Eksperimentalno istraživanje sušenja zrnatih materijala u fluidiziranom sloju

Mudrinić, Saša

Doctoral thesis / Disertacija

2012

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:045471

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Mr.sc. Saša Mudrinić, dipl.ing.

EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE SUŠENJA ZRNATIH MATERIJALA U FLUIDIZIRANOM SLOJU

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2012.

University of Zagreb
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL ARCHITECTURE

Saša Mudrinić, MSc, BSc

AN EXPERIMENTAL STUDY OF FLUIDIZED BED DRYING OF GRANULAR MATERIALS

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2012.

Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Mr.sc. Saša Mudrinić, dipl.ing.

EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE SUŠENJA ZRNATIH MATERIJALA U FLUIDIZIRANOM SLOJU

DOKTORSKI RAD

Mentor: Dr.sc. Boris Halasz, redoviti profesor

Zagreb, 2012.

University of Zagreb
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL ARCHITECTURE

Saša Mudrinić, MSc, BSc

AN EXPERIMENTAL STUDY OF FLUIDIZED BED DRYING OF GRANULAR MATERIALS

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Boris Halasz, PhD, Full professor

Zagreb, 2012.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK: 536.2:66.04

Ključne riječi: Sušenje u fluidiziranom sloju, zrnati materijali, žitarice, bezdimenzijska korelacijska funkcija

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: Strojarstvo

Institucija u kojoj je rad izrađen: Fakultet strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: Dr.sc. Boris Halasz, red. prof.

Broj stranica: 216

Broj slika: 104

Broj tablica: 57

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 97

Datum obrane: 03. srpanj 2012.

Povjerenstvo: Dr.sc. Antun Galović, red. prof. – predsjednik
Dr.sc. Boris Halasz, red. prof. – mentor
Dr.sc. Davor Zvizdić, red. prof. – član
Dr.sc. Mladen Andrassy, red. prof. – član
Dr.sc. Bernard Franković, red. prof. – član

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Fakultet strojarstva i brodogradnje
Nacionalna i sveučilišna knjižnica

PODACI O MENTORU:

Dr. sc. Boris Halasz, dipl. ing. strojarstva, rođen je 1. rujna 1950. godine u Zagrebu.

Osnovnu školu i Klasičnu gimnaziju završio je u Zagrebu. Maturirao je 1969. godine.

Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu diplomirao je 1974. godine konstruktorski smjer, usmjerenje Termotehnika.

Na Katedri za toplinu i toplinske uređaje, danas Katedri za tehničku termodinamiku Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, u stalnom je radnom odnosu od 1975. do danas.

Magistarski rad pod naslovom „Izmjena topline u regeneratorima topline i metode njihovog proračuna“ obranio je 1984. Doktorirao je 3. siječnja 1992. godine na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, disertacijom pod naslovom „Indirektno hlađenje ishlapljivanjem u izmjenjivaču topline s jednostrano ovlaženom stijenkom“.

U zvanje znanstveni suradnik i zvanje docenta izabran je 1992. godine, a u zvanje izvanrednog profesora 2004. godine. U zvanje znanstvenog savjetnika i redovitog profesora izabran je 2009. godine.

Na FSB u Zagrebu, a do 1995. i na Strojarskom Fakultetu u Slavonskom brodu, održava nastavu (vježbe, kasnije predavanja) iz više studija dodiplomskog studija vezanih uz tehničku termodinamiku, kao što su Nauka o toplini I i II, kasnije Termodinamika I i II, Termodinamika smjesa i Evaporativni procesi i uređaji.

Do akademske godine 1997/98. održavao je nastavu iz kolegija termodinamika na stručnom studiju, a nakon toga iz kolegija Termodinamika B na dodiplomskom studiju brodogradnje.

Nakon izbora u izvanrednog profesora u okviru bolonjskog procesa od šk. god. 2003/04. osniva kolegij Uvod u termodinamiku kojji slušaju studenti brodogradnje i neki smjerovi studija strojarstva.

Aktivno je sudjelovao u svim znanstvenoistraživačkim projektima u okviru Katedre.

Predstojnik je Zavoda za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku.

Godine 1988. nagrađen je medaljom Fakulteta.

Zahvala

Ovim putem bih se prije svega zahvalio laborantima Katedre za turbostrojeve i Katedre za energetska postrojenja i energetiku FSB Radoslavu Babiću i Milanu Šulentiću na njihovoj svesrdnoj pomoći i stručnim savjetima prilikom sastavljanja mjerne linije, te na velikoj podršci koju su mi pružali za sve vrijeme izrade ovog rada.

Veliku pomoć pružili su mi i djelatnici Laboratorija za procesna mjerenja FSB: voditelj laboratorija prof. dr. sc. Davor Zvizdić, zatim dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec, Danijel Šestan, dipl. ing., te laboranti Alen Jurišinac i Jože Zelko, koji su, unatoč svojim brojnim obvezama, uvijek našli vremena da mi pomognu oko mjernih instrumenata.

Zahvaljujem se i mentoru prof. dr. sc. Borisu Halaszu koji mi je puno pomogao svojim savjetima, kao i na pomoći koju mi je pružio oko opremanja mjerne linije.

No, posebno se moram zahvaliti prof. dr. sc. Antunu Galoviću, koji mi je kao voditelj Katedre za tehničku termodinamiku FSB, ali i kao dugogodišnji mentor, i ovaj put pružio svu moguću potporu.

SADRŽAJ

1 UVOD 1

1.1 CILJEVI I SVRHA RADA 1

1.2 DOSADAŠNJE SPOZNAJE I RADOVI DRUGIH AUTORA 2

1.3 POSTAVLJANJE PROBLEMA 6

1.4 HIPOTEZA RADA 7

2 OSNOVE FLUIDIZACIJE 8

2.1 PRIMJENA FLUIDIZACIJE 8
2.1.1 Općenito 8
2.1.2 Primjena fluidizacije kod fizikalnih operacija 10
2.1.2.1 Primjena fluidizacije kod kemijskih reakcija 11

2.2 OPIS PROCESA FLUIDIZACIJE 12
2.2.1 Nastajanje fluidiziranog sloja 12
2.2.2 Karakteristike fluidiziranog sloja u ovisnosti o fluidizatoru 14
2.2.3 Mjehuri u fluidiziranom sloju 15
2.2.3.1 Nastajanje mjehura na distributivnoj ploči 15
2.2.3.2 Oblik i rast mjehura u fluidiziranom sloju 16
2.2.3.3 Minimalna brzina nastajanja mjehura 17
2.2.3.4 Brzina dizanja mjehura u fluidiziranom sloju 18
2.2.4 Pad tlaka u fluidiziranom sloju 18
2.2.5 Poroznost fluidiziranog sloja 20
2.2.6 Klasifikacija čestica prema fluidizacijskim svojstvima kod plinske fluidizacije 23
2.2.6.1 *Geldartove* grupe čestica 23
2.2.6.1.1 Grupa A 24
2.2.6.1.2 Grupa B 25
2.2.6.1.3 Grupa C 25
2.2.6.1.4 Grupa D 25
2.2.7 Minimalna brzina fluidizacije 26
2.2.8 Brzina odnošenja čestica 29
2.2.9 Režimi plinske fluidizacije 32
2.2.10 Distributivne ploče 34
2.2.11 Ostali oblici fluidizacije 36
2.2.11.1 Fontanski sloj 36
2.2.11.2 Centrifugalna fluidizacija 37

2.3 PRIJENOS TOPLINE U FLUIDIZIRANOM SLOJU PLIN-ČESTICE 38
2.3.1 Prijenos topline između plina i čestica u fluidiziranom sloju 39
2.3.2 Prijenos topline između fluidiziranog sloja i uronjene krute stijenke 41
2.3.2.1 Konvekcija čestica 43
2.3.2.2 Plinska konvekcija 45
2.3.2.3 Zračenje 46

2.4 PRIJENOS TVARI U FLUIDIZIRANOM SLOJU PLIN-ČESTICE 46
2.4.1 Prijenos tvari između plina i čestica 48

2.5 MATEMATIČKI MODELI FLUIDIZIRANOG SLOJA 49
2.5.1.1 *Davidsonov* i *Harrisonov* model 49
2.5.1.2 *Partridgeov* i *Roweov* model 51
2.5.1.3 *Kuniijev* i *Levenspielov* model 51
2.5.1.4 *Katoov* i *Wenov* model 52
2.5.1.5 Ocjena prikazanih modela 54

3 SUŠENJE ZRNATIH MATERIJALA U FLUIDIZIRANOM SLOJU 56

3.1 OSNOVNE DEFINICIJE 57

3.1.1 Sadržaj vlage i vlažnost tvari 57
3.1.2 Veza vode i zrna 57
3.1.3 Ravnotežna vlažnost 59
3.1.4 Faze sušenja zrnatog materijala 60
3.1.5 Difuzivnost vlage 64
3.1.6 Sušionici s fluidiziranim slojem 65

3.2 MASENA I ENERGIJSKA BILANCA SUŠIONICE 65

3.3 METODE ODREĐIVANJA VLAŽNOSTI TVARI 70

3.4 PRIKAZ REZULTATA MJERENJA SADRŽAJA VLAGE TVARI POMOĆU EMPIRIJSKIH MODELA 71

4 OPIS MJERNE LINIJE 73

4.1 OPIS POJEDINIH ELEMENATA MJERNE LINIJE 75

4.1.1 Kolona za fluidizaciju 75
4.1.2 Mjerna prigušnica 77
4.1.2.1 Pregled jednadžbi prema ISO 5167-1:1991(E) 77
4.1.3 Fini regulacijski ventil 80
4.1.4 Instrumenti za mjerenje temperature 80
4.1.5 Instrumenti za mjerenje tlaka 80
4.1.5.1 Pretvornik apsolutnog tlaka GS4102 81
4.1.5.2 Pretvornik razlike tlaka PR3202 81
4.1.5.3 Pretvornik razlike tlaka 3A20-1H5 81
4.1.6 Pretvornik temperature i relativne vlažnosti HMP50 82
4.1.7 Digitalna vaga PB303-S Delta-Range 82
4.1.8 Pomično mjerilo s digitalnim pokazivačem mjere 82
4.1.9 Multimetar *Fluke* 189 83
4.1.10 Multimetar Iskra MI 7030 83
4.1.11 Mjerni sustav *National Instruments* 84
4.1.11.1 SCXI komponenta 84
4.1.11.1.1 SCXI-1102B modul 85
4.1.11.1.2 SCXI-1300 priključna kutija 86
4.1.11.1.3 SCXI-1122 modul 87
4.1.11.1.4 SCXI-1322 priključna kutija 87
4.1.11.1.5 SCXI-1308 priključna kutija 87
4.1.11.1.6 SCXI-1000 kućište 88
4.1.11.2 DAQ kartica 88
4.1.11.2.1 PCI-MIO-16XE-50 DAQ kartica 88
4.1.11.3 LabVIEW programski paket 89
4.1.12 Osobno računalo 91

5 FIZIKALNA SVOJSTVA MATERIJALA 92

5.1 OLJUŠTENI JEČAM 92

5.2 PŠENICA 95

5.3 TERMODINAMIČKA SVOJSTVA VLAŽNOG ZRAKA 97

6 UMJERAVANJE INSTRUMENATA I ANALIZA MJERNE NESIGURNOSTI 99

6.1 ODREĐIVANJE NETOČNOSTI MJERENJA 99

6.1.1 Klasifikacija mjernih pogrešaka 99
6.1.1.1 Sustavne mjerne pogreške 99
6.1.1.2 Slučajne mjerne pogreške 99
6.1.2 Mjerna nesigurnost 100
6.1.2.1 Procjena mjerne nesigurnosti tipa A 101
6.1.2.2 Mjerna nesigurnost tipa B 102

6.1.3 Nesigurnost posrednih mjerenja 103
6.1.4 Proširena mjerna nesigurnost 104

6.2 UMJERAVANJE INSTRUMENATA i PROCJENA NJIHOVE MJERNE NESIGURNOSTI 105
6.2.1 Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti pretvornika apsolutnog tlaka GS4102 105
6.2.2 Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti pretvornika razlike tlaka 3A20-1H5 105
6.2.3 Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti *Fluke* štapnih termoparova 107
6.2.4 Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti pretvornika temperature i relativne vlažnosti HMP50 109
6.2.5 Procjena mjerne nesigurnosti digitalne vage PB303-S DeltaRange 111
6.2.5.1 Očitanje vage 111
6.2.5.2 Ponovljivost pokazivanja 111
6.2.5.3 Greška linearnosti 112
6.2.5.4 Temperaturni koeficijent 112
6.2.5.5 Ukupna standardna nesigurnost vaganja 113
6.2.6 Procjena mjerne nesigurnosti pomičnog mjerila s digitalnim pokazivačem mjere 113
6.2.7 Procjena nesigurnosti mjerenja masenog protoka zraka 114
6.2.8 Procjena nesigurnosti mjerenja sadržaja vlage zrna 118

7 REZULTATI MJERENJA I NJIHOVA INTERPRETACIJA 120

7.1 OPIS MJERNOG POSTUPKA 120

7.2 REZULTATI MJERENJA MINIMALNE BRZINE FLUIDIZACIJE 121

7.3 REZULTATI MJERENJA SADRŽAJA VLAGE 124
7.3.1 Oljušteni ječam 124
7.3.2 Pšenica 154

7.4 FLUIDIZACIJSKA SVOJSTVA ŽITARICA 178

7.5 APROKSIMACIJA REZULTATA MJERENJA BEZDIMENZIJSKIM FUNKCIJSKIM OBLIKOM 179

7.6 USPOREDBA S REZULTATIMA ISTRAŽIVANJA DRUGIH AUTORA 189

7.7 USPOREDBA REZULTATA S KONVENCIONALNIM NAČINOM SUŠENJA ŽITARICA 190

8 ZAKLJUČAK 194

8.1 ZNANSTVENI DOPRINOS 198

8.2 SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA 199

9 LITERATURA 201

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Neka svojstva fluidiziranog sloja u usporedbi s mirujućim slojem čestica 9
Slika 2-2. Posuda za hlađenje čestica u fluidiziranom sloju 10
Slika 2-3. Posuda za šaržno sušenje čestica u fluidiziranom sloju 11
Slika 2-4. Nastajanje fluidiziranog sloja 12
Slika 2-5. Pad tlaka fluidizatora u ovisnosti o brzini fluidizatora za mirujući i fluidizirani sloj 13
Slika 2-6. Kapljeviti i plinski fluidizirani sloj pri različitim brzinama 14
Slika 2-7. Nastajanje mjehura na distributivnoj ploči [18] 16
Slika 2-8. Karakteristični oblik mjehura u sloju 17
Slika 2-9. Poroznost kao funkcija sfericiteta i zbijenosti sloja 21
Slika 2-10. Jednostavni model raspodjele poroznosti u homogenom fluidiziranom sloju 22
Slika 2-11. Geldartova klasifikacija čestica 24
Slika 2-13. Poroznost sloja u stanju minimalne fluidizacije [33] 28
Slika 2-14. Eksperimentalno određivanje minimalne brzine fluidizacije 29
Slika 2-15. Dijagramski prikaz ovisnosti faktora otpora trenja C_D o Reynoldsovoj značajci za pojedinačno nastrujanu kuglu 30
Slika 2-16. Režimi plinske fludizacije 34
Slika 2-17. Različiti tipovi distributivnih ploča 35
Slika 2-18. Fontanski sloj 37
Slika 2-19. Centrifugalna fluidizacija 38
Slika 2-20. Nusseltovi brojevi kod prijelaza topline plin-čestice u heterogenom fluidiziranom sloju za Pr = 0,7 [20] 40
Slika 2-21. Kvalitativne vrijednosti sveukupnog koeficijenta prijelaza topline između fluidiziranog sloja i uronjene krute stijenke [29] 42
Slika 2-22. Prijenos topline između kapljevine i fluidiziranog sloja plin-čestice 44
Slika 2-23. Utjecaj brzine plina na sveukupni koeficijent prijelaza topline 44
Slika 2-24. Eksperimentalne vrijednosti koeficijenta prijenosa tvari plin-čestice [20] 48
Slika 2-25. Strujanje plina prema Davidsonovom i Harrisonovom modelu 51
Slika 3-1. Krivulja higroskopne ravnoteže (sorpcijska izoterma) 59
Slika 3-2. Različiti oblici vlage u materijalu 60
Slika 3-3. Različite faze sušenja 61
Slika 3-4. Shematski prikaz sušionice 66
Slika 3-5. Sušenje u h_{1+x}, x-dijagramu 68
Slika 3-6. Shematski prikaz sušionice s predgrijavanjem zraka 69
Slika 3-7. Sušenje s predgrijavanjem zraka u h_{1+x}, x-dijagramu 69
Slika 3-8. Metode određivanja vlažnosti tvari 70
Slika 4-1. Mjerna linija za sušenje u fluidiziranom sloju 73
Slika 4-2. Mjerni sustav National Instruments i pretvornici tlaka 74
Slika 4-3. Shematski prikaz korištene mjerne linije 74
Slika 4-4. Montažni crtež kolone za fluidizaciju 76
Slika 4-5. Distributivna ploča 77
Slika 4-6. Izvedba prigušnice s ugradbenim prstenima 77
Slika 4-7. Crtež ventila za finu regulaciju protoka 80
Slika 4-12. Shematski prikaz mjernog sustava National Instruments 84
Slika 4-13. Shematski prikaz upotrijebljenih SCXI komponenti 85
Slika 4-14. SCXI-1102B modul 86
Slika 4-15. SCXI-1300 priključna kutija 86
Slika 4-16. Unutrašnjost priključne kutije SCXI-1300 87
Slika 4-17. SCXI kućište s modulima i različitim osjetnicima 88
Slika 4-18. Korisničko sučelje LabVIEW-a s virtualnim instrumentima 89
Slika 4-19. Blok dijagram jednog LabVIEW programa s funkcijama i alatima 90
Slika 5-2. Ravnotežna vlažnost ječma 95

Slika 5-4. Ravnotežna vlažnost meke pšenice 97
Slika 6-1. Ukupna nesigurnost kao geometrijski zbroj pojedinih komponenti 100
Slika 6-2. Normalna razdioba 101
Slika 6-3. Pravokutna razdioba 103
Slika 6-4. Ovisnost mjerne nesigurnosti U pretvornika tlaka 3A20-1H5 o tlaku etalona 106
Slika 6-5. Mjerna nesigurnost pretvornika temperature i relativne vlažnosti HMP50 110
Slika 6-6. Relativna proširena mjerna nesigurnost mjerenja masenog protoka mjernom prigušnicom 118
Slika 7-1. Određivanje minimalne brzine fluidizacije za ječam 123
Slika 7-2. Određivanje minimalne brzine fluidizacije za pšenicu 123
Slika 7-3. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,0 m/s i za različite ulazne tenperature zraka 129
Slika 7-4. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,07 m/s i za različite ulazne temperature zraka 129
Slika 7-5. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,15 m/s i za različite ulazne temperature zraka 130
Slika 7-6. Vremena sušenja ječma do potrebne vlažnosti, X_w = 14%, za sve temperature i brzine zraka 132
Slika 7-7. Utjecaj vremena i ulazne temperature zraka na sušenje ječma za w_f = 1,0 m/s 133
Slika 7-8. Utjecaj vremena i ulazne temperature zraka na sušenje ječma za w_f = 1,07 m/s 134
Slika 7-9. Utjecaj vremena i ulazne temperature zraka na sušenje ječma za w_f = 1,15 m/s 134
Slika 7-10. Utjecaj vremena i brzine zraka na sušenje ječma za ϑ_f = 35 °C 135
Slika 7-11. Utjecaj vremena i brzine zraka na sušenje ječma za ϑ_f = 42 °C 135
Slika 7-12. Utjecaj vremena i brzine zraka na sušenje ječma za ϑ_f = 50 °C 136
Slika 7-13. Vrijednosti bezdimenzijskog sadržaja vlage ječma $X^*_{120\,\min}$ za sve ulazne temperature i brzine zraka 137
Slika 7-14. Temperature u sloju ječma za w_f = 1,0 m/s i različite ulazne temperature zraka 139
Slika 7-15. Temperature u sloju ječma za w_f = 1,07 m/s i različite ulazne temperature zraka 140
Slika 7-16. Temperature u sloju ječma za w_f = 1,15 m/s i različite ulazne temperature zraka 142
Slika 7-17. Promjena brzine zraka w_f u vremenu 144
Slika 7-18. Promjena relativne vlažnosti zraka φ na ulazu i izlazu iz kolone 145
Slika 7-19. Krivulje pravih brzina sušenja ječma za w_f = 1,0 m/s 146
Slika 7-20. Aproksimativne brzine sušenja ječma u ovisnosti o vremenu za sve brzine zraka 148
Slika 7-21. Aproksimativne brzine sušenja ječma u ovisnosti o vremenu za sve temperature zraka 150
Slika 7-22. Aproksimativne brzine sušenja ječma u ovisnosti o bezdimenzijskom sadržaju vlage X za sve brzine zraka* 152
Slika 7-23. Aproksimativne brzine sušenja ječma u ovisnosti o bezimenzijskom sadržaju vlage X za sve temperature zraka* 154
Slika 7-24. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,0 m/s i za različite ulazne temperature zraka 159
Slika 7-25. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,07 m/s i za različite ulazne temperature zraka 160
Slika 7-26. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,15 m/s i za različite ulazne temperature zraka 160
Slika 7-27. Vremena sušenja pšenice do potrebne vlažnosti, X_w = 14%, za sve temperature i brzine zraka 161
Slika 7-28. Utjecaj ulazne temperature zraka na sušenje pšenice za w_f = 1,0 m/s 162
Slika 7-29. Utjecaj ulazne temperature zraka na sušenje pšenice za w_f = 1,07 m/s 162
Slika 7-30. Utjecaj ulazne temperature zraka na sušenje pšenice za w_f = 1,15 m/s 163
Slika 7-31. Utjecaj brzine zraka na sušenje pšenice za ϑ_f = 35 °C 163
Slika 7-32. Utjecaj brzine zraka na sušenje pšenice za ϑ_f = 42 °C 164
Slika 7-33. Utjecaj brzine zraka na sušenje pšenice za ϑ_f = 50 °C 164
Slika 7-34. Vrijednosti bezdimenzijskog sadržaja vlage pšenice $X^*_{120\,\min}$ za sve ulazne temperature i brzine zraka 165
Slika 7-35. Temperature u sloju pšenice za w_f = 1,0 m/s i različite ulazne temperature zraka 167
Slika 7-36. Temperature u sloju pšenice za w_f = 1,07 m/s i različite ulazne temperature zraka 169
Slika 7-37. Temperature u sloju pšenice za w_f = 1,15 m/s i različite ulazne temperature zraka 170
Slika 7-38. Aproksimativne brzine sušenja pšenice za sve brzine zraka 173
Slika 7-39. Aproksimativne brzine sušenja pšenice za sve temperature zraka 174
Slika 7-40. Aproksimativne brzine sušenja pšenice u ovisnosti o bezdimenzijskom sadržaju vlage X za sve brzine zraka* 176
Slika 7-41. Aproksimativne brzine sušenja pšenice u ovisnosti o bezdimenzijskom sadržaju vlage X za sve temperature zraka* 178
Slika 7-42. Fluidizirani sloj s pšenicom 179
Slika 7-43. Prikaz izmjerenih i izračunatih bezdimenzijskih rezultata za ječam i w_f = 1,0 m/s 182
Slika 7-44. Prikaz izmjerenih i izračunatih bezdimenzijskih rezultata za ječam i w_f = 1,07 m/s 182
Slika 7-45. Prikaz izmjerenih i izračunatih bezdimenzijskih veličina za ječam i w_f = 1,15 m/s 183
Slika 7-46. Prikaz izmjerenih i izračunatih bezdimenzijskih veličina za pšenicu i w_f = 1,0 m/s 183

Slika 7-47. Prikaz izmjerenih i izračunatih bezdimenzijskih veličina za pšenicu i w_f = 1,07 m/s _____ *184*
Slika 7-48. Prikaz izmjerenih i izračunatih bezdimenzijskih veličina za pšenicu i w_f = 1,15 m/s _____ *184*
Slika 7-49. Sušenje u konvencionalnoj šaržnoj sušari _____ *191*

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Wadellov faktor sfericiteta Ψ_s za čestice pravilnih oblika 20
Tablica 2-2. Wadellov faktor sfericiteta Ψ_s za čestice nepravilnih oblika (orijentacijske vrijednosti) 20
Tablica 2-3. Korekcijski faktor ξ_p za područje $10^3 < Re < 10^5$ 32
Tablica 3-1. Raspon aproksimativnih vrijednosti efektivne difuzivnosti D_{ef} za neke prehrambene proizvode [68] 65
Tablica 3-2. Temperature i vremena sušenja kod određivanja vlažnosti za cijela zrna prema ASAE S352.2 DEC97 71
Tablica 4-1. Gornje vrijednosti relativne hrapavosti uzvodnog cjevovoda za mjerne prigušnice 79
Tablica 4-2. Približne vrijednosti apsolutne hrapavosti k za cijevi 79
Tablica 5-1. Prosječne veličine zrna ječma [80] 92
Tablica 5-2. Dimenzije slučajno izabranih 100 zrna ječma upotrijebljenih u mjerenjima 92
Tablica 5-3. Prosječne veličine zrna pšenice [80] 95
Tablica 5-4. Dimenzije slučajno izabranih 100 zrna pšenice upotrijebljenih u mjerenjima 95
Tablica 6-1. Ovisnost faktora proširenja k o statističkoj sigurnosti P 104
Tablica 6-2. Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti pretvornika apsolutnog tlaka GS4102 105
Tablica 6-3. Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti pretvornika tlaka 3A20-1H5 106
Tablica 6-4. Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti Fluke štapnih termoparova 107
Tablica 6-5. Procjena mjerne nesigurnosti Fluke štapnih termoparova za točku 1 107
Tablica 6-6. Procjena mjerne nesigurnosti Fluke štapnih termoparova za točku 2 108
Tablica 6-7. Procjena mjerne nesigurnosti Fluke štapnih termoparova za točku 3 108
Tablica 6-8. Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti pretvornika temperature i relativne vlažnosti HMP50 109
Tablica 6-9. Sastavnice standardne nesigurnosti u postupcima umjeravanja digitalnog i konvencionalnog pomičnog mjerila rezolucije 0,01 mm 114
Tablica 6-10. Proračun nesigurnosti mjerenja masenog protoka zraka za točku 1 (w_f = 1,0 m/s i ϑ_f = 35 °C) 115
Tablica 6-11. Proračun nesigurnosti mjerenja masenog protoka zraka za točku 2 (w_f = 1,07 m/s i ϑ_f = 35 °C) 116
Tablica 6-12. Proračun nesigurnosti mjerenja masenog protoka zraka za točku 3 (w_f = 1,15 m/s i ϑ_f = 35 °C) 117
Tablica 6-13. Primjer proračuna nesigurnosti mjerenja sadržaja vlage zrna za jedno mjerenje X 119
Tablica 7-1. Dozvoljene temperature zagrijavanja zrna pivarskog ječma [80] 120
Tablica 7-2. Ulazni uvjeti sušenja ječma iz svih eksperimenata 121
Tablica 7-3. Ulazni uvjeti sušenja pšenice iz svih eksperimenata 121
Tablica 7-4. Rezultati mjerenja sveukupnog pada tlaka u fluidiziranom sloju i distributivnoj ploči za ječam 122
Tablica 7-5. Rezultati mjerenja sveukupnog pada tlaka u fluidiziranom sloju i distributivnoj ploči za pšenicu 122
Tablica 7-6. Rezultati mjerenja pada tlaka na distributivnoj ploči 122
Tablica 7-7. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,0 m/s i ϑ_f = 35 °C 124
Tablica 7-8. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,0 m/s i ϑ_f = 42 °C 125
Tablica 7-9. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,0 m/s i ϑ_f = 50 °C 125
Tablica 7-10. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,07 m/s i ϑ_f = 35 °C 126
Tablica 7-11. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,07 m/s i ϑ_f = 42 °C 126
Tablica 7-12. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,07 m/s i ϑ_f = 50 °C 127
Tablica 7-13. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,15 m/s i ϑ_f = 35 °C 127
Tablica 7-14. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,15 m/s i ϑ_f = 42 °C 128
Tablica 7-15. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,15 m/s i ϑ_f = 50 °C 128
Tablica 7-16. Vrijednosti konačnog sadržaja vlage ječma 131
Tablica 7-17. Bezdimenzijski sadržaj vlage ječma $X^*_{120\,\min}$ 136
Tablica 7-18. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,0 m/s i ϑ_f = 35 °C 155
Tablica 7-19. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,0 m/s i ϑ_f = 42 °C 155
Tablica 7-20. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,0 m/s i ϑ_f = 50 °C 156
Tablica 7-21. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,07 m/s i ϑ_f = 35 °C 156
Tablica 7-22. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,07 m/s i ϑ_f = 42 °C 157

Tablica 7-23. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,07 m/s i ϑ_f = 50 °C 157
Tablica 7-24. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,15 m/s i ϑ_f = 35 °C 158
Tablica 7-25. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,15 m/s i ϑ_f = 42 °C 158
Tablica 7-26. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,15 m/s i ϑ_f = 50 °C 159
Tablica 7-27. Vrijednosti konačnog sadržaja vlage pšenice 161
Tablica 7-28. Bezdimenzijski sadržaj vlage pšenice $X^*_{120\,\mathrm{min}}$ 165
Tablica 7-29. Usporedba mjerenih i proračunskih vrijednosti X prema korelacijskoj jednadžbi (7-15) za ječam* 185
Tablica 7-30. Usporedba mjerenih i proračunskih vrijednosti X prema korelacijskoj jednadžbi (7-16) za pšenicu* 187
Tablica 7-31. Toplinska efikasnost konvencionalne sušare [94] 192
Tablica 7-32. Toplinska efikasnost procesa sušenja ječma u koloni za fluidizaciju 193
Tablica 7-33. Toplinska efikasnost procesa sušenja pšenice u koloni za fluidizaciju 193

POPIS OZNAKA

Latinične oznake

A - površina, m^2

A_0 - ukupna površina izmjene topline uronjene krute stijenke, m^2

a - temperaturna provodnost, m^2/s

a - poluinterval nesigurnosti

C - faktor protjecanja, -

C_D - faktor otpora trenja čestica, -

c - molna koncentracija tvari, mol/m^3

c_m - specifični toplinski kapacitet vlažne tvari, J/(kg K)

c_p - specifični toplinski kapacitet pri stalnom tlaku, J/(kg K)

$c_{p,d}$ - specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku pregrijane vodene pare, J/(kg K)

$c_{p,z}$ - specifični toplinski kapacitet suhog zraka pri konstantnom tlaku, J/(kg K)

c_v - specifični toplinski kapacitet kapljevite vode, J/(kg K)

D - promjer, m

D - difuzivnost, m^2/s

D_{ef} - efektivna difuzivnost vlage, m^2/s

D_g - srednji geometrijski promjer, m

D_0 - efektivna difuzivnost vlage na referentnoj temperaturi, m^2/s

d - promjer, m

$d_{b,a}$ - prosječni promjer mjehura u sloju, m

$d_{b,t}$ - maksimalni stabilni promjer mjehura, m

d_{ek} - ekvivalentni promjer, m

d_{kol} - promjer kolone, m

d_0 - početni promjer mjehura na distributivnoj ploči, m

E_a - energija aktivacije, J

E_f - toplinska efikasnost procesa sušenja, - (J/J)

e - faktor ekspanzije

e_∞ - emisijski faktor fluidiziranog sloja, -

$e_{\infty s}$ - efektivni emisijski faktor sustava uronjena površina-fluidizirani sloj, -

e_p - emisijski faktor pojedinih čestica, -

e_s - emisijski faktor površine stijenke, -

F - sila, N

F_0 - koeficijent prijenosa tvari izražen po jedinici volumena mjehura u fluidiziranom sloju, l/s

F_d - ukupni koeficijent prijenosa tvari izražen po jedinici volumena mjehura u fluidiziranom sloju, l/s

F_f - sila zbog pada tlaka fluidizatora, N

F_o - sila otpora, N

F_p - masena sila čestica, N

F_u - sila uzgona, N

G - gustoća toka vlage, kg/(m^2 s)

g - ubrzanje gravitacije, m/s^2

h - visina iznad distributivne ploče, m

h - specifična entalpija, J/kg

h_{1+x} - specifična entalpija vlažnog zraka, svedena na jedan kilogram suhog zraka, J/kg

$(h_{1+x})_{sH}$ - specifična entalpija vlažnog zraka na granici hlađenja, J/kg

K' - ravnotežna konstanta adsorpcije, -

k - apsolutna hrapavost cijevi, mm

k_g - koeficijent prijenosa tvari, m/s

L - duljina, m

L_1 - odnos udaljenosti uzvodnog priključka za mjerenje tlaka od uzvodne plohe prigušnice i svijetlog otvora cjevovoda, - (m/m)

L_2' - odnos udaljenosti nizvodnog priključka za mjerenje tlaka od nizvodne plohe prigušnice i svijetlog otvora cjevovoda, - (m/m)

l_{sr} - srednja dužina, m

M - koeficijent prijenosa čestica između mjehura i guste faze fluidiziranog sloja izražen po jedinici volumena mjehura, l/s

m - masa, kg

m_b - masa vlažne tvari u sloju, kg

m_{st} - masa suhe tvari, kg

m_{vt} - masa vlažne tvari, kg

m_w - masa vlage, kg

N - gustoća toka tvari (fluks tvari), mol/(m^2 s)

n_0 - broj otvora distributivne ploče, -

P - statistička sigurnost, -

p_d - parcijalni tlak vodene pare u vlažnom zraku, Pa

p_s - parcijalni tlak vodene pare zasićenog vlažnog zraka, Pa

Q_z - toplina predana zraku za sušenje, J

q_m - maseni protok, kg/s

q_m - maseni protok suhog zraka, kg/s

$q_{m,\,mf}$ - maseni protok plina u stanju minimalne fluidizacije, kg/s

$q_{m,b}$ - maseni protok plina u obliku mjehura, kg/s

$q_{m,st}$ - maseni protok suhe tvari, kg/s

$q_{m,vt}$ - maseni protok vlažne tvari, kg/s

$q_{m,vz}$ - maseni protok vlažnog zraka, kg/s

$q_{m,w}$ - maseni protok vlage, kg/s

q_r - gustoća toplinskog toka zračenjem, W/m^2

R_m - molarna (opća, univerzalna) plinska konstanta, R_m = 8314 J/(kmol K)

r - polumjer, m

$r(\vartheta)$ - specifična toplina isparivanja vode pri temperaturi ϑ

r^* - specifična toplina isparivanja vode iz zrnja, J/kg

T - termodinamička temperatura, K

T_s - termodinamička temperatura površine stijenke, K

T_∞ - prosječna termodinamička temperatura fluidiziranog sloja, K

t - vrijeme, s

U - proširena mjerna nesigurnost

u - ukupna nesigurnost

u_A - nesigurnost tipa A

u_B - nesigurnost tipa B

u_c - složena standardna mjerna nesigurnost rezultata mjerenja

V - volumen, m^3

V_ε - volumen prostora između čestica u sloju, m^3

v_m - molarni volumen, m^3/kmol

w - brzina, m/s

w_b - brzina dizanja mjehura u fluidiziranom sloju, m/s

w_c - brzina kod koje nastaje turbulentna fluidizacija, m/s

w_e - relativna brzina između plina i čestica u fluidiziranom sloju, m/s

w_f - brzina fluidizatora na slobodnom presjeku kolone, m

$w_{f,e}$ - brzina plina u gustoj fazi, m/s

w_{fp} - brzina lebdenja čestica, m/s

w_{kf} - brzina odnošenja čestica, m/s

w_{mb} - brzina kod koje dolazi do stvaranja mjehura u fluidiziranom sloju, m/s

w_{mf} - brzina minimalne fluidizacije, m/s

w_{msl} - brzina kod koje nastaje stapna fluidizacija, m/s

w_{ms} - brzina formiranja fontanskog sloja, m/s

w_s - prostrujna brzina kroz mirujući sloj, m/s

w_{sb} - brzina dizanja pojedinačnog mjehura u fluidiziranom sloju, m/s

w_{tr} - transportna brzina, m/s

X - sadržaj vlage vlažne tvari (vlaga), kg/kg

X_r - ravnotežni sadržaj vlage, kg/kg

X_w - sadržaj vlage sveden na kilogram vlažne tvari (vlažnost), kg/kg

$X_{w,r}$ - higroskopna ravnotežna vlažnost zrna, kg/kg

X_0 - početni sadržaj vlage, kg/kg

x - sadržaj vlage u vlažnom zraku, kg/kg

x - koordinata *Kartezijevog* koordinatnog sustava, m

x_A - ekvivalentni promjer izražen površinom čestice nepravilnog oblika, m

x_V - ekvivalentni promjer izražen volumenom čestice nepravilnog oblika, m

Z - visina fluidiziranog sloja, m

Z_{mf} - visina sloja u stanju minimalne fluidizacije, m

Z_0 - visina mirujućeg sloja čestica, m

Grčke oznake

α - koeficijent prijelaza topline, W/(m^2 K)

α_{gc} - koeficijent prijelaza topline plinskom konvekcijom, W/(m^2 K)

α_{pc} - koeficijent prijelaza topline konvekcijom čestica, W/(m^2 K)

α_r - koeficijent prijelaza topline zračenjem, W/(m^2 K)

β - omjer svijetlih otvora mjerne prigušnice i cjevovoda u koji je prigušnica ugrađena, - (m/m)

γ - površinska napetost, N m

Δc - razlika molne koncentracije tvari, mol/m^3

Δp - pad tlaka, Pa

Δp_D - pad tlaka u distributivnoj ploči, Pa

ε - stupanj poroznosti fluidiziranog sloja, -

ε_{rs} - poroznost rahlog sloja, -

η - dinamička viskoznost, N s/m^2

ϑ - (*Celzijeva*) temperatura, °C

ϑ_s - (*Celzijeva*) temperatura površine stijenke, °C

ϑ_{sH} - (*Celzijeva*) temperatura na granici hlađenja, °C

ϑ_∞ - prosječna temperatura fluidiziranog sloja, °C

κ - izentropski eksponent, -

λ - parametar zbijenosti sloja čestica, -

λ - toplinska provodnost, W/(m K)

ν - kinematička viskoznost, m^2/s

ξ_p - korekcijski faktor otpora oblika čestica, -

ρ - gustoća, kg/m^3

σ - *Stefan – Boltzmannova konstanta*, $\sigma = 5{,}6703 \cdot 10^{-8}$ W/(m^2 K^4)

φ - relativna vlažnost vlažnog zraka, - (Pa/Pa)

Φ - toplinski tok, W

Ψ_s - *Wadellov* faktor sfericiteta, -

ω - maseni udio

BEZDIMENZIJSKE (KRITERIJSKE) ZNAČAJKE

$Ar = \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \frac{g d_p^3}{\nu^2}$ - *Archimedova* značajka

$Fo = \frac{a_p t}{D_g^2}$ - *Fourierova* značajka

$Fr = \frac{w_{mf}^2}{d_p g}$ - *Froudeova* značajka

$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ - *Nusseltova* značajka

$Pr = \frac{\eta c}{\lambda}$ - *Prandtlova* značajka

$Re = \frac{w d}{\nu}$ - *Reynoldsova* značajka

$Sc = \frac{\eta}{\rho D}$ - *Schmidtova* značajka

$Sh = \frac{k_g L}{D}$ - *Sherwoodova* značajka

$T^* = \frac{T_{f,u} - T_{sH}}{T_{p,0} - T_{sH}}$ - bezdimenzijska temperatura

$X^* = \frac{X - X_r}{X_0 - X_r}$ - bezdimenzijski sadržaj vlage

INDEKSI

- f - fluid (zrak)
- krit - kritični
- m - srednji
- maks - maksimalni
- mf - minimalna fluidizacija
- p - čestica

PREDGOVOR

Fluidizacija je proces kojim se sloj čestica čvrste tvari u dodiru s fluidom koji ga prostrujava dovodi u stanje slično kapljevini koja vrije. Čestice se pri tom kreću u određenom volumenu, a nastala mješavina i sama poprima neka svojstva fluida. U fluidiziranom sloju dolazi do intenzivnog miješanja čestica u krutoj fazi te čestica i fluida zbog čega se ostvaruje veliki intenzitet prijenosa topline i tvari kao i niz još drugih prednosti. Prva značajna primjena fluidizacije bila je u kemijskoj industriji 40-ih godina dvadesetog stoljeća kada se počela koristiti za katalitičko krekiranje teških hidrokarbonata u sloju katalitičkih čestica. No vrlo brzo se primjena počela širiti i na druge fizikalne operacije i kemijske reakcije tako da se danas fluidizacija intenzivno koristi u farmaceutskoj, prehrambenoj, kemijskoj, naftnoj i ostalim granama industrije. Uz širenje primjene započeto je i značajnije istraživanje fluidizacije, pa su u razdoblju između 60-ih i 80-ih godina postavljene fundamentalne zakonitosti ponašanja plinskih fluidiziranih slojeva, a izdano je i mnoštvo literature koja se bavi miješanjem čestica, mjehurima, te prijenosom topline i tvari u sloju.

Obzirom da je fluidizacija vrlo interesantna za termotehniku kao perspektivni način poboljšanja izmjene topline između stijenke i fluida, ona predstavlja jedno od polja istraživanja Katedre za tehničku termodinamiku Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Istraživanja su započela tijekom 80-ih godina (doktorski rad prof. Galovića pod nazivom „Prilog izmjeni topline između fluidizirane kupke i uronjene čvrste stijenke“), a nastavljena su u okviru Znanstvenih projekata „Intenziviranje izmjene topline na izmjenjivačkim površinama (1996-2002.) i „Izmjena topline i tvari pri kondenzaciji, ishlapljivanju i sušenju“ (2002-2005.) prijavljenih pri MZOŠ. U tom razdoblju objavljeno je niz radova u različitim publikacijama, a treba istaknuti da su istraživanja bila ne samo teorijska nego i eksperimentalna na mjernoj liniji projektiranoj i postavljenoj u prostoru Laboratorija za tehničku termodinamiku.

Ovaj rad se nastavlja na ta istraživanja (poglavito na magistarski rad autora pod nazivom „Analiza prijelaza topline između fluidiziranog sloja i uronjene zavojnice“), a nastao je u okviru projekta „Intenziviranje izmjene topline i tvari pri kondenzaciji, ishlapljivanju i sušenju“.

SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Sažetak:

U okviru ovog rada provedeno je eksperimentalno istraživanje sušenja odabranih žitarica, oljuštenog ječma i pšenice, sa svrhom definiranja kinetike sušenja (krivulje sušenja, periodi sušenja, utjecaj procesnih parametara na kinetiku sušenja), te kvantifikacije intenziteta prijenosa topline i tvari u fluidiziranom sloju. Mjerenjem je dobivena ovisnost sadržaja vlage ječma i pšenice o vremenu sušenja (krivulje sušenja) za tri ulazne temperature zraka (35 °C, 42 °C i 50 °C) i tri brzine zraka (1,0, 1,07 i 1,15 m/s). Na osnovu sadržaja vlage izračunate su brzine sušenja, te nacrtane u ovisnosti o vremenu sušenja. Izmjerene vrijednosti sadržaja vlage prikazane su i u bezdimenzijskom obliku kako bi se mogao analizirati utjecaj temperature i brzine zraka na vremena sušenja za različite vrijednosti početnog sadržaja vlage zrna i ulaznog stanja zraka. Prikazana je i promjena temperature fluidiziranog sloja s vremenom sušenja. Dobiveni rezultati prikazani su i pomoću općih bezdimenzijskih korelacijskih jednadžbi zajedno s područjem njihove valjanosti. Rezultati su izanalizirani te su se usporedili s rezultatima sličnih novijih istraživanja drugih autora, te s rezultatima sušenja žitarica konvencionalnim načinom.

Ključne riječi:

Sušenje u fluidiziranom sloju, zrnati materijali, žitarice, bezdimenzijska korelacijska funkcija

ABSTRACT AND KEYWORDS

Abstract:

The experimental investigation of the fluidized bed drying of the selected grains, pearly barley and wheat, was performed with the following objectives:

- to define their drying kinetics (drying curves, periods of drying, influence of process parameters on the drying kinetics), and to quantify the intensity of heat and mass transfer in a fluidized bed;
- to present the obtained results in the form of non-dimensional correlation functions that are structured by the appropriate number of relevant non-dimensional numbers commonly cited in the literature in view of such problems;
- the obtained results needs to be critically analyzed and compared with the results of similar recent studies of other researchers, and also compared with drying rates achieved by conventional drying methods.

The cylindrical fluidization column with perforated plate as air distributor was used in this study. In the experiments, moisture content, relative humidity and temperature of the inlet and exit air, moisture content of the inlet and exit particles, and air mass flow are measured. To determine the mass of dried specimens (fluidized particles), and thus to determine the mass of evaporated moisture, the precision balance was used. Since the results are reduced to a mass of dry matter, for complete removal of moisture from the samples and to obtain the mass of bone dry solid, standard laboratory furnace was used.

The experimental investigation resulted in the following:

1. The minimum fluidization velocity was obtained by measuring bed pressure drop across a bed of wetted grains with a moisture content of about 25% d.b. and bed height 130 mm. The measured minimum fluidization velocities were 0,9 m/s for pearl barley, and 0,85 m/s for wheat. The range of air velocities for the fluidization was selected based on these results: 1,0 m/s, 1,07 m/s and 1,15 m/s. Despite a somewhat higher velocity than the minimum, initial grains moisture content was usually higher than 25% and grains are sticky and cohesive, so the bed started to fluidize only after a certain time when the particles are sufficiently dried.
2. The experiments were conducted at three inlet air temperatures (35 °C, 42 °C and 50 °C) and three drying air velocities (1,0, 1,07 and 1,15 m/s) and moisture contents data with time (drying curves) was obtained. Based on the measured moisture contents, drying rates were calculated and plotted as a function of the drying time. The measured values of moisture content are presented in dimensionless form in order to be able to analyze the

effect of temperature and air velocity on drying time for different values of initial moisture content of grains and air inlet conditions.

3. The change of fluidized bed temperature with time was also plotted. Temperatures were measured at three bed heights: 45, 75 and 105 mm above the distributor, and they are good indicator of the fluidization quality because in fully fluidized bed temperatures should be completely uniform.
4. Nondimensional correlation functions for the investigated fluidization and temperature ranges were obtained by means of mathematical computation.
5. The results were analyzed and compared with results of similar recent studies of other authors and with the results of conventional grain drying method.

Based on the obtained results and the experimental-computational analysis, the following conclusions were carried out:

1. Grain drying curves have a characteristic curved shape, so no constant rate period is observed in the course of drying, and drying takes place in the falling rate period. Surface moisture evaporates very quickly, so drying takes place inside the grains and the drying process is mostly controlled by internal mass transfer parameters (diffusion).
2. The inlet air temperature has a dominant influence on the drying rate, thus the drying time is greatly reduced at higher temperatures. The air velocity range in this study was relatively small, only 15%, but it can be concluded that the air velocity is very important in the initial stage of drying when the grain surface is partially or fully saturated, and when the maximum drying rates are achieved due to very intense evaporation of surface moisture. By increasing the air velocity the amount of bubbles in the bed is also increased, so the mixing of particles is greatly enhanced. Also, higher air velocities ensures the supply of fresh air with low humidity because it is very important that in the initial stage air is not saturated with moisture and thus reduce the drying rate. In a later stage of drying, when diffusion of moisture from inside the grain controls the drying rate, the influence of air velocity becomes much smaller.

   At lower moisture content of air, the difference of water vapour partial pressures in air over the saturated grain surface is increased, resulting in greater drying rates.

   The initial moisture content of the grains hase an important effect on the drying rate. Grains with higher initial moisture content have greater drying rates in the initial stage of drying, but in the later stage moisture diffusivity is also increased with the moisture content.

   The influence of bed height and particle size of grains on the drying rates was not studied in this research, but it can be found from the literature that drying rate decreases with increasing bed height and particle size.
3. Nondimensional correlation functions for the investigated fluidization and temperature ranges were obtained by means of mathematical computation. The equation for pearl barley is valid for the range of nondimensional temperatures: $1{,}70 \leq T^* \leq 48$, the range of *Fourier* numbers: $10 \leq Fo \leq 226$, and the range of *Reynolds* numbers: $207 \leq Re \leq 269$. The equation for wheat is valid for the range: $1{,}82 \leq T^* \leq 42{,}08$, $4 \leq Fo \leq 90$ and $226 \leq Re \leq 288$.

   It must be emphasized however that those correlation functions are based on *Page* empirical model and as such are valid only for the material being dried, the applied process parameters and the specific fluidization column geometry.

4. Drying rates from this research are compared with ones from commercial batch grain dryer. Drying rates in these conventional dryers are much smaller compared with rates in fluidized bed dryers with large horizontal and vertical moisture gradients. On the contrary, grain moisture content in fluidized bed is very uniform if fully fluidized.
5. The obtained results and conclusions in this research are consistent with similar recent studies by other authors.

Keywords:

Fluidized bed drying, granular materials, grains, nondimensional correlation function

1 UVOD

1.1 CILJEVI I SVRHA RADA

Izmjena topline i tvari u fluidiziranom sloju nalazi svoju primjenu u zadnjih tridesetak godina na veoma širokom području. Tako se primjerice ta primjena može naći u raznim kemijskim reaktorima, ložištima parnih kotlova kao i izmjenjivačima topline uronjenim u fluidizirani sloj. To su primjeri kod kojih se koristi svojstvo fluidiziranih slojeva glede povećanja izmjene topline na strani plina, kao mjestu „uskog grla“ u sveukupnom toplinskom otporu.

S druge pak strane, u eksploataciji su i uređaji koji istovremeno koriste svojstva fluidiziranog sloja u smislu istodobnog poboljšanja kako prijenosa topline tako i prijenosa tvari. To su primjerice ložišta s izgaranjem u fluidiziranom sloju, razni kemijski rekatori ili pak primjena kod rashladnih tornjeva u termo-energetskim postrojenjima.

Dakako da svoju primjenu fluidizirani sloj sa svojim svojstvima nalazi i u procesima sušenja, a posebice je moguća primjena kod sušenja zrnatih materijala. Tako se u fluidiziranom sloju suše gotovo svi materijali koji se mogu fluidizirati, pa čak i različite emulzije, paste i suspenzije koji se fluidiziraju u sloju inertnih čestica.

U fluidiziranom sloju se suše i razni poljoprivredni i prehrambeni proizvodi među koje spadaju i žitarice (pšenica, ječam, zob, heljda, proso, sirak, riža, kukuruz itd). One se naime obično žanju s visokim postotkom vlage kako bi se smanjili gubici zbog oštećivanja zrna i rasipanja koji nastupaju prilikom strojnog ubiranja (kombajniranja). Smanjivanje gubitaka kod žitarica je uočeno već kod 2-3% više vlage od skladišne. Pšenica se zato ubire i s vlagom koja dostiže 20%, kukuruz 38%, suncokret 20%, repica 18%, soja 18% itd. Ubiranjem zrna veće vlažnosti također se smanjuje rok sazrijevanja te se površina prije oslobađa za daljnju obradu. Zrno koje se skladišti s visokom vlagom i visokom temperaturom brzo se međutim kvari i propada zbog rasta mikroorganizama i enzimskih promjena pa se stoga vlažnost zrna mora smanjiti ispod 14%. Smanjenjem vlage zrna također se smanjuje i masa zrna te se olakšava transport i rukovanje. No, treba naglasiti da se na sušenje žitarica, obzirom na godišnje proizvedene količine, troše vrlo velike količine energije. Primjerice, prema podacima organizacije Ujedinjenih naroda za prehranu i poljoprivredu (*FAO*) svjetska proizvodnja žitarica u 1999. godini iznosila je oko 884 miliona metričkih tona što daje oko 70-197 miliona tona vode koju je potrebno odstraniti sušenjem. Konvencionalne sušare za sušenje žitarica su uglavnom konvekcijskog tipa i imaju relativno malu efikasnost pa stoga primjena novih tehnologija u sušenju žitarica ima veliki potencijal za uštedu energije. U te nove tehnologije, koje su u velikom dijelu još u fazi istraživanja, spadaju fluidizirani sloj, fontanski sloj, mikrovalno sušenje, te sušenje pomoću infracrvenih zraka. Osim toga primjenom fluidizacije dobiva se puno veća brzina sušenja nego kod konvencionalnih sušara, te bolja kvaliteta osušenog proizvoda jer je jednoličniji sadržaj vlage osušenog zrna. Stoga se čini potpuno opravdanim provesti eksperimentalna istraživanja sušenja žitarica u fluidiziranom sloju sa svrhom kvantifikacije intenziteta prijenosa topline i tvari.

Ciljevi postavljeni u ovom radu su sljedeći:

- provesti eksperimentalna istraživanja sušenja odabranih žitarica sa svrhom definiranja kinetike sušenja (krivulje sušenja, periodi sušenja, utjecaj procesnih parametara na

kinetiku sušenja), te kvantifikacije intenziteta prijenosa topline i tvari u fluidiziranom sloju;

- dobivene rezultate prikazati pomoću korelacijskih jednadžbi koje su strukturirane od odgovarajućeg broja relevantnih bezdimenzijskih značajki koje se u literaturi najčešće navode u prikazu ovakvih problema, te im pridružiti, u bezdimenzijskoj formi, i područje njihove valjanosti;
- dobivene rezultate kritički izanalizirati i usporediti kako s rezultatima sličnih novijih istraživanja drugih autora, tako i s postizivim brzinama sušenja žitarica konvencionalnim načinom.

Za istraživanje su odabrani ječam i pšenica koje spadaju među najvažnije žitarice. Ječam se danas koristi dvojako: kao pivski ječam za proizvodnju pivskog slada te ječam za druge namjene (oljušteni ječam ili ječam za kavovine). U istraživanjima je korišten oljušteni ječam koji se koristi u ljudskoj prehrani, a ljuska mu je odstranjena jer je neprobavljiva za čovjeka. Takav ječam je vrlo česti proizvod, a pregledom literature ustanovljeno je da ne postoje podaci o sušenju ječma u fluidiziranom sloju, kako onog s pljevicom (opnom) tako i oljuštenog. Pšenica je s prehrambenog stajališta najvažnija žitarica pa se u literaturi mogu naći različiti radovi vezani za kinetiku sušenja i intenzitet prijenosa topline i tvari, no vrlo su rijetki radovi s eksperimentalnim rezultatima sušenja pšenice u fluidiziranom sloju. U ovom istraživanju bi se dobile i općenite korelacijske jednadžbe sušenja ove dvije žitarice u fluidiziranom sloju što se u literaturi nije moglo naći.

U ovom istraživanju bi se dobili eksperimentalni podaci sušenja tih dviju žitarica, a ti rezultati zajedno s opisom mjernog postupka i primijenjene mjerne linije predstavljaju kvantitativne i pouzdane pokazatelje za praktičnu primjenu, npr. konstrukciju sušare za sušenje žitarica u fluidiziranom sloju. Dobiveni podaci također mogu poslužiti i za provjeru postojećih matematičkih modela, jer se, treba naglasiti, pokazalo da teorijske ekstrapolacije, bez čvrste osnove na izmjerenim podacima, mogu dovesti do potpuno pogrešnih zaključaka o ponašanju fluidiziranog sloja. Naime, fluidizacija bez obzira što je relativno dobro istražena u smislu fundamentalnih zakonitosti ipak ima vrlo važan nedostatak, a to je nepostojanje pouzdanih matematičkih modela zbog vrlo složenih hidrodinamičkih i termodinamičkih pojava u sloju. Eksperimentalni rezultati pomažu u razvoju novih modela koji bi s većom pouzdanošću mogli simulirati zbivanja u fluidiziranom sloju, a njihova bi primjena, npr. u *CFD* (*Computational Fluid-Dynamics*) softverskim alatima, omogućila jednostavniju analizu zbivanja u sloju te olakšalo konstruiranje sušionika s fluidiziranim slojem.

1.2 DOSADAŠNJE SPOZNAJE I RADOVI DRUGIH AUTORA

Fluidizacija se već dugo komercijalno koristi kod sušenja zrnatih čestica. U fluidiziranom sloju se tako suše proizvodi kao što su drobljena rudača, pijesak, polimeri, umjetna gnojiva, žitarice, kristali raznih tvari itd. Glavne prednosti fluidizacije kod procesa sušenja su vrlo intenzivan prijenos topline i tvari zbog velike dodirne površine između sloja čestica čvrste tvari i plina, izotermni uvjeti u sloju koji se postižu zbog vrlo intenzivnog miješanja čestica, jednostavan transport fluidiziranog sloja čestica u reaktor i iz njega jer se sloj ponaša poput tekućine, jednostavna kontrola procesa, za upravljanje uređajima s fluidiziranim slojem nije potrebno stručno znanje, niski troškovi održavanja itd. No, postoje i mnogi nedostaci koji su uglavnom vezani za složenost procesa i fluidizacijska svojstva čestica. *Geldart* [1] je zbog toga klasificirao čestice u četiri grupe prema njihovim fluidizacijskim svojstvima kad se

fluidiziraju zrakom u okolišnim uvjetima kako bi se mogla odmah načiniti procjena mogućnosti njihove fluidizacije. Čestice grupe A i B su jedine pogodne za fluidizaciju, grupa C (vrlo fine, sitne čestice između kojih postoje velike privlačne sile) se ne može fluidizirati bez primjene nekih specijalnih postupaka (vibracija, miješanje, rotacija i centrifugiranje), a grupa D su velike čestice kod kojih se javljaju prostrujni kanali u sloju. U oba ta slučaja fluidizacija je slaba, a kvaliteta proizvoda nije ujednačena. Drugi važan nedostatak fluidizacije je, zbog složenosti zbivanja u fluidiziranom sloju, ne postoje pouzdani matematički modeli koji se mogu primijeniti kod analize njihovog ponašanja i konstruiranja uređaja s fluidiziranim slojem, pa je eksperimentiranje i primjena probnih postrojenja uz znanje i iskustvo nužno kod ovog područja istraživanja. Nedostaci su još da u sloju može doći do loma krhkijih čestica koje onda propadaju u tlačnu komoru ili bivaju odnesene iz kolone, sitne čestice se obično nagomilavaju u sloju što uzrokuje njihovu nejednoliku raspodjelu i nepravilnu fluidizaciju, intenzivno miješanje čestica uzrokuje eroziju površina u koloni te skraćuje njezin radni vijek, vlažne čestice zahtijevaju veću minimalnu brzinu fluidizacije pa je potrebno pažljivo odabrati režim brzina fluidizatora, u sloju dolazi do znatnog pada tlaka, velika je potrošnja električne energije kod zagrijavanja zraka električnim grijačima, niska toplinska efikasnost u usporedbi s konvencionalnim sušionicima na zrak pa se zbog toga preporučuje recirkulacija zraka itd.

No, bez obzira na sve te probleme prednosti fluidizacije kod sušenja zrnatih materijala su velike te se u fluidiziranom sloju praktično suše sve čestice koje je moguće fluidizirati. Tako se, među ostalima, suše i razni prehrambeni i poljoprivredni proizvodi među koje spadaju i žitarice.

Sušenje žitarica se vrši prostrujavanjem zraka kroz sloj žitarica pri čemu se koristi (a) zrak iz okoliša, (b) zrak ugrijan 1 do 5 °C iznad okolišne temperature pomoću toplinskih gubitaka ventilatora ili motornog sklopa, (c) zrak ugrijan 5 do 15 °C pomoću vanjskih izvora (el. grijači, izgaranjem fosilnih goriva, solarna energija) što se naziva niskotemperaturno sušenje, i (d) zrak ugrijan na temperaturu 50 do 200 °C (visokotemperaturno sušenje) što ovisi o početnom sadržaju vlage žitarica, njihovoj namjeni i tipu sušare.

Za konvencionalno sušenje žitarica postoji više tipova industrijskih sušara koje se svrstavaju u razne grupe i podgrupe ovisno o vrsti i namjeni robe koja se suši, o načinu transporta robe kroz sušaru, prema načinu grijanja zraka za sušenje, prema vođenju zraka kroz sušaru itd.

Primarna podjela je prema načinu rada, i to na sušare koje suše u šaržnom postupku i na one koje suše u kontinuiranom postupku. Podjela se može proširiti na način grijanja (s okolišnim negrijanim zrakom ili s toplim zrakom) i temperaturu zraka kojom se zrnje suši. Zrak se može grijati neposredno miješanjem dimnih plinova i zraka, i posredno, preko stijenke koja razdvaja dimne plinove i zrak za sušenje.

Prema smjeru kojim zrak prolazi kroz sloj zrna, sušare mogu biti s istosmjernim tijekom, protusmjernim ili s križanim smjerom.

Transport zrna kroz sušaru je prisilan ili slobodnim spuštanjem uslijed gravitacije. Velike sušare su obično gravitacijske, a kod manjih se koristi mehanički transporter ili zrak.

Današnje moderne sušare su obično modularne, različitog normalnog kapaciteta[1], a konstrukcijom se nastoji postići visoka energijska racionalizacija (toplinska izolacija sušare, podjela u više temperaturnih zona i recirkulacija zraka).

---

[1] Normalni kapacitet sušare je označen kod sušenja kukuruznog zrna, u jednom prolazu kroz sušaru, uz redukciju vlažnosti s 32% na 14%.

Iako se kod modernih sušara postiže značajna ušteda energije, daljni potencijal leži u primjeni novih tehnologija koje su još velikim dijelom u fazi istraživanja. U to spadaju sušenje u fluidiziranom sloju, sušenje u fontanskom sloju, mikrovalno sušenje, te sušenje pomoću infracrvenih zraka.

U fluidiziranom sloju dobiva se jednolično osušeno zrno u veoma kratkom vremenu zbog toga što zrno lebdi u struji zraka velike brzine (2-3 m/s). Tako se npr. sloj riže u ljusci visine 100 mm može osušiti u fluidiziranom sloju od vlažnosti 24% na 18% u roku od 15 minuta pri temperaturi zraka od 100 °C i brzini od 2 m/s, pri čemu nisu uočene nikakve loše posljedice na kvalitetu zrna (*Sutherland* i *Ghali* [2] te *Tumambing* i *Driscoll* [3]. U literaturi se mogu naći brojni radovi u kojima su prikazani eksperimentalni rezultati sušenja i raznih drugih žitarica, a negdje su prikazani i odgovarajući matematički modeli. Tako su npr. *Dimattia* i ostali [4] izveli šaržno sušenje crvene jare pšenice u fluidiziranom sloju. Pri tome su istražili utjecaj različitih parametara na brzinu sušenja: visine sloja, brzine zraka, početnih sadržaja vlage i temperature zraka. Pšenica je prije ispitivanja bila ovlaživana kako bi se simulirao visok sadržaj vlage odmah nakon žetve. Kao medij za sušenje koristio se zagrijani zrak, a po visini sloja su bili razmješteni termoparovi kako bi se bilježile temperature u sloju. Za vrijeme sušenja su u redovitim vremenskim intervalima bili uzimani uzorci kojima se mjerio sadržaj vlage. Zaključeno je da brzinu sušenja kontrolira unutarnja brzina difuzije te da pojava čepova plina nema utjecaja na brzinu sušenja. Temperaturna distribucija unutar sloja je bila jednolika zbog intenzivnog miješanja čestica koje se javlja zbog pojave čepova plina u sloju. Pri nižim temperaturama sloja brzina i vrijeme sušenja su bili značajno manji nego kod viših temperatura. *Hajidavalloo* i *Hamdullahpur* [5] i [6] razvili su matematički model simultanog prijenosa topline i tvari u mjehurastom fluidiziranom sloju koji se može primijeniti na različit raspon čestica, te su usporedili modelirane s eksperimentalnim rezultatima sušenja crvene jare pšenice. Također su zaključili (a) da je sušenje žitarica kontrolirano s unutarnjim parametrima prijenosa tvari, (b) na brzinu sušenja važni utjecaj ima temperatura zraka, (c) visina sloja nema značajan utjecaj na brzinu sušenja, i (d) početni sadržaj vlage vlažnih čestica može imati znatan utjecaj na brzinu sušenja ovisno o fizikalnim svojstvima materijala čestica. *Soponronnarit* i ostali [7] istražili su karakteristike sušenja kukuruza u šaržnom fluidiziranom sloju pri temperaturama zraka od 150, 170 i 200 °C. Zaključili su da se sušenje kukuruza od početnog sadržaja vlage 43% do konačnog sadržaja 16% može obaviti sa zrakom temperature 170 °C bez većeg gubitka kvalitete. Osim toga su eksperimentalni rezultati pokazali da je prijenos vlage unutar zrna upravljan mehanizmom difuzije. *Srinivasakannan* i *Balasubramaniam* [8] izveli su eksperimentalno istraživanje i modeliranje sušenja žitarice *Eleusine corocana* (eng. *Ragi*) u šaržnom fluidiziranom sloju. Sušenje su izvršili s više različitih temperatura, protoka zraka i visina sloja, a zaključili su da brzina sušenja značajno raste s porastom temperature sušenja a vrlo malo s porastom protoka zraka, te da se smanjuje s porastom visine sloja. Također su istražili i sušenje prosa [9] sa sličnim zaključcima. *Izadifar* i *Mowla* [10] istražili su sušenje riže u fluidiziranom sloju, *Soponronnarit* i ostali [11] sušenje soje itd.

U ovom radu istraženo je sušenje oljuštenog ječma i pšenice u fluidiziranom sloju. Ječam je žitarica iz porodice trava (*Poaceae*), zauzima peto mjesto u svjetskoj proizvodnji žitarica, te se smatra najstarijom kultiviranom žitaricom koja je i danas sastavni dio prehrane istočne Europe, Bliskog istoka i Azije. *Hordeum vulgare* šestoredni je oblik ječma koji ima klasove smještene na suprotnim stranama s tri klasića svaki na svojoj stapci iz kojih se poslije razvija zrno ječma. Ovaj se oblik razvio iz dvorednih oblika koji imaju središnji klasić iz kojeg se razvijaju zrno i postranični sterilni klasići. Ječam se danas najviše rabi kao sirovina u proizvodnji piva i viskija, te kao stočna hrana. Oljušteni ječam je zrno ječma pripremljeno za ljudsku prehranu struganjem zrna pomoću brusnih diskova. Nakon tri brušenja dobiva se

ječmeno zrno kojemu su uklonjeni ljuska i posije, a s dva dodatna brušenja dobiva se oljušteni ječam. U trgovinama se može naći u pakiranjima od 500 ili 1000 g i s lomom zrna do 5%. Vlažnost tako pakiranog ječma mora biti manja od 14,5% kako bi se sačuvala kvaliteta proizvoda i spriječio rast plijesni, no ta vrijednost može biti i niža. Tako prema „Pravilniku o žitaricama, mlinskim i pekarskim proizvodima, tjestenini, tijestu i proizvodima od tijesta“ objavljenom u NN 78/2005 žitarice za izravnu ljudsku potrošnju se stavljaju na tržište samo kao pakirane i smiju sadržavati do 13% vode. Za ječam su preporučene vrijednosti za skladištenje i transport 11-14%, a što je niža vlažnost zrna to se mogu duže vrijeme očuvati.

Literatura o sušenju ječma je dosta rijetka, osobito ona o sušenju u fontanskom sloju, i bez objavljenih podataka o njegovu sušenju u fluidiziranom sloju. *Markowski* i ostali [12] istražili su karakteristike sušenja i kvalitetu ječma sušenog u laboratorijskom sušioniku s fontanskim slojem na 30, 35, 40 i 45 °C i pri ulaznoj brzini zraka od 23 m/s, te u infracrveno-konvekcijskom sušioniku s intenzitetom infracrvenog zračenja od 0,048, 0,061, 0,073 i 0,107 W/cm^2 i brzinom zraka od 0,5 m/s. Rezultati su pokazali da nakon prve, relativno kratke, faze naglog smanjenja, slijedi faza sporijeg smanjenja brzine sušenja. *Sobieski* [13] je predstavio računalnu simulaciju jednog stvarnog sušionika s fontanskim slojem načinjenog za različite konfiguracije fizikalnih i numeričkih parametara. Cilj studije je bio određivanje osjetljivosti *Eulerianskog* multifaznog modela (EMM) sušenja *Mauritia* vrste ječma u fontanskom sloju na pojedine varijable. *Bruce* [14] je dobio niz krivulja sušenja sloja prirodno vlažnog jarog ječma sa sadržajem vlage nakon žetve od 0,410, 0,350, 0,269 i 0,215, te 11 temperatura zraka za sušenje od 50 do 150 °C. Također je dobivene mjerne podatke analitički aproksimirao i međusobno usporedio pomoću tri različita modela: jednostavnim eksponencijalnim *Newtonovim* modelom, *Pageovim* modelom i numeričkim rješenjem *Fickovog zakona difuzije* za kuglu s koeficijentom difuzije kao funkcijom sadržaja vlage koji je vrlo dobro aproksimirao kompleksni oblik krivulje sušenja. *Mandas* i *Habte* [15] razvili su računalni program za simulaciju neravnotežnog matematičkog modela za sušenje mirujućeg dubokog sloja ječma.

Pšenica (*Triticum spp.*) je vrsta jestive trave, pšenično zrno ili sjeme krušarice *Triticum vulgare*. To je najvažnija žitarica koja je na drugom mjestu po proizvodnji u svijetu, odmah iza kukuruza. Sirovina je za proizvodnju brašna, a istovremeno je i gotova namirnica, jer se konzumira npr. kao pšenična kaša. U obliku kruha i tjestenine služi za prehranu ljudi više nego bilo koja druga žitarica. Proizvodi se obična ili meka pšenica, *Triticum vulgare*, sa svoje dvije skupine ozime ili jare forme, te tvrda pšenica, *Triticum durum*, koja se proizvodi za izradu tjestenine. U trgovinama se pšenica može naći u rinfuzi ili određenim pakiranjima. Vlažnost tako pakirane pšenice mora biti ispod 14,5%.

U recentnoj literaturi je sušenje pšenice u fluidiziranom sloju opisano u [4-6], te zatim u radu *Ginera* i *Calvela* [16] koji su na osnovu eksperimentalnih rezultata sušenja tankog sloja pšenice razvili kinetički model sušenja pšenice u šaržnom fluidiziranom sloju. Prema modelu, vrijeme sušenja se može smanjiti i do četiri puta, povećanjem temperature zraka s 40 °C na 70 °C. Također su izračunali da se mogu koristiti i temperature veće od one na koju se zrno pšenice smije ugrijati bez opasnosti od oštećenja zrna. Izračunate toplinske efikasnosti su bile male, ali se mogu povećati primjenom recirkulacije zraka. Šira analiza utjecaja temperature zraka i rekuperacije topline na toplinske efikasnosti može se naći u radu *Ginera* i *deMichelisa* [17]. Povećanje temperature zraka je dosta ograničeno zbog toplinske osjetljivosti pšenice pa su dobici na toplinskoj efikasnosti prilično mali. Ipak, kod većih brzina na izlazu iz kolone zrak ima visoku temperaturu i nisku vlažnost što ga čini povoljnim za recirkulaciju. U radu je prikazan algoritam pomoću kojeg se može odrediti potrebna količina zraka za recirkulaciju, a toplinska efikasnost je porasla na 53%, dok je bez recirkulacije bila 28%. U algoritmu je dana mogućnost i rekuperacije otpadne topline pšenice koja se može hladiti sa svježim, hladnim

zrakom. Na taj način postoji mogućnost povećanja toplinske efikasnosti i na 62% što je usporedivo s križnim kontinuiranim sušionicima kod kojih zrak struji okomito na smjer strujanja žita, te s kontinuiranim sušionicima s mješovitim strujanjem kod kojih zrak struji zajedno istosmjerno i protusmjerno sa žitom.

1.3 POSTAVLJANJE PROBLEMA

Fluidizirani sloj svoju primjenu nalazi i u procesima sušenja gotovo svih zrnatih materijala koji se mogu fluidizirati, a među njih spadaju i razni prehrambeni i poljoprivredni proizvodi, posebice žitarice.

Primjenom fluidiziranog sloja kod sušenja žitarica dobivaju se veće brzine sušenja, a time i kraća vremena sušenja materijala, te jednoličniji sadržaj vlage osušenog materijala. Zbog većih brzina sušenja u odnosu na konvencionalne načine sušenja u industrijskim sušarama moguće su znatne uštede energije. U Republici Hrvatskoj, kao i u velikom broju drugih zemalja u svijetu, sušare su velikim dijelom zastarjele te je potrošnja energije znatno veća od stvarne potrebe. Kao gorivo za te sušare uglavnom se koristi prirodni plin i derivati nafte čija cijena je u stalnom porastu. Zbog toga je opravdano provesti eksperimentalna istraživanja sušenja žitarica u fluidiziranom sloju sa svrhom kvantifikacije intenziteta prijenosa topline i tvari.

Eksperimentalna istraživanja provest će se na projektiranoj i izrađenoj mjernoj liniji koja se sastoji od odgovarajućeg grijača zraka i fluidizirane kupke s pripadajućim mjernim uređajima.

Za prikupljanje i prikaz izmjerenih vrijednosti temperatura, tlaka i relativne vlažnosti koristio bi se mjerni sustav proizvođača *National Instruments Corporation* upravljan mjernim softverom *LabVIEW* istog proizvođača.

Mjernom linijom obuhvaćeno je mjerenje sljedećih parametara procesa: ulazni i izlazni sadržaj vlage u zraku, ulazna i izlazna relativna vlažnost zraka, ulazna i izlazna temperatura zraka, ulazni i izlazni sadržaj vlage u česticama, te maseni protok zraka. Te bi se vrijednosti mjerile *on-line*, budući je mjerni sustav izravno vezan na osobno računalo.

Za određivanje mase sušenih uzoraka (fluidiziranih čestica), a time i određivanja mase iz njih ishlapljene vlage koristi se precizna vaga proizvođača *Mettler Toledo*. Budući je zgodno rezultate istraživanja svesti na masu suhe tvari, za potpuno odstranjivanje vlage iz uzoraka i dobivanje mase suhe tvari koristi se standardna laboratorijska peć.

Temeljem mjernih rezultata moguće je dobiti podatke o prosječnoj brzini sušenja ispitivanog materijala za pojedinačno nametnute ulazne uvjete sušenja.

Dobivene rezultate prikazat će se pomoću korelacijskih jednadžbi, koje su strukturirane od odgovarajućeg broja relevantnih bezdimenzijskih značajki koje se u literaturi najčešće navode u prikazu ovakvih problema. Dakako, tako dobivenim jednadžbama potrebno je pridružiti, u bezdimenzijskoj formi, i područje njihove valjanosti.

Dobivene rezultate potrebno je kritički analizirati i, ako je moguće, usporediti kako s rezultatima sličnih novijih istraživanja drugih autora, tako i s postizivim brzinama sušenja žitarica konvencionalnim načinom.

1.4 HIPOTEZA RADA

Iz navedenih razmatranja i provedenih mjerenja sušenja žitarica u fluidiziranom sloju postavlja se sljedeća hipoteza ovog doktorskog rada:

Procesom sušenja zrnatih materijala, posebice žitarica, u fluidiziranom sloju moguće je ostvariti sljedeće prednosti u odnosu na konvencionalni način sušenja:

- **veće brzine sušenja, a time i kraća vremena sušenja materijala;**
- **jednoličniji sadržaj vlage osušenog materijala.**

Te će se prednosti realizirati na način da se sam zrnati materijal, reguliranim protokom nositelja fluidizacije (zraka), drži u fluidiziranom režimu.

Postavljenu hipotezu potrebno je provjeriti na projektiranoj i izrađenoj mjernoj liniji koja se sastoji od odgovarajućeg grijača zraka i fluidizirane kupke s pripadajućim mjernim uređajima.

2 OSNOVE FLUIDIZACIJE

2.1 PRIMJENA FLUIDIZACIJE

2.1.1 Općenito

U mnogim industrijskim procesima vrlo je važno ostvariti dobar dodir između fluida (kapljevine ili plina) i čestica čvrste tvari kako bi se ostvarila veća brzina prijenosa topline i tvari. Ti procesi se kreću od relativno jednostavnih za provođenje kao što je primjerice sušenje zrnatih materijala, pa sve do onih kompleksnih, kao što su različite kemijske reakcije ili primjerice izgaranje.

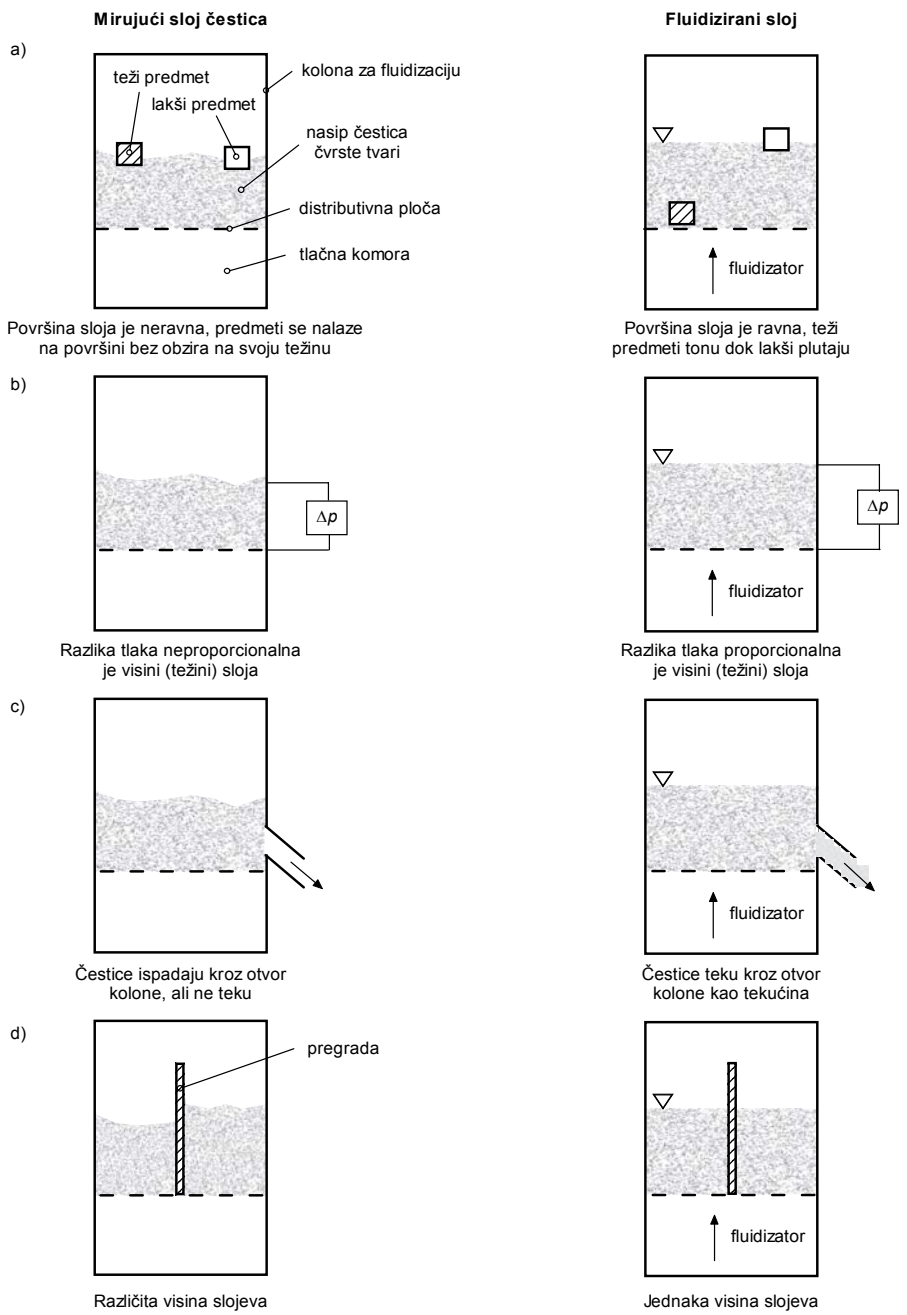
Fluidizirani sustavi omogućuju izvedbu takvih procesa pri čemu u usporedbi s drugim sustavima, u kojima se zbivaju ti procesi, postižu značajne prednosti.

Fluidizacija je proces prostrujavanja sloja čestica čvrste tvari nekom tekućinom (plinom, kapljevinom ili oboje). Čestice se pri tom kreću u određenom volumenu, a nastala mješavina i sama poprima neka svojstva tekućine, vidi sliku 2-1. Dovedena tekućina naziva se *fluidizatorom*, a nastala mješavina *fluidiziranim slojem*.

Procesi u kojima se koristi fluidizacija mogu se svrstati u dvije temeljne skupine: primjena fluidizacije kod *fizikalnih* operacija i primjena fluidizacije kod izvođenja *kemijskih* reakcija.

Glavne prednosti fluidizacije su:

- veliki intenzitet prijenosa topline i tvari;
- jednaka temperatura u svim dijelovima sloja zbog vrlo intenzivnog miješanja čestica;
- fluidizirani sloj čestica se ponaša poput tekućine, pa čestice mogu „teći“ između više fluidiziranih slojeva što se može primijeniti npr. kod prijenosa topline (u jednom sustavu se čestice zagrijavaju ohlađivanjem jednog fluidizatora, a u drugome se hlade zagrijavajući drugog);
- u uređajima s fluidiziranim slojem ne postoje pomični dijelovi pa su troškovi održavanja relativno mali;
- uređaji su postavljeni vertikalno pa tako ne zauzimaju puno prostora;
- kontrola procesa je relativno jednostavna, čak i kod većih postrojenja, pa za upravljanje uređajima nije potrebno stručno znanje;
- fluidizirani sloj je vrlo pogodan za izvođenje toplinski osjetljivih, egzotermnih i endotermnih reakcija;
- zbog velikih vrijednosti koeficijenata prijelaza topline uronjeni izmjenjivači topline imaju manju površinu;
- visine sloja nisu velike pa je onda i mali pad tlaka fluidizatora;
- fluidizacija se može odvijati u više stupnjeva, pa se na taj način može kontrolirati vrijeme sudjelovanja čestica i fluidizatora u procesu.



Slika 2-1. Neka svojstva fluidiziranog sloja u usporedbi s mirujućim slojem čestica

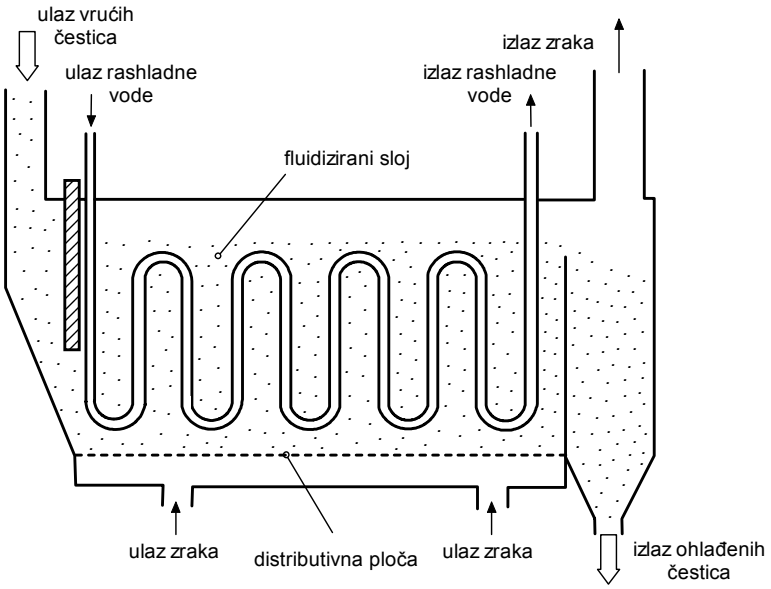
Nedostaci fluidizacije su uglavnom vezani za složenost procesa i fluidizacijska svojstva čestica:

- vrlo sitne, fine čestice je veoma teško fluidizirati bez primjene dopunskih mehaničkih miješalica ili neke druge tehnike zbog velikih privlačnih sila između čestica. Isto vrijedi ukoliko postoji elektrostatski naboj ili prisustvo vrlo vlažnog ili ljepljivog materijala u sloju;
- zbivanja u fluidiziranom sloju su vrlo složena, pa ne postoje pouzdani matematički modeli koji se mogu primijeniti kod konstruiranja uređaja s fluidiziranim slojem;

- kod velikih razlika u gustoći fluidizatora i čestica čvrste tvari (npr. kod zraka kao fluidizatora) u sloju se javljaju mjehuri fluidizatora što smanjuje dodirnu površinu i učinkovitost aparata;
- velike čestice je isto vrlo teško fluidizirati, a kod njih se može javiti i lokalno propuhivanje fluidizatora kroz sloj pri čemu nastaje proboj u vidu vertikalnog kanala. Zbog takvog prostrujavanja javljaju se velike promjene tlaka u sloju i vibracije postrojenja;
- za kvalitetno odvijanje fluidizacije potrebna je velika pažnja kod odabira režima brzina i dimenzija čestica;
- zbog intenzivnog miješanja i sudaranja čestica u sloju može doći do loma krhkijih čestica te njihova propadanja kroz distributivnu ploču u tlačnu komoru ili odnošenja iz kolone;
- intenzivno miješanje čestica uzrokuje eroziju površina u koloni te skraćuje njezin radni vijek;
- potrebno je veliko znanje i iskustvo kod projektiranja i izvođenja postrojenja za fluidizaciju;
- nije moguća primjena kod reakcija koje zahtijevaju temperaturni gradijent u sloju.

2.1.2 Primjena fluidizacije kod fizikalnih operacija

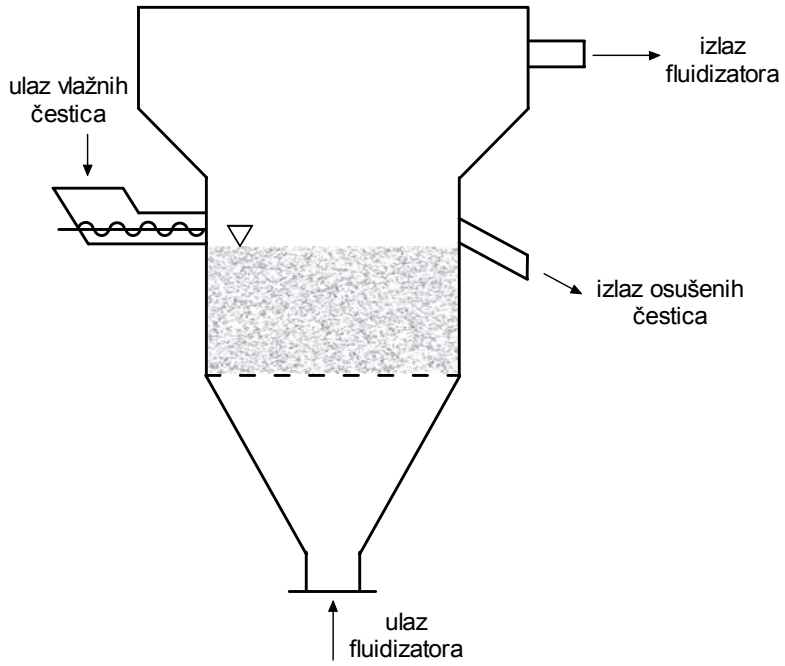
Fizikalne operacije koje uključuju primjenu fluidizacije su brojne, a neke karakteristične su sušenje, miješanje prašaka, operacije klasiranja i sortiranja, grijanje i hlađenje, operacije pneumatskog i hidrauličnog transporta, te izgaranje u fluidiziranim ložištima. Primjer jedne posude za hlađenje čestica u fluidiziranom sloju prikazan je na slici 2-2.



Slika 2-2. Posuda za hlađenje čestica u fluidiziranom sloju

Vrlo široka primjena fluidizacije je kod sušenja zrnatih čestica. Komercijalno se fluidizacija koristi u sušenju drobljene rudače, pijeska, polimera, umjetnog gnojiva, žitarica i kristala

raznih tvari. Primjer posude za sušenje čestica u fluidiziranom sloju po šaržama prikazan je na slici 2-3.



Slika 2-3. Posuda za šaržno sušenje čestica u fluidiziranom sloju

2.1.2.1 Primjena fluidizacije kod kemijskih reakcija

Povoljna svojstva fluidiziranih slojeva čine ih vrlo dobrim medijem za izvođenje kemijskih reakcija. Problemi koji se javljaju uglavnom su izazvani pojavom mjehura u fluidiziranom sloju što se događa kod plina kao fluidizatora. U idealnom slučaju (homogena fluidizacija bez pojave mjehura) u sloju postoji velika dodirna površina između plina i čestica koje su zbog vrtložnog gibanja dobro izmiješane, koeficijenti prijelaza topline su vrlo veliki, a uvjeti reakcije gotovo izotermni. U heterogenoj fluidizaciji (s pojavom mjehura) uvjeti su drugačiji. Većina plina prolazi kroz sloj u obliku mjehura što znači da svi učesnici neće u potpunosti reagirati u procesu. No, s druge strane pojava mjehura ipak ima i značajne prednosti jer je kod plinske fluidizacije moguće koristiti znatno širi raspon brzina, a mjehuri također poboljšavaju i miješanje čestica u sloju. U praksi se zato u kolone za fluidizaciju postavljaju unutarnje cijevi i pregrade s ciljem kontroliranja kretanja mjehura u sloju i sprečavanja njihova rasta kako se dižu kroz sloj, jer samo manji mjehuri poboljšavaju miješanje čestica [18].

Unatoč tim problemima fluidizacija se primjenjuje u različitim pirolizama (npr. spaljivanje muljevitih ili kapljevitih otpadaka industrije na ugrijanom, fluidiziranom pijesku), procesima krekiranja, pri tzv. *Fischer-Tropschovim*[2] sintezama, kod rasplinjavanja ugljena, prženja, pečenja, a u novije vrijeme i kod izvođenja nekih nuklearnih reakcija.

[2] Proces nazvan prema njemačkim kemičarima *Franc Fischeru* i *Hans Tropschu* koji su ga prvi razvili, a koji se intenzivno koristio u Njemačkoj 30-ih godina prošlog stoljeća za proizvodnju sintetskog benzinskog i dizelskog goriva. Danas se uglavnom koristi za dobivanje sirovina kod dobivanja sintetske masti i sapuna.

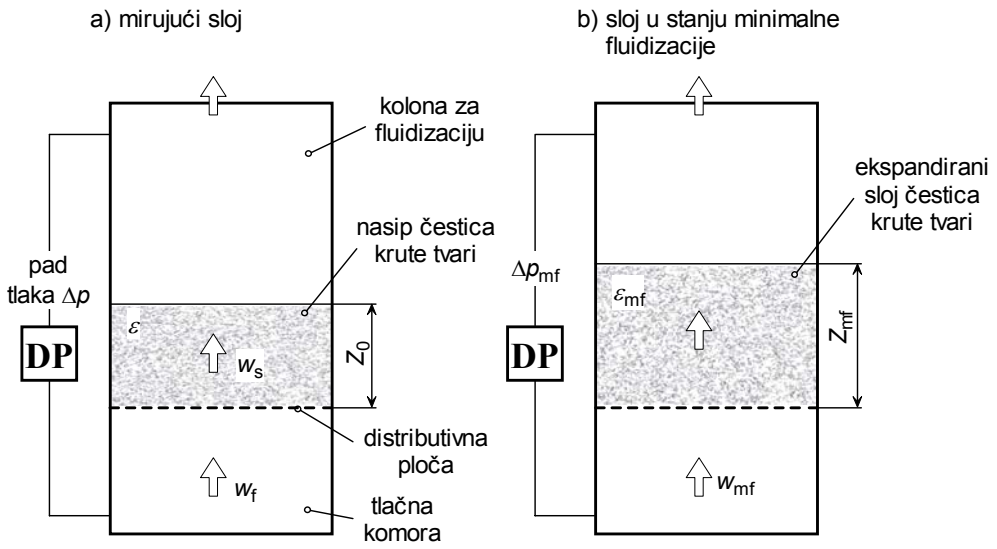
Širi uvid u problematiku praktične primjene fluidizacije može se naći u literaturi [18], [19] i [20].

2.2 OPIS PROCESA FLUIDIZACIJE

2.2.1 Nastajanje fluidiziranog sloja

Fluidizacija se provodi u različitim uvjetima, ali najčešće u cilindričnoj ili prizmatičnoj posudi (koloni). Fluidizirajuća tekućina dovodi se kroz distributivnu ploču kojom je pregrađen donji dio kolone za fluidizaciju, a koja ima vrlo važnu ulogu u ravnomjernoj distribuciji fluidizatora po poprečnom presjeku kolone.

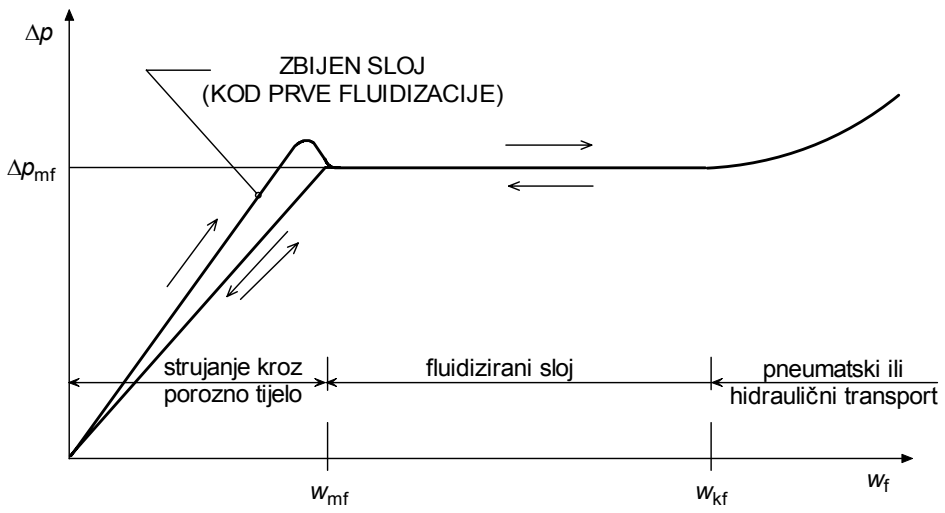
Nastajanje fluidiziranog sloja je shematski prikazano na slici 2-4.



Slika 2-4. Nastajanje fluidiziranog sloja

Distributivna ploča ima dvojaku funkciju: omogućavanje jednolike distribucije fluidizatora po presjeku sloja i sprečavanje propadanja čestica krute tvari u tlačnu komoru ili dovodni kanal fluidizatora. To se postiže otvorima na ploči, točnije rečeno njihovim brojem, veličinom i oblikom.

Pri razmjerno malim brzinama fluidizatora (slika 2-4a) sloj čestica krute tvari mirno leži na distributivnoj ploči pri čemu se ostvaruje njegovo najgušće stanje. Ovaj sloj se naziva *mirujućim slojem* budući se čestice ne miču, tj. međusobni razmak ostaje stalan. Visina tog sloja na slici 2-4a. označena je sa Z_0, poroznost sloja (vidi 2.2.5) s ε, brzina fluidizatora na slobodnom presjeku kolone s w_f, a prostrujna brzina fluidizatora s w_s. (U analizi zbivanja u fluidiziranom sloju ipak se češće koristi brzina na slobodnom presjeku w_f koja se dobiva iz masenog protoka fluidizatora kroz kolonu). U mirujućem sloju fluidizator dakle samo prostrujava između čestica ne mijenjajući poroznost sloja, a karakteristike strujanja fluidizatora jednake su kao kod strujanja tekućine kroz porozno tijelo, što je prikazano dijagramom na slici 2-5 koji prikazuje ovisnost pada tlaka fluidizatora u sloju o brzini fluidizatora za mirujući i fluidizirani sloj.



Slika 2-5. Pad tlaka fluidizatora u ovisnosti o brzini fluidizatora za mirujući i fluidizirani sloj

Pri malim brzinama w_f (*laminarno* strujanje) ovisnost pada tlaka o brzini kroz mirujući sloj je linearna.

Povećanjem brzine fluidizatora pad tlaka u sloju raste samo do neke granice, kada unatoč daljnjem povećavanju brzine zadržava približno konstantnu vrijednost. To je kritični trenutak u nastajanju fluidiziranog sloja, kada se sila zbog pada tlaka fluidizatora, usmjerena prema gore, izjednačava s težinom čestica u sloju umanjenom za silu uzgona čestica uronjenih u fluidizatoru. Čestice se tada počinju pokretati, što dovodi do povećanja volumena sloja (*ekspanzija sloja*) tj. do prijelaza sloja u stanje tzv. *minimalne fluidizacije*. Prijelaz mirnog sloja čestica u stanje minimalne fluidizacije karakterizira porast poroznosti s ε na ε_{mf}, brzine fluidizatora w_f na w_{mf}, visine sloja Z_0 na Z_{mf} i pada tlaka Δp na Δp_{mf} (slika 2-4b.) Brzina w_{mf} naziva se *minimalna brzina fluidizacije*. Ona raste s veličinom i gustoćom čestica, a ovisna je i o fizikalnim svojstvima fluidizatora. Također ovisi i o sadržaju vlage čestica što je važno npr. kod sušenja.

Daljnjim povećanjem brzine fluidizatora dolazi do sve veće ekspanzije sloja praćene intenzivnim kretanjem čestica. Poroznost sloja ε_f povećava se, a pad tlaka u sloju Δp_{mf} postignut u stanju minimalne fluidizacije ostaje približno konstantan zbog rasta slobodne površine strujanja između čestica.

Granica fluidizacije bit će dostignuta kod neke kritične brzine w_{kf} kod koje nastupa odnošenje čestica i razaranje fluidiziranog sloja. (Brzina w_{kf} se stoga naziva i *brzina odnošenja čestica*). Proces koji tada nastupa naziva se *pneumatskim* ili *hidrauličnim transportom* (ovisno o tome je li fluidizator plin ili kapljevina). Kod razaranja fluidiziranog sloja poroznost ε počinje naglo rasti uz porast tlaka iznad Δp_{mf}. Kad se prostrujna brzina fluidizatora w_s izjednači s brzinom na slobodnom presjeku w_f čestice su u potpunosti odnesene iz kolone, a vrijednost poroznosti ε jednaka je 1.

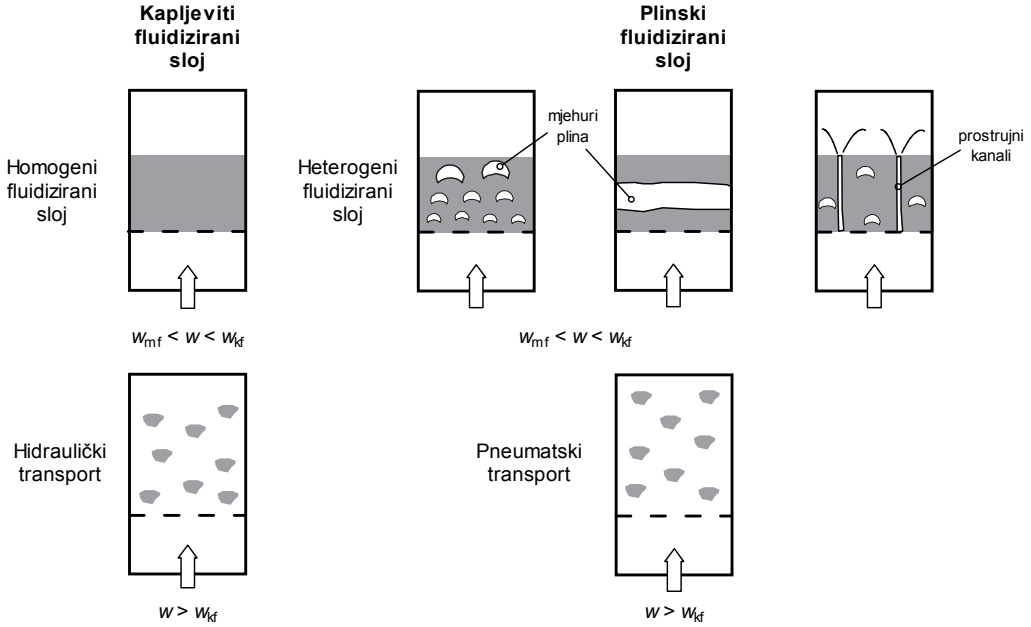
Na slici 2-5 treba još uočiti da porast tlaka u sloju Δp osim o hidrodinamičnim parametrima ovisi i o stanju sloja prije početka fluidizacije, odnosno je li sloj mirovao duže vrijeme pa je došlo do njegovog zbijanja, ili je upravo slegnut nakon fluidiziranja. Prilikom fluidizacije zbijenog sloja čestica potrebna je naime dodatna sila za savladavanje privlačnih sila između čestica pa je zato pad tlaka u sloju prije postizanja stanja minimalne fluidizacije nešto veći u odnosu na stanje kad je sloj rahao, odnosno nije gusto zbijen. Stoga prijelaz iz mirujućeg sloja

u fluidizirani sloj nije isti kad se odvija u smjeru povećanja i u smjeru smanjenja brzine fluidizatora što je na slici i naznačeno strelicama.

2.2.2 Karakteristike fluidiziranog sloja u ovisnosti o fluidizatoru

Fluidizator koji struji kroz sloj čestica može biti plin, kapljevina ili oboje. Kod kapljevine kao fluidizatora postiže se *homogena* fluidizacija optimalne kvalitete. Sloj čestica ekspandira ovisno o brzini fluidizatora pri čemu se može postići daleko veća visina sloja nego početna, a povećanjem brzine se progresivno povećava i intenzitet miješanja čestica. Kod kapljevitih fluidiziranih sustava karakteristično je da se s povećanjem brzine i dalje zadržava homogenost sve do postizanja neke krajnje brzine kod koje započinje odnošenje čestica, odnosno *hidraulički transport*. Kod fluidizacije plinom, ovisno o veličini i gustoći čestica te gustoći plina, može se prvo javiti homogena fluidizacija, ali se najčešće s povećanjem brzine vrlo brzo u sloju javljaju mjehuri fluidizatora pa se fluidizacija nastavlja kao *heterogena*. Kod većine čestica do stvaranja mjehura dolazi odmah po nastajanju fluidiziranog sloja. Mjehuri nastaju na distributivnoj ploči i rastu međusobnim spajanjem kroz sloj, a veličina im može rasti i s porastom brzine fluidizatora. Kod većih brzina mjehuri se mogu i razdvajati na manje. Mjehuri se vrlo brzo dižu kroz sloj prema površini gdje se rasprskavaju, a prilikom dizanja povlače sa sobom čestice što izaziva njihovo jako miješanje. Zbog takvog ponašanja fluidizacija plinom jako nalikuje kapljevini koja vrije. Heterogeni fluidizirani sloj je u osnovi dvofazni sustav gdje postoji: (a) gusta faza (naziva se još emulzijom) koja se sastoji od plina i čestica, te (b) rijetka ili mjehurasta faza.

Na slici 2-6 prikazano je ponašanje fluidiziranih slojeva u ovisnosti o fluidizatoru, plinu ili kapljevini. Na slici su nacrtani i neki specijalni slučajevi koji se mogu javiti kod plinskih fluidiziranih slojeva. Naime, kod uskih i dubljih slojeva s česticama manjih dimenzija mogu se mjehuri spojiti u jedan veliki koji zauzima cijeli promjer kolone za fluidizaciju, a fluidizacija se zbog toga naziva „stapnom“. Ovisno o dimenziji čestica moguće je i lokalno propuhivanje sloja pri čemu nastaje proboj u obliku vertikalnog kanala. To je tzv. „fontanska fluidizacija“.



Slika 2-6. Kapljeviti i plinski fluidizirani sloj pri različitim brzinama

Kako bi se mogli odrediti uvjeti za nastupanje homogene ili heterogene fluidizacije, još su 1948. godine *Wilhelm* i *Kwauk* [21] predložili korištenje *Froudeovog* broja (w_{mf}^2 / gd) kao kriterij, gdje je w_{mf} minimalna brzina fluidizacije svedena na slobodni presjek kolone, d promjer čestica, a g gravitacija. Za vrijednosti *Froudeovog* broja manjeg od 0,13 javlja se homogena, a za vrijednosti veće od 1,3 heterogena fluidizacija. Kod kapljevina kao fluidizatora javljaju se mnogo manje vrijednosti *Froudeovog* broja jer su vrijednosti minimalne brzine fluidizacije znatno manje nego kod plinova. Teorijsku potvrdu za korištenje *Froudeovog* broja za razlikovanje homogene i heterogene fluidizacije dali su *Jackson* [22] i *Murray* [23].

Nešto precizniji kriterij predložili su *Romero* i *Johanson* [24] koji su umjesto jedne bezdimenzijske značajke za određivanje kvalitete fluidizacije predložili njih četiri:

$$Fr_{mf},\ Re_{mf},\ (\rho_p - \rho_f)/\rho_f \text{ i } Z_{mf}/d_{kol},$$

pa se za vrijednosti:

$$\left(Fr_{mf} Re_{mf} \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \frac{Z_{mf}}{d_{kol}} \right) < 100 \tag{2-1}$$

dobiva homogena fluidizacija, a za:

$$\left(Fr_{mf} Re_{mf} \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \frac{Z_{mf}}{d_{kol}} \right) > 100 \tag{2-2}$$

heterogena fluidizacija.

Kod fluidizacije plinom ekspanzija sloja je vrlo ograničena i daleko je manja nego kod fluidizacije kapljevinom, a s povećanjem brzine proces se nastavlja do neke brzine w_{kf} koja se naziva *brzinom odnošenja čestica* kod koje nastupa *pneumatski transport*.

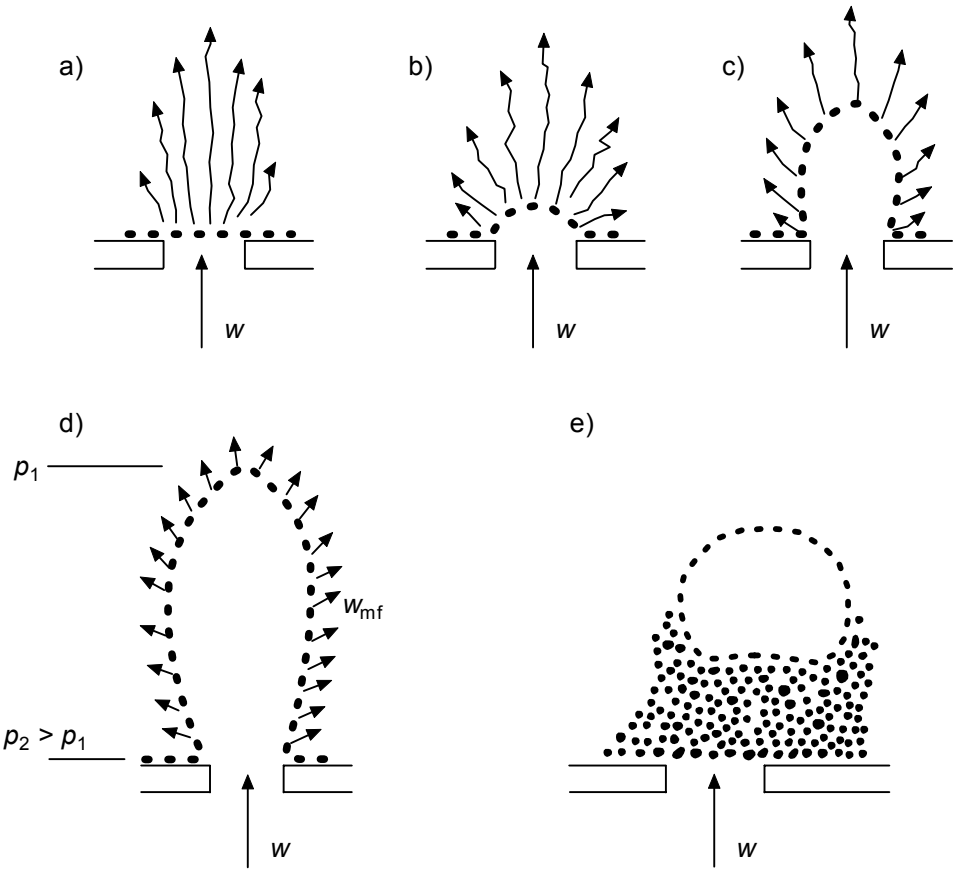
Kod tzv. *trofazne* fluidizacije kao fluidizator se koristi plin i kapljevina. U zadnjih dvadesetak godina se znatno istražuje i taj oblik fluidizacije pri čemu se trofazni reaktori koriste npr. kod hidrogenacije i hidrodesulfurizacije ulja (kemijske reakcije između vodika i raznih ulja s česticama čvrste tvari kao katalizatorom), zatim katalitičkog oksidiranja, hidratacije, biooksidacijskih procesa kod tretiranja otpadnih voda, ionske izmjene, desulfurizacije otpadnih plinova, u hidrometalurgiji, te proizvodnji antibiotika.

2.2.3 Mjehuri u fluidiziranom sloju

2.2.3.1 Nastajanje mjehura na distributivnoj ploči

Nastajanje mjehura na otvoru distributivne ploče opisao je *Zenz* [25] i prikazano je na slici 2-7. Plin kroz otvor na distributivnoj ploči struji s nekom brzinom w koja može biti veća i za red veličine od minimalne brzine fluidizacije w_{mf}, te je stoga dovoljna da podigne čestice koje se nalaze na otvoru ploče u položaj prikazan na slici 2-7b. Mjehur plina koji se počinje formirati raste, slika 2-7c, no s porastom njegove veličine dolazi do opadanja srednje brzine

plina kroz granicu mjehura i to proporcionalno omjeru površine otvora ploče i površine mjehura. Prema *Zenzu* mjehur ostaje stabilan i dalje nastavlja rasti sve dok je ta srednja brzina veća od brzine w_{mf}. Kad se te brzine izjednače, slika 2-7d, mjehur je postigao svoju maksimalnu veličinu i kako brzina plina više nije dovoljna da ga održi stabilnim dolazi do otkidanja mjehura na otvoru ploče gdje je tlak najveći, te se počinje dizati prema površini. Nakon toga čestice ponovo zauzimaju prostor iznad otvora, slika 2-7e, te započinje proces nastanka novog mjehura.



Slika 2-7. Nastajanje mjehura na distributivnoj ploči [18]

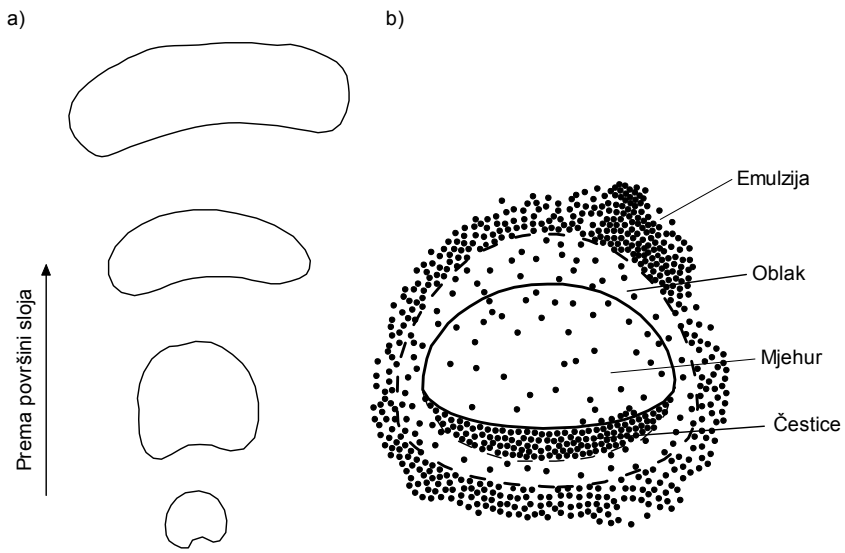
2.2.3.2 Oblik i rast mjehura u fluidiziranom sloju

U trenutku nastanka na distributivnoj ploči, mjehuri u sloju imaju približno sferičan oblik s blago uvučenim dijelom na dnu ispunjenim česticama. (Mjehur prilikom podizanja prema površini sloja ostavlja trag tih čestica za sobom nalik brazdi, eng. *wake*). Početna veličina mjehura ovisi o masenom protoku plina, odnosno o vrijednosti minimalne brzine fluidizacije w_{mf}, a prema *Roweu* [26] je za jedan do dva reda veličine veća od veličine čestica u sloju (oko 0,005 m za sitne fine čestice i 0,1 m za veće čestice promjera nekoliko mm). Daljnji oblik mjehura ovisi o položaju u sloju, veličini, te eventualnom prisustvu krutih stijenki (npr. izmjenjivačkih površina, stijenke kolone ili sapnice na distributivnoj ploči) zbog čega se površina mjehura može i iskriviti. Prilikom dizanja prema površini sloja veličina mjehura se povećava međusobnim stapanjem, a u vrlo maloj mjeri postoji i izmjena s plinom iz guste faze koji prostrujava kroz mjehure što je *Rowe* (kao i neki drugi istraživači) pokazao serijom

eksperimenata s vidljivim plinom u dvodimenzijskom fluidiziranom sloju. Ako je protok plina u mjehurastoj fazi konstantan onda se s porastom veličine mjehura smanjuje njihov broj, a osim međusobnog stapanja veliki mjehuri se mogu cijepati i na manje kad postanu nestabilni što se dešava kad je brzina dizanja mjehura veća od brzine lebdjenja čestica.

Rowe je na osnovu svojih eksperimenata opisao i formiranje tzv. „oblaka“ plina (eng. *cloud*) oko mjehura u sloju sitnih čestica u kojem je brzina podizanja mjehura veća od brzine minimalne fluidizacije w_{mf}. Oblak nastaje zbog toga što plin (koji prostrujava kroz mjehur i izlazi na njegovu vrhu) biva skrenut od sporijih čestica iz guste faze, te počinje strujati niz mjehur prema njegovom dnu gdje ponovo ulazi u njega, pri čemu nastaje cirkulirajuće strujanje plina. Oblak plina koji nastaje oko mjehura je približno sferičnog oblika i putuje zajedno s njim.

Oblak plina je vrlo važan za prijenos tvari između guste faze i mjehura jer se prijenos mora vršiti kroz taj dodatni sloj što smanjuje učinak kemijskih reaktora.



Slika 2-8. Karakteristični oblik mjehura u sloju

2.2.3.3 Minimalna brzina nastajanja mjehura

Kod većine čestica do nastanka mjehura dolazi odmah po nastajanju fluidiziranog sloja kod brzine minimalne fluidizacije w_{mf}, iako se kod vrlo finih čestica može prvo javiti homogena fluidizacija, a tek kod neke veće brzine w_{mb} heterogena. Brzina w_{mb} naziva se *minimalna brzina nastajanja mjehura*. Omjer brzina w_{mb}/w_{mf} prvenstveno ovisi o veličini čestica i povećava se sve do vrijednosti 2 ili 3 za čestice manje od 100 μm. *Abrahamson* i *Geldart* [27] mjerili su brzine w_{mb} za široki raspon finih čestica od 20-72 μm te su predložili sljedeću korelaciju za predviđanje omjera w_{mb}/w_{mf}:

$$\frac{w_{mb}}{w_{mf}} = \frac{2300\rho_f^{0,13}\eta_f^{0,52}e^{0,72\omega_{45}}}{d_p^{0,8}\left(\rho_p - \rho_f\right)^{0,93}}, \tag{2-3}$$

gdje je d_p prosječna veličina čestica, η_f dinamička viskoznost plina, ρ_f i ρ_p gustoće plina i čestica i ω_{45} maseni udio čestica manjih od 45 μm u promjeru.

2.2.3.4 Brzina dizanja mjehura u fluidiziranom sloju

Dizanje mjehura u fluidiziranom sloju je vrlo slično dizanju mjehura plina u kapljevini. Mjehuri se dižu kroz sloj konstantnom brzinom koja je proporcionalna njihovom promjeru, a za pojedinačni mjehur se brzina dizanja w_{sb} može izračunati *Davidsonovom* i *Harrisonovom* jednadžbom [28]:

$$w_{sb} = k\sqrt{gd_b}\,, \tag{2-4}$$

pri čemu je konstanta $k = 0{,}67$. No, za finije čestice, npr. različite praškove, pokazalo se da je potrebna dodatna korekcija jer jednadžba (2-4) daje preniske vrijednosti, pa je *Botterill* [29] predložio oko 50% veći k, a *Kunii* i *Levenspiel* [20] vrijednost $k = 0{,}71$.

Kod velikog broja mjehura u sloju brzina će biti nešto veća jer mjehuri „nose“ jedan drugoga. Na brzinu dizanja mjehura utječu i drugi faktori kao što je viskoznost plina, te veličina i gustoća čestica. Ti faktori ustvari utječu na minimalnu brzinu fluidizacije w_{mf}, pa što je ona veća bit će manja brzina dizanja mjehura. *Davidson* i *Harrison* [28] stoga su predložili sljedeću jednadžbu za proračun brzine dizanja mjehura koja je preuzeta iz plinsko-kapljevitih sustava:

$$w_b = w_{sb} + \left(w_f - w_{mf}\right). \tag{2-5}$$

2.2.4 Pad tlaka u fluidiziranom sloju

Pad tlaka fluidizatora pri strujanju kroz mirni sloj čestica može se promatrati kao pojavu strujanja kroz porozni medij, tako da se za opis koristimo istim jednadžbama. Stanje minimalne fluidizacije se isto tako može promatrati kao granično stanje mirnog sloja čestica.

Pri laminarnom strujanju u području vrijednosti *Reynoldsove* značajke:

$$Re = \frac{d_p w_f \rho_f}{\eta_f} < 20\,,$$

u kojoj d_p označuje prosječnu veličinu čestica, w_f brzinu fluidizatora, ρ_f gustoću fluidizatora i η_f dinamičku viskoznost fluidizatora, pad tlaka se može procijeniti *Cramer-Kozenyjevom* jednadžbom:

$$\Delta p_{mf} = 150\frac{\left(1-\varepsilon_{mf}\right)^2}{\varepsilon_{mf}^3}\frac{\eta_f w_{mf} Z_{mf}}{\left(\Psi_s d_p\right)^2}\,, \tag{2-6}$$

koja vrijedi za laminarno strujanje fluida kroz porozno tijelo.

Pri turbulentnom strujanju za vrijednosti *Reynoldsove* značajke:

$$Re > 1000\,,$$

prevladavaju utjecaji vrtloženja, te se za taj slučaj pad tlaka može procijeniti *Burk-Plamerovom* jednadžbom

$$\Delta p_{\mathrm{mf}} = 1{,}75 \frac{\left(1-\varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)}{\varepsilon_{\mathrm{mf}}^3} \frac{\rho_{\mathrm{f}} w_{\mathrm{mf}}^2 Z_{\mathrm{mf}}}{\Psi_{\mathrm{s}} d_{\mathrm{p}}}\,. \tag{2-7}$$

U fluidiziranom sloju najčešće nije prisutno ni izrazito laminarno ni izrazito turbulentno prostrujavanje, pa se za slučaj *Reynoldsovih* brojeva 20 < *Re* < 1000 pad tlaka izračunava *Ergunovom* jednadžbom:

$$\Delta p_{\mathrm{mf}} = 150 \frac{\left(1-\varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)^2}{\varepsilon_{\mathrm{mf}}^3} \frac{\eta_{\mathrm{f}} w_{\mathrm{mf}} Z_{\mathrm{mf}}}{\left(\Psi_{\mathrm{s}} d_{\mathrm{p}}\right)^2} + 1{,}75 \frac{\left(1-\varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)}{\varepsilon_{\mathrm{mf}}^3} \frac{\rho_{\mathrm{f}} w_{\mathrm{mf}}^2 Z_{\mathrm{mf}}}{\Psi_{\mathrm{s}} d_{\mathrm{p}}}\,, \tag{2-8}$$

koja obuhvaća utjecaj sila viskoziteta i utjecaj vrtloženja, pa ima opći značaj.

U sve tri jednadžbe, osim fizikalnih svojstava fluidizatora, pojavljuju se i *Wadellov* faktor sfericiteta Ψ_{s} koji uzima u obzir koliko oblik čestice odstupa od pravilnog oblika kugle. Definira se preko omjera ekvivalentnih promjera čestica:

$$\Psi_{\mathrm{s}} = x_V^2 / x_A^2\,. \tag{2-9}$$

U jednadžbi (2-9) x_A je ekvivalentni promjer izražen površinom A_{p} čestice nepravilnog oblika, a određuje se pomoću formule za površinu kugle:

$$A_{\mathrm{p}} = A_{\mathrm{kugle}} = d_{\mathrm{p}}^2 \pi\,,$$

odakle slijedi:

$$x_A = d'_{\mathrm{ek}} = \left(A_{\mathrm{p}} / \pi\right)^{0{,}5}\,. \tag{2-10}$$

U jednadžbi (2-9) x_V je ekvivalentni promjer čestice izražen njezinim volumenom V_{p}, pri čemu se koristi formula za volumen kugle:

$$V_{\mathrm{p}} = V_{\mathrm{kugle}} = d_{\mathrm{p}}^3 \pi / 6\,,$$

odakle slijedi:

$$x_V = d''_{\mathrm{ek}} = \left(6 V_{\mathrm{p}} / \pi\right)^{1/3}\,. \tag{2-11}$$

Sfericitet Ψ_{s} čestica pravilnog oblika se može jednostavno analitički izračunati pomoću jednadžbe (2-9), ali za čestice nepravilnog oblika to nije jednostavno. Stoga se sfericitet takvih čestica vrlo često određuje iz korelacija za pad tlaka u mirujućem sloju čestica u kojima je sadržan i sfericitet Ψ_{s} te eksperimentalnih podataka pada tlaka u sloju uz poznata

fizikalna svojstva tekućine i čestica, s time da se mjeri pad tlaka u području laminarnog strujanja ($Re < 10$) pri čemu se zanemaruje utjecaj površinske hrapavosti čestica.

Wadellov faktor sfericiteta npr. za čestice kuglastog oblika ima vrijednost 1, za kocku 0,81, a za čestice nekuglastog oblika poprima vrijednosti unutar intervala od 0 do 1. U tablici 2-1 i tablici 2-2 su dane vrijednosti Ψ_s za pojedine čestice pravilnih i nepravilnih oblika.

Tablica 2-1. *Wadellov* faktor sfericiteta Ψ_s za čestice pravilnih oblika

Oblik	Ψ_s
Kugla	1
Valjak: $Z = d$	0,87
$Z = 5d$	0,70
$Z = 10d$	0,58
Kocka	0,81
Disk: $Z = d/3$	0,76
$Z = d/6$	0,60
$Z = d/10$	0,47

Tablica 2-2. *Wadellov* faktor sfericiteta Ψ_s za čestice nepravilnih oblika (orijentacijske vrijednosti)

Oblik	Ψ_s
Mulj	0,97
Volfram, 124 μm	0,94
Silikagel	0,94
Fini pijesak	0,80
Ugljena prašina	0,80
Cement, 40μm	0,87
Ugljen, 2411 μm	0,87
Pšenica	0,85
Glinica	0,72
Oštar pijesak	0,65
Pluto	0,69
Mljev. staklo 124 μm	0,53
Tinjac, lisnat 124 μm	0,53

2.2.5 Poroznost fluidiziranog sloja

Poroznost sloja ε se definira kao omjer volumena prostora između čestica u sloju i ukupnog volumena sustava:

$$\varepsilon = \frac{V_\varepsilon}{V} = \frac{V - V_p}{V} = 1 - \frac{V_p}{V}, \tag{2-12}$$

gdje je V_p volumen svih čestica u sustavu, a V ukupni volumen sustava.

Na poroznost *mirujućeg sloja* čestica utječu parametri kao što su veličina, oblik, raspodjela veličine čestica u sloju, površinska hrapavost čestica, način pakiranja sloja, omjer veličine čestica i promjera kolone, te visina sloja.

Sitnije i grublje čestice smanjuju poroznost sloja, dok ga one veće povećavaju.

Oblik površine zrna, odnosno površinska hrapavost čestica utječe na koeficijent međusobnog trenja te na taj način djeluje na međusobno slaganja čestica i na poroznost sloja.

Prema načinu pakiranja sloj čestica može biti jako slegnut (zbijen), normalan ili rahao. Sloj će biti jako slegnut ukoliko se to omogući npr. vibriranjem ili trešnjom kolone, ili ukoliko je imao dovoljno vremena za smirivanje i stvaranje najgušće moguće strukture djelovanjem sile gravitacije. Normalno slegnut sloj se dobiva ako odstoji nekoliko dana ili tjedana, a rahli sloj je onaj koji nije imao dovoljno vremena da se slegne, npr. kad se sloj čestica ubaci u kolonu, fluidizira i onda ostavi da se slegne.

U literaturi postoje različite empirijske jednadžbe za izračunavanje vrijednosti poroznosti mirujućeg sloja čestica sloja ε u ovisnosti o sfericitetu Ψ_s, pa je tako u [30] dana jednadžba:

$$\varepsilon = \left[1 - 0{,}297\lambda\left(\Psi_s - 0{,}08\right)\right]\varepsilon_{rs} . \tag{2-13}$$

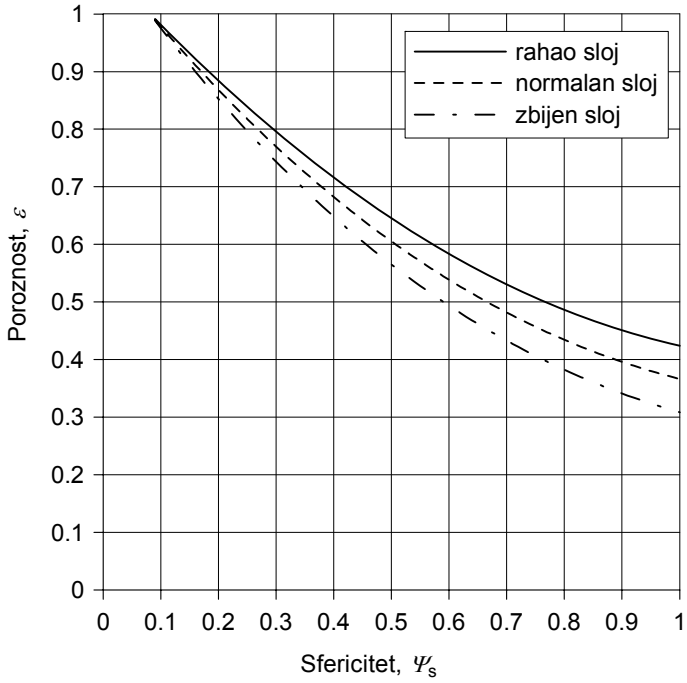
U jednadžbi (2-13) λ je parametar koji ovisi o zbijenosti sloja čestica:

$$\lambda = \begin{cases} 0 & \text{za rahao sloj} \\ 0{,}5 & \text{za normalan sloj} \\ 1 & \text{za zbijen sloj} \end{cases},$$

a ε_{rs} je poroznost rahlog sloja koja se računa jednadžbom:

$$\varepsilon_{rs} = 0{,}4411\Psi_s^2 - 1{,}1042\Psi_s + 1{,}0873 . \tag{2-14}$$

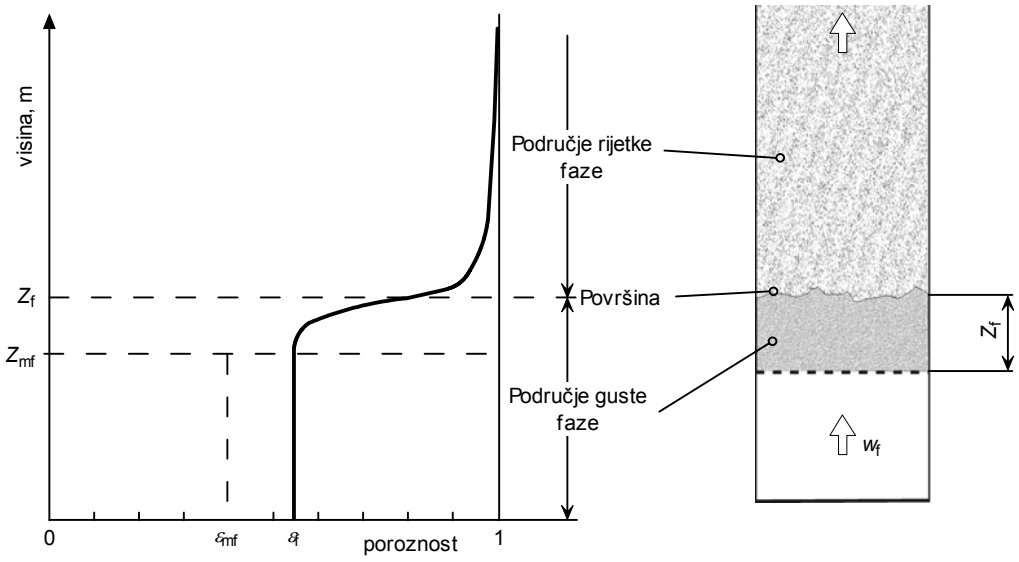
Jednadžba (2-13) prikazana je dijagramom na slici 2-9 iz kojeg se vidi da za normalno slegnut sloj i vrijednost sfericiteta 0,9 (što su neke prosječne vrijednosti) poroznost iznosi oko 0,4.



Slika 2-9. Poroznost kao funkcija sfericiteta i zbijenosti sloja

Veliki utjecaj na poroznost ima i visina sloja čestica jer tlak koji se stvara na dnu visoke hrpe smanjuje poroznost. To se naročito uočava u visokim silosima gdje prilikom punjenja ćelija zrno pada s velike visine (i do 30 - 40 m).

Kod *homogene fluidizacije* općenito je poroznost nekog sloja čestica uvijek u pravilu neravnomjerna po visini sloja budući se sloj i po visini može podijeliti na dvije faze, gustu i rijetku, sa znatnom razlikom poroznosti. Na slici 2-10 kvalitativno je prikazana raspodjela poroznosti po visini homogenog fluidiziranog sloja kad se on ostvaruje u koloni.



Slika 2-10. Jednostavni model raspodjele poroznosti u homogenom fluidiziranom sloju

Zbog toga se za praktične potrebe mora računati sa srednjim vrijednostima poroznosti. Proračuni su uglavnom empirijski, a zasnivaju se na eksperimentalnom mjerenju karakterističnih veličina za barem jedno stanje fluidiziranog sloja.

Ukoliko je masa čestica u sloju za vrijeme odvijanja procesa konstantna, te su poznate visina sloja i poroznost u jednom stanju, može se napisati jednakost:

$$m_p = (1-\varepsilon_1)\rho_p A Z_1 = (1-\varepsilon_2)\rho_p A Z_2 = konst.\,, \tag{2-15}$$

gdje je m_p masa čestica u fluidiziranom sloju, ε_1 i ε_2 poroznosti sloja pri visinama Z_1 i Z_2, A površina presjeka kolone i ρ_p gustoća čestica. Iz jednadžbe (2-15) proizlazi omjer različitih visina sloja:

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{1-\varepsilon_1}{1-\varepsilon_2}\,. \tag{2-16}$$

Eksperimentalno se najčešće određuje stanje minimalne fluidizacije, a sva ostala stanja se mogu dobro aproksimirati jednadžbom (2-16).

Relativno dobru aproksimaciju predstavlja i jednadžba prema [31]:

$$\frac{w_{\mathrm{f}}}{w_{\mathrm{kf}}} = \frac{Re_{\mathrm{f}}}{Re_{\mathrm{kf}}} = \varepsilon_{\mathrm{f}}^{n}, \tag{2-17}$$

pa, ukoliko su poznate brzina i poroznost u stanju minimalne fluidizacije, w_{mf} i $\varepsilon_{\mathrm{mf}}$, te brzina odnošenja čestica w_{kf}, postavljanjem uvjeta:

$$\varepsilon_{\mathrm{f}}\left(w_{\mathrm{mf}}\right) = \varepsilon_{\mathrm{mf}},$$

i logaritmiranjem jednadžbe (2-17), dobiva se jednadžba za izračunavanje eksponenta ekspanzije sloja n:

$$n = \frac{\ln\left(\dfrac{Re_{\mathrm{mf}}}{Re_{\mathrm{kf}}}\right)}{\ln \varepsilon_{\mathrm{mf}}}. \tag{2-18}$$

Pomoću jednadžbi (2-16), (2-17) i (2-18) može se odrediti poroznost sloja pri ekspanzijskom ponašanju sloja kod homogene fluidizacije.

Kod ekspanzije *heterogenog* fluidiziranog sloja mora se uzeti i prisustvo mjehura u sloju, što bitno komplicira analizu.

2.2.6 Klasifikacija čestica prema fluidizacijskim svojstvima kod plinske fluidizacije

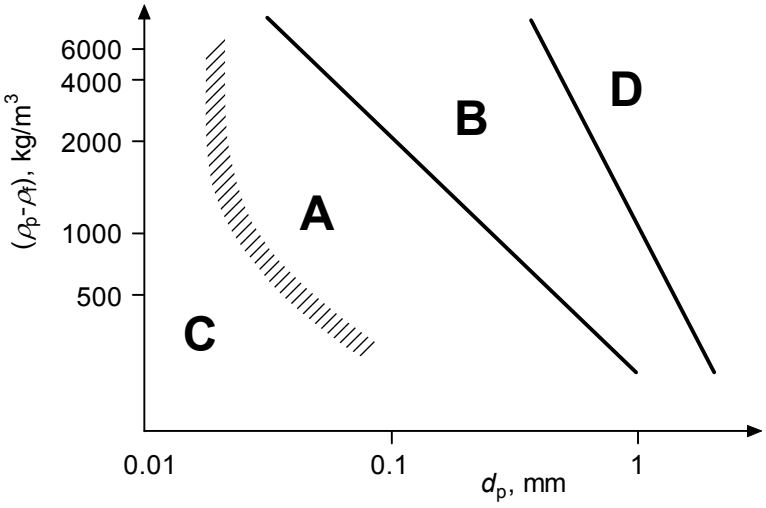
Kod plinske fluidizacije odvijanje procesa ovisi o svojstvima plina kao fluidizatora i čestica čvrste tvari. Mjehuri plina koji se javljaju imaju vrlo veliki utjecaj na kvalitetu procesa, pa je stoga bitno definirati tipove fluidizacije u ovisnosti o svojstvima fluidiziranog sustava. Zato su nastale različite klasifikacije čestica od kojih je najznačajnija *Geldartova* [1], makar su prisutne još neke podjele (npr. *Molerusova*, *Clarkova* i bezdimenzijska *Geldartova* klasifikacija) koje ustvari predstavljaju nadogradnju *Geldartove* podjele s ciljem ispravljanja uočenih nedostataka, npr. nejasno definirane granice između grupe C i A. Prisutne su još i klasifikacije koje osim hidrodinamičnih uzimaju u obzir i toplinska svojstva, odnosno intenzitet izmjene topline u sloju (npr. klasifikacija prema *Saxeni* i *Ganzhu* [32]).

2.2.6.1 Geldartove grupe čestica

Geldart je 1973. godine predložio klasifikaciju čestica u četiri grupe prema njihovim fluidizacijskim svojstvima kad se fluidiziraju zrakom u okolišnim uvjetima (tlak i temperatura zraka su bliski okolišnom stanju) sa svrhom sistematizacije pojava u fluidiziranom sloju, koje općenito ovise o veličini i gustoći čestica te o svojstvima fluidizatora. Njegova podjela je široko prihvaćena u različitim granama industrije koje se bave praškastim materijalima,

Slika 2-11 dijagramski prikazuje *Geldartovu* klasifikaciju prema svojstvima čestica i plina kao fluidizatora. Za proces fluidizacije pogodne su grupe A i B, no važno je naglasiti da pri nekim drugačijim uvjetima fluidizacije, npr. tlaku i temperaturi većim nego pri okolišnom

stanju, čestice mogu promijeniti skupinu. To je posljedica promjene svojstava plina kao fluidizatora, što može imati značajan utjecaj na uvjete fluidizacije.



Slika 2-11. *Geldartova* klasifikacija čestica

2.2.6.1.1 Grupa A

Ovoj grupi pripadaju čestice veličine d_p = 0,03 do 0,15 mm i gustoće ρ_p < 1400 kg/m^3. *Geldart* je razvio numerički kriterij za razlikovanje pojedinih grupa čestica, pa za ovu grupu čestica vrijedi:

$$(\rho_p - \rho_f) d_p \leq 225 , \tag{2-19}$$

pri čemu jednadžba (2-19) predstavlja granicu između grupe A i B.

Čestice grupe A, prilikom fluidizacije zrakom u okolišnim uvjetima, prvo stvaraju homogeni fluidizirani sloj kod brzine w_{mf}, a kod neke veće brzine w_{mb} dolazi do stvaranja mjehura, te se fluidizacija nastavlja kao heterogena. Brzina w_{mb} kod koje se počinju javljati mjehuri izravno je proporcionalna veličini čestica:

$$w_{mb} = K_{mb} d_p ,$$

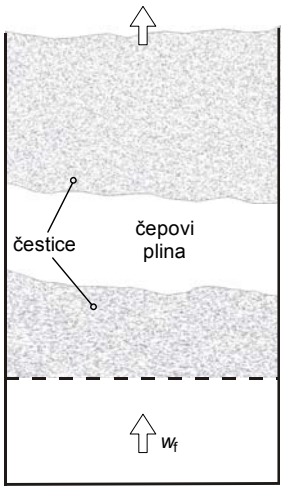
gdje je konstanta K_{mb} = 100 s^{-1}, za zrak sobnog stanja.

Kretanje mjehura kroz sloj nalikuje vrenju, pri čemu se mjehuri neprestano cijepaju i međusobno stapaju dok ne postignu neku maksimalnu veličinu, koja onda ostaje nepromijenjena do površine fluidiziranog sloja. Maksimalna veličina mjehura praktički je neovisna o brzini plina ili veličini posude. U slučaju prestanka dotoka plina, prvo dolazi do naglog pada visine sloja uslijed bijega mjehura, a zatim do polaganog pada kako se nastavlja njegovo daljnje urušavanje.

Primjenom čestica ove skupine dobiva se fluidizacija optimalne kvalitete.

2.2.6.1.2 Grupa B

Grupa B obuhvaća čestice veličine d_p = 0,04 do 0,5 mm i gustoće ρ_p = 1400 do 4000 kg/m^3. Pri okolišnim uvjetima te čestice ostvaruju samo heterogenu fluidizaciju. Mjehuri koji nastaju pri brzini minimalne fluidizacije w_{mf} neprestano rastu kroz sloj nikada ne dostižući svoju maksimalnu veličinu. Zbog toga je fluidizacija nestabilna s velikim promjenama tlaka u sloju što je loše za kvalitetu procesa. Veličina mjehura ograničena je samo veličinom posude i visinom sloja, a raste s porastom brzine plina.



Slika 2-12. Nastajanje čepova plina u sloju čestica grupe C

2.2.6.1.3 Grupa C

Ovdje spadaju vrlo fine, sitne čestice (d_p < 0,03 mm), male gustoće i oblika koji znatno odstupa od kugle. Za granicu između ove grupe čestica i grupe A *Geldart* nije predložio nikakav kriterij, odnosno ne postoji jasna granica između te dvije grupe što predstavlja određeni nedostatak *Geldartove* podjele.

Zbog velikih privlačnih sila između čestica (zbog vrlo malih dimenzija, elektrostatskog naboja, te prisustva vrlo vlažnog ili ljepljivog materijala u sloju) nije moguće postići njihovo razdvajanje i nastanak fluidiziranog sloja, odnosno to je moguće samo uz primjenu dopunskih mehaničkih miješalica, ili nekih drugih postupaka. Umjesto mjehura, plin formira prostrujne kanale kroz sloj. Moguće je i nastajanje stapne fluidizacije (slika 2-12) što je praćeno velikim promjenama tlaka i vibracijama postrojenja. To se onda nastoji izbjeći pravilnim dimenzioniranjem visine posude koja mora biti što plića kad se radi s česticama ove grupe.

2.2.6.1.4 Grupa D

Čestice grupe D su čestice veličine d_p > 0,5 mm i gustoće ρ_p > 1400 kg/m^3 neprikladne za dobivanje kvalitetne fluidizacije. Numerički kriterij za čestice ove grupe je:

$$\left(\rho_p - \rho_f\right) d_p^2 \geq 10^6 , \tag{2-20}$$

što predstavlja granicu između grupe B i D.

Kao i kod čestica grupe B, mjehuri se javljaju već kod minimalne brzine fluidizacije, pri čemu njihova veličina kontinuirano raste kako se kreću kroz sloj prema površini. Kod čestica ove veličine karakteristično je stvaranje prostrujnih kanala kroz sloj, čak i za veće visine, tako da plin prostrujava kroz mjehure. Moguća je i pojava tzv. „fontanske fluidizacije“, specijalnog slučaja turbulentne fluidizacije, kad se plin propuhuje lokalno kroz sloj, pri čemu nastaje proboj sloja u obliku vertikalnog kanala. Zbog takvog prostrujavanja javljaju se promjene tlaka u sloju i vibracije postrojenja.

2.2.7 Minimalna brzina fluidizacije

Određivanje minimalne brzine fluidizacije w_{mf} osobito je važno jer ona predstavlja početak nastajanja fluidiziranog sloja, pa stoga spada u osnovne parametre procesa fluidizacije. Minimalna brzina fluidizacije određuje se najčešće eksperimentalnim putem, no moguće je dobiti i teorijskim putem makar to često nije posve egzaktno, jer u dobivenim izrazima vrlo često je potrebno poznavati još neki parametar, najčešće poroznost u stanju minimalne fluidizacije ε_{mf}. Minimalna brzina fluidizacije u prvom redu ovisi o veličini i gustoći čestica. Tako se primjerice kod plinske fluidizacije sloj u kojem su sve čestice fine (skupina A) fluidizira već pri laminarnom strujanju fluidizatora, a sloj s većinom grubih čestica (skupina D) tek pri turbulentnom strujanju. Zbog toga se izračunavanje minimalne brzine fluidizacije izvodi s pomoću različitih jednadžbi, već prema uvjetima strujanja fluidizatora. Ako se stanje minimalne fluidizacije promatra kao granično stanje mirnog sloja, onda se može poslužiti jednadžbama za pad tlaka u fluidiziranom sloju (2-6), (2-7) i (2-8).

Jednadžba (2-6) može se napisati u obliku:

$$w_{mf} = \frac{(\Psi_s d_p)^2}{150} \frac{\varepsilon_{mf}^3}{(1-\varepsilon_{mf})^2} \frac{\Delta p_{mf}}{\eta_f Z_{mf}} . \tag{2-21}$$

Izjednačavanjem masene sile čestica:

$$F_p = g m_p - g m_f = g(\rho_p - \rho_f)(1-\varepsilon_{mf}) Z_{mf} A , \tag{2-22}$$

i sile zbog pada tlaka fluidizatora:

$$F_f = A \Delta p_{mf} , \tag{2-23}$$

sve za stanje minimalne fluidizacije, dolazi se do izraza za pad tlaka fluidizatora u stanju minimalne fluidizacije:

$$\Delta p_{mf} = g(\rho_p - \rho_f)(1-\varepsilon_{mf}) Z_{mf} . \tag{2-24}$$

Uvrštavanjem (2-24) u (2-21) proizlazi jednadžba:

$$w_{mf} = g \frac{(\Psi_s d_p)^2}{150} \frac{\rho_p - \rho_f}{\eta_f} \frac{\varepsilon_{mf}^3}{1-\varepsilon_{mf}} , \tag{2-25}$$

kojom se može izračunati minimalna brzina fluidizacije kad se sustav fluidizira u uvjetima izrazito *laminarnog* strujanja ($Re < 20$).

Analognim postupkom za uvjete izrazito *turbulentnog* strujanja ($Re > 1000$) dolazi se do jednadžbe:

$$w_{mf} = \left[g \frac{(\Psi_s d_p)}{1{,}75} \frac{\rho_p - \rho_f}{\eta_f} \varepsilon_{mf}^3 \right]^{0,5} , \tag{2-26}$$

odnosno, za *prijelazno* područje (20 < *Re* <1000):

$$g\left(\rho_{\mathrm{p}}-\rho_{\mathrm{f}}\right)\left(1-\varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)=150\frac{\left(1-\varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)^{2}}{\varepsilon_{\mathrm{mf}}^{3}}\frac{\eta_{\mathrm{f}}w_{\mathrm{mf}}}{\left(\Psi_{\mathrm{s}}d_{\mathrm{p}}\right)^{2}}+1{,}75\frac{\left(1-\varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)}{\varepsilon_{\mathrm{mf}}^{3}}\frac{\rho_{\mathrm{f}}w_{\mathrm{mf}}^{2}}{\Psi_{\mathrm{s}}d_{\mathrm{p}}}\,. \tag{2-27}$$

Uvođenjem *Reynoldsove* značajke u jednadžbu (2-27) dobiva se:

$$g\left(\rho_{\mathrm{p}}-\rho_{\mathrm{f}}\right)\left(1-\varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)\left(\frac{\rho_{\mathrm{f}}d_{\mathrm{p}}^{3}}{\eta_{\mathrm{f}}^{2}}\right)=150\frac{\left(1-\varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)^{2}}{\Psi_{\mathrm{s}}^{2}\varepsilon_{\mathrm{mf}}^{3}}Re_{\mathrm{mf}}+1{,}75\frac{\left(1-\varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)}{\Psi_{\mathrm{s}}\varepsilon_{\mathrm{mf}}^{3}}Re_{\mathrm{mf}}^{2}\,. \tag{2-28}$$

Ako se lijeva strana jednadžbe (2-28) zamijeni *Archimedovom* značajkom:

$$Ar=\frac{\rho_{\mathrm{p}}-\rho_{\mathrm{f}}}{\rho_{\mathrm{f}}}\frac{gd_{\mathrm{p}}^{3}}{\nu_{\mathrm{f}}^{2}},$$

gdje je $\nu_{\mathrm{f}}=\eta_{\mathrm{f}}/\rho_{\mathrm{f}}$ koeficijent kinematičke viskoznosti fluidizatora, dobiva se jednakost:

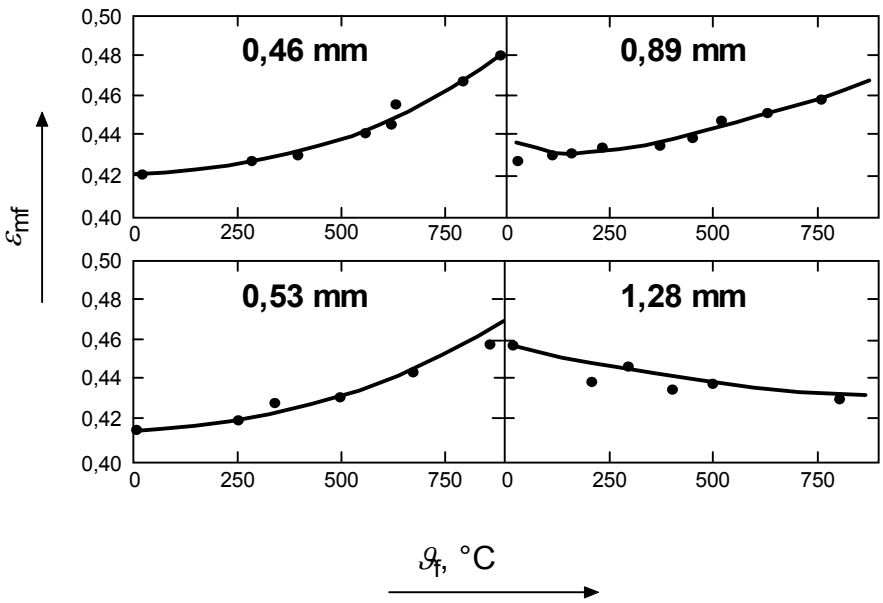
$$Ar=150\frac{\left(1-\varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)}{\Psi_{\mathrm{s}}^{2}\varepsilon_{\mathrm{mf}}^{3}}Re_{\mathrm{mf}}+1{,}75\frac{1}{\Psi_{\mathrm{s}}\varepsilon_{\mathrm{mf}}^{3}}Re_{\mathrm{mf}}^{2}\,. \tag{2-29}$$

Taj je oblik jednadžbe (2-29) često citiran u literaturi.

U praksi se za određivanje stanja pri *heterogenoj* fluidizaciji vrlo često koristi i jednadžba iz [31]:

$$Re_{\mathrm{mf}}=42{,}9\frac{\left(1-\varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)}{\Psi_{\mathrm{s}}}\left[\left(1+3{,}1\cdot10^{-4}\frac{\Psi_{\mathrm{s}}^{3}\varepsilon_{\mathrm{mf}}^{3}}{\left(1-\varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)^{2}}Ar\right)^{0{,}5}-1\right]. \tag{2-30}$$

Izračunavanje minimalne brzine fluidizacije pomoću ovih jednadžbi nije sasvim egzaktno jer je potrebno poznavati vrijednost poroznosti u stanju minimalne fluidizacije $\varepsilon_{\mathrm{mf}}$. Kod fluidizacije plinom okolišnog stanja vrijednosti $\varepsilon_{\mathrm{mf}}$ obično su nešto veće od 0,4. Na slici 2-13 prikazane su izmjerene vrijednosti $\varepsilon_{\mathrm{mf}}$ za kvarcni pijesak prosječne veličine od 0,46 mm do 1,28 mm pri različitim temperaturama plinovitog fluidizatora.



Slika 2-13. Poroznost sloja u stanju minimalne fluidizacije [33]

Prema jednadžbi (2-13) odnosno slici 2-9, za normalno slegnut sloj i vrijednost sfericiteta $\Psi_s = 0{,}9$, poroznost ε_{mf} iznosi oko 0,4 pa se onda, u nedostatku eksperimentalno izmjerenih vrijednost, može uzeti ta vrijednost. U tom slučaju se iz (2-29) dobiva jednadžba:

$$Ar = 1406 Re_{mf} + 27{,}3 Re_{mf}^2 . \tag{2-31}$$

Vrlo često se minimalna brzina fluidizacije određuje pomoću iskustvenih (empirijskih) jednadžbi koje vrijede za određene uvjete fluidizacije, te vrstu i dimenziju čestica.

Jedna od najčešće korištenih je *Levina* [34] jednadžba:

$$w_{mf} = 0{,}0079 \frac{d_p^{1,82} \left(\rho_p - \rho_f\right)^{0,94}}{\eta_f^{0,88}} , \tag{2-32}$$

koja vrijedi za $Re_{mf} \leq 10$, dok se za veće vrijednosti Re_{mf} mora primijeniti korekcijski faktor.

Postoji i cijeli niz empirijskih jednadžbi za određivanje minimalne brzine fluidizacije. Naime, jednadžba (2-29) može se napisati u sljedećem obliku:

$$\alpha Re_{mf}^2 + \beta Re_{mf} - Ar = 0 , \tag{2-33}$$

pri čemu se faktori α i β vrlo malo mijenjaju za različite uvjete fluidizacije, a vrijednosti im se određuju eksperimentalno.

Tako su npr. *Wen* i *Yu* [35] na osnovu izmjerenih podataka za ε_{mf} i Ψ_s načinili sljedeće aproksimacije:

$$\frac{1-\varepsilon_{mf}}{\Psi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \cong 11 \qquad \text{i} \qquad \frac{1}{\Psi_s \varepsilon_{mf}^3} \cong 14 ,$$

te dobili izraz:

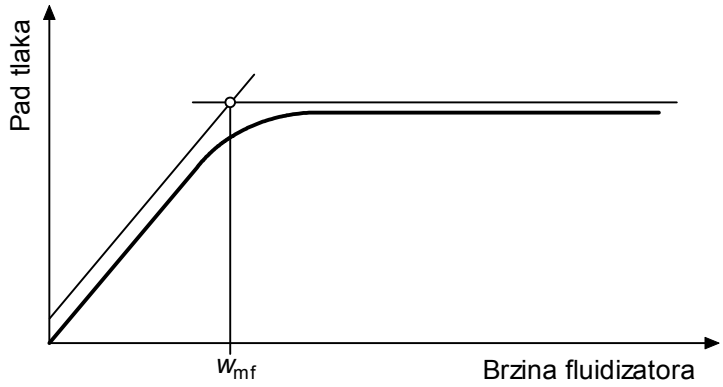
$$Ar = 1650 Re_{\mathrm{mf}} + 24{,}5 Re_{\mathrm{mf}}^2 . \tag{2-34}$$

Jednadžba (2-34) vrijedi za plinsku fluidizaciju, sferične čestice veće od 100 μm i *Reynoldsove* brojeve u rasponu $0{,}01 < Re_{\mathrm{mf}} < 1000$.

Jednadžba koju je izveo *Baeyens* [36] koristi se za čestice manje od 100 μm:

$$w_{\mathrm{mf}} = \frac{\left(\rho_{\mathrm{p}} - \rho_{\mathrm{f}}\right)^{0{,}934} g^{0{,}934} d_{\mathrm{p}}^{1{,}8}}{1110 \eta_{\mathrm{f}}^{0{,}87} \rho_{\mathrm{f}}^{0{,}066}} . \tag{2-35}$$

Najtočnije vrijednosti poroznosti u stanju minimalne fluidizacije ipak se dobivaju eksperimentalnim putem, i to najčešće mjerenjem pada tlaka u fluidiziranom sloju. U fluidiziranom sloju pad tlaka fluidizatora ima neku konstantnu vrijednost neovisnu o porastu brzine fluidizatora, dok pri nižim brzinama pad tlaka raste približno linearno s porastom brzine. Minimalna brzina fluidizacije odgovara točki presjecišta između uzlaznog i ravnog dijela krivulje pada tlaka, kako je to prikazano na slici 2-14.



Slika 2-14. Eksperimentalno određivanje minimalne brzine fluidizacije

Eksperimentalno se minimalna brzina fluidizacije određuje još preko poroznosti sloja (vizualno se pokušava odrediti početak ekspanzije sloja) i preko mjerenja koeficijenta prijelaza topline u sloju (nastajanjem fluidiziranog sloja dolazi do naglog rasta koeficijenta prijelaza topline u sloju). Ove dvije metode se ipak rjeđe koriste jer se vizualno ne može dovoljno točno odrediti početak fluidizacije, dok je za mjerenje prijelaza topline u sloju potrebna određena oprema, odnosno znatno je skuplje nego mjerenje pada tlaka u sloju.

2.2.8 Brzina odnošenja čestica

Odnošenje čestica iz sloja započinje onda kada je brzina fluidizatora w_{kf} veća od brzine lebdjenja čestica w_{fp}. Kod homogene fluidizacije će količina odnesenih čestica, osim o toj brzini, ovisiti i o poroznosti sloja $\varepsilon_{\mathrm{kf}}$, dok će kod heterogene još ovisiti o pojavi mjehura, te o geometrijskim karakteristikama prostora iznad sloja. Heterogena fluidizacija je slična vrenju, pri čemu mjehuri izbacuju čestice iznad sloja, ali se zbog težine krupnije i teže čestice vraćaju

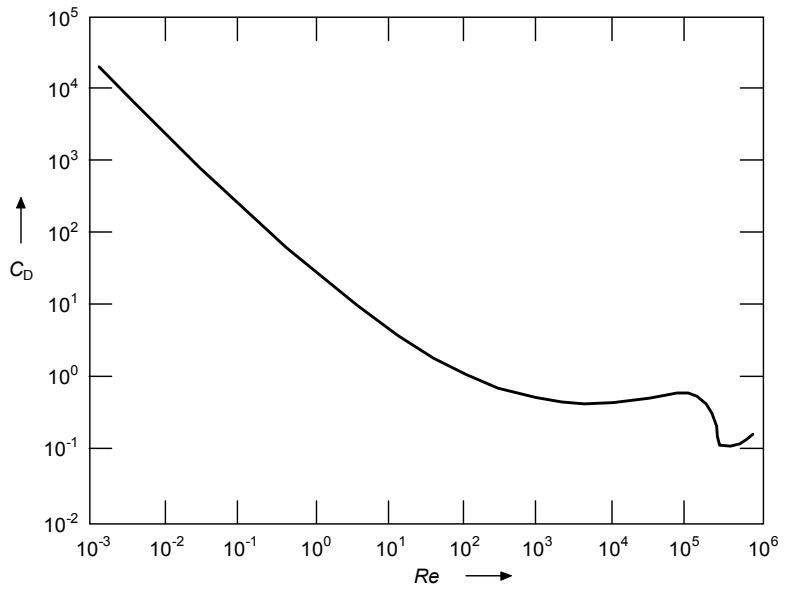
u sloj. Zbog toga površina sloja nije točno razgraničena i ovisit će o geometriji prostora iznad sloja. Ukoliko se sloj sastoji od čestica različite veličine, brzina odnošenja najmanje čestice može biti jednaka ili čak manja od minimalne brzine fluidizacije najveće čestice. U tom slučaju dolazi do odnošenja tih najmanjih čestica dok se najveće tek počinju fluidizirati ili još miruju. Čestice srednje veličine bit će u fluidiziranom stanju.

Brzina lebdjenja čestica w_{fp} može se izvesti iz zakona o slobodnom padu. Kad su čestice uronjene u mirnu tekućinu one se počinju nejednoliko gibati pod utjecajem sile teže. U momentu kad se djelovanje te sile izjednači sa silom otpora, čestice se počinju gibati jednoliko. (Može se reći da lebde u struji tekućine, ovisno o načinu gledanja) Sila otpora F_o općenito ovisi o brzini lebdjenja w_{fp} i promjeru čestice d_p, te o dinamičkoj žilavosti η_f i gustoći tekućine ρ_f.

Za kuglaste čestice sila otpora F_o može se izračunati pomoću jednadžbe:

$$F_o = (\pi / 8) d_p^2 w_{fp}^2 \rho_f C_D , \tag{2-36}$$

gdje je C_D faktor otpora trenja čestica koji se utvrđuje iskustveno u ovisnosti o *Reynoldsovoj* značajci *Re*. Eksperimentalne rezultate taloženja kuglastih čestica u mirnoj tekućini prikazuje slika 2-15.



Slika 2-15. Dijagramski prikaz ovisnosti faktora otpora trenja C_D o *Reynoldsovoj* značajci za pojedinačno nastrujanu kuglu

Ovisnost faktora trenja C_D o *Reynoldsovoj* značajci *Re*, prikazana na slici 2-15, može se razdijeliti na pet karakterističnih režima strujanja:

a) *Stokesovo* područje, $Re \leq 1$.

Strujanje tekućine oko čestice je laminarno. Faktor otpora trenja može se dobro aproksimirati jednadžbom:

$$C_D = 24 / Re . \tag{2-37}$$

b) prijelazno područje, $1 < Re < 10^3$.

Strujanje tekućine oko čestica nije izrazito laminarno i iza njih se počinju javljati vrtlozi. U području *Reynoldsovih* brojeva $1 < Re < 500$ dobiva se dobra podudarnost s mjerenim rezultatima ako se faktor otpora trenja aproksimira jednadžbom:

$$C_D = 18{,}5 / Re^{0,6} . \tag{2-38}$$

U području $500 < Re < 1000$ jednadžba (2-38) znatno odstupa od mjerenih veličina, pa se, u nedostatku izmjerenih podataka, može uzeti prosječna veličina $C_D = 0{,}44$.

c) *Newtonovo* područje, $10^3 < Re < 3 \cdot 10^5$.

Strujanje tekućine oko čestica je turbulentno s vrtlozima. Vrijednost faktora otpora trenja je od 0,4 do 0,5, ali se najčešće procjenjuje s $C_D = 0{,}44$.

d) Kritično područje, $Re \cong 3 \cdot 10^5$.

Strujanje tekućine oko čestica je turbulentno s izrazitim vrtlozima. Dolazi i do kidanja laminarnog graničnog sloja na površini čestica. Faktor otpora trenja C_D ima vrijednost od 0,4 do 0,09.

e) Nadkritično područje, $Re > 3 \cdot 10^5$.

Dolazi do formiranja turbulentnog graničnog sloja oko površina čestica, a strujanje tekućine je izrazito vrtložno. Vrijednost faktora otpora trenja može se procijeniti jednadžbom *Kaskasa* i *Brauera* [37]:

$$C_D = 24 / Re + 4 / Re^{0,5} + 0{,}4 . \tag{2-39}$$

Osim ovih jednadžbi koje vrijede za pojedine režime strujanja, provedena su istraživanja s ciljem utvrđivanja jedinstvene opće jednadžbe. Dobre rezultate postigli su *Heider* i *Levenspiel* [38] s jednadžbom:

$$C_D = 24 / Re\left(1 + 0.1806 Re^{0,6459}\right) + 0{,}4251 / \left(1 + 6880{,}95 / Re\right), \tag{2-40}$$

koja se može koristiti ukoliko je $Re < 2{,}6 \cdot 10^5$.

Za *nekuglaste* čestice postoje različite empirijske jednadžbe za izračunavanje faktora otpora trenja i sile otpora, ali je za njihovo korištenje potrebno poznavati *Wadellov* faktor sfericiteta Ψ_s. *Reynoldsova* značajka *Re* se tada računa pomoću ekvivalentnog promjera čestice koji se definira promjerom kugle čiji je volumen jednak volumenu promatrane čestice $x_V = d_{ek}$.

Zgodan je postupak *R. Wollheima* [39] kojim se dosta jednostavno može utvrditi vrijednost sile otpora F_o bez poznavanja faktora sfericiteta. Jednadžba (2-36) može se napisati u transformiranom obliku

$$F_o = (\pi / 8) d_{ek}^2 w_{fp}^2 \rho_f C_D \xi_p , \tag{2-41}$$

gdje se faktor trenja C_D računa kao za kuglaste čestice, a zatim se njegova stvarna vrijednost za nekuglaste čestice dobiva množenjem s korekcijskim faktorom ξ_p otpora oblika čestice. Neke karakteristične vrijednosti faktora oblika čestice prikazane su u tablici 2-3.

Tablica 2-3. Korekcijski faktor ξ_p za područje $10^3 < Re < 10^5$

Oblik	ξ_p
kugla	1
sitne čestice raznih oblika	1,2 do 1,5
oktaedar	2,4
kocka	3,2
tetraedar	4,7
ploče (duž./šir./vis. = 10/5/1)	5

Ukoliko je poznata sila otpora čestice prema (2-36), brzina lebdjenja w_{fp} se može izračunati izjednačenjem sile uzgona:

$$F_u = gm_p - gm_f = gV_p(\rho_p - \rho_f),$$

i sile otpora čestice, pa se dobiva jednadžba:

$$w_{fp} = \left[4/3(\rho_p/\rho_f - 1)gd_p/C_D\right]^{0,5}, \tag{2-42}$$

koja nije prikladna za upotrebu s obzirom da je $C_D = C_D(w_{fp})$. Množenjem (2-42) s Re^2 i uvođenjem *Archimedove* značajke dobiva se oblik

$$C_D Re^2 = 4/3Ar, \tag{2-43}$$

koji se dalje može dodatno transformirati uvođenjem jedne od jednadžbi (2-37) do (2-40) za pojedine režime strujanja. Za nekuglaste čestice faktor otpora trenja mora se dodatno množiti s korekcijskim faktorom ξ_p oblika čestice ili, ukoliko je moguće, odrediti ga eksperimentalno.

Eksperimentalno se brzina odnošenja čestica može odrediti istim metodama kao i minimalna brzina fluidizacije, i to mjerenjem: (a) pada tlaka u sloju, (b) poroznosti (ekspanzije) sloja i (c) koeficijenta prijelaza topline u sloju. Kod sloja čestica istih dimenzija prilikom odnošenja čestica i razaranja fluidiziranog sloja vrijednost pada tlaka u sloju naglo padne na nulu, dok je taj pad u sloju čestica različite veličine postepen. Mjerenje ekspanzije sloja i ekstrapolacija poroznosti do vrijednosti jedan u dijagramu log w - log ε je isto vrlo popularna metoda. Najmanje se brzina odnošenja čestica određuje mjerenjem koeficijenta prijelaza topline u sloju zbog složenosti takvog ispitivanja.

2.2.9 Režimi plinske fluidizacije

U ovisnosti o brzini plina razlikuju se sljedeći režimi plinske fluidizacije: mirujući sloj čestica, homogena fluidizacija, mjehurasta fluidizacija, stapna fluidizacija, turbulentna fluidizacija, brza fluidizacija i pneumatski transport, odnosno odnošenje čestica iz sloja (slika 2-16).

a) Mirujući sloj čestica

Kod mirujućeg sloja čestica brzina fluidizatora je u rasponu $0 \le w \le w_{mf}$. Čestice miruju, a plin struji između čestica ne mijenjajući poroznost sloja.

b) Homogena fluidizacija

Brzina fluidizatora je u rasponu $w_{mf} \leq w \leq w_{mb}$, fluidizirani sloj glatko ekspandira bez pojave mjehura uz lagano miješanje čestica, a površina sloja je jasno definirana. Homogena fluidizacija s plinom kao fluidizatorom javlja se samo kod čestica grupe A prema *Geldartovoj* podjeli.

c) Mjehurasta fluidizacija

Raspon brzina fluidizatora je $w_{mb} \leq w \leq w_{msl}$. Mjehuri plina koji se formiraju iznad distributivne ploče neprestano se cijepaju i stapaju kako se dižu prema površini, pospješujući i intenzivirajući miješanje čestica što povoljno djeluje na odvijanje procesa izmjene mase i topline. Međutim, veličina mjehura pri tome ima vrlo veliku važnost jer plin u mjehuru dolazi u dodir samo s česticama u oblaku oko mjehura, pa se s porastom veličine mjehura smanjuje intenzitet tih dodira i učinkovitost odvijanja procesa. Zato se vrlo često u kolone ugrađuju interne cijevi i pregrade koje cijepaju mjehure s ciljem ograničenja njihova rasta.

d) Stapna fluidizacija

Brzina fluidizatora je u rasponu $w_{msl} \leq w \leq w_c$. Mjehuri plina zauzimaju cijeli promjer kolone, površina sloja raste i pada u jednakim vremenskim intervalima uz velike promjene tlaka u sloju koje odgovaraju frekvenciji nastajanja mjehura. Režim „stapne fluidizacije“ se javlja kad je visina kolone dva ili više puta veća od promjera kolone pa manji mjehuri imaju dovoljno vremena da se stope u velike. Kad je promjer mjehura oko 2/3 promjera kolone nastaje „stapna fluidizacija“.

e) Turbulentna fluidizacija

Brzina fluidizatora je u rasponu $w_c \leq w < w_{tr}$. Turbulentna fluidizacija se javlja kod većih brzina plina i za nju je karakteristično cijepanje velikih mjehura u sitne. Prijelaz između stapne i turbulentne fluidizacije nije moguće precizno odrediti jer to ovisi o kojoj grupi čestica se radi, no prilikom nastajanja turbulentnog sloja primjetno je smanjenje fluktuacije tlaka u sloju, a smanjuju se i vibracije. Zbog toga se turbulentna fluidizacija znatno više primjenjuje nego mjehurasta, pa se u novije vrijeme turbulentni fluidizirani slojevi puno koriste u mnogim katalitičkim i nekatalitičkim reakcijama. Kod turbulentne fluidizacije površina sloja je difuzna i teško je odrediti. *Lee* i *Kim* [40] predložili su izraz za kritični *Reynoldsov* broj pri kojem nastaje tranzicija u turbulentnu fluidizaciju:

$$Re_{kr} = 0{,}74 Ar^{0{,}485}, \tag{2-44}$$

i koji vrijedi za raspon *Archimedovih* brojeva $0{,}44 \leq Ar \leq 4{,}4 \cdot 10^7$.

f) Brza fluidizacija

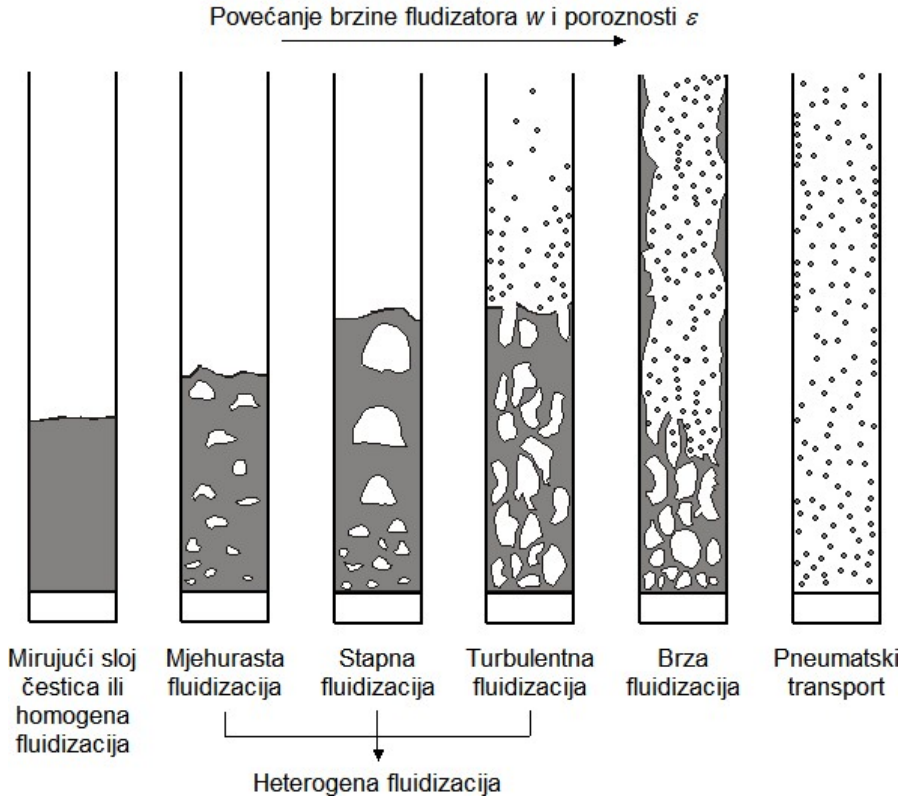
Brzina fluidizatora veća je od transportne brzine w_{tr}. Brzu fluidizaciju karakterizira postojanje samo guste faze s česticama i plinom bez mjehura, te vrlo intenzivno miješanje čestica. U ovom režimu dolazi do značajnog odnošenja čestica iz sloja jer je kod čestica grupe A i B brzina w_{tr} veća od brzine odnošenja čestica w_{kf}. Kod čestica grupe D transportna brzina w_{tr} veća je ili jednaka brzini odnošenja pojedinih čestica. Čestice se stoga moraju vraćati u kolonu pa se ovaj režim fluidizacije naziva i „cirkulirajućom fluidizacijom“. *Reynoldsov* broj kod kojeg se odvija tranzicija između turbulentne fluidizacije i brze može se procijeniti sljedećim izrazom:

$$Re_{tr} = 2{,}916 Ar^{0{,}354}\,, \tag{2-45}$$

koji vrijedi za *Archimedove* brojeve $1{,}22 \le Ar \le 5{,}7 \cdot 10^4$.

g) Pneumatski transport

Brzina fluidizatora puno je veća od brzine odnošenja čestica w_{kf} svih čestica u sloju. Sve čestice bivaju odnešene iz kolone, a poroznost sloja ε jednaka je 1.



Slika 2-16. Režimi plinske fludizacije

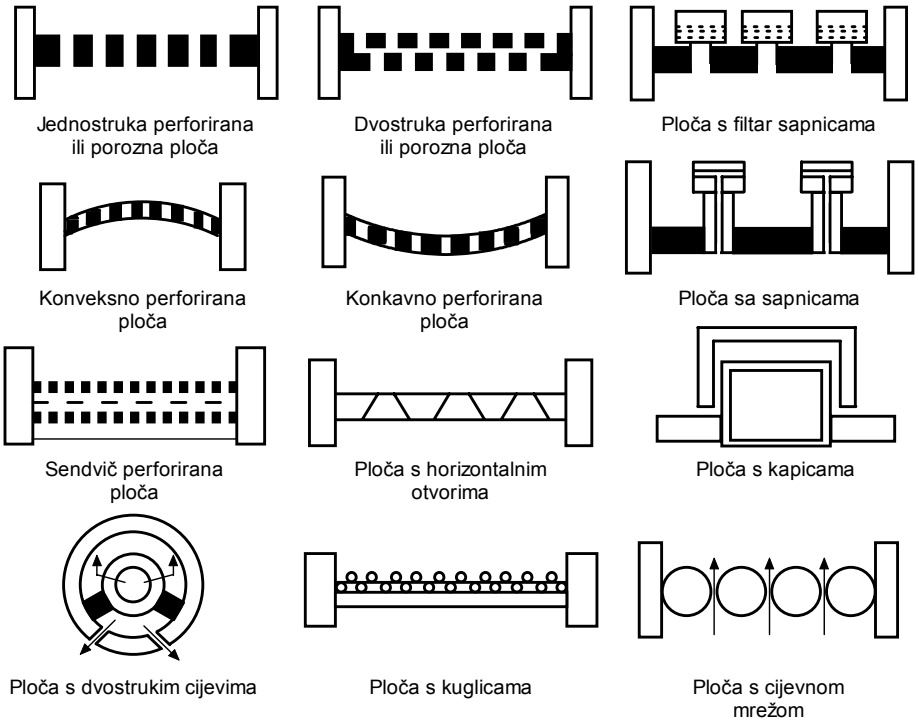
2.2.10 Distributivne ploče

Distributivna ploča spada u najvažnije elemente uređaja s fluidiziranim slojem. Njezine osnovne funkcija su podupiranje sloja čestica čvrste tvari i pravilna razdioba fluidizatora po presjeku sloja. Uz to, distributivna ploča mora još zadovoljiti i niz drugih zahtjeva kao što su omogućavanje pravilnog nastanka procesa fluidizacije, onemogućavanje propada čestica u tlačni kanal ili komoru, održavanje stabilne fluidizacije kroz različite radne režime, minimalna erozija površine, što manji pad tlaka, otpornost na kemijske utjecaje, čvrstoća, tvrdoća itd.

Vrlo važan utjecaj distributivne ploče je i na nastanak mjehura u fluidiziranom sloju, te na njihovu veličinu i broj. Naime poznato je da mjehuri nastaju na distributivnoj ploči i da imaju vrlo važan utjecaj na hidrodinamiku sloja. Mjehuri koji se dižu prema površini sloja povlače sa sobom i dio čestica, a kako je broj mjehura vrlo velik miješanje čestica je izrazito kompleksno i odvija se veoma brzo.

Distributivne ploče imaju vrlo važan utjecaj i na prijenos topline u sloju, osobito na maksimalnu vrijednost koeficijenta prijelaza topline, pa je stoga osobito važan odabir pravilne distributivne ploče.

Iako se u zadnja tri desetljeća mnogo pažnje posvetilo izučavanju veze između hidrodinamike fluidiziranog sloja i konstrukcije distributivne ploče, još uvijek ima mnogo nepoznanica u teorijskog opisu ovog problema. Zato standardni proračuni za konstruiranje distributivnih ploča u praksi još ne postoje, ali se vrlo dobre smjernice mogu naći u literaturi [19, 41-43]. Neki osnovni tipovi ploča su prikazani na slici 2-17.



Slika 2-17. Različiti tipovi distributivnih ploča

Najčešće korišten tip ploča su *porozne ploče* koje se rade od sinterirane keramike ili metala. Ploče tog tipa imaju linearnu karakteristiku otpora strujanju plina i daju fluidizaciju najbolje kvalitete pa su zato najčešće korišten tip ploča kod manjih kolona ili pri laboratorijskim uvjetima. Inače je kod tog tipa ploča karakteristično da se prvo formira veoma ekspandirana i nestabilna disperzija plina i čestica odmah iznad same ploče, koja se zatim vrlo brzo razgrađuje u gustu i mjehurastu fazu. Mjehuri koji nastaju su vrlo sitni i u velikom broju, no jako brzo se međusobno spajaju prilikom dizanja prema površini. Porozne ploče se zbog određenih nedostataka ipak puno rjeđe koriste u industrijskim uvjetima. Te ploče, naime, uzrokuju dosta velik pad tlaka fluidizatora, problematična je i izrada pora točno određene veličine, kod većih temperatura dolazi do širenja materijala što može poremetiti pore na ploči, a kod onečišćenih plinova lako se začepe. Također se ploče većeg promjera moraju raditi zavarivanjem iz više dijelova što onda stvara određene zone na ploči kroz koje ne može protjecati fluidizator. Kod tih ploča se vrlo često izrađuju kombinacije s filtar papirom ili nekim sličnim pokrovom kako bi se postigla pravilna raspodjela fluidizatora i određeni pad tlaka na ploči. Moguća je i kombinacija više poroznih ploča s takvim pokrovom koje onda tvore sendvič sloj.

Perforirane ploče se najčešće koriste u industriji jer imaju veće otvore pa se stoga lakše proizvode i stvaraju manji pad tlaka. Nedostatak im je propuštanje čestica u tlačnu komoru ili kanal, bez obzira na relativno velike brzine fluidizatora, što se dešava zbog nejednolike raspodjele fluidizatora kroz sve otvore. Stoga se najčešće koristi kombinacija više ploča s nekim pokrovom u obliku sendvič sloja. Često se te ploče rade zakrivljene (konveksne ili konkavne) ili s nekim ojačanjem kako bi mogle nositi težinu sloja. Promjeri otvora na tim pločama variraju od 1 do 2 mm kod manjih ploča koje se koriste za istraživanje u laboratorijima, ili sve do 50 mm u veoma velikim kemijskim reaktorima.

Ploče sa sapnicama različitih oblika su pogodne jer ne propuštaju čestice, a prednost im je što im otpor strujanju raste s kvadratom masenog protoka fluidizatora. Vrlo često se koriste kod većih i dubokih slojeva.

Ploče s kuglicama se koriste kod prašinom onečišćenih fluidizatora, dok se ploče s cijevnom mrežom upotrebljavaju kod većih jedinica.

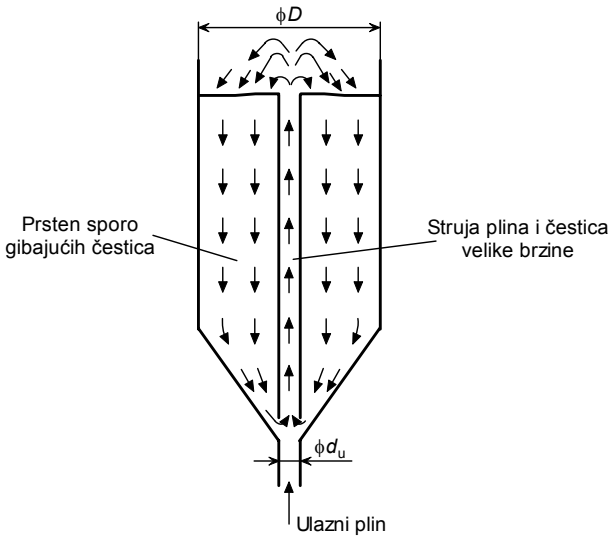
Ploče u obliku dvostrukih cijevi nemaju potrebu za tlačnim komorama, nego se mogu postaviti izravno na kanal.

Pada tlaka u ploči mora biti dovoljan kako bi se osigurala jednolika distribucija fluidizatora kroz sve otvore ploče te se na taj način dobila stabilna fluidizacija, no pri tome treba paziti da pad tlaka ne bude prevelik jer bi to uzrokovalo povećanu potrošnju energije za pogon kompresora. Za pad tlaka kod plitkog sloja čestica preporučuje se da bude istog reda veličine kao i pad tlaka u sloju (*Richardson* [44]). *Hiby* [45] je za male brzine plina $w_f / w_{mf} \cong 1-2$ preporučio da pad tlaka u ploči bude oko 0,15, a za veće brzine $w_f / w_{mf} >> 2$ oko 0,015 pada tlaka u sloju. *Siegel* [46] je također preporučio minimalnu vrijednost od 0,14 za $\Delta p_D / \Delta p$, dok su *Shi* i *Fan* [47] isto preporučili 0,14 za porozne ploče i 0,07 za perforirane.

2.2.11 Ostali oblici fluidizacije

2.2.11.1 Fontanski sloj

Fluidizirani slojevi koji se ostvaruju u cilindričnim posudama jednakog poprečnog presjeka imaju određene nedostatke. Slojevi s većim česticama, pogotovo sa širokom raspodjelom veličina, teško se fluidiziraju, a kod viših temperatura čestice se mogu zalijepiti za distributivnu ploču ili međusobno. U tom slučaju se više upotrebljava fontanski sloj nego potpuno fluidiziran. Fontanski sloj ostvaruje se u cilindričnoj posudi s bazom koničnog oblika i centralnom vertikalnom cijevi postavljenom na vrh konusa kroz koju velikom brzinom struji plin s česticama. Na izlazu iz cijevi čestice šikljaju (kao kod fontane), te padaju natrag u sloj u kojem se polako kreću prema dnu, pri čemu struja plina sporo prostrujava između čestica u suprotnom smjeru prema površini sloja. Na dnu koničnog dijela struja plina ponovno povlači čestice sa sobom. Time je zatvoren jedan ciklus. Kod fontanskog sloja su ti ciklusi točno definirani i odvijaju se u pravilnim intervalima, a zbog konstrukcije uređaja osigurano je stalno miješanje čestica te minimalno vrijeme dodira čestica s plinom kako bi došlo do reakcije.



Slika 2-18. Fontanski sloj

Postoje određeni uvjeti za stvaranje dobrog fontanskog sloja. On se može ostvariti samo s česticama promjera većeg od 1-2 mm (normalno su to čestice od 1 do 30 mm), vršni kut koničnog dijela posude također ne smije biti prevelik jer sloj postaje nestabilan, normalno je oko 30 do 50°, omjer cilindričnog dijela posude D prema promjeru ulazne cijevi d_u je 2-4, a dubina sloja Z bi morala biti najmanje $2D$ i manja od neke maksimalne dubine Z_{ms}. Naime, pad tlaka u sloju ne raste ujednačeno, najmanji je na dnu sloja a najveći na površini gdje se približava onom padu tlaka koji je dovoljan za podizanje čestica, odnosno postizanje stanja minimalne fluidizacije. Prema tome postoji neka maksimalna visina sloja Z_{ms} kada fontanski sloj postaje nestabilan te se pretvara u fluidizirani sloj. Kod te visine sloja brzina je približno jednaka minimalnoj brzini fluidizacije w_{mf}. U praksi će visine fontanskog sloja ipak biti daleko manje od Z_{ms}, kao i brzine w_{ms} prema w_{mf}.

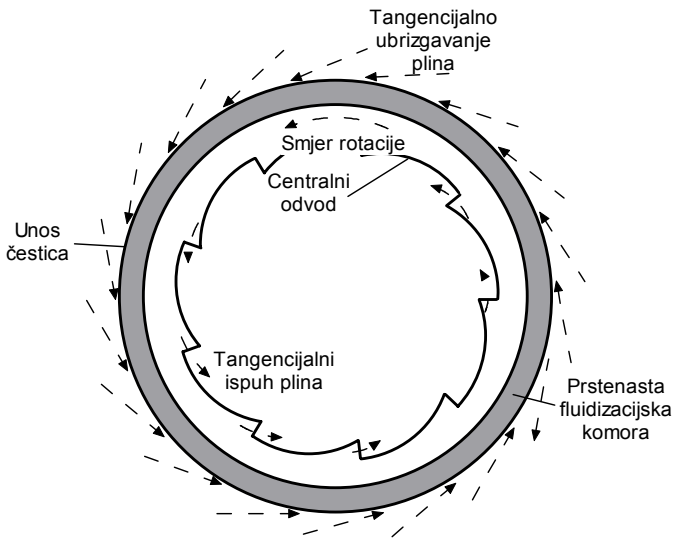
Kao i kod fluidizacije postoji minimalna brzina kod koje se formira fontanski sloj, a jedna od najranijih korelacija je ona od *Mathura* i *Gishlera* [48]:

$$w_{ms} = \left(\frac{d_p}{D}\right)\left(\frac{d}{D}\right)^{0,33}\left(\frac{2gZ\left(\rho_p - \rho_f\right)}{\rho_f}\right)^{0,5}, \tag{2-46}$$

U literaturi se mogu naći podaci za brzine w_{ms} za različite vrste čestica. *Mathur* [49] je tako dao podatke za pšenicu, sjeme gorušice, uljanu repicu, proso i grašak jer se fontanski slojevi često upotrebljavaju za sušenje žitarica koje se zbog veličine dosta teško mogu fluidizirati. U svim tim slučajevima jednadžba (2-46) pokazala se dosta točnom.

2.2.11.2 Centrifugalna fluidizacija

Centrifugalna fluidizacija služi za fluidiziranje velikih, nepravilnih čestica pri brzinama koje uvelike premašuju brzine pneumatskog transporta. Osim toga se, zbog velikih brzina, postiže veliki intenzitet prijenosa topline pri mnogo nižim temperaturama nego što bi inače bile potrebne. Zato se centrifugalna fluidizacija najviše koristi za početno sušenje ljepljivih, vlažnih i toplinski osjetljivih prehrambenih proizvoda.



Slika 2-19. Centrifugalna fluidizacija

2.3 PRIJENOS TOPLINE U FLUIDIZIRANOM SLOJU PLIN-ČESTICE

U fluidiziranim slojevima ostvaruje se značajno veći intenzitet prijenosa topline u odnosu na običnu plinsku konvekciju zbog dva efekta: s jedne strane se razgrađuje hidrodinamički granični sloj oko krute stijenke atakiranjem čestica na uronjenu površinu, a s druge strane se povećava izmjenjivačka površina na strani plina zbog prisutnosti krutih čestica u struji plina (efekt proširenih površina). Površina čestica po jedinici volumena sloja kod plinske fluidizacije iznosi oko 3000 do 45000 m^2/m^3, toplinski kapacitet fluidiziranog sloja je oko 10^6 J/(m^3 K), dok se vrijednosti koeficijenta prijelaza topline kreću oko 250 do 700 W/(m^2 K). Osim toga postoji i vrlo intenzivno miješanje čestica. Posljedica toga je da se u sloju vrlo brzo postiže toplinska ravnoteža, pa se kod proračuna prijenosa topline vrlo često pretpostavljaju izotermni uvjeti u sloju.

Fluidizacija se zbog tih svojih važnih karakteristika zato i koristi kod procesa kao što su sušenje i smrzavanje čestica.

U većini aplikacija toplina se u procesu dovodi putem ulaznog vrućeg zraka, no često se koriste i uronjene izmjenjivačke površine. Toplina se na isti način može i odvoditi iz procesa. Prijenos topline u sloju odvija se mehanizmima provođenja, konvekcije i zračenja. Udio svakog od tih načina u ukupnoj prenesenoj toplini ovisi o uvjetima strujanja, svojstvima čestica i temperaturi sloja.

Prijenos topline u plinskim fluidiziranim slojevima obično se grupira u prijenos topline između: (a) plina i čestica, (b) fluidiziranog sloja i uronjene krute stijenke i (c) fluidiziranog sloja i uronjenog snopa cijevi.

Korelacije za prijenos topline u sloju obično imaju oblik:

$$Nu = f(Re, Pr), \tag{2-47}$$

odnosno:

$$Nu = CRe^a Pr^b , \tag{2-48}$$

gdje su C, a i b konstante dobivene najčešće eksperimentalnim mjerenjem, a koje ovise o geometriji i prirodi izmjene topline.

2.3.1 Prijenos topline između plina i čestica u fluidiziranom sloju

Kad se toplina u nekom procesu s fluidiziranim slojem dovodi putem vrućeg zraka, vrlo brzo, gotovo odmah iznad distributivne ploče, dolazi do izjednačavanja temperatura zraka i sloja pri čemu je, zbog vrlo intenzivnog miješanja čestica, temperaturna distribucija unutar sloja praktički izotermna. Značajniji temperaturni gradijenti su prisutni tek kod postojanja određenih temperaturnih ponora u sloju ili npr. kod procesa sušenja vlažnih čestica zbog ishlapljivanja. Iako koeficijenti prijelaza topline plin-čestice nisu veliki te prema *Botterillu* [29] iznose oko 20 W/(m^2 K), u fluidiziranom sloju je to kompenzirano vrlo velikom specifičnom površinom čestica.

Minimalna vrijednost *Nusseltova* broja kod prijenosa topline plin-čestice može se dobiti teorijskom analizom slučaja prijenosa topline između jedne sferične čestice i plina kad ne postoji relativna brzina između njih, i ta vrijednost iznosi $Nu = 2$. Prijenos topline se u tom slučaju odvija samo provođenjem kroz granični sloj oko čestice.

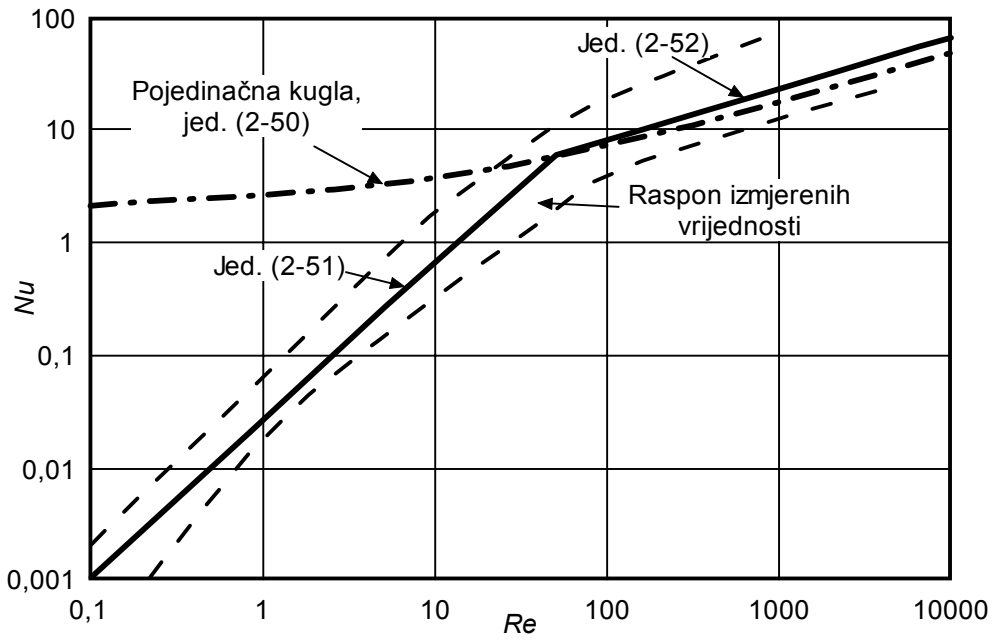
Kad postoji relativna brzina između sferične čestice i struje plina, prijenos topline može se izračunati pomoću jednadžbe oblika:

$$Nu = 2 + CRe^a Pr^b , \tag{2-49}$$

Često se kod većih brzina zna i zanemariti udio provođenja pa jednadžba (2-49) poprima oblik (2-48).

Kunii i *Levenspiel* [20] sakupili su eksperimentalno dobivene rezultate koeficijenta prijelaza topline plin-čestice iz 22 različite studije i prikazali ih u obliku dijagrama na slici 2-20. U svim mjerenjima je vrijednost *Prandtlove* značajke za plin bila $Pr \cong 0{,}7$. U isti dijagram je radi usporedbe ucrtana i poznata *Ranzova* [50] korelacija za konvekciju s pojedinačne kuglaste čestice:

$$Nu = 2 + 0{,}6 Re^{0{,}5} Pr^{0{,}33} . \tag{2-50}$$



Slika 2-20. *Nusseltovi* brojevi kod prijelaza topline plin-čestice u heterogenom fluidiziranom sloju za $Pr = 0{,}7$ [20]

Kao što se može vidjeti sa slike dobivene vrijednosti *Nusseltova* broja su za vrlo male *Reynoldsove* brojeve $Re < 20$ manje od teorijski minimalne vrijednosti $Nu = 2$. Objašnjenje toga je što se mali *Reynoldsovi* brojevi javljaju u sloju sitnih čestica kroz koji veći dio plina prolazi u obliku velikih mjehura (i oblaka plina oko njih) što smanjuje efikasnost dodira između plina i čestica. U sloju s većim česticama veće su i brzine plina, a mjehuri su manji (uz minimalnu debljinu oblaka plina) pa je dodir između plina i čestica puno bolji. Tek za $Re > 60$ vrijednosti *Nu* značajke u fluidiziranom sloju postaju veće od vrijednosti za pojedinačnu česticu.

Eksperimentalni podaci prikazani na slici 2-20 mogu se aproksimirati sljedećim jednadžbama:

$$Nu = 0{,}0282 Re^{1,4} Pr^{0,33}, \tag{2-51}$$

koja vrijedi za raspon *Reynoldsovih* brojeva $0{,}1 \le Re \le 50$, te:

$$Nu = 1{,}01 Re^{0,48} Pr^{0,33}, \tag{2-52}$$

koja vrijedi za $50 < Re \le 10^4$.

U gornjim jednadžbama *Nusseltova* značajka je definirana kao:

$$Nu = \frac{\alpha_\mathrm{p} d_\mathrm{p}}{\lambda_\mathrm{f}}.$$

Kunii i *Levenspiel* [20] još su naznačili da se za vrlo niske *Reynoldsove* brojeve $Re < 10$ može koristiti i *Kotharijeva* jednadžba:

$$Nu = 0{,}03Re^{1{,}3}\,, \tag{2-53}$$

iako bi prema *Boterrillu* [29] vrijednost eksponenta na *Reynoldsovoj* značajci ipak trebala biti nešto niža, što su pokazale neke druge studije, pa je on predložio vrijednost 0,77.

2.3.2 Prijenos topline između fluidiziranog sloja i uronjene krute stijenke

Osnovna jednadžba pomoću koje se računa koeficijent prijelaza topline između fluidiziranog sloja i uronjene krute stijenke je:

$$\alpha = \frac{\Phi}{A_0\left(\vartheta_\mathrm{s} - \vartheta_\infty\right)}, \tag{2-54}$$

gdje je Φ sveukupno izmijenjeni toplinski tok, A_0 površina prijenosa topline uronjene krute stijenke, ϑ_s temperatura površine stijenke i ϑ_∞ prosječna temperatura fluidiziranog sloja.

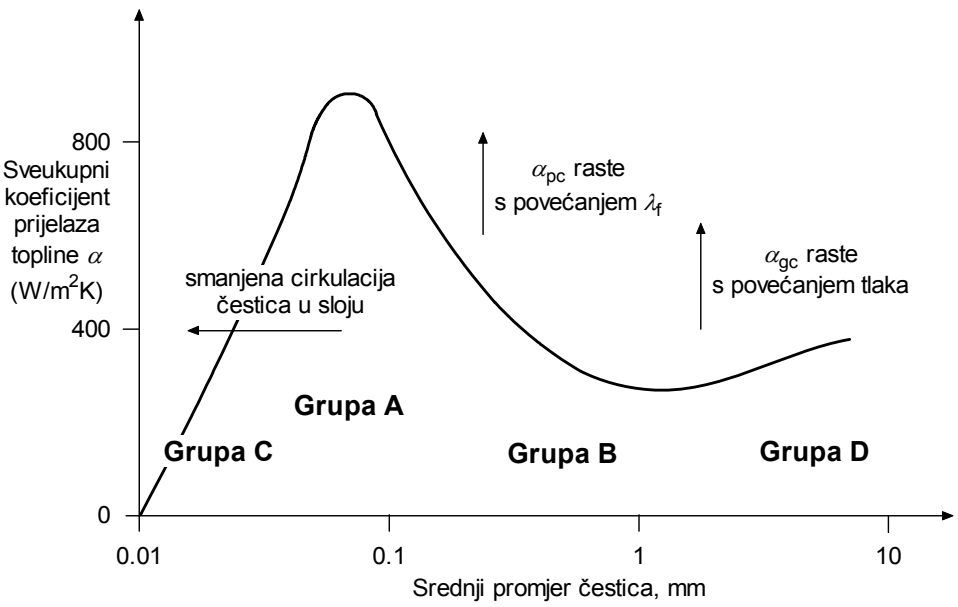
Prema novijoj literaturi prijenos topline između heterogenog fluidiziranog sloja i uronjene krute stijenke, s plinom kao fluidizatorom, može se razdijeliti na tri međusobno neovisna načina: konvekciju čestica, plinsku konvekciju i zračenje.

Za svaki od tih načina prijenosa topline može se izračunati koeficijent prijelaza topline neovisan o ostalima, pa se sveukupni koeficijent prijelaza topline α tada izražava kao njihova suma:

$$\alpha = \alpha_\mathrm{pc} + \alpha_\mathrm{gc} + \alpha_\mathrm{r}\,. \tag{2-55}$$

gdje je α_pc koeficijent prijelaza topline konvekcijom čestica, α_gc koeficijent prijelaza topline plinskom konvekcijom i α_r koeficijent prijelaza topline zračenjem.

Na slici 2-21 prema *Botterillu* [29] kvalitativno su ucrtane vrijednosti sveukupnog koeficijenta prijelaza topline koji se mogu očekivati za pojedine grupe čestica. Uočljivo je da konvekcija čestica postaje dominantna u odnosu na ostala dva mehanizma kad se radi o malim česticama (grupa A i B), dok je konvekcija plina dominantna kod većih čestica. Na slici nije naznačen utjecaj zračenja, ali on postaje značajan tek kod visokih temperatura.



Slika 2-21. Kvalitativne vrijednosti sveukupnog koeficijenta prijelaza topline između fluidiziranog sloja i uronjene krute stijenke [29]

Na osnovu eksperimentalnih istraživanja prijenosa topline između plinskog fluidiziranog sloja i uronjene krute stijenke došlo se do određenih zaključaka o utjecaju pojedinih parametara na koeficijent prijelaza topline:

a) brzina fluidizatora

S povećanjem brzine iznad minimalne brzine fluidizacije povećava se i vrijednost α, sve dok se ne postigne neka optimalna brzina iznad koje počinje lagano opadanje vrijednosti α.

b) veličina čestica

Smanjivanjem veličine čestica postiže se povećanje α, ali se pri tome ne smije pretjerati jer manje čestice imaju i manju pokretljivost što onda smanjuje vrijednost koeficijenta prijelaza topline.

c) toplinska provodnost čestica

S povećanjem toplinske provodnosti čestica povećava se i α.

d) specifični toplinski kapacitet čestica

Koeficijent prijelaza topline α mijenja se proporcionalno s c_p^n, gdje je $0{,}25 < n < 0{,}8$.

e) specifični toplinski kapacitet plina

Kod umjereno visokih tlakova i brzina plina podaci su proturječni, no pri visokim tlakovima plina povećava se α jer se povećava i specifični toplinski kapacitet plina.

f) toplinska provodnost plina

S povećanjem koeficijenta toplinske provodnosti plina povećava se i α.

g) visina fluidiziranog sloja

Za ekspandirani fluidizirani sloj i dobro uronjenu krutu stijenku α ne ovisi o visini sloja.

h) zona fluidizacije iznad distributivne ploče

Fluidizirani sloj neposredno iznad distributivne ploče je pod jakim utjecajem konstrukcije i tipa distributivne ploče, pa će to onda utjecati i na vrijednost α. U dijelovima gdje je veća koncentracija čestica bit će i bolja izmjena topline, odnosno veći α.

i) promjer kolone

Za promjer kolone ne postoji dovoljno podataka o utjecaju na α.

j) površina prijenosa topline

Povećanjem površine izmjene topline povećava se α.

k) promjer cijevnog snopa

Sa smanjenjem promjera cijevi povećava se α.

l) vertikalno uronjeni cijevni snop prema horizontalno uronjenom

Kod vertikalno uronjenog cijevnog snopa vrijednost α je za oko 5-15% veća u odnosu na horizontalno uronjeni cijevni snop. Orijentacija cijevnog snopa ipak ovisi o konstrukciji i tehnološkim uvjetima.

m) cijevni snop

Na α utječe omjer razmaka između cijevi i promjera cijevi. Kod manjeg omjera manja je i vrijednost α. Kod gustog pakiranja cijevi α može pasti 35 do 50%.

n) temperatura sloja

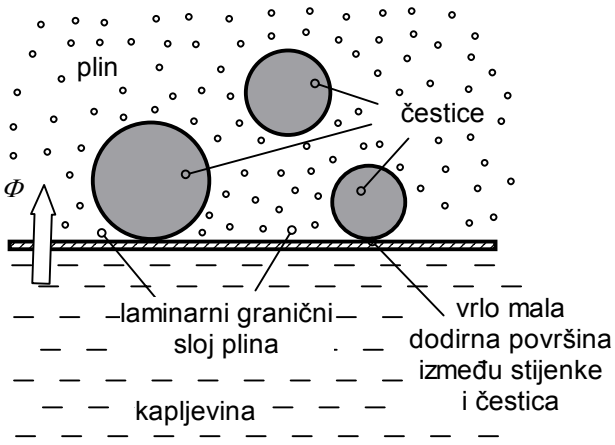
S povećanjem temperature sloja povećava se udio plinske konvekcije kod manjih čestica ($d_p < 0{,}5$ mm), dok se kod većih čestica smanjuje ($d_p > 0{,}5$ mm).

o) tlak plina

Povećanje tlaka plina nema utjecaja na konvekciju čestica. Plinska konvekcija se povećava proporcionalno drugom korijenu gustoće plina.

2.3.2.1 Konvekcija čestica

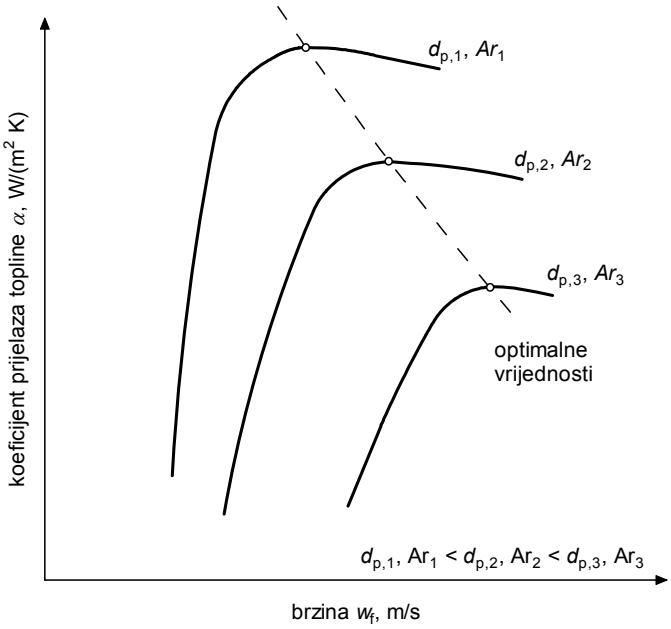
Konvekcija čestica zasniva se na komešanju različito temperiranih čestica unutar fluidiziranog sloja, pri čemu toplije čestice izravnim dodirima prenose i predaju toplinu hladnijim česticama. Limitirajući faktori pri tom prijenosu su vrlo mala dodirna površina (stijenka-čestice i čestice-čestice), i koeficijent toplinske provodnosti plina λ_f, jer se toplina, pri njihovim dodirima, jednim dijelom prenosi i provođenjem kroz laminarni granični sloj plina („klin“ plina) koji nastaje na dodirnim površinama (slika 2-22).



Slika 2-22. Prijenos topline između kapljevine i fluidiziranog sloja plin-čestice

Povećanje intenziteta prijenosa topline konvekcijom čestica može se postići na tri načina: povećanjem brzine plina, smanjivanjem veličine čestica i povećanjem koeficijenta toplinske provodnosti plina.

Povećanjem brzine strujanja plina povećava se vrijednost koeficijenta prijelaza topline α_{pc} sve do postizanja maksimuma $\alpha_{pc,maks}$ pri nekoj optimalnoj brzini plina. Nakon toga započinje opadanje jer se smanjuje površina prijenosa topline kako raste broj i veličina mjehura. Ipak treba naglasiti da to opadanje nije naglo i da se visoke vrijednosti koeficijenta prijelaza topline dosta dugo zadržavaju. Ovisnost sveukupnog koeficijenta prijelaza topline (za različite veličine čestica i vrijednosti *Archimedove* značajke) o brzini fluidizatora kvalitativno je prikazana na slici 2-23.



Slika 2-23. Utjecaj brzine plina na sveukupni koeficijent prijelaza topline

Smanjivanjem veličine čestica postiže se povećanje koeficijenta prijelaza topline jer se smanjuje debljina graničnog sloja oko krute stijenke, ali se pri tome ne smije pretjerati jer manje čestice imaju i manju pokretljivost što onda smanjuje koeficijent prijelaza topline.

Određivanje koeficijenta prijelaza topline konvekcijom čestica α_{pc} teško je zbog hidrodinamičke složenosti zbivanja u fluidiziranom sloju, kao i prisustva rjeđe i gušće faze u sloju (mjehuri i čestice s fluidizatorom). Određeni modeli se mogu pronaći u literaturi, no za proračun maksimalnog sveukupnog koeficijenta prijelaza topline kod konvekcije čestica kao dominantnog načina izmjene topline, mogu se koristiti i neke empirijske jednadžbe.

Tako se za čestice grupe B može koristiti često citirana jednadžba *Zabrodskog* [51]:

$$\alpha_{\mathrm{maks}} = 35{,}8 \frac{\lambda_{\mathrm{f}}^{0,6} \rho_{\mathrm{p}}^{0,2}}{d_{\mathrm{p}}^{0,36}}, \tag{2-56}$$

dok se jednadžba *Khana* [52] može koristiti za čestice grupe A:

$$Nu_{\mathrm{maks}} = 0{,}157\, Ar^{0,475}. \tag{2-57}$$

Konvekcija čestica predstavlja dominantan način prijenosa topline kod čestica grupe A i B koje fluidiziraju na manjim brzinama pa je prostrujavanje plina kroz fluidizirani sloj laminarno.

2.3.2.2 Plinska konvekcija

Plinska konvekcija postaje dominantna kod krupnijih čestica (grupa D), koje fluidiziraju na većim brzinama, pri čemu se ostvaruje prijelazno ili turbulentno strujanje plina između čestica. Kod plinske konvekcije za prijelaz topline veoma je značajna vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta plina. Stoga se fluidizacija čestica veće granulacije često provodi kod većeg radnog tlaka, pri čemu c_p plina ima nešto veću vrijednost što onda rezultira i većim koeficijentom prijelaza topline α_{gc}.

Za računanje koeficijenta prijelaza topline α_{gc} postoje mnoge iskustvene jednadžbe jer je fenomen plinske konvekcije dobro istražen. Za proračun se često citira jednadžba *Baskakova* [53]:

$$\alpha_{\mathrm{gc}} = 0{,}009 \frac{\lambda_{\mathrm{f}}}{d_{\mathrm{p}}} Ar^{1/2} Pr^{1/3}, \tag{2-58}$$

koja vrijedi za čestice veličine 0,16 mm $\leq d_{\mathrm{p}} \leq$ 4 mm i koja je potvrđena kao dovoljno dobra i na osnovu mjernih rezultata drugih autora.

Za proračun se može koristiti i jednadžba prema *Botterillu* i *Denloyu* [54]:

$$\alpha_{\mathrm{gc}} = 0{,}86 \frac{\lambda_{\mathrm{f}}}{d_{\mathrm{p}}^{0,5}} Ar^{0,39}, \tag{2-59}$$

koja vrijedi za $10^3 < Ar < 2 \cdot 10^6$ i tlak fluidizatora do 1 MPa.

2.3.2.3 Zračenje

Koeficijent prijelaza topline zračenjem α_r između fluidiziranog sloja temperature T_∞ i uronjenje krute stijenke temperature T_s može se izračunati pomoću jednadžbe:

$$\alpha_r = \frac{q_r}{(T_\infty - T_s)} = e_{\infty s}\sigma\left(T_\infty^4 - T_s^4\right), \tag{2-60}$$

gdje je q_r gustoća toplinskog toka zračenjem, σ = 5,67 · 10^{-8} W/(m^2 K^4) *Stefan - Boltzmannova* konstanta, ili univerzalna konstanta zračenja, i $e_{\infty s}$ efektivni emisijski faktor sustava uronjena površina-fluidizirani sloj koji se računa kao:

$$e_{\infty s} = \left(1/e_\infty + 1/e_s - 1\right)^{-1}, \tag{2-61}$$

gdje je e_∞ emisijski faktor sloja, a e_s emisijski faktor stijenke.

Emisijski faktor stijenke e_s je poznata veličina ovisna o materijalu stijenke, dok se emisijski faktor sloja e_∞ treba odrediti. Za slojeve normalnih dimenzija e_∞ se za gotovo sve čestice približava jedinici, a obično se uzima vrijednost oko 0,9. Inače je vrijednost e_∞ veća od emisijskog faktora pojedinih čestica e_p zbog višestrukih refleksija s površina. Iz istog razloga nepravilna čestica ima veći emisijski faktor nego glatka čestica iz istog materijala. Efektivni emisijski faktor $e_{\infty s}$ može se procijeniti i jednadžbom prema *Graceu* [55]:

$$e_{\infty s} \approx 0{,}5\left(1 + e_p\right). \tag{2-62}$$

Eksperimentalno dobiveni podaci za čestice slične pijesku pokazuju da se vrijednosti $e_{\infty s}$ kreću između 0,8 i 1 kod temperatura iznad 700 °C. Mjerenja su isto tako pokazala da $e_{\infty s}$ gotovo ne ovisi o brzini fluidizatora.

Prijenos topline zračenjem ima vrlo važnu ulogu kod viših temperatura (iznad 600 °C), a koeficijent prijelaza topline zračenjem α_r ima visoke vrijednosti kod temperatura iznad 1000 °C što je slučaj kod npr. izgaranja u fluidiziranom ložištu. Eksperimentalna istraživanja pokazala su da je udio zračenja u ukupnoj izmjeni topline manji od 15% kod temperatura manjih od 500 °C, i veći od 35% za temperature veće od 800 °C.

2.4 PRIJENOS TVARI U FLUIDIZIRANOM SLOJU PLIN-ČESTICE

Ukoliko u nekom sustavu postoji razlika koncentracije neke tvari od točke do točke u prostoru, tada postoji prirodna tendencija da se ta tvar prenosi čak i kod minimalne razlike koncentracija. Prijenos iz područja više koncentracije u područje niže koncentracije naziva se *prijenosom tvari*.

Prijenos tvari može se, analogno prijenosu topline, odvijati *molekularnim mehanizmom* (*difuzija*) ili *konvektivnim mehanizmom*. U slučaju kada djeluju oba mehanizma, vrlo često se radi pojednostavljenja modela primjenjuje samo dominirajući mehanizam.

Gustoća toka neke tvari (fluks tvari) N, mol/(m^2 s) kod prijenosa tvari *difuzijom* definira se pomoću *Prvog Fickovog zakona difuzije* koji za model jednodimenzijske stacionarne difuzije glasi:

$$N = -D\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}x}, \tag{2-63}$$

gdje je D difuzivnost, m^2/s, c je molna koncentracija tvari, mol/m^3, a dc/dx je gradijent koncentracije.

Ukoliko se gradijent koncentracije mijenja s vremenom onda se promjena koncentracije računa diferencijalnom jednadžbom poznatom kao *Drugi Fickov zakon difuzije* koja za model jednodimenzijske nestacionarne difuzije ima oblik:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}\right). \tag{2-64}$$

Rješenje jednadžbe (2-64) je koncentracijski profil u ovisnosti o vremenu i koordinati x, $c = f(x,t)$.

Konvektivni prijenos tvari predstavlja prijenos između fluida u gibanju i površine, a kao i kod prijenosa topline razlikuje se:

- prijenos tvari prisilnom konvekcijom kad je gibanje fluida uzrokovano narinutom silom;
- prijenos tvari prirodnom konvekcijom kad je gibanje fluida uzrokovano razlikom lokalnih gustoća koje su nastale razlikom lokalnih koncentracija.

Gustoća toka neke tvari N kod prijenosa tvari *konvekcijom* analogna je *Newtonovom* zakonu za prijenos topline konvekcijom:

$$N = k_\mathrm{g}\Delta c, \tag{2-65}$$

gdje je k_g koeficijent prijenosa tvari, m/s, a Δc je razlika molne koncentracije tvari, mol/m^3.

Koeficijent prijenosa tvari k_g može se korelirati s fizikalnim svojstvima i procesnim varijablama na način da to bude analogno kao kod prijenosa topline. Tako se kod prijenosa tvari koristi *Sherwoodov* broj koji se definira kao:

$$Sh = \frac{k_\mathrm{g}L}{D}, \tag{2-66}$$

i koji predstavlja maseni ekvivalent *Nusseltovom* broju kod prijenosa topline. *Sherwoodov* broj predstavlja omjer ukupno prenesene količine tvari, što je predstavljeno koeficijentom prijenosa tvari k_g, i količine tvari prenesene difuzijom, predstavljene koeficijentom difuzije D.

Schmidtov broj ekvivalent je *Prandtlovom* broju i definiran je kao:

$$Sc = \frac{\eta}{\rho D}, \tag{2-67}$$

i predstavlja omjer otpora fluida na posmično naprezanje i količine tvari prenesene difuzijom.

Jednadžbe za prijenos tvari imaju oblik kao i jednadžbe za prijenos topline. Tako se isto može izračunati teorijski minimalna vrijednost *Sherwoodova* broja $Sh = 2$ za slučaj prijenosa tvari s površine pojedinačne sferične čestice okružene mirujućim plinom pri čemu se prijenos tvari odvija samo difuzijom kroz granični sloj.

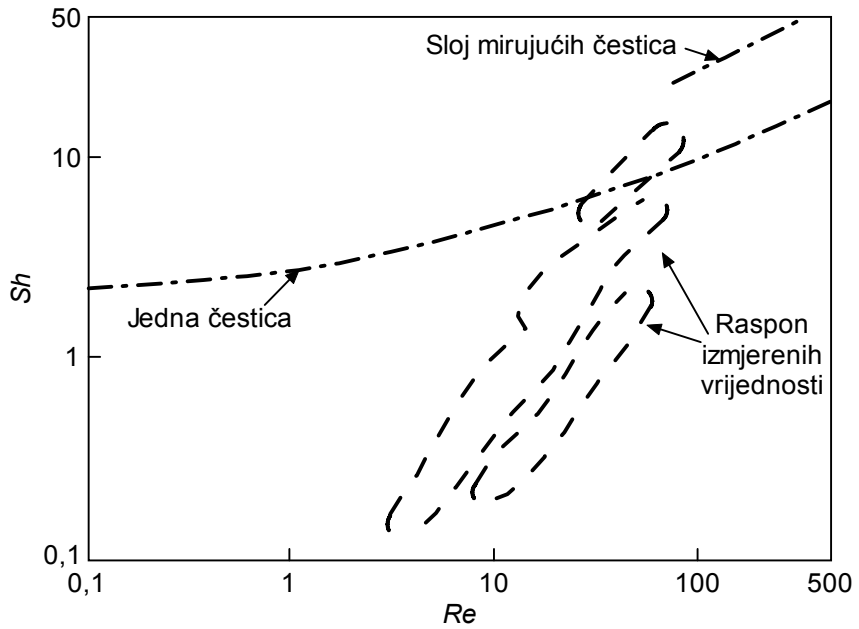
Kad se prijenos tvari odvija i konvekcijom jednadžbe imaju oblik:

$$Sh = 2 + CRe^a Sc^b , \tag{2-68}$$

gdje se drugi član odnosi na konvektivni prijenos tvari, a član difuzije $Sh = 2$ se često zna i zanemariti.

2.4.1 Prijenos tvari između plina i čestica

Eksperimentalne vrijednosti koeficijenata prijenosa tvari plin-čestice koje su iz različitih studija sakupili *Kunii* i *Levenspiel* [20] prikazani su u dijagramu na slici 2-24. Slično kao i kod prijenosa topline sa smanjenjem veličine čestica i *Reynoldsovih* brojeva *Sh* vrijednosti bi se trebale približavati teorijski minimalnoj vrijednosti *Sh* =2, ali ne bi smjele pasti ispod. Međutim na slici se vidi da za $Re < 10$ vrijednosti *Sh* brojeva su daleko ispod 2. Za $Re > 100$ vrijednosti *Sh* se nalaze iznad onih za jednu česticu, a ispod vrijednosti za sloj mirujućih čestica. Objašnjenje za ovako niske vrijednosti je isto kao i kod prijenosa topline. Kod sitnih čestica većina plina prolazi u obliku mjehura pa je dodirna površina između plina i čestica ustvari manja nego što se pretpostavilo kod proračuna *Sh* broja.



Slika 2-24. Eksperimentalne vrijednosti koeficijenta prijenosa tvari plin-čestice [20]

Prijenos tvari između plina i jedne kuglaste čestice može se izračunati *Fröesslingovom* jednadžbom (1938):

$$Sh = 2 + 0{,}6 Re^{0{,}5} Sc^{0{,}33}\,, \tag{2-69}$$

dok se prijenos tvari u sloju mirujućih čestica računa pomoću *Ranzove* jednadžbe:

$$Sh = 2 + 1{,}8 Re^{0{,}5} Sc^{0{,}33}\,, \tag{2-70}$$

koja vrijedi za $Re > 80$.

2.5 MATEMATIČKI MODELI FLUIDIZIRANOG SLOJA

Primjenom matematičkih modela fluidiziranog sloja nastoji se opisati strujanje plina, kretanje čestica i mjehura, prijenos topline i tvari te efikasnost uređaja s fluidiziranim slojem. Uobičajeno se dijele na *homogene* i *dvofazne* modele. Osnovno obilježje homogenih modela je da uzimaju obzir samo jednu fazu unutar sloja pri čemu se koriste različiti konvencionalni višefazni modeli strujanja, npr. modeli idealnog strujanja, disperzijski modeli, modeli razdiobe vremena zadržavanja i modeli raspodjele vremena dodira. Zbog svog pojednostavljenog pristupa ovi modeli nisu dali dobre rezultate pa je zbog toga došlo do razvoja modela baziranih na *dvofaznoj teoriji fluidizacije* koju su originalno predložili *Toomey* i *Johnston* [56]. Prema toj teoriji plinski fluidizirani sloj se sastoji od dvije faze: (a) guste faze (ili emulzije) koja se sastoji od čestica i plina i (b) rijetke ili mjehuraste faze koja sadrži veoma malo čestica. Gusta faza nalazi se u stanju minimalne fluidizacije s poroznosti $\varepsilon_{\mathrm{mf}}$, a sav plin u količini iznad one potrebne za postizanje stanja minimalne fluidizacije prolazi kroz sloj u obliku mjehura. Ukupni maseni protok plina $q_{m,\mathrm{uk}}$ tada je jednak:

$$q_{m,\mathrm{uk}} = q_{m,\mathrm{mf}} + q_{m,\mathrm{b}}\,, \tag{2-71}$$

gdje je $q_{m,\mathrm{mf}}$ je maseni protok plina kod stanja minimalne fluidizacije, a $q_{m,\mathrm{b}}$ je maseni protok plina u obliku mjehura.

U dvofaznim modelima se za svaku fazu posebno postavljaju jednadžbe s kojima se definira prijenos tvari između tih dviju faza. Međutim, dvofazni modeli ipak mogu koristiti različite pretpostavke koje ne moraju u potpunosti slijediti originalnu teoriju. Tako se u nekim modelima npr. uzima u obzir postojanje oblaka oko mjehura, a u nekima ne, veličina mjehura se u nekim modelima uzima da je jednaka u cijelom sloju dok se u drugim uzima u obzir njihov rast itd. Od različitih dvofaznih modela najviše pažnje su izazvali *Davidsonov i Harrisonov* [28], *Partridgeov* i *Roweov* [57], *Kuniijev* i *Levenspielov* [20], i *Katoov* i *Wenov* [58] model. Svi su oni opisani u navedenoj literaturi pa su ovdje samo ukratko prikazane njihove glavne pretpostavke te ocjena njihove valjanosti koju su načinili *Chavarie* i *Grace* [59] usporedbom s eksperimentalno dobivenim rezultatima.

2.5.1.1 Davidsonov i Harrisonov model

U *Davidsonovom* i *Harrisonovom* modelu koriste se sljedeće glavne pretpostavke:

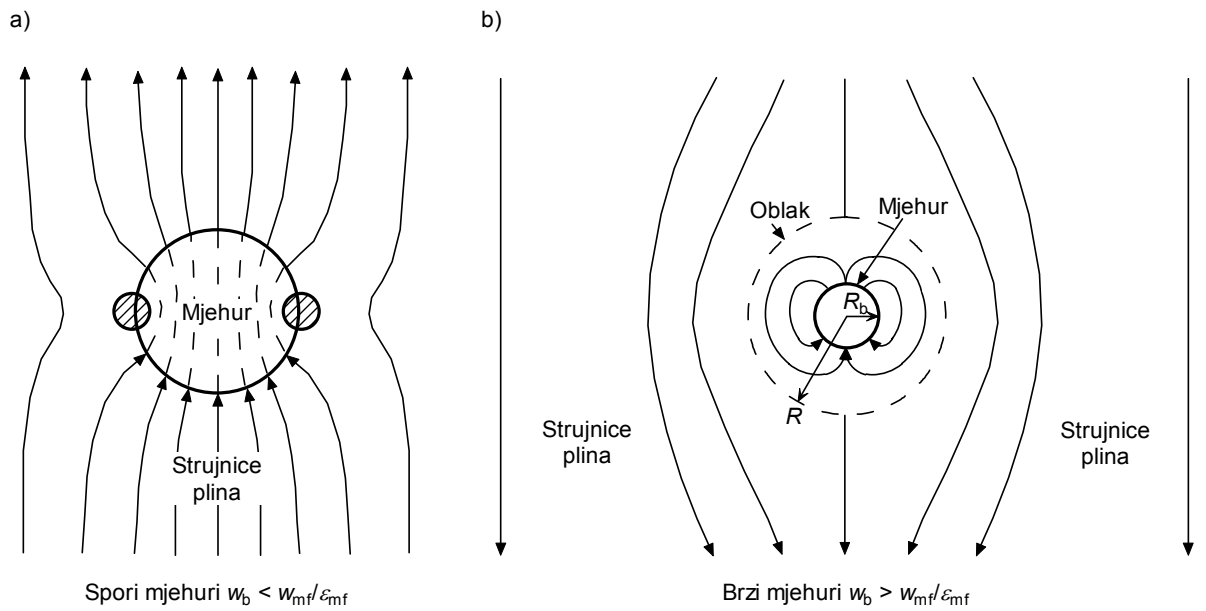
1. Sav plin u odnosu na onaj potreban za postizanje minimalne fluidizacije prolazi kroz sloj u obliku mjehura;

2. Mjehuri su kuglastog oblika, jednake veličine u cijelom sloju i u njima nema čestica;
3. Gusta faza smatra se kontinuumom koji struji oko mjehura;
4. Poroznost guste faze je konstantna i jednaka ε_{mf};
5. Brzina plina, w_f, i ona od čestica, w_p, povezane su *D'Arcyjevim* zakonom strujanja fluida kroz porozni medij:

$$\left(w_f - w_p\right) = -\frac{k}{\eta}\nabla p\,, \tag{2-72}$$

gdje je k, m^2, propusnost porozne sredine, η, Pa s, dinamička viskoznost plina, a ∇p, Pa/m, gradijent tlaka.

6. Fluidizirajući plin je nestlačiv;
7. Površina mjehura je izobarna;
8. Gradijent tlaka podalje od mjehura jednak je kao gradijent tlaka u stanju minimalne fluidizacije.
9. Strujanje guste faze opisuje se matematičkim modelom s idealnim miješanjem ili modelom za segmentirano (čepoliko) strujanje;
10. Strujanje plina i čestica odvija se duž strujnica na čiji oblik utječe brzina mjehura. Ako se mjehur kreće sporije od plina u gustoj fazi (velike čestice i mali mjehuri), onda plin prostrujava kroz mjehur od njegova dna prema vrhu, gdje ponovo ulazi u gustu fazu pri čemu jedna manja količina plina ipak ostaje cirkulirati u mjehuru gibajući se zajedno s njim, kako je prikazano na slici 2-25a. Količina tog cirkulirajućeg plina povećava se s brzinom podizanja mjehura. Ako se mjehur kreće brže od plina u gustoj fazi (sitne čestice koje imaju malu brzinu minimalne fluidizacije i veliki mjehuri) onda sav plin koji ulazi u mjehur cirkulira kroz i oko mjehura, pa se oko njega stvara vrlo tanki oblak plina, slika 2-25b. Plin u mjehuru i u oblaku oko njega praktički je izoliran od ostatka plina u gustoj fazi osim za prijenos tvari koji se odvija difuzijom i prostrujavanjem plina.



Slika 2-25. Strujanje plina prema *Davidsonovom* i *Harrisonovom* modelu

Davidsonov model daje rješenja u pogledu gibanja čestica, raspodjele tlaka u fluidizatoru, apsolutnih brzina fluidizatora, te prijenosa tvari između mjehura i guste faze. Model je dao i vezu između brzine podizanja mjehura i debljine oblaka prema veličini mjehura.

2.5.1.2 Partridgeov i Roweov model

Drugi dvofazni model važan za spomenuti je *Partridgeov* i *Roweov* model. Strujanje plina smatra se da se odvija na isti način kao u *Davidsonovom* i *Harrisonovom* modelu, no razlika je da se mjehur s oblakom smatra jednom fazom tako da se sloj onda sastoji od guste faze i mjehura s oblakom. Prijenos tvari odvija se na granici između guste faze i oblaka, i to samo difuzijom, dok se ne uzima u obzir prostrujavanje mjehura. Zbog toga je brzina prijenosa tvari niža nego kod *Davidsona* i *Harrisona*.

2.5.1.3 Kuniijev i Levenspielov model

Model mjehurastog sloja (eng. *Bubbling Bed Model*) *Kuniija* i *Levenspiela* može se smatrati modificiranom verzijom dvofaznog modela jer se oblak smatra posebnom, trećom fazom tako da se prijenos tvari odvija između guste faze i oblaka, te oblaka i mjehura. Kod izvođenja modela korištena su saznanja i pretpostavke iz *Davidsonovog* i *Harrisonovog*, te *Roweovog* i *Partridgeovog* modela:

1. Plin iz mjehura giba se zajedno s mjehurom pri čemu cirkulira na vrlo kratkoj udaljenosti oko mjehura što se naziva oblakom;
2. Brzina podizanja mjehura, debljina oblaka i brzina cirkulirajućeg plina su jednostavne funkcije veličine mjehura;
3. Svaki mjehur prilikom podizanja vuče sa sobom znatnu količinu čestica.

Na osnovu tih zapažanja *Kunii* i *Levenspiel* postavili su sljedeće pretpostavke u svom modelu:

1. Mjehuri su svi iste veličine i jednoliko raspodijeljeni unutar sloja;
2. Strujanje plina u blizini mjehura je isto kao u *Davidsonovom* modelu;
3. Gusta faza je stalno u stanju minimalne fluidizacije, pa je zato relativna brzina između plina i čestica uvijek jednaka i iznosi:

$$w_{\mathrm{e}} = \frac{w_{\mathrm{mf}}}{\varepsilon_{\mathrm{mf}}} - w_{\mathrm{p}} \,. \tag{2-73}$$

4. Svaki mjehur vuče za sobom znatnu količinu čestica uslijed čega nastaje cirkulacija čestica u sloju i to u smjeru prema gore kad su čestice iza mjehura i prema dolje kad su u ostatku guste faze.

2.5.1.4 Katoov i Wenov model

Model spajanja mjehura (eng. *Bubble Assemblage Model*) koji su predložili *Kato* i *Wen* uzima u obzir promjenu veličine mjehura u sloju. U modelu se koriste sljedeće pretpostavke:

1. Fluidizirani sloj se dijeli na n segmenata u seriji, a visina svakog je jednaka promjeru mjehura na određenoj visini u sloju;
2. Svaki segment se sastoji od guste i mjehuraste faze. Plin prostrujava kroz mjehure, a gusta faza se smatra potpuno izmiješanom;
3. Gusta faza se nalazi u stanju minimalne fluidizacije;
4. Mjehuri se smatraju idealno kuglastim i okruženi su s idealno kuglastim oblacima. Poroznost oblaka je jednaka kao kod guste faze i iznosi $\varepsilon_{\mathrm{mf}}$, a promjer oblaka i mjehura se može izračunati prema *Davidsonovoj* jednadžbi [18]:

$$\left(\frac{d_{\mathrm{c}}}{d_{\mathrm{b}}}\right)^3 = \frac{w_{\mathrm{sb}} + 2\left(w_{\mathrm{mf}} / \varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)}{w_{\mathrm{sb}} - \left(w_{\mathrm{mf}} / \varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)} \,, \tag{2-74}$$

   koja vrijedi ako je brzina podizanja pojedinačnog mjehura $w_{\mathrm{sb}} \geq w_{\mathrm{mf}}/\varepsilon_{\mathrm{mf}}$ što je slučaj kod sitnijih čestica. Brzina w_{sb} se može izračunati pomoću jednadžbe (2-4);
5. Ukupni volumen mjehuraste faze u sloju može se izraziti kao $(Z - Z_{\mathrm{mf}})A$;
6. Izmjena plina odvija se između dvije faze, a ukupni koeficijent prijenosa tvari F_{d}, l/s, je izražen po jedinici volumena mjehura što znatno pojednostavnjuje proračun:

$$F_{\mathrm{d}} = F_0 + K'M \,, \tag{2-75}$$

   gdje je F_0 koeficijent prijenosa tvari izražen po jedinici volumena mjehura, l/s, K' je ravnotežna konstanta adsorpcije, a M koeficijent prijenosa čestica između mjehura i guste faze izražen po jedinici volumena mjehura, l/s;

7. Mjehuri kontinuirano rastu kako se dižu kroz sloj sve dok ne postignu neku maksimalnu stabilnu veličinu ili dok ne zauzmu cijeli promjer kolone. Maksimalna stabilna veličina mjehura $d_{b,t}$ može se izračunati po izrazu koji su predložili *Harrison* i ostali [60]:

$$d_{b,t} = \left(\frac{w_{fp}}{0{,}711}\right)^2 \frac{1}{g}, \tag{2-76}$$

gdje se brzina lebdjenja čestica w_{fp} može izračunati pomoću jednadžbe (2-43).

8. U fluidiziranom sloju pretpostavljaju se izotermni uvjeti.

Osim navedenih pretpostavki u modelu se upotrebljavaju još neki izrazi za procjenu različitih svojstava mjehura, kao i još neke pretpostavke vezane za brzine i prijenos tvari:

1. Veličina mjehura, prema *Cookeu* i ostalim [61]:

$$d_b = 0{,}14\rho_p d_p \left(\frac{w_f}{w_{mf}}\right) h + d_0, \tag{2-77}$$

gdje je h, m, visina iznad distributivne ploče, a d_0, m, početna veličina mjehura na distributivnoj ploči koja se može procijeniti prema izrazu:

$$d_0 = 0{,}025 \frac{\left[6(w_f - w_{mf})/(n_0\pi)\right]^{0,4}}{g^{0,2}}, \tag{2-78}$$

U gornjoj jednadžbi je n_0 broj otvora na distributivnoj ploči;

2. Brzina podizanja mjehura može se izračunati prema jednadžbi (2-5);
3. Ekspanzija sloja, temeljeno na pretpostavci 5 i jednadžbama (2-5), (2-77) i (2-78) može se izračunati prema izrazu:

$$\frac{Z - Z_{mf}}{Z_{mf}} = \frac{w_f - w_{mf}}{0{,}711\left(g d_{b,a}\right)^{0,5}}, \tag{2-79}$$

gdje je $d_{b,a}$ prosječni promjer mjehura u sloju koji se računa kao:

$$d_{b,a} = 0{,}14\rho_p d_p \frac{w_f}{w_{mf}} \frac{Z_{mf}}{2} + d_0. \tag{2-80}$$

4. Poroznost sloja ε:

a) za $h \le Z_{mf}$:

$$1 - \varepsilon = \frac{Z_{mf}}{Z}\left(1 - \varepsilon_{mf}\right); \tag{2-81}$$

b) za $Z_{mf} \le h \le Z_{mf} + 2(Z - Z_{mf})$:

$$1-\varepsilon=\frac{Z_{\mathrm{mf}}}{Z}\left(1-\varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)-0{,}5\frac{Z_{\mathrm{mf}}\left(1-\varepsilon_{\mathrm{mf}}\right)\left(h-Z_{\mathrm{mf}}\right)}{2Z\left(Z-Z_{\mathrm{mf}}\right)}. \tag{2-82}$$

5. Brzina plina u gustoj fazi, $w_{\mathrm{f,e}}$:

$$\frac{w_{\mathrm{f,e}}}{w_{\mathrm{mf}}}=1-\frac{\varepsilon_{\mathrm{mf}}\alpha'\theta w_{\mathrm{b}}}{w_{\mathrm{mf}}\left(1-\theta-\alpha'\theta\right)}, \tag{2-83}$$

gdje je $\theta = (Z - Z_{\mathrm{mf}})/Z$, a α' omjer volumena guste faze koja se prenosi iza mjehura prema volumenu mjehura. Vrijednost α' je približno 0,2-0,3 prema eksperimentalnim rezultatima *Rowea* i *Partridgea* [62], pa kod normalnih eksperimentalnih uvjeta jednadžba (2-83) iznosi $w_{\mathrm{e}}/w_{\mathrm{mf}} = 0{,}5$ za $w_{\mathrm{f}}/w_{\mathrm{mf}} = 3$, te $w_{\mathrm{e}}/w_{\mathrm{mf}} = 0$ za $w_{\mathrm{f}}/w_{\mathrm{mf}} = 5 \div 6$. Međutim, u modelu se uzima da je $w_{\mathrm{e}} = 0$ prema eksperimentalnim rezultatima *Lathama* [63] i dokazima koje su iznijeli *Kunii* i *Levenspiel* [64]. Kod velikih brzina većina protoka plina se naime ostvaruje u obliku velikih mjehura pa se protok kroz gustu fazu i oblake praktično može zanemariti. Stoga se aproksimativno može smatrati da se jedini protok ostvaruje u mjehurastoj fazi.

6. Kako eksperimentalni podaci vezani za iznose M i K' u pretpostavci 6 nisu poznati, u modelu se zanemaruje prijenos plina adsorpcijom preko čestica koje prelaze iz jedne faze u drugu. Stoga jednadžba (2-75) prelazi u:

$$F_{\mathrm{d}}=F_0, \tag{2-84}$$

a za proračun F_0 se upotrebljava jednadžba koju su predložili *Kobayashi* i drugi [65] na osnovu svojih eksperimentalnih rezultata:

$$F_0=\frac{0{,}11}{d_{\mathrm{b}}}. \tag{2-85}$$

2.5.1.5 Ocjena prikazanih modela

Kako bi ocijenili točnost prikazanih dvofaznih modela *Chavarie* i *Grace* su načinili eksperiment katalitičke razgradnje ozona u dvodimenzijskom fluidiziranom sloju s ciljem praćenja učinka razgradnje u reaktoru te dobivanja profila koncentracije ozona u obje faze. Dobivene mjerne rezultate usporedili su s izračunatim prema navedenim modelima, te su izveli sljedeće općenite zaključke:

1. Matematičko dobiveni rezultati pretvorbe prema *Davidsonovom* i *Harrisonovom* modelu, uz pretpostavku da je gusta faza idealno izmiješana, daleko su manji od eksperimentalno dobivenih. Uz pretpostavku segmentiranog (čepolikog) načina strujanja dobivaju se nešto bolji rezultati ukupne pretvorbe, no izračunati profili koncentracija po fazama znatno odstupaju od izmjerenih.

2. U *Partridgeovom* i *Roweovom* modelu uzima se u obzir rast mjehura i prisustvo oblaka, no model ima tendenciju precjenjivanja veličine oblaka pa dobiveni profili koncentracija kao i druge veličine nemaju fizikalni smisao.
3. Rezultati prema *Kuniijevom* i *Levenspielovom* modelu su pokazali najbolje slaganje s eksperimentalnim podacima. Izračunati profil koncentracije po visini u mjehurastoj fazi ima povremeno blaga odstupanja, dok je profil u gustoj fazi uglavnom u dobrom slaganju s izmjerenim.
4. *Katoov* i *Wenov* model, iako uzima u obzir različita svojstva mjehura pa bi načelno bolje odgovarao za prezentaciju složene hidrodinamike u sloju, ipak ne daje dobre rezultate. Model je dao najbolju aproksimaciju za profil koncentracije u mjehurastoj fazi, no profil u gustoj fazi te izlazne koncentracije reaktanata bili su značajno preuveličani.

3 SUŠENJE ZRNATIH MATERIJALA U FLUIDIZIRANOM SLOJU

Sušenje je tehnološka operacija kojom se dio vlage iz krute tvari odstranjuje procesom ishlapljivanja (odnosno isparivanja ukoliko se sušenje odvija u vakuumu). Poseban oblik sušenja je sušenje sublimacijom kad se iz tvari koja se nalazi u zaleđenom stanju odstranjuje vlaga koja iz stanja leda izravno prelazi u paru. Različite druge (mehaničke) metode odstranjivanja vlage kao što su filtracija, centrifugiranje, sedimentacija, i korištenje tzv. molekularnih sita (adsorpcija), iako često prethode operacijama sušenja kako bi se smanjila potrebna dovedena toplina, ne smatraju se procesom sušenja.

Sušenje se kao jedna od najvažnijih operacija u kemijskoj, prehrambenoj, farmaceutskoj i drvnoj industriji, poljoprivredi, biotehnologiji, preradi polimera, keramike, proizvodnji papira, preradi drobljene rudače itd., upotrebljava radi očuvanja kvalitete proizvoda kod dužeg skladištenja (npr. konzerviranje hrane radi očuvanja prirodnih svojstava), smanjenja troškova transporta, postizanja određene kvalitete proizvoda, te lakše manipulacije proizvodima.

Sušenje je također toplinska operacija koja troši veoma velike količine energije zbog velike topline ishlapljivanja vode te niskog stupnja djelovanja konvencionalnih sušionika koji koriste vrući zrak kao medij za sušenje. Prema novijim podacima (*Mujumdar* [66]) na procese sušenja u industriji u SAD, Kanadi, Francuskoj i Velikoj Britaniji otpada 10-15% ukupno potrošene energije, te 20-25% u Danskoj i Njemačkoj.

Osim po velikoj potrošnji energije, sušenje se izdvaja i po nekim drugim karakteristikama [66]:

- veličina proizvoda koji se suši može biti od nekoliko mikrometara pa do nekoliko desetaka centimetara (debljina ili širina);
- poroznost može biti od nule do 99,9%;
- vrijeme sušenja može biti od 0,25 s (sušenje papirnatih maramica) do pet mjeseci (za neke vrste drveta);
- proizvodni kapaciteti su od 0,1 kg/h do 100 t/h;
- brzine proizvoda su od nule (stacionarni) pa do 2000 m/min (papirnate maramice);
- temperature sušenja mogu biti niže od trojne točke pa sve do kritične točke;
- tlak sušenja može biti manji od jednog milibar pa sve do 25 bar;
- toplina se može dovoditi kontinuirano ili s prekidima konvekcijom, provođenjem ili zračenjem.

Zbog tako različitih karakteristika i zahtjeva koji se postavljaju na proces, postoji veliki broj različitih tipova sušionika (u literaturi ih je opisano više od 100 različitih tipova s više od 400 zabilježenih izvedbi [66]), pa stoga niti ne postoji jedinstven proračun za sve njih.

Treba naglasiti da sušenje ima veliki utjecaj na strukturu i svojstva gotovog proizvoda. Naime prilikom sušenja dolazi do različitih fizikalnih i kemijskih promjena kao što su npr. skupljanje, bubrenje, kristalizacija i sl. Također može doći i do promjena u boji, teksturi, mirisu ili nekim drugim složenim svojstvima proizvoda kao što su zadržavanje hranjivih tvari i okusa. Sve to može dovesti do degradacije kvalitete proizvoda. Za vrijeme sušenja može se oštetiti struktura tkiva hrane, npr. voća i povrća, što rezultira u promjeni izgleda i poteškoćama u vraćanju originalnih svojstava procesom rehidratacije. Zato je potrebno znati

kako se materijal ponaša prilikom sušenja, odnosno poznavati utjecaj različitih procesnih parametara kao što su temperatura, brzina sušenje i sl. na proces sušenja, te ih treba znati pažljivo odabrati kako bi se dobio proizvod tražene kvalitete.

3.1 OSNOVNE DEFINICIJE

3.1.1 Sadržaj vlage i vlažnost tvari

Ukupna masa vlažne tvari m sastoji se od mase suhe tvari m_{st} i mase vlage m_w:

$$m = m_{st} + m_w \,. \tag{3-1}$$

Vlažnost materijala X_w, kg/kg, je maseni udio vlage u ukupnoj masi tvari:

$$X_w = \frac{m_w}{m} = \frac{m_w}{m_{st} + m_w} \,, \tag{3-2}$$

no kako se prilikom sušenja masa vlage m_w mijenja zbog ishlapljivanja, a masa suhe tvari m_{st} općenito se ne mijenja, onda se često koristi *sadržaj vlage X* (ili *vlaga materijala*), kg/kg, koji se definira:

$$X = \frac{m_w}{m_{st}} \,. \tag{3-3}$$

Međusobni odnos X_w i X je:

$$X_w = \frac{X}{1 + X} \,, \tag{3-4}$$

i

$$X = \frac{X_w}{1 - X_w} \,. \tag{3-5}$$

3.1.2 Veza vode i zrna

Sušenjem se odstranjuje voda iz materijala koji se suši, a odvija se ishlapljivanjem na površinama koje se nalaze u dodiru sa zrakom. Pomoću zraka se dovodi energija potrebna za ishlapljivanje, ali se i odvodi ishlapljena vlaga. Količina topline koja se mora dovesti za ishlapljivanje vlage ovisi o tome da li je vlaga vezana ili nevezana. Nevezana vlaga samo vlaži površinu materijala i za njezino sušenje je potrebno dovoditi samo toplinu ishlapljivanja. No ukoliko je vlaga vezana sa suhom tvari materijala koji se suši onda je potrebno dovoditi i dodatnu toplinu koja će razbiti tu vezu. Prema veličini te dodatne topline razlikuju se četiri načina vezanja vode u materijalu:

a) kemijska veza

Kemijski vezana voda (hidratna i kristalna voda) je najjače vezana, a naziva se i konstitucionalna voda. Veza ustvari predstavlja vodikovu vezu koja se može uspostaviti između molekula vode i molekula tvari u kojima su ugrađeni kisik i dušik. Uobičajenim sušenjem do 105 °C ova voda se ne može odstraniti, a korištenje nekih drugih metoda može dovesti do razgradnje materijala. Sušenje kao tehnološka operacija se ne bavi odstranjivanjem ove vode.

b) fizikalno-kemijska veza

Fizikalno-kemijska veza između vode i čestica javlja se kod koloidnih otopina. Molekule vode adsorbirane su na površinu koloidnih čestica, npr. gelova.

c) fizikalno-mehanička veza

Fizikalno mehanički vezana voda je ona koja ispunjava velike pore, šupljine i kapilare tijela. Jednomolekularni ili višemolekularni sloj u obliku vodene pare je adsorbiran na njihovim površinama.

d) mehanički vezana voda

Mehanički vezana voda (ili osmotski vezana voda) je slobodna voda koja vlaži površinu tijela i u kojoj druge tvari mogu biti suspendirane ili dispergirane.

Svaki od tih načina vezanja vode za suhu tvar snizuje tlak vodene pare vezane vode u usporedbi s tlakom vodene pare nad slobodnom vodenom površinom iste temperature. Najvažniji oblici vezivanja su kapilarnost, adsorpcija i vodene otopine.

Kapilarnost se objašnjava pojavom da se zbog različitih sila adhezije između kapljevine i površine posude, odnosno *površinske napetosti* tekućine, dolazi do toga da površina tekućine nije potpuno vodoravna, već se uz rubove posude zakrivljuje da bi sa stijenkom posude zatvorila *dodirni kut*. Dodirni kut ovisi o tekućini i materijalu posude. Što su stijenke posude bliže, odnosno što je posuda uža, kao npr. tanka cijevčica, zakrivljenje površine tekućine (obično primjetno samo uz rub posude) počinje vidljivo zahvaćati cijelu površinu tekućine. Ukoliko je zakrivljenje takvo da se tekućina uzdiže uz rub posude, primjerice kao kod vode, onda će se ona toliko uzdizati u vis dokle god se težina izdignutog stupca vode ne izjednači sa silom kojom ga kapilarnost uzdiže.

Kod materijala koji se suši oštri uglovi među pojedinim nepravilnim česticama i vlakancima robe djeluju kao kapilare. Što je manji polumjer zakrivljenosti meniskusa vode u kapilarama, odnosno što su one tješnje, to se tlak pare u materijalu više smanjuje. Zbog toga se u tijeku sušenja prvo prazne šire kapilare, a tek onda uže. Pad tlaka vodene pare se kod kapilara određuje pomoću *Kelvinove* jednadžbe:

$$\ln \frac{p_{\mathrm{d}}(T)}{p_{\mathrm{s}}(T)} = -\frac{2\gamma v_{\mathrm{m}} \cos\Theta}{r R_{\mathrm{m}} T}, \tag{3-6}$$

gdje je za određeni sadržaj vlage u materijalu p_{d} parcijalni tlak vodene pare u kapilari, p_{s} tlak zasićenja vodene pare iznad slobodne vodene površine za istu temperaturu, γ površinska napetost, v_{m} molarni volumen, Θ dodirni kut, a r polumjer meniskusa.

Omjer tlakova ($p_{\mathrm{d}}/p_{\mathrm{s}}$) jednak je relativnoj vlažnosti zraka φ kad materijal određenog sadržaja vlage X dođe u ravnotežu s okolnim zrakom zadane vlažnosti te se više ne izmjenjuje vlaga.

Dodatna energija ishlapljivanja ΔE zbog sila međumolekularnih veza izravno je povezana s omjerom (p_d/p_s):

$$-\Delta E = -R_m T \ln \frac{p_d(T)}{p_s(T)}, \tag{3-7}$$

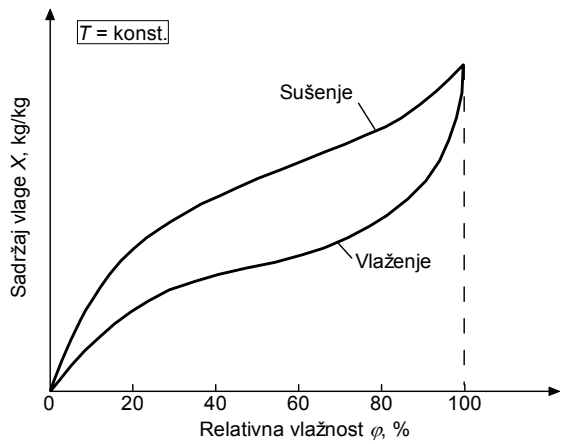
a u literaturi se mogu pronaći njezine vrijednosti za različite žitarice i određene vlažnosti i temperature zrna.

Adsorpcija je uvjetovana površinskim silama između stijenki i vodene pare, dok se kod vodenih otopina tlak pare smanjuje zbog njihovih svojstava.

3.1.3 Ravnotežna vlažnost

Većina materijala u dodiru sa zrakom upija ili ispušta vlagu. Takvo svojstvo se naziva *higroskopnost*, a da li će doći do upijanja ili ispuštanja vlage ovisi o vlažnosti materijala i njegovoj temperaturi, te o vlažnosti i temperaturi zraka. Koliko će materijal upijati vlagu iz okoline ovisi i o vrsti materijala, odnosno njegovim biokemijskim svojstvima. Upijena ili ispuštena vlaga naziva se *higroskopnom vlagom*. Kad materijal dođe u ravnotežu s okolnim zrakom dane vlažnosti i temperature, onda se više ne izmjenjuje vlaga, a vlažnost koja se pri tome ustali u zrnu naziva se *higroskopna ravnotežna vlažnost zrna* $X_{w,r}$, ili *ravnotežni sadržaj vlage* X_r.

Za analizu higroskopnih procesa služe *krivulje higroskopne vlažnosti* (mogu se koristiti i *krivulje higroskopnog sadržaja vlage*) koje predstavljaju odnos $X_{w,r}$ i relativne vlažnosti zraka φ za određenu temperaturu zraka T. Na slici 3-1 prikazana je ovisnost sadržaja vlage X_r o relativnoj vlažnosti φ.

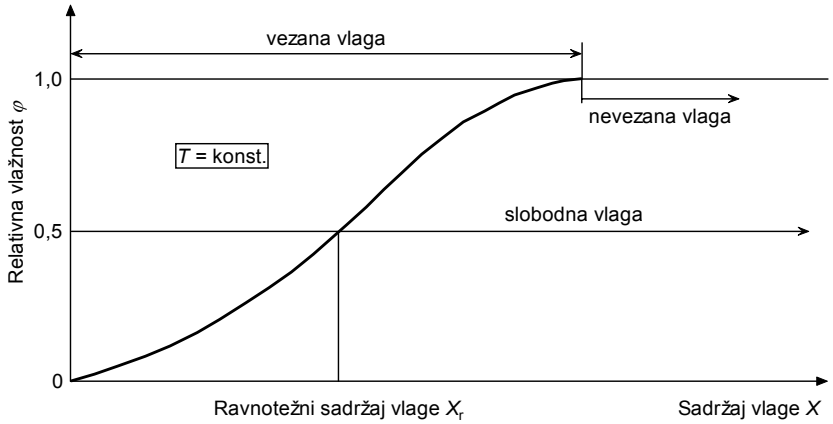


Slika 3-1. Krivulja higroskopne ravnoteže (sorpcijska izoterma)

Krivulje higroskopne vlažnosti, kao što se vidi na slici 3-1, razlikuju se prilikom sušenja i prilikom vlaženja materijala. Krivulja pokazuje zatvorenu petlju koja se naziva „histereza“, pri čemu je kod sušenja ravnotežna vlažnost veća nego kod vlaženja.

Ukoliko se prikaže ovisnost relativne vlažnosti zraka φ o sadržaju vlage X onda se dobiva dijagram na slici 3-2 gdje su prikazani različiti oblici vlage sadržane u nekom materijalu:

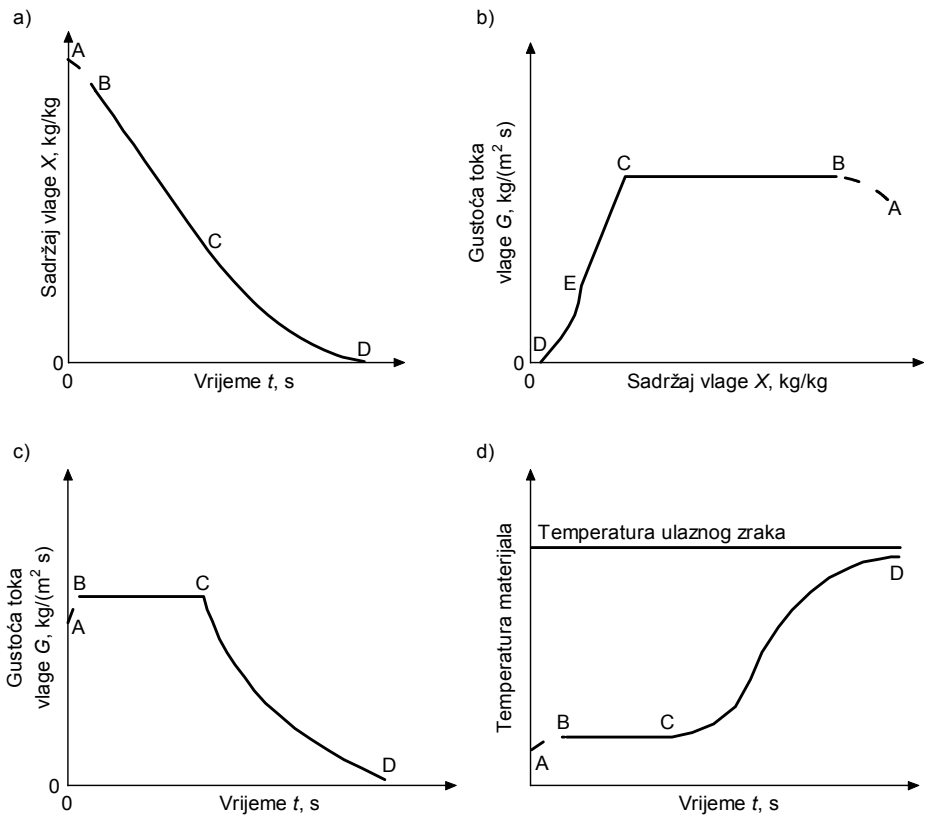
slobodna, vezana i nevezana vlaga. Slobodna vlaga je ona iznad ravnotežnog sadržaja vlage X_r koja se može odstraniti sušenjem sa zrakom određenog stanja, vezana vlaga je ona za koju se prilikom sušenja mora trošiti još i dodatna energija za razbijanje veze vlage sa suhom tvari, a nevezana vlaga vlaži površinu materijala i za njezino sušenje je potrebna samo toplina ishlapljivanja.



Slika 3-2. Različiti oblici vlage u materijalu

3.1.4 Faze sušenja zrnatog materijala

Proces sušenja nekog zrnatog materijala može se podijeliti na više faza koje su označene na tzv. *krivuljama sušenja* prikazanim na slici 3-3. Na slici 3-3a prikazana je promjena sadržaja vlage X, kg/kg, u vremenu t, na slici 3-3b ovisnost gustoće toka vlage G, kg/(m^2 s) o sadržaju vlage X, a na slici 3-3c ovisnost gustoće toka vlage G o vremenu t. Različite faze sušenja označene su slovima A, B, C, D i E.



Slika 3-3. Različite faze sušenja

Dio krivulje **AB** predstavlja fazu predgrijavanja u kojoj dolazi do vrlo male promjene sadržaja vlage, a brzina sušenja je gotovo jednaka nuli. Dio **BC** predstavlja fazu „*konstantne brzine sušenja*“ (eng. *constant-rate period*) kad je brzina sušenja neovisna o sadržaju vlage i konstantna je u vremenu, a sva se dovedena toplina troši na ishlapljivanje vlage s površine zrna. Za vrijeme te faze sušenja površina zrnatog materijala se još održava zasićenom, kretanjem vlage unutar poroznog materijala, a kod neporoznog se odstranjuje samo površinska vlaga. Ako svu toplinu potrebnu za ishlapljivanje vode daje zrak samo konvekcijom tada se temperatura slobodne vodene površine približava *temperaturi granice hlađenja vode*, ϑ_{sH}. No, ukoliko se toplina dovodi i provođenjem, zračenjem, ili njihovom kombinacijom, tada je temperatura zasićene površine veća od temperature ϑ_{sH} a manja od temperature zasićenja vode. Temperatura zasićene površine zrna ostaje konstantna za vrijeme trajanja te faze, a brzina sušenja ovisi samo o dovedenoj toplini neovisno o svojstvima zrnatog materijala. Mehanizmi su dakle isti kao kod ishlapljivanja sa slobodne vodene površine pri čemu vrijede iste zakonitosti.

Gustoća toka vlage G, kg/(m^2 s), odnosno masa vlage koja se u jednoj sekundi odvede s 1 m^2 zasićene površine zrnatog materijala, u fazi „konstantne brzine sušenja“ može se izračunati:

$$G = \frac{q_{uk}}{r(\vartheta_s)}, \tag{3-8}$$

gdje je q_{uk} ukupna gustoća toplinskog toka dovedenog konvekcijom, kondukcijom i zračenjem, a $r(\vartheta_s)$ latentna toplina ishlapljivanja za ravnotežnu temperaturu vodene površine ϑ_s.

Prema *Daltonovom zakonu ishlapljivanja* gustoća toka vlage proporcionalna je i razlici parcijalnih tlakova vodene pare neposredno uz vodenu površinu i podalje od nje:

$$G = b(p_s - p_d), \tag{3-9}$$

gdje je faktor b faktor proporcionalnosti koji ovisi o značajkama strujanja zraka uz površinu vode, p_s je parcijalni tlak vodene pare neposredno uz slobodnu vodenu površinu što je i tlak zasićenja za temperaturu ϑ_s, a tlak p_d je parcijalni tlak vodene pare podalje od slobodne vodene površine.

Obzirom da postoji jednoznačna veza između parcijalnih tlakova p_d i p_s, i sadržaja vlage vlažnog zraka podalje od slobodne vodene površine x_d i sadržaja vlage zasićenog vlažnog zraka neposredno uz slobodnu vodenu površinu x_s prema jednadžbama:

$$x_d = 0{,}622 \frac{p_d}{p - p_d} \tag{3-10}$$

i

$$x_s(p, \vartheta) = 0{,}622 \frac{p_s(\vartheta)}{p - p_s(\vartheta)}, \tag{3-11}$$

onda se jednadžba (3-9) prema *Lewisu* može napisati u obliku:

$$G = \sigma(x_s - x_d), \tag{3-12}$$

gdje je σ, kg/(m^2 s), tzv. *koeficijent ishlapljivanja* koji također ovisi o načinu strujanja zraka uz površinu vode.

Ako se toplina ishlapljivanja dovodi samo konvekcijom onda se povezujući jed. (3-8) i (3-12) dobiva:

$$G = \frac{\alpha_k}{r(\vartheta_{sH})}(\vartheta_\infty - \vartheta_{sH}) = b(p_{sH} - p_d) = \sigma(x_{sH} - x_d), \tag{3-13}$$

gdje je α_k, W/(m^2 K), koeficijent prijelaza topline konvekcijom, $r(\vartheta_{sH})$ latentna toplina ishlapljivanja za temperaturu krajnje granice hlađenja ϑ_{sH}, a ϑ_∞ temperatura struje zraka podalje od slobodne vodene površine.

Iz jednadžbe (3-13) se vidi da postoji veza između koeficijenta prijelaza topline α i koeficijenta ishlapljivanja σ. Jednadžba se naime može napisati i u obliku:

$$c_p\left(\vartheta_\infty - \vartheta_{\mathrm{sH}}\right) = \frac{\sigma c_p}{\alpha_{\mathrm{k}}}\left(x_{\mathrm{sH}} - x_{\mathrm{d}}\right) r\left(\vartheta_{\mathrm{sH}}\right), \tag{3-14}$$

gdje se omjer ($\sigma c_{\mathrm{p}}/\alpha_{\mathrm{k}}$) naziva *Lewisov faktor ishlapljivanja* i koji je za sustav voda-zrak vrlo blizu jedinice, a ovisi o intenzitetu difuzije vodene pare i provođenja topline kroz tanki laminarni granični sloj koji se formira neposredno iznad slobodne vodene površine i kroz koji se toplina prenosi provođenjem a voda difuzijom.

Iz ovih se jednadžbi može zaključiti da brzina sušenja zrnatog materijala u periodu konstantne brzine sušenja ovisi o koeficijentu prijelaza topline, koeficijentu ishlapljivanja, površini zrna, razlici temperatura i razlici sadržaja vlage između vlažne površine i struje zraka. U većini slučajeva, kao što je prethodno rečeno, temperatura zasićene površine zrnatog materijala približava se temperaturi granice hlađenja vode, ali kada se ne može zanemariti izmjena topline zračenjem sa zagrijanim površinama ili provođenjem kad su čestice u dodiru sa zagrijanom površinom, onda se povećava temperatura površine čestica, povećava se tlak zasićenja p_{s} i prema tome i brzina sušenja.

Dio **CDE** predstavlja fazu „padajuće brzine sušenja“ (eng. *falling-rate period*) jer se difuzijom u materijalu više ne može prenositi dovoljno vlage da se cjelokupna površina održava zasićenom. Na nezasićenim dijelovima površine tada se smanjuje brzina sušenja jer parcijalni tlak vodene pare na površini p_{s} postaje manji od p_{sH} pa se smanjuje razlika parcijalnih tlakova vodene pare ($p_{\mathrm{s}} - p_{\mathrm{d}}$), u unutrašnjosti zrna se javlja gradijent sadržaja vlage, a temperatura čestice počinje rasti. Točka **C** u kojoj započinje ta faza naziva se još i *kritičnim sadržajem vlage* X_{krit}. Dok je površina još djelomično zasićena, na brzinu sušenja utječu vanjski parametri: temperatura, brzina i vlažnost zraka, ali sve važniji postaju i parametri koji utječu na brzinu prijenosa vlage kroz unutrašnjost materijala difuzijom. U točki **E** površina tijela postaje potpuno nezasićena, a na brzinu sušenja dalje utječe samo difuzija. Dio **CE** se obično naziva i „prvom fazom padajuće brzine sušenja“, a **DE** „drugom fazom“. Sušenje završava u točki **D** kad se dostigne ravnotežni sadržaj vlage X_{r}.

Važno je napomenuti da mnogi prehrambeni proizvodi, npr. žitarice, uopće nemaju fazu konstantne brzine sušenja, te da materijali mogu imati i više kritičnih sadržaja vlage zbog utjecaja sušenja na njihovu strukturu ili kemijskih promjena. Kritični sadržaj vlage također nije jednoznačno svojstvo materijala nego ovisi i o brzini sušenja i mora se odrediti eksperimentalno.

Sušenje žitarica se cjelokupno odvija u fazi „padajuće brzine sušenja“, ali treba napomenuti da se na početku kod visokog sadržaja vlage zrna (npr. neposredno nakon žetve) sušenje ipak može vrlo kratko odvijati i u fazi „konstantne brzine sušenja“.

Gustoća toka vlage G može se izračunati i iz promjene sadržaja vlage zrna:

$$G = -\frac{m_{\mathrm{st}}}{A}\frac{\mathrm{d}X}{\mathrm{d}t}, \tag{3-15}$$

a ukoliko površina A nije poznata onda se brzina sušenja može izraziti i kao maseni protok vlage u kg/s.

U fazi konstantne brzine sušenja kad su početni i konačni sadržaj vlage X_1 i X_2 veći od kritičnog sadržaja vlage X_{krit}, vrijeme sušenja t može se izračunati iz jednadžbe:

$$t = \frac{m_{\mathrm{st}}}{A \cdot G}\left(X_1 - X_2\right), \tag{3-16}$$

a u fazi padajuće brzine sušenja:

$$t = \frac{m_{\mathrm{st}}}{A}\int_{X_2}^{X_1}\frac{\mathrm{d}X}{G(X)}, \tag{3-17}$$

no za to se mora poznavati ovisnost $G = G(X)$. Uz pretpostavku linearne ovisnosti, za početni i konačni sadržaj vlage X_1 i X_2 koji su veći od ravnotežnog sadržaja vlage X_{r} i manji od kritičnog sadržaja vlage X_{krit}, dobiva se:

$$t = \frac{m_{\mathrm{st}}}{A}\frac{\left(X_1 - X_2\right)}{\left(G_1 - G_2\right)}\ln\frac{G_1}{G_2}. \tag{3-18}$$

3.1.5 Difuzivnost vlage

Prijenos kapilarne vlage se iz dubine na površinu materijala vrši na tri načina: sisanjem vode kroz kapilare uslijed kapilarnog efekta, difuzijom vodene pare kroz ispražnjene šire kapilare i pojavom kapilarne kondenzacije, koja se sastoji u tome da voda na jednom mjestu ishlapljuje iz kapilara i zatim u parovitom obliku difundira dalje, da bi se drugdje zbog niže temperature, ili zbog užih kapilara, ili oba efekta zajedno, opet kondenzirala. Sva tri načina se pojavljuju istovremeno pa je stoga prijenos vlage u česticama vrlo složen proces.

Ukoliko se svi ti mehanizmi objedine u jedan, onda se prijenos vlage u česticama može opisati *Drugim Fickovim zakonom difuzije*:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{\mathrm{ef}}\nabla^2 X, \tag{3-19}$$

gdje je D_{ef}, m^2/s, *efektivna difuzivnost* vlage.

Difuzivnost je odlučujuća za brzinu puta vlage u materijalu, a funkcija je prvenstveno temperature, zatim sadržaja vlage i napokon puta difuzije (odnosno oblika tvari) koji je važan kod materijala koji se znatno skupljaju tijekom sušenja. Ovisnost difuzivnosti o temperaturi opisuje *Arrheniusova* jednadžba:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{a}}}{R_{\mathrm{m}}T}\right), \tag{3-20}$$

gdje je D_0, m^2/s, efektivna difuzivnost pri referentnoj temperaturi ϑ_0, E_{a}, J/kmol, energija difuzijske aktivacije, a R_{m}, J/(kmol K), opća plinska konstanta.

Kod žitarica je za raspon vlažnosti od 12% do 30% i konstantnu temperaturu vrijednost difuzivnosti praktički nepromjenjiva. Unutar zrna difuzivnost nije jednolika u svim dijelovima što je vrlo važno za brzinu sušenja. Najmanja je u ljuski, a najveća u endpospermu,

no razlika može biti i između pojedinih zrna u hrpi. Npr. kod riže je difuzivnost u ljuski 6,4 puta manja nego u endospermu. Stoga brzina sušenja sloja žitarica ustvari predstavlja prosjek brzina sušenja pojedinih zrna.

Ukoliko tijekom sušenja dođe do promjene strukture tvari, promijenit će se i difuzivnost, a ta promjena može biti i za red veličine. Zbog toga se ona najčešće određuje eksperimentalno, iako se u literaturi mogu naći i neke aproksimativne vrijednosti za pojedine materijale. Tako su *Okos* i ostali [67] dali vrlo opsežnu kompilaciju vrijednosti D i E_a za različite prehrambene proizvode, a *Zogzaz* i ostali [68] prikazali su metode za mjerenje vrijednosti D kao i vrlo široku bibliografiju vezanu za tu temu. U tablici 3-1 dane su aproksimativne vrijednosti efektivne difuzivnosti za neke prehrambene proizvode.

Tablica 3-1. Raspon aproksimativnih vrijednosti efektivne difuzivnosti D_{ef} za neke prehrambene proizvode [68]

Materijal	Sadržaj vlage X, kg/kg	Temperatura, °C	Difuzivnost D_{ef}, m^2/s
Jabuka	0,1 – 1,5	30 – 70	$1{,}0 \cdot 10^{-11} – 3{,}3 \cdot 10^{-9}$
Banana	0,01 – 3,50	20 – 40	$3{,}0 \cdot 10^{-13} – 2{,}1 \cdot 10^{-10}$
Mrkva	0,01 – 5.00	30 – 70	$1{,}2 \cdot 10^{-9} – 5{,}9 \cdot 10^{-9}$
Grožđice	0,15 – 2,40	60	$5{,}0 \cdot 10^{-11} – 2{,}5 \cdot 10^{-10}$
Riža	0,1 – 0,25	30 – 50	$3{,}8 \cdot 10^{-8} – 2{,}5 \cdot 10^{-7}$
Soja	0,07	30	$7{,}5 \cdot 10^{-13} – 5{,}4 \cdot 10^{-12}$
Pšenica	0,12 – 0,30	21 - 80	$6{,}9 \cdot 10^{-12} – 2{,}8 \cdot 10^{-10}$

Žitarice su inače higroskopna tvar s kapilarno-poroznom strukturom. Pore su im djelomično ispunjene s kapljevitom vodom i s mješavinom zraka i vodene pare. Za vrijeme sušenja vlaga ishlapljuje na površini zrna i u porama (ili kompletno u porama) te napušta zrno zbog razlike parcijalnih tlakova vodene pare u zrnu (ili na površini zrna) i u vlažnom zraku.

3.1.6 Sušionici s fluidiziranim slojem

Izvedba sušionika s fluidiziranim slojem je veoma različita i ovisi o tvari koja se suši (zrnate tvari, paste), o tome rade li u šaržnom ili kontinuiranom načinu, te o nizu drugih procesnih parametara (tlak, temperatura, način strujanja čestica i plina, vrsta fluidizatora itd).

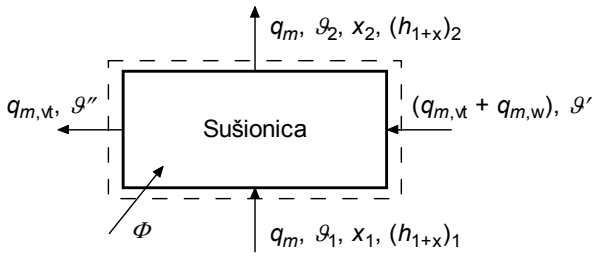
Šaržni sušionici s fluidiziranim slojem koriste se kod manjih proizvodnih kapaciteta (obično oko 50 do 100 kg/h), te za toplinski osjetljive materijale, npr. žitarice. Prednost im je u jednostavnoj kontroli uvjeta sušenja (brzina i temperatura zraka, visina sloja i sl.), a proizvod ima ujednačenu kakvoću. Nedostaci su viša cijena rada, a kvaliteta proizvoda se ipak može malo razlikovati po šaržama. Kod kontinuiranih sušionika proizvod kontinuirano prolazi kroz kolonu pa se oni primjenjuju kod velikih proizvodnih kapaciteta, no kakvoća proizvoda tu ipak nije posve ujednačena zbog miješanja vlažnih i već djelomično osušenih čestica te njihova različita vremena zadržavanja u procesu.

3.2 MASENA I ENERGIJSKA BILANCA SUŠIONICE

U literaturi se mogu naći različiti matematički modeli sušenja u fluidiziranom sloju kao što su npr. difuzijski, empirijski, kinetički, jednofazni i dvofazni. U tim modelima se nastoji definirati promjenu sadržaja vlage sloja čestica u vremenu, postavljaju se masena i energijska

bilanca za sloj pod pretpostavkom da se ponaša kao jedna faza, ili se pak zasebno promatraju obje faze u sloju, gusta i rijetka, i za svaku se postavljaju bilance. No, za bilo koju sušionicu se može postaviti masena i energijska bilanca ne ulazeći u prijenos tvari i topline u samome sloju, nego samo promatrajući tokove mase i energije na ulazu i izlazu iz sušionice, kao što se može naći npr. u [69].

Na slici 3-4 shematski je prikazana neka sušionica zajedno s tokovima mase i energije.



Slika 3-4. Shematski prikaz sušionice

Sušionici na slici 3-4 dovodi se ($q_{m,\mathrm{vt}}$ + $q_{m,\mathrm{w}}$), kg/s, vlažne robe s temperaturom ϑ', gdje je $q_{m,\mathrm{vt}}$ maseni protok vlažne tvari, a $q_{m,\mathrm{w}}$, kg/s, maseni protok vlage koju treba osušiti. Iz sušionice izlazi samo maseni protok vlažne robe $q_{m,\mathrm{vt}}$ temperature ϑ'' i istog sadržaja vlage. Maseni protok vlažne tvari $q_{m,\mathrm{vt}}$ sastoji se od masenog protoka suhe tvari $q_{\mathrm{m,st}}$ i dijela vlage koji ostaje i nakon sušenja, a definiran je pomoću sadržaja vlage X:

$$q_{m,\mathrm{vt}} = q_{m,\mathrm{st}}(1+X). \tag{3-21}$$

Sušenje se odvija dovođenjem q_m, kg/s, masenog protoka suhog zraka temperature ϑ_1, sadržaja vlage x_1 i specifične entalpije nezasićenog vlažnog zraka $(h_{1+\mathrm{x}})_1$, koji napušta sušionicu s temperaturom ϑ_2, sadržajem vlage x_2 i specifičnom entalpijom $(h_{1+\mathrm{x}})_2$. Specifična entalpija vlažnog zraka $h_{1+\mathrm{x}}$ određuje se prema izrazu:

$$h_{1+\mathrm{x}} = c_{p,z}\vartheta + x_{\mathrm{d}}\left(r_0 + c_{p,\mathrm{d}}\vartheta\right), \tag{3-22}$$

gdje je $c_{p,\mathrm{z}}$ = 1005 J(kg K) specifični toplinski kapacitet suhog zraka pri konstantnom tlaku, $r_0 = 2500 \cdot 10^3$ J/kg toplina isparivanja vode pri temperaturi 0 °C, a $c_{p,\mathrm{d}}$ = 1930 J/(kg K) specifični toplinski kapacitet vodene pare pri konstantnom tlaku.

Jednadžba održanja mase vlage koju zrak preuzima glasi:

$$q_{m,\mathrm{w}} = q_m\left(x_2 - x_1\right). \tag{3-23}$$

Toplina za ishlapljivanje namiče se ohlađivanjem zraka, no ako se u sušionicu dovodi dodatna toplina kako bi se proces ubrzao onda energijska bilanca glasi:

$$\Phi = q_m\left[\left(h_{1+\mathrm{x}}\right)_2 - \left(h_{1+\mathrm{x}}\right)_1\right] + q_{m,\mathrm{st}}c_{\mathrm{m}}\left(\vartheta'' - \vartheta'\right) - q_{m,\mathrm{w}}c_{\mathrm{v}}\vartheta', \tag{3-24}$$

gdje je c_{m}, J/(kg K), specifični toplinski kapacitet vlažne tvari, a c_{v}, J/(kg K), specifični toplinski kapacitet vode za temperaturu ϑ'.

Specifični toplinski kapacitet vlažne tvari c_{m} računa se kao prosječno svojstvo specifičnog toplinskog kapaciteta suhe tvari zrna c_{st}, J/(kg K), i specifičnog toplinskog kapaciteta vode c_{v}, J/(kg K):

$$c_{\mathrm{m}} = c_{\mathrm{st}} + c_{\mathrm{v}} X \,. \tag{3-25}$$

Ukoliko se jednadžba (3-24) podijeli s $q_{m,\mathrm{w}}$ dobiva se specifična toplina po 1 kg osušene vlage:

$$q = \frac{\Phi}{q_{m,\mathrm{w}}} = \frac{(h_{1+\mathrm{x}})_2 - (h_{1+\mathrm{x}})_1}{x_2 - x_1} + c_{\mathrm{m}} \frac{q_{m,\mathrm{st}}}{q_{m,\mathrm{w}}} (\vartheta'' - \vartheta') - c_{\mathrm{v}} \vartheta' \,, \tag{3-26}$$

ili:

$$q = \frac{(h_{1+\mathrm{x}})_2 - (h_{1+\mathrm{x}})_1}{x_2 - x_1} + q_{\mathrm{s}} \,, \tag{3-27}$$

gdje se član:

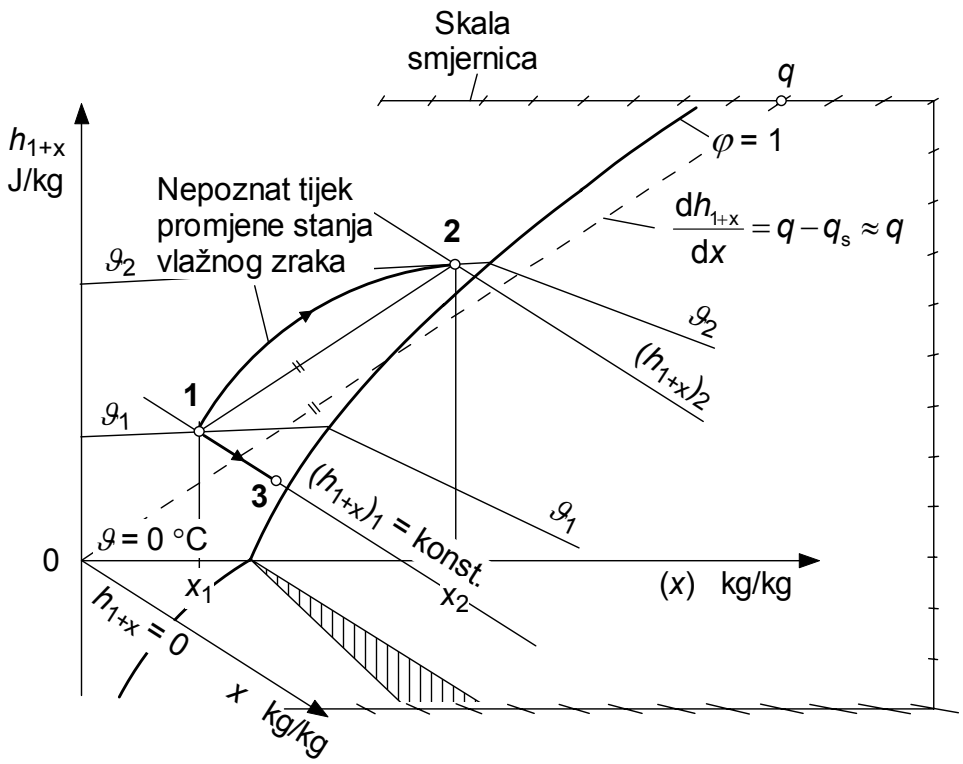
$$q_{\mathrm{s}} = c_{\mathrm{m}} \frac{q_{m,\mathrm{st}}}{q_{m,\mathrm{w}}} (\vartheta'' - \vartheta') - c_{\mathrm{v}} \vartheta'$$

odnosi na zagrijavanje robe prilikom sušenja te na entalpiju unesene vlage. Specifična toplina q_{s} je u općem slučaju različita od nule, no kako joj je iznos puno manji u odnosu na prvi član onda se često i zanemaruje.

Tijek procesa na strani vlažnog zraka može se zgodno prikazati u *Mollierovom* $h_{1+\mathrm{x}}, x$-dijagramu za vlažni zrak, slika 3-5. Naime, jednadžba (3-27) može se napisati i u obliku:

$$\frac{(h_{1+\mathrm{x}})_2 - (h_{1+\mathrm{x}})_1}{x_2 - x_1} = q - q_{\mathrm{s}} \approx q = \frac{\mathrm{d}h_{1+\mathrm{x}}}{\mathrm{d}x} = \mathrm{tg}\alpha \,. \tag{3-28}$$

što znači da se stanje vlažnog zraka **2** mora nalaziti na pravcu povučenom iz točke **1**, koja označava stanje vlažnog zraka na ulazu u sušionicu, kojemu je koeficijent nagiba (tgα) jednak specifičnoj toplini ($q - q_{\mathrm{s}}$), odnosno q ukoliko se zanemari član q_{s}.

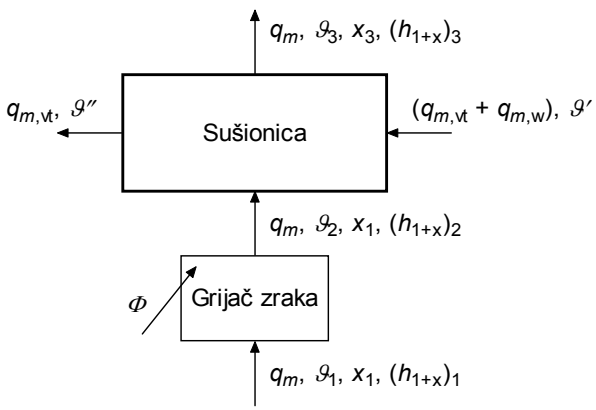


Slika 3-5. Sušenje u h_{1+x}, x-dijagramu

Na *skali smjernici* h_{1+x}, x-dijagrama prvo se pronađe vrijednost specifične topline q, te se tu točku spoji s ishodištem dijagrama, a nakon toga se povuče pravac iz točke **1** s istim koeficijentom nagiba, i gdje on presiječe vertikalu x_2 dobiva se točka **2**, tj. stanje vlažnog zraka na izlazu iz sušionice. Sadržaj vlage x_2 određen je pomoću jed. (3-23):

$$x_2 = \frac{q_{m,\mathrm{w}}}{q_m} + x_1, \tag{3-29}$$

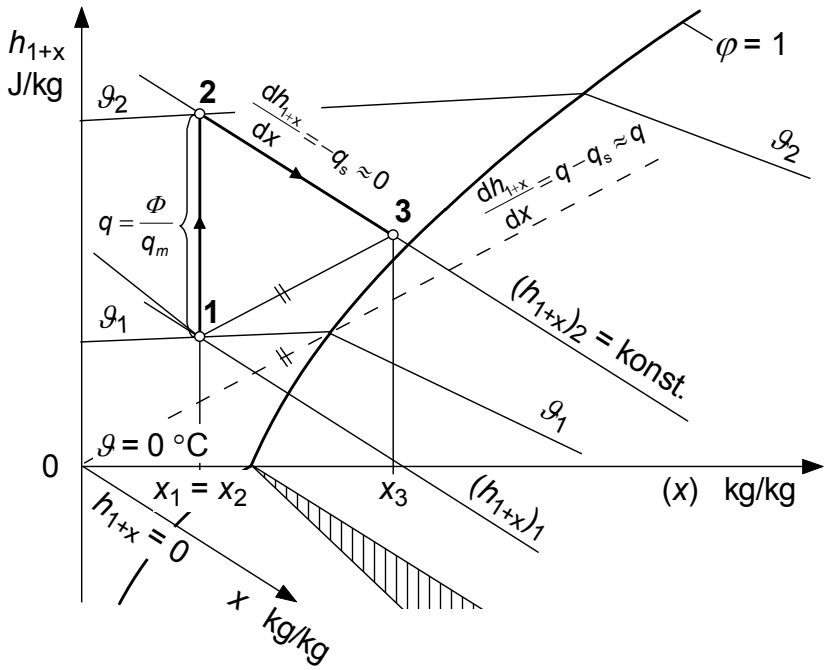
Ukoliko se u sušionicu ne dovodi dodatna toplina q nego se vrši strujanjem velikih količina zraka, onda je $\mathrm{d}h_{1+x} / \mathrm{d}x \approx 0$, a tijek promjene vlažnog zraka ide približno po pravcu **1-3**, odnosno po liniji $(h_{1+x})_1 = (h_{1+x})_3 = \text{konst.}$.



Slika 3-6. Shematski prikaz sušionice s predgrijavanjem zraka

Najčešće se toplina u procesu dovodi na način da se zrak prije ulaska u sušionicu predgrije u grijaču na temperaturu ϑ_2, pa kako se toplina u sušionici ne dovodi tijek promjene ide po pravcu **2** – **3**, odnosno točke **2** i **3** leže na istoj liniji $(h_{1+x})_2 = (h_{1+x})_3 = \text{konst.}$ Dovedena toplina u grijaču zraka izražena po 1 kg osušene vlage opet je jednaka:

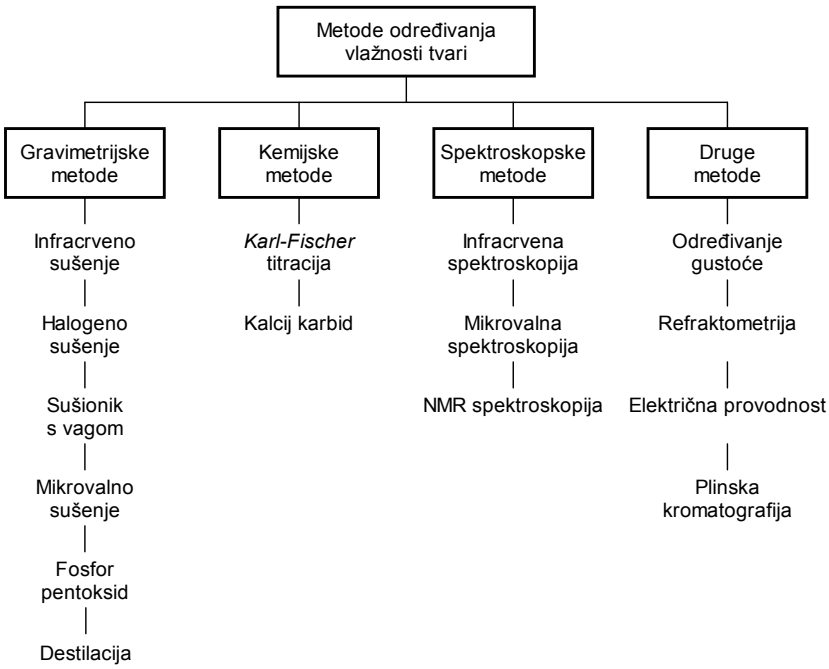
$$q = \frac{\Phi}{q_{m,\mathrm{w}}} = \frac{(h_{1+x})_3 - (h_{1+x})_2}{x_3 - x_2} + q_s \approx \frac{(h_{1+x})_3 - (h_{1+x})_2}{x_3 - x_2} = \frac{\mathrm{d}h_{1+x}}{\mathrm{d}x} = \mathrm{tg}\alpha\,. \tag{3-30}$$



Slika 3-7. Sušenje s predgrijavanjem zraka u h_{1+x}, x-dijagramu

3.3 METODE ODREĐIVANJA VLAŽNOSTI TVARI

Vlažnost ima utjecaj na fizikalna svojstva tvari kao što su masa, gustoća, viskoznost, indeks loma, električna provodnost i slično. Tijekom vremena su se razvile različite metode mjerenja tih fizikalnih veličina kako bi se preko njih mogla izraziti vlažnost tvari. Te metode se mogu podijeliti na grupe kako je prikazano na slici 3-8.



Slika 3-8. Metode određivanja vlažnosti tvari

Dalje će se ukratko opisati samo gravimetrijska metoda sušionika s vagom. Ukoliko se masa uzorka smanji s m_1 na m_2, početni sadržaj vlage X_1 može se izračunati jednadžbom:

$$X_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_2/(1+X_2)} + X_2 = \frac{m_1}{m_2}(1+X_2) - 1, \tag{3-31}$$

gdje je X_2 konačni sadržaj vlage. Normalno se uzorak suši tako da ostatak vlage bude zanemarivo malen, $X_2 \approx 0$, pa se sadržaj vlage X_1 može izravno izračunati iz izmjerenih masa:

$$X_1 = \frac{m_1}{m_2} - 1. \tag{3-32}$$

Uzorak se obično suši pri temperaturi 105 ± 2 °C dok masa m_2 ne postane konstantna, što onda predstavlja masu suhe tvari za te uvjete sušenja. Vrijeme sušenja određuje se iskustveno i ovisi o vrsti materijala. Također je važno da temperatura u sušioniku ne smije biti viša od temperature ishlapljivanja ili izgaranja drugih sastojaka osim vode kao što su razna organska otapala, alkoholi, masti, ulja i aromatični sastojci. Kod određivanja vlažnosti poljoprivrednih proizvoda pri temperaturi većoj od 105 °C može doći do izgaranja ili isparavanja ulja i ostalih tvari (škrob, bjelančevine) što može dovesti do pogrešnih rezultata jer se tijekom sušenja zrna

poljoprivrednih proizvoda želi odstraniti samo voda. Ukoliko se radi o uzorcima od cijelog zrna onda temperatura ovisno o vrsti može ići i do 130 °C. Sušenje uzoraka može trajati i do 72 sata.

U tablici 3-2 prikazane su temperature i vrijeme sušenja za neke poljoprivredne kulture, te masa uzoraka prema normi ASAE S352.2 DEC97. (U Republici Hrvatskoj se određivanje količine vode u mlinsko-pekarskim proizvodima vrši prema normi HRN ISO 712:1999, no korištena metoda je ista kao kod ASAE norme).

Tablica 3-2. Temperature i vremena sušenja kod određivanja vlažnosti za cijela zrna prema ASAE S352.2 DEC97

Zrno	Temperatura sušenja, °C	Vrijeme sušenja		Masa uzorka, g
		sati	minute	
Ječam	130	20	0	10
Kukuruz	103	72	0	15 ili 100*
Zob	130	22	0	10
Raž	130	16	0	10
Soja	103	72	0	15
Suncokret	130	3	0	10
Pšenica	130	19	0	10

* Koristiti 100 g ako sadržaj vlage prelazi 25%

Kad je potrebno brzo odrediti vlažnost onda se može skratiti vrijeme sušenja usitnjavanjem vlažnog zrna prije sušenja ili dvofaznim sušenjem.

Usitnjavanjem vlažnog zrna vrijeme sušenja skraćuje se na 60-120 minuta ovisno o temperaturi sušenja koja može biti 130 °C ili manja. No, primjenom te metode može doći do znatne pogreške jer prilikom usitnjavanja dolazi do zagrijavanja zrna pa postoji opasnost da jedan dio vlage ishlapi. Visoka temperatura sušenja isto može uzrokovati izgaranje osnovne tvari zrna.

Kod dvofaznog sušenja izvagani uzorak zrna se predsuši na temperaturi 130 °C u trajanju od 10-15 minuta, pa se ohladi na zraku i izvaže. Nakon toga se usitnjava i dosušuje do stalne mase pri temperaturi 103 °C. Dvofazno sušenje je nešto duži postupak, ali daje nešto točnije rezultate jer se izbjegava usitnjavanje jako vlažnog zrna.

3.4 PRIKAZ REZULTATA MJERENJA SADRŽAJA VLAGE TVARI POMOĆU EMPIRIJSKIH MODELA

Opće rješenje diferencijalne jednadžbe *Drugog Fickovog zakona difuzije* ima oblik eksponencijalne jednadžbe gdje je sadržaj vlage izražen kao funkcija vremena. Za kuglaste čestice i konstantnu vrijednost difuzivnosti vlage *Drugi Fickov zakon* glasi:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial X}{\partial r}\right). \tag{3-33}$$

a rješenje je dano u obliku sume eksponencijalnih funkcija:

$$\frac{X - X_{\mathrm{r}}}{X_0 - X_{\mathrm{r}}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-n^2\left(\pi^2 D_{\mathrm{ef}} t / R^2\right)}, \tag{3-34}$$

gdje je R promjer čestice

Stoga se i eksperimentalni rezultati sušenja mogu korelirati u obliku neke eksponencijalne funkcije:

$$\frac{X - X_{\mathrm{r}}}{X_0 - X_{\mathrm{r}}} = f(t), \tag{3-35}$$

pri čemu su predložene različite eksponencijalne jednadžbe $f(t)$. U jed. (3-34) i (3-35) X_0 je početni sadržaj vlage.

Najjednostavniji oblik eksponencijalne funkcije ima jednadžba korištena u tzv. *Newtonovom* modelu [70]:

$$\frac{X - X_{\mathrm{r}}}{X_0 - X_{\mathrm{r}}} = e^{-kt}. \tag{3-36}$$

no ta jednadžba ne opisuje dobro proces jer daje preveliku brzinu sušenja u početnom periodu, a premalu u kasnijim fazama sušenja.

Henderson i *Pabis* [71] u svom su modelu predložili modificirani oblik jednadžbe (3-36):

$$\frac{X - X_{\mathrm{r}}}{X_0 - X_{\mathrm{r}}} = a e^{-bt}, \tag{3-37}$$

koja nešto bolje opisuje krivulju sušenja.

Page [72] je u svom modelu predložio jednadžbu koja se i najviše koristi jer dobro aproksimira eksperimentalne podatke:

$$\frac{X - X_{\mathrm{r}}}{X_0 - X_{\mathrm{r}}} = e^{-at^b}. \tag{3-38}$$

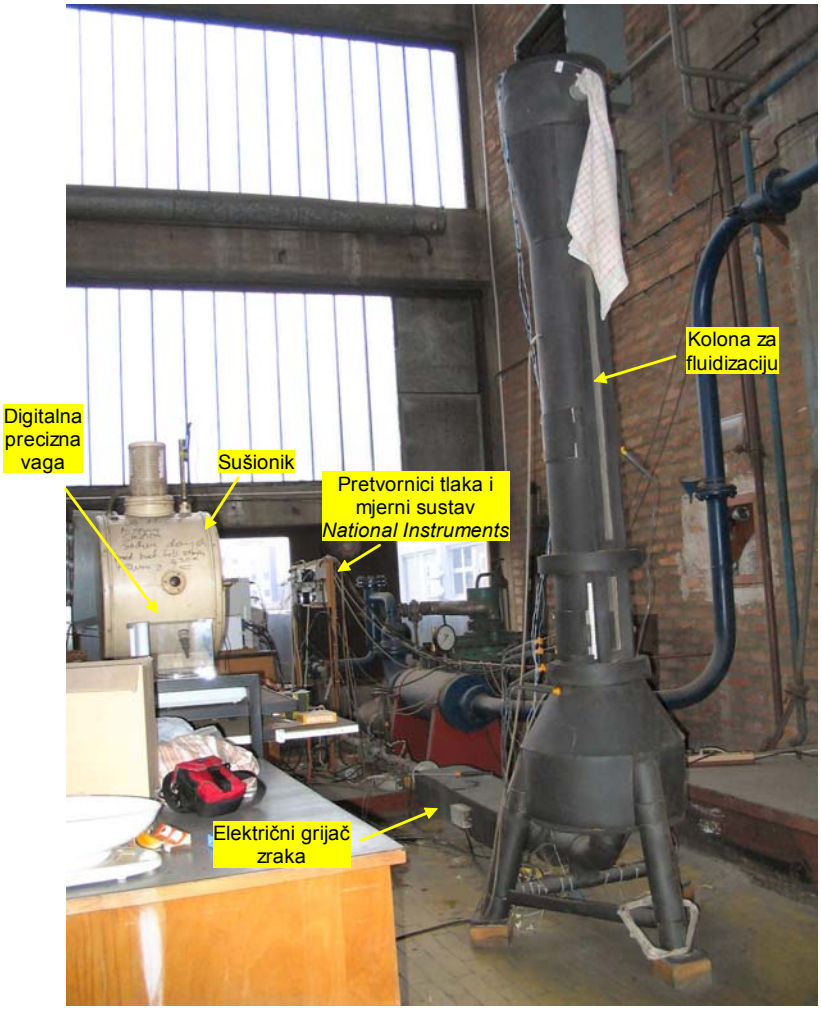
Još je poznata jednadžba iz tzv. „dvočlanog eksponencijalnog modela“ (eng. *Two-term exponential model*) [73] koja koristi prva dva člana rješenja *Fickovog drugog zakona difuzije*:

$$\frac{X - X_{\mathrm{r}}}{X_0 - X_{\mathrm{r}}} = a_1 e^{-b_1 t} + a_2 e^{b_2 t}. \tag{3-39}$$

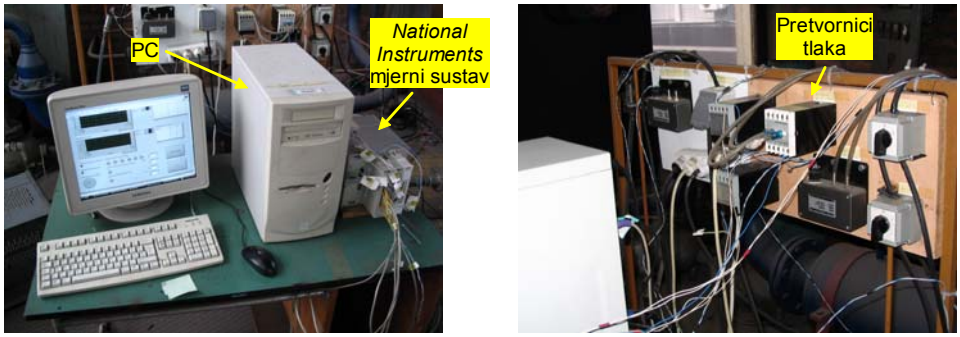
Treba istaknuti da su konstante a i b u gornjim jednadžbama empirijske i ovise o materijalu koji se suši, te o uvjetima sušenja, što predstavlja određeni nedostatak empiričkih modela sušenja.

4 OPIS MJERNE LINIJE

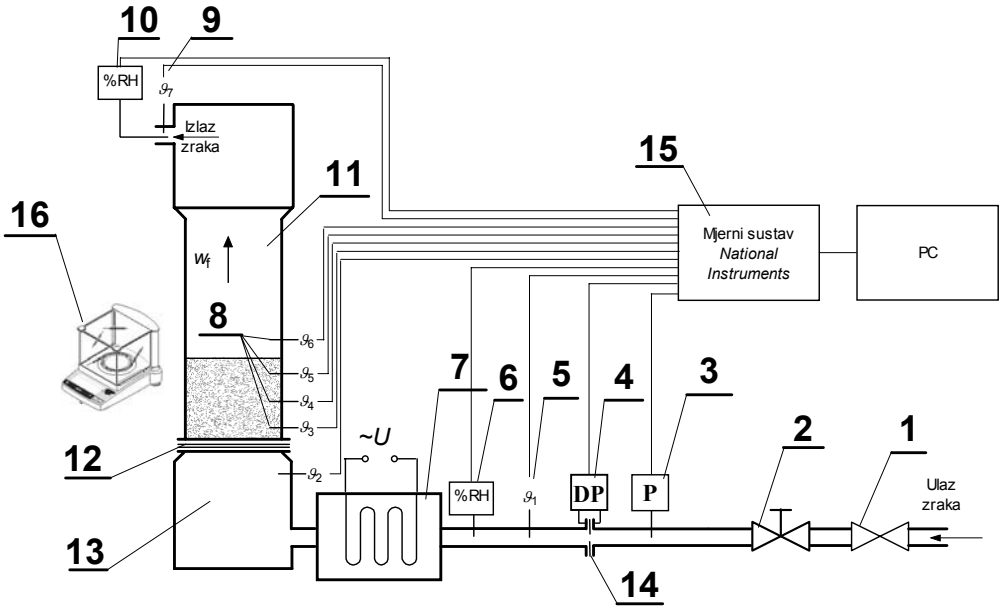
Mjerenja su provedena u prostoru Laboratorija Katedre za tehničku termodinamiku Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, gdje je smještena mjerna linija na kojoj se već duže vrijeme provode eksperimentalna istraživanja prijelaza topline između uronjenih izmjenjivačkih površina i fluidiziranog sloja zrak-čestice. Mjerna linija je stoga morala biti malo modificirana kako bi se prilagodila istraživanju sušenja u fluidiziranom sloju, odnosno toplinski je izolirana te su dodani pretvornici vlage. Korištenu mjernu liniju prikazuju slike 4-1 i 4-2, a njezinu shemu sa svim korištenim aparaturama prikazuje slika 4-3.



Slika 4-1. Mjerna linija za sušenje u fluidiziranom sloju



Slika 4-2. Mjerni sustav *National Instruments* i pretvornici tlaka



Slika 4-3. Shematski prikaz korištene mjerne linije

Mjerna se linija sastoji iz uspravne cilindrične kolone (pozicija **11** na slici 4-3) visine 1300 mm i promjera 200 mm. Cijela kolona, uključivši i električni grijač zraka, toplinski je izolirana HT/Armaflex izolacijom kako bi se spriječio gubitak topline u okoliš. Zrak (fluidizator) ulazi u kolonu kroz podnicu **12** iz tlačne komore (plenuma) **13**. Podnica nosi sloj ječma i pšenice jednake visine 135 mm u svim mjerenjima. Zrak se za potrebe fluidizacije dobavlja iz velikog tlačnog spremnika (15 m^3) koji je spojen na stapni kompresor, a njegov se maseni protok $q_{m,\mathrm{f}}$ određuje ugrađenom mjernom prigušnicom **14** promjera 51/20 mm. Pad tlaka na prigušnici kao i apsolutni tlak zraka prije mjerne prigušnice registriraju se pomoću pretvornika tlaka **3** i **4**. Sve temperature mjere se pomoću štapnih termoparova tipa K. Unutar sloja mjerene su tri temperature ϑ_3, ϑ_4 i ϑ_5 na visinama 45, 75 i 105 mm iznad podnice kako bi se dobila prosječna temperatura fluidiziranog sloja. Za prikupljanje i prikaz vrijednosti temperatura i tlaka koristi se mjerni sustav *National Instruments Corporation* **15**. Tijekom provođenja eksperimenata brzina zraka w_f mijenjana je pomoću finog regulacijskog ventila **2**. Pomoću protočnog ventila **1** zrak se iz tlačnog spremnika puštao u mjernu liniju. Za zagrijavanje zraka na traženu temperaturu ϑ_2 koristi se električni grijač zraka **7** koji je načinjen od dva cijevna orebrena grijača, svaki snage 1500 W, postavljena u kućište od

savijenog lima pravokutnog profila. Jedan grijač direktno je spojen na strujnu mrežu 220 V, a drugi je reguliran putem zakretnog transformatora 220 V kako bi se mogla kontrolirati količina topline predana zraku i na taj način održavati konstantnom ulazna temperatura zraka. Za mjerenja mase uzoraka tijekom eksperimenata koristi se digitalna precizna vaga *Mettler Toledo* **16** PB 303-S Delta-Range mogućnosti očitanja 0,001 g. Uzorci ječma sušili su se u laboratorijskom sušioniku 20 sati, a pšenica 19 sati na temperaturi 130 °C. Za određivanje relativne vlažnosti ulaznog i izlaznog zraka koriste se pretvornici vlage *Vaisala* HMP50 **6** i **10**, te se iz njih računaju vrijednosti sadržaja vlage ulaznog i izlaznog zraka.

4.1 OPIS POJEDINIH ELEMENATA MJERNE LINIJE

4.1.1 Kolona za fluidizaciju

Projektirana kolona (montažni crtež prikazan je na slici 4-4) predviđena je za nastajanje fluidiziranog sloja čestica krutog materijala prolaskom struje zraka kroz distributivnu ploču kojom je pregrađen donji dio kolone za fluidizaciju.

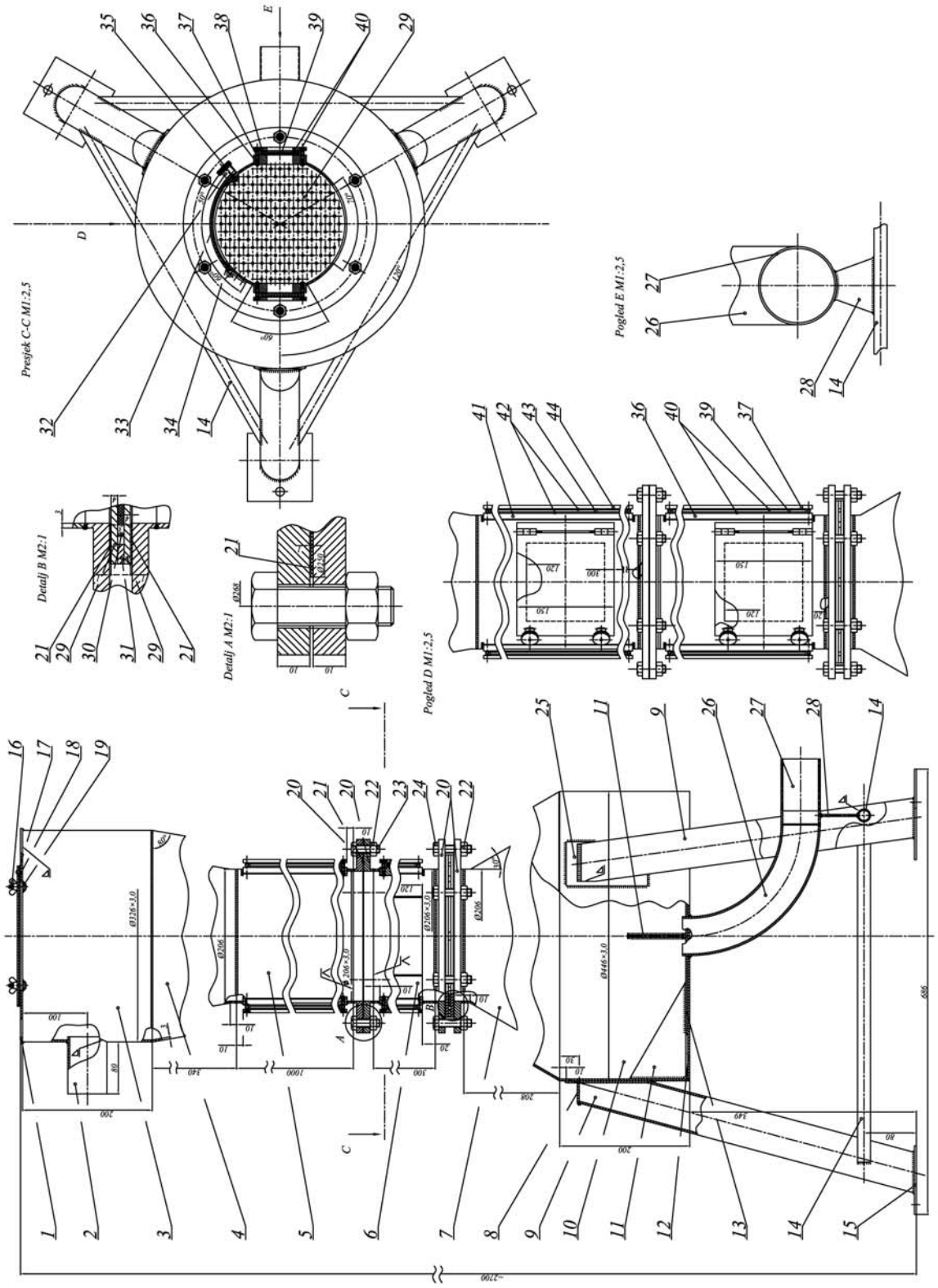
Fluidizirana kupka sastoji se od gornjeg i donjeg cilindra (pozicija ***5*** i ***6*** na slici 4-4) unutarnjeg promjera 200 mm, visine 300 i 1000 mm, a izrađena je iz dva dijela da bi se omogućila lakša manipulacija i rastavljanje. Materijal kupke je čelični lim debljine 3 mm.

Distributivnu ploču predstavljaju dvije perforirane mjedene ploče, slika 4-5, sa 166 otvora promjera 4 mm. Između ploča nalazi se sloj poroznog materijala (staničevina, pozicija ***30*** na slici 4-4). Uloga staničevine je onemogućavanje propada čestica u plenum kolone i stvaranje dovoljnog pada tlaka kako bi se omogućila jednolika razdioba zraka kroz sve istrujne otvore distributivne ploče u fluidizirani sloj. Stvaranjem dostatnog otpora na ploči svi otvori postaju „aktivni“, što sprječava pojavu lokalnih „proboja“ u sloju.

Zrak dolazi iz donjeg plenuma (pozicija ***10***) koji se nalazi ispod podnice. Na plenum su još učvršćene cijevi (pozicija ***26*** i ***27***) za dovod stlačenog zraka iz kompresora.

Po visini cilindričnog dijela kupke nalaze se dva dijametralno suprotna procjepa s umetkom od stakla da bi se pratio tok fluidizacije u kupki. Na plaštu se nalaze još otvori za punjenje i pražnjenje kupke, te još jedan otvor za uzimanje uzoraka.

Zrak iz kupke izlazi kroz gornji konus i plenum (pozicije ***3*** i ***4***), te izlazi kroz ispušnu cijev (pozicija ***2***) na koju je učvršćen vrećasti filtar za odvajanje čestica nasipa koje odnosi zrak.



Slika 4-4. Montažni crtež kolone za fluidizaciju

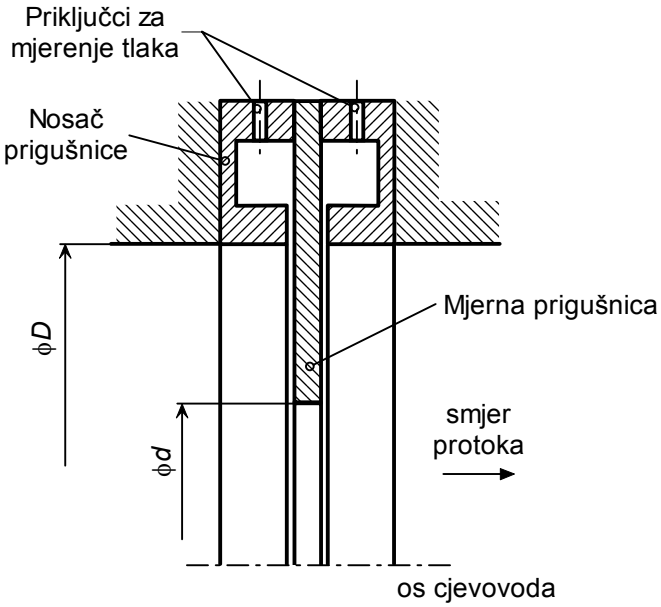
Slika 4-5. Distributivna ploča

4.1.2 Mjerna prigušnica

Maseni protok zraka u koloni za fluidizaciju određuje se mjerenjem pada tlaka na mjernoj prigušnici. Algoritam proračuna je zadan standardom ISO 5167-1:1991(E) za izračunavanje protoka fluida kroz mjerne prigušnice, venturi cijevi i sapnice.

4.1.2.1 Pregled jednadžbi prema ISO 5167-1:1991(E)

Ugrađena mjerna prigušnica je izvedena s ugradbenim prstenima kod kojih su priključci za mjerenje razlike tlaka Δp izvedeni u „uglu“, tj. neposredno uz odgovarajuće plohe prigušnice (slika 4-6).



Slika 4-6. Izvedba prigušnice s ugradbenim prstenima

Opći izraz za mjerenje masenog protoka fluida mjernom prigušnicom glasi:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} e_1 \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1}\,, \tag{4-1}$$

gdje je C faktor protjecanja, β omjer svijetlih otvora prigušnice i cjevovoda u koji je prigušnica ugrađena: $\beta = d/D$, e_1 faktor ekspanzije koji se odnosi na uzvodne uvjete strujanja, $\pi d^2/4$ površina svijetlog otvora prigušnice, Δp razlika tlaka neposredno ispred i iza prigušnice i ρ_1 gustoća fluida uzvodno od mjerne prigušnice.

Faktor protjecanja C može se izračunati pomoću *Stolzove* jednadžbe:

$$C = 0{,}5959 + 0{,}0312\beta^{2,1} - 0{,}1840\beta^8 + 0{,}0029\beta^{2,5}\left(\frac{10^6}{Re_\mathrm{D}}\right)0{,}75 +$$

$$+ 0{,}090 L_1 \beta^4 \left(1-\beta^4\right)^{-1} - 0{,}0337 L_2' \beta^3\,, \tag{4-2}$$

gdje je Re_D *Reynoldsova* značajka strujanja u cjevovodu ispred prigušnice, L_1 omjer udaljenosti uzvodnog priključka za mjerenje tlaka od uzvodne plohe prigušnice i svijetlog otvora cjevovoda, a L_2' omjer udaljenosti nizvodnog priključka za mjerenje tlaka od nizvodne plohe prigušnice i svijetlog otvora cjevovoda. Ako su priključci za mjerenje razlike tlaka Δp izvedeni u „uglu“, onda je:

$$L_1 = L_2' = 0\,.$$

Faktor ekspanzije e_1 obuhvaća promjenu gustoće u slučaju protoka kompresibilnog fluida. Empirijska jednadžba kojom se računa e_1 glasi:

$$e_1 = 1 - \left(0{,}41 + 0{,}35\beta^4\right)\frac{\Delta p}{\kappa p_1}\,, \tag{4-3}$$

gdje je κ eksponent izentropske ekspanzije, a p_1 statički tlak u cjevovodu ispred prigušnice.

Ograničenja uz koja vrijedi primjena navedenih jednadžbi za mjerenje masenog protoka mjernom prigušnicom glase:

a) Ograničenja u pogledu d, D i β:

$d \geq 12{,}5$ mm

$50 \text{ mm} \leq D \leq 1000 \text{ mm}$

$0{,}2 \leq \beta \leq 0{,}75$

b) Ograničenja u pogledu Re_D i β:

$Re_\mathrm{D} \geq 5000$ za $0{,}2 \leq \beta \leq 0{,}45$

$Re_\mathrm{D} \geq 10000$ za $\beta > 0{,}45$

c) Ograničenja u pogledu relativne hrapavosti su dana u tablici 4-1, a relativna hrapavost je definirana u točki 3.3.6 predmetnog standarda. Približne vrijednosti apsolutne hrapavosti k za različite vrste cijevi dane su u tablici 4-2.

Tablica 4-1. Gornje vrijednosti relativne hrapavosti uzvodnog cjevovoda za mjerne prigušnice

β	≤ 0,3	0,32	0,34	0,36	0,38	0,4	0,45	0,5	0,6	0,74
$10^4\, k / D$	25	18,1	12,9	10,0	8,3	7,1	5,6	4,9	4,2	4,0

Tablica 4-2. Približne vrijednosti apsolutne hrapavosti k za cijevi

Materijal	Stanje	k, mm
Mjed, bakar, aluminij, plastika, staklo	Glatke, bez naslaga	< 0,03
Čelik	nove, bešavne, hladno vučene	< 0,03
	nove, bešavne, toplo vučene	
	nove, bešavne, valjane	0,05 do 0,10
	nove, uzdužno zavarene	
	nove, spiralno zavarene	0,1
	umjereno korodirane	0,1 do 0,2
	korodirane	0,2 do 0,3
	s korozivnim tavernama	0,5 do 2
	s dubokim korozivnim tavernama	> 2
	bitumenizirane – nove	0,03 do 0,05
	bitumenizirane normalne	0,10 do 0,20
	galvanizirane	0,13
Lijevano željezo	novo	0,25
	korodirano	1,0 do 1,5
	s korozivnim kavernama	> 1,5
	bitumenizirano novo	0,03 do 0,05
Azbestni cement	izolirane i neizolirane, nove	< 0,03
	neizolirane, normalne	0,05

d) Faktor ekspanzije e_1 može se izračunati pomoću jednadžbe (4-3) samo ako je $p_2/p_1 \geq 0{,}75$

e) Standardom je u potpunosti definirana geometrija prigušnice, hrapavost obrade kao i način provjere ispunjenosti ovih uvjeta. Zahtjevi i ograničenja u pogledu ugradnje mjerne prigušnice definirani su točkom 7. ovog standarda koja također obuhvaća i definira upotrebu i izgled uređaja za smirivanje strujanja koji se primjenjuju u slučaju da ne postoji dužina ravne cijevi ispred prigušnice dovoljna za postizanje ujednačenog polja tlaka po presjeku cijevi ispred prigušnice.

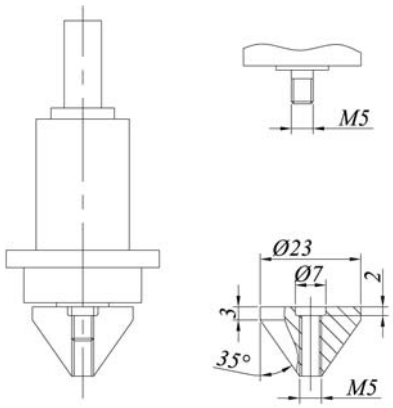
Ugrađena mjerna prigušnica zadovoljava geometrijske uvjete jer je omjer $\beta = 0{,}39$ za zadanu geometriju. Uvjet u pogledu *Reynoldsovog* broja Re_D provjerava se za vrijeme mjerenja prema izmjerenim veličinama, dok je uvjet postavljen na relativnu hrapavost ulazne cijevi za zrak isto tako ispunjen jer je za $k = 0{,}03$ (apsolutna hrapavost nove, bešavne, hladno vučene cijevi)

$$10^4 k / D = 10^4 \cdot 0{,}03 / 51 = 5{,}88 < 7{,}7.$$

Omjer tlakova p_2/p_1 kontrolira se za vrijeme mjerenja. Proračun masenog protoka zraka je iteracijski jer je faktor protjecanja C ovisan o protoku pa se u prvom koraku mora pretpostaviti neka vrijednost $q_{m,\mathrm{f}}$.

4.1.3 Fini regulacijski ventil

Za regulaciju masenog protoka zraka koristi se modificirani protočni ventil kojemu je pladanj zamijenjen koničnim elementom koji omogućava finu regulaciju protoka zraka. Skica ventila prikazana je na slici 4-7.



Slika 4-7. Crtež ventila za finu regulaciju protoka

4.1.4 Instrumenti za mjerenje temperature

Za mjerenje temperature koriste se štapni termoparovi tipa K (nikal/krom-nikal) *SureGrip Immersion Temperature Probe* proizvođača *Fluke Corporation*, SAD. Podaci za sonde su sljedeći:

- dužina sonde 8,375″ (21,27 cm);
- dužina kabla sonde 40″ (1 m);
- mjerni raspon: -40 do 1090 °C;
- deklarirana točnost: ± 2,2 °C u području -40 do 293 °C, odnosno ±0,75% u području od 293 do 1090 °C; Sonde su klasa 2 prema standardu ASTM-E230-1993.

Za prikupljanje i pretvorbu termonapona u temperature, kao i kasniju obradu, koristi se mjerni sustav proizvođača *National Instruments Corporation* (pozicija **15** na slici 4-3) na koji se sonde spajaju preko kompenzacijskih kabela za K tip termoparova, i *LabVIEW* programski paket istog proizvođača. Pretvorba termonapona u temperaturu obavlja se preko gotovih funkcija u *LabVIEW* softveru.

4.1.5 Instrumenti za mjerenje tlaka

Za mjerenje tlaka i razlike tlaka koriste se pretvornici tlaka određenih mjernih područja, dok se prikupljanje i obrada njihovog signala (naponskog ili strujnog) obavlja pomoću mjernog sustava *National Instruments* i mjernog softvera *LabVIEW*.

4.1.5.1 Pretvornik apsolutnog tlaka GS4102

Pretvornik apsolutnog tlaka GS4102 (proizvođač: *Ellison Sensors International*, Velika Britanija) spada u seriju preciznih pretvornika apsolutnog tlaka. Primjenjuje se za kontinuirano mjerenje tlaka ulja, plinova, vode i drugih tekućina u različitim granama industrije.

Slika 4-8. Pretvornik apsolutnog tlaka ESI GS4102

SPECIFIKACIJE

Model: GS4102

Serijski broj: 54146

Mjerni raspon: 0 – 2 bar apsolutnog tlaka

Napajanje: 0 – 30 V istosmjerne struje

Izlaz: 0-10 V istosmjerne struje

4.1.5.2 Pretvornik razlike tlaka PR3202

Pretvornik razlike tlaka PR3202 (proizvođač: *Ellison Sensors International*, Velika Britanija) omogućuje precizno mjerenje vrlo malih razlika tlaka zraka i ostalih plinova.

Slika 4-9. Pretvornik razlike tlaka ESI PR3202

SPECIFIKACIJE

Model: PR3202

Serijski broj: 54147

Mjerni raspon: 0 – 50 mbar razlike tlaka

Napajanje: 0 – 30 V istosmjerne struje

Izlaz: 0 – 10 V istosmjerne struje

4.1.5.3 Pretvornik razlike tlaka 3A20-1H5

Pretvornik razlike tlaka 3A20-1H5 (proizvođač: MARUS-ATM, Zagreb, Hrvatska) omogućuje mjerenje razlika tlaka zraka i ostalih plinova.

SPECIFIKACIJE

Model: 3A20-1H5

Mjerni raspon: 0 – 350 mbar razlike tlaka

Napajanje: 0 – 24 V istosmjerne struje

Izlaz: 4 – 20 mA istosmjerne struje

4.1.6 Pretvornik temperature i relativne vlažnosti HMP50

Pretvornik temperature i relativne vlažnosti HMP50 (proizvođač: *Vaisala*, Finska) omogućuje mjerenje temperature i relativne vlažnosti zraka:

Slika 4-10. Pretvornik temperature i vlage HMP50

SPECIFIKACIJE

Model: HMP50

Mjerni raspon:

0 – 98% relativne vlažnosti i -10 – 60 °C

Deklarirana točnost na 20 °C:

±3% RH u području 0 – 90% RH, ±5% RH od 90 – 98% RH i ±0,6 °C

Stabilnost: ±2% RH u razdoblju od dvije godine

Temperaturni osjetnik: Pt 1000 IEC 751 klasa B

4.1.7 Digitalna vaga PB303-S Delta-Range

Digitalna vaga PB303-S Delta-Range (proizvođač: *Mettler Toledo*, Švicarska) precizna je vaga s dvojnim rasponom koja nudi očitanje od 0,001 g za uzorke mase do 60 g i 0,01 g za uzorke od 60 do 310 g.

Slika 4-11. Digitalna vaga PB303-S

SPECIFIKACIJE

Model: PB 303-S

Maksimalni kapacitet: 60 g/310 g

Očitanje: 0,001 g/0,01 g

Linearnost: ±0,002 g/0,01 g

Ponovljivost: 0,008 g/0,001 g

Temperaturni otklon: 6 ppm/°C

Tipično vrijeme stabilizacije: 2 s

Klasa točnosti: 2

4.1.8 Pomično mjerilo s digitalnim pokazivačem mjere

Za mjerenje dimenzija zrna koristi se pomično mjerilo s digitalnim pokazivačem mjere proizvođača *HM Müllner Messtechnik* sa sljedećim karakteristikama:

- maksimalna duljina: 155 mm;
- očitanje: 0,01 mm;
- točnost: ±0,02 mm.

4.1.9 Multimetar *Fluke* 189

Multimetar *Fluke* 189 koristi se za mjerenje napona na električnom grijaču zraka. Kako se radi o izmjeničnom naponu multimetar prikazuje RMS (eng. *root mean square*) vrijednosti koje predstavljaju ekvivalentni istosmjerni napon koji bi proizveo istu količinu topline na grijaču kao mjereni napon.

Deklarirane specifikacije uređaja kod mjerenja izmjeničnog napona su sljedeće:

- mjerna nesigurnost: $U = \pm(0{,}4\%$ od rezultata $+ 40 \cdot$ očitanje), normalna razdioba ($2{,}6\sigma$), $P = 99\%$;
- maksimalna rezolucija: 1 μV;
- maksimalni napon: 1000,0 V.

Deklarirana nesigurnost vrijedi za mjerenje pri temperaturama od 18 °C do 28 °C. U suprotnom se još mora dodati i iznos nesigurnosti definiran pomoću temperaturnog koeficijenta:

$$0{,}05 \cdot \text{specificirana mjerna nesigurnost} / \text{°C}.$$

Prilikom mjerenja napona u voltima, V, multimetar se automatski prebacuje na sljedeće raspone napona: 5,0000 V; 50,000 V; 500,00 V i 1000,0 V.

Primjerice, specificirana mjerna nesigurnost kod mjerenja 10 V pri sobnoj temperaturi iznosi:

$$U = \pm(0{,}4\% \cdot 10\ \text{V} + 40 \cdot 0{,}001\ \text{V}) =$$

$$= \pm(0{,}040\ \text{V} + 0{,}040\ \text{V}) = \pm 0{,}080\ \text{V}, \text{ normalna razdioba } (2{,}6\sigma),\ P = 99\%.$$

4.1.10 Multimetar Iskra MI 7030

Multimetar *Iskra* MI 7030 koristi se za mjerenje struje na električnom grijaču zraka. Deklarirane specifikacije multimetra kod mjerenja izmjenične struje su sljedeće:

- mjerna nesigurnost: $U = \pm(2\%$ od rezultata $+ 2 \cdot$ očitanje), normalna razdioba ($2{,}6\sigma$), $P = 99\%$;
- maksimalna rezolucija: 1μA;
- maksimalna struja: 10 A.

Deklarirana mjerna nesigurnost vrijedi pri temperaturama od 16 °C do 30 °C. U suprotnom se još mora dodati i iznos nesigurnosti definiran pomoću temperaturnog koeficijenta:

$$0{,}1 \cdot \text{specificirana mjerna nesigurnost} \cdot \Delta\vartheta,$$

gdje je $\Delta\vartheta = 16\ \text{°C} - \vartheta_{\text{ok}}$ ($\vartheta_{\text{ok}} < 16$ °C) i $\Delta\vartheta = \vartheta_{\text{ok}} - 30$ °C ($\vartheta_{\text{ok}} > 30$ °C).

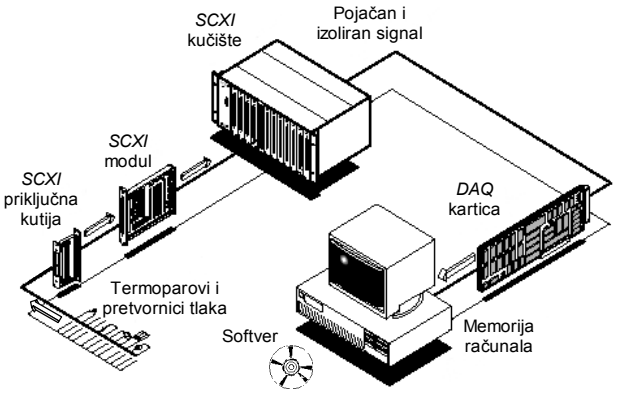
Primjerice, specificirana mjerna nesigurnost kod mjerenja 3 A pri sobnoj temperaturi iznosi:

$$U = \pm(2\% \cdot 3\ \text{A} + 2 \cdot 0{,}01\ \text{A}) =$$

$$= \pm(0{,}06\ \text{A} + 0{,}02\ \text{A}) = \pm 0{,}08\ \text{A}, \text{ normalna razdioba } (2{,}6\sigma),\ P = 99\%.$$

4.1.11 Mjerni sustav *National Instruments*

Za prikupljanje i obradu svih mjerenih veličina temperature i tlaka koristi se mjerni sustav proizvođača *National Instruments Corporation*, SAD, i programski paket *LabVIEW* istog proizvođača. Shematski prikaz tog sustava prikazan je na slici 4-12.



Slika 4-12. Shematski prikaz mjernog sustava *National Instruments*

Sustav se može podijeliti na tri komponente: *SCXI* (*Signal Conditioning eXtensions for Instrumentation*) komponenta za kondicioniranje signala iz osjetnika, *DAQ* (*Data Acquisition*) kartica koja služi kao analogno/digitalni pretvornik i *LabVIEW* programski paket za analizu i obradu mjerenih podataka.

4.1.11.1 SCXI komponenta

SCXI komponenta služi za kondicioniranje ulaznog električnog signala (struja, napon) koji daju osjetnici tlaka, temperature, svjetla, sile ili pomaka. Ti signali se prije ulaza u *DAQ* uređaj moraju pretvoriti u oblik koji on može primiti. Napon koji, npr., proizvodi termoelement je tako malen da se, ovisno o okolišnim uvjetima, može pojaviti značajan šum u signalu. Kako bi se to spriječilo signal se pojačava i po potrebi filtrira prije nego što ga se digitalizira. Takva manipulacija signalom naziva se *kondicioniranje*. U postupke kondicioniranja obično se ubrajaju: (a) pojačavanje signala, (b) izolacija, (c) filtriranje i (d) kompenzacija temperature „hladnog“ spoja kod termoparova ili *CJC* kompenzacija (eng. *Cold Junction Compensation*).

(a) Pojačavanje signala

Pojačavanje signala provodi se radi povećanja točnosti digitaliziranog signala i smanjenja štetnog šuma. Napon koji se dobiva na termoelementu veoma je podložan vanjskim utjecajima pa se preporučuje da *SCXI* sustav bude što bliže izvoru signala.

(b) Izolacija

Naponski signal može biti prevelik za mjernu opremu i računala pa *SCXI* sustav koristi izolaciju i prenaponsku zaštitu.

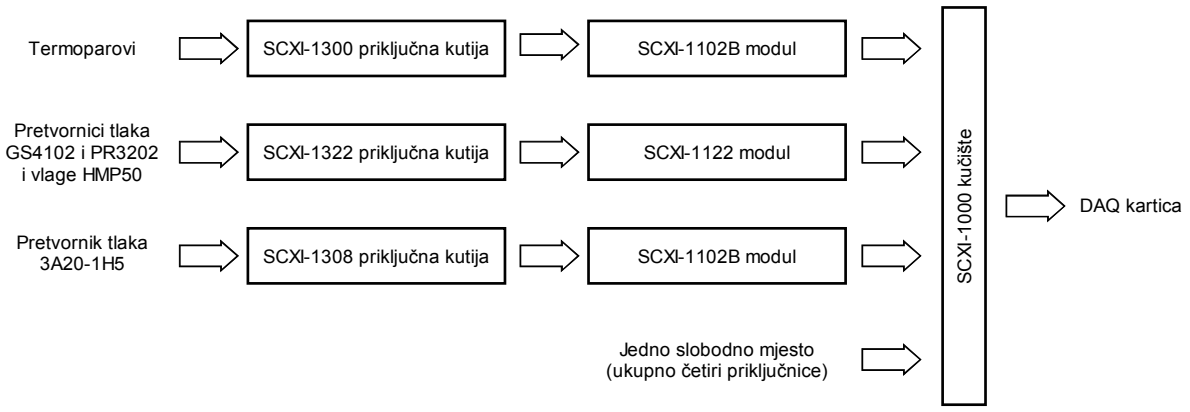
(c) Filtriranje

SCXI sustavi mogu filtrirati neželjeni šum iz signala. Tako niskopropusni filtar na 4 Hz ugrađen u *SCXI* module odstranjuje šum naponskog kabela (frekvencije 50 ili 60 Hz) koji se može javiti u naponskom signalu iz termoelementa. Mnogi *SCXI* moduli imaju programirajuće niskopropusne filtre od 10 do 25 kHz za odstranjivanje svih frekvencija iznad granične.

(d) CJC kompenzacija

Mjerenje temperature pomoću termoparova zahtijeva poznavanje temperature „hladnog“ spoja (ili referentne temperature), tj. temperature mjesta na kojem su žice termopara spojene na mjerni sustav. Većina S*CXI* sustava ima ugrađen osjetnik pomoću kojeg se registrira ta temperatura. Obično se radi o *IC* (*Integrated Circuit*) senzoru ili termistoru[3] koji se nalazi na izotermnoj ploči s vijčanim priključcima na koje se spajaju žice termoparova. Na taj način se postiže točnost mjerenja referentne temperature od ±0,5 °C.

Shemu upotrijebljenih *SCXI* priključnih kutija i pripadajućih modula prikazuje slika 4-13.

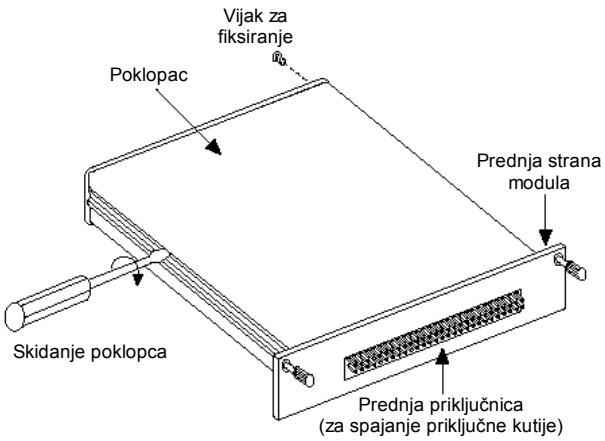


Slika 4-13. Shematski prikaz upotrijebljenih *SCXI* komponenti

4.1.11.1.1 SCXI-1102B modul

SCXI-1102B modul, slika 4-14, namijenjen je kondicioniranju malih (milivolti) i srednjih napona (do 10 V istosmjerne struje), a obično se koristi kod prikupljanja naponskih signala termoelemenata. Pomoću odgovarajućih priključnih kutija (npr. SCXI-1308) moguće je dovesti i strujni signal (0 do 20 mA ili 4 do 20 mA). SCXI 1102-B ima 32 ulazna i jedan *CJC* kanal. Na svakom je kanalu tropolni niskopropusni filtar s graničnom frekvencijom 200 Hz. Na *CJC* kanalu je niskopropusni filtar od 2 Hz. Kako se radi o vrlo malim iznosima napona na svakom kanalu postoji i pojačalo s programirajućim pojačanjem od 1 do 100. Preko *DAQ* uređaja moguće je prikupljati podatke sa svakog kanala posebno, uključujući i *CJC* kanal. Što se tiče softverske kompatibilnosti SCXI-1102B radi u okruženju programskih paketa *ComponentWorks*, *LabVIEW* za *Windows* operacijske sustave, *LabVIEW* za Macintosh računala, *LabWindows/CVI* for *Windows Measure*, *NI-DAQ* za Macintosh i PC kompatibilna računala i *Virtualbench*.

[3] Električni otpornik. Poluvodički element čiji se otpor mijenja na poznati način s temperaturom.

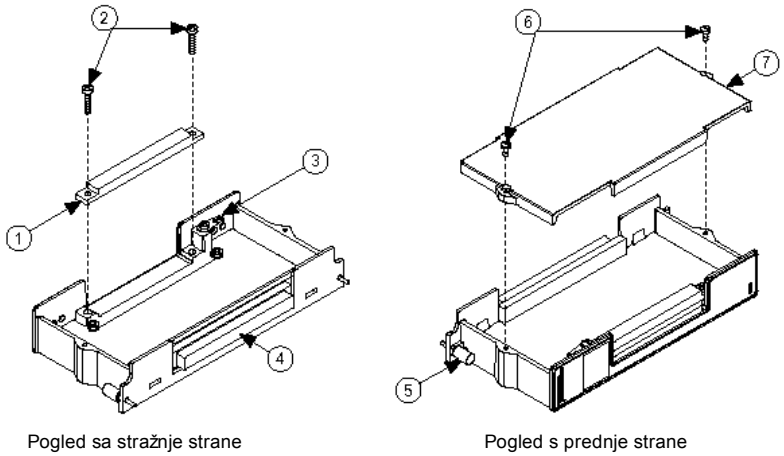


Slika 4-14. SCXI-1102B modul

Potpune specifikacije SCXI-1102B modula mogu se naći u [74]

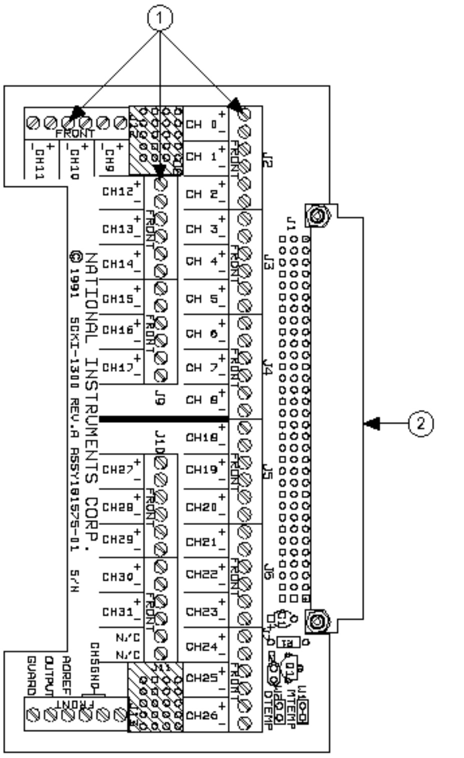
4.1.11.1.2 SCXI-1300 priključna kutija

SCXI-1300 priključna kutija, slika 4-15, služi za spajanje ulaznog naponskog signala iz termoparova, pretvornika tlaka ili drugih osjetnika na modul. Signalne žice spajaju se prema polaritetu (+ ili -) na redne stezaljke (spojnice), slika 4-15. U priključnoj kutiji se nalazi i *IC* senzor za mjerenje referentne temperature.



1 Poluga za fiksiranje signalnih žica	**3** Spojnica za uzemljenje	**4** Priključnica za spajanje na modul	**6** Vijci za gornji poklopac
2 Vijci		**5** Vijak	**7** Gornji poklopac

Slika 4-15. SCXI-1300 priključna kutija



1 Spojnice **2** Priključnica za spajanje na modul

Slika 4-16. Unutrašnjost priključne kutije SCXI-1300

Potpune specifikacije priključne kutije SCXI-1300 mogu se naći u [75].

4.1.11.1.3 SCXI-1122 modul

SCXI-1122 je modul za kondicioniranje signala osjetnika naprezanja, RTD-a (*Resistance Temperature Detector*), termistora, termoparova, naponskih (V i mV) i strujnih signala (4 do 20 mA i 0 do 20 mA). Modul ima 16 ulaznih kanala i jedan *CJC* kanal. Svi kanali imaju programirajuće niskopropusne 4 Hz ili 4kHz filtre za odstranjivanje šuma. Moguće je mjerenje i većih iznosa napona (do ±250 V) s time da se pomoću pojačala na svakom kanalu regulira ulaz do ±10 V.

Potpune specifikacije SCXI-1122 modula mogu se naći u [76].

4.1.11.1.4 SCXI-1322 priključna kutija

SCXI-1322 je visokonaponska priključna kutija koja služi za spajanje signala s osjetnika na SCXI-1122 modul. Sadrži 16 ulaznih spojnica i termistor za registriranje referentne temperature.

Potpune informacije o SCXI-1322 priključnoj kutiji mogu se naći u [77].

4.1.11.1.5 SCXI-1308 priključna kutija

SCXI-1308 priključna kutija služi za spajanje strujnog signala (4 do 20 mA i 0 do 20 mA) s osjetnika na SCXI-1102/B/C i SCXI-1100 module. Sadrži 32 ulazne spojnice s 249 Ω otpornicima za pretvorbu strujnog u naponski signal.

Potpune specifikacije priključne kutije SCXI-1308 mogu se naći u [78].

4.1.11.1.6 SCXI-1000 kućište

SCXI-1000, slika 4-17, kućište je s četiri utora za *SCXI* module. Ono osigurava izoliranu okolinu za kondicioniranje signala iz osjetnika, napajanje i kontrolira rad modula. Kućište je općenamjensko i može se koristiti sa sadašnjim, ali i budućim izvedbama modula.

Slika 4-17. SCXI kućište s modulima i različitim osjetnicima

Potpune specifikacije SCXI-1000 kućišta mogu se naći u [79].

4.1.11.2 DAQ kartica

DAQ kartica je uređaj koji pretvara analogni signal (napon, struja) u digitalni oblik koji se unosi u memoriju računala. Današnje izvedbe obično su u obliku interne kartice koja se priključuje na neki od *plug-in* utora računala. Postoje i eksterne izvedbe koje se spajaju na računalo preko serijskog ili paralelnog ulaza. Kod prijenosnih računala povezivanje se vrši preko *PCMCIA* ulaza. *DAQ* kartica je uređaj opće namjene koji služi samo za pretvorbu dolaznog signala u digitalni oblik, dok se kontrola, obrada i prikaz podataka obavlja na razini instaliranog kompjuterskog programa. Korisnik može sam razviti takve programe ili koristiti već gotove programske pakete, npr. *LabVIEW*, *LabWindows* i slično.

4.1.11.2.1 PCI-MIO-16XE-50 DAQ kartica

PCI-MIO-16XE-50 je 16-bitni analogno/digitalni (A/D) pretvornik koji se priključuje na *PCI* utor računala. Posjeduje 16 ulaznih analognih kanala ukoliko se konfiguriraju u NRSE[4] ili RSE[5] modalitetu, odnosno 8 u DIFF[6] modalitetu. Maksimalna brzina digitalizacije ulaznog analognog signala je 20000 uzoraka u sekundi.

---

[4] Modalitet koji se koristi kad su svi izvori signala spojeni na neki sustav uzemljenja koji ne mora biti zajednički s A/D pretvornikom.

[5] Svi izvori signala spojeni su na jedan sustav uzemljenja koji koristi i A/S pretvornik.

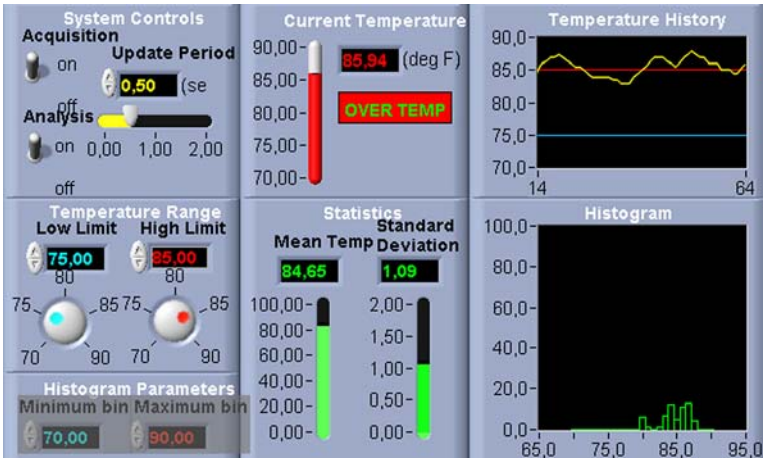
[6] Svaki kanal može imati zaseban sustav uzemljenja neovisan o sustavu uzemljenja A/D pretvornika.

4.1.11.3 LabVIEW programski paket

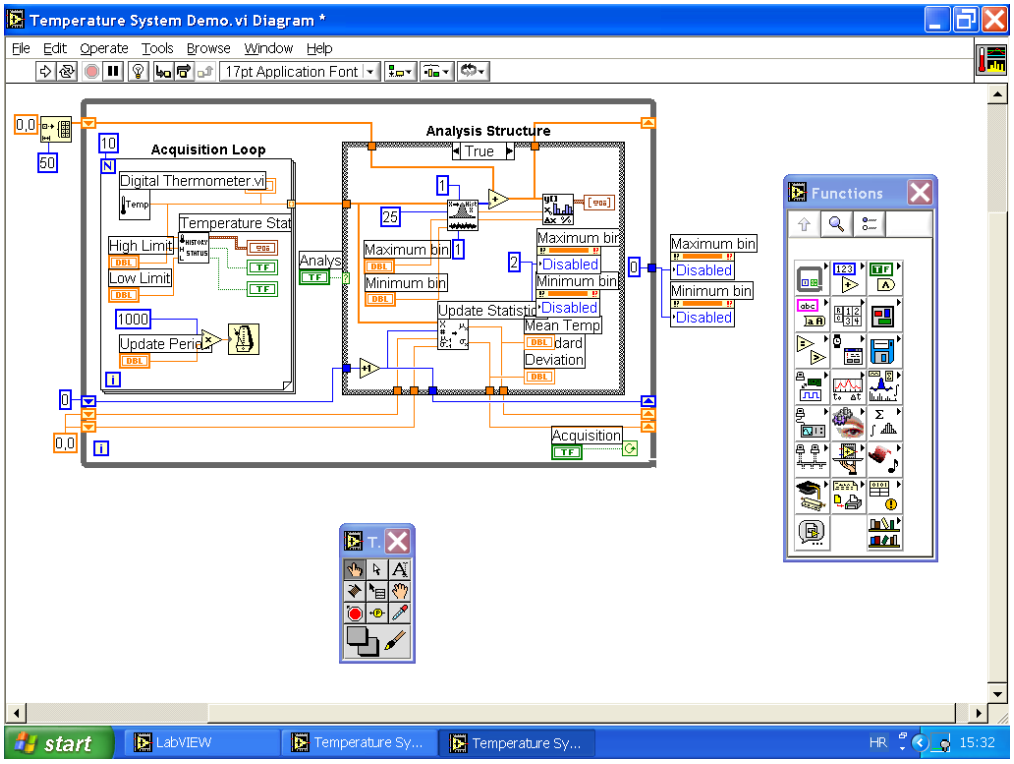
Podaci koje računalo prima su „sirovi“, i kao takvi nemaju neko značenje. Da bi ga dobili, moraju se prikazati u obliku koji korisnik može razumjeti (dijagramski ili tablični prikaz). Programska aplikacija je ta koja mora uzeti sirove podatke, izvršiti određene proračune i prikazati ih u takvom obliku. To uključuje i kontrolu različitih uređaja (npr. *DAQ* pretvornika) pomoću upravljačkih programa (*drivers*). Ti upravljački programi su jedinstveni za svaki uređaj, odnosno tip uređaja, a sadrže set instrukcija koje on prihvaća. Kontrola takvih uređaja je vrlo složena zadaća pa su razvijena različita programska okruženja koja to bitno pojednostavljuju jer koriste gotove funkcije koje korisnik, odnosno programer, mora samo pozivati. Praksa je da proizvođači mjerne opreme sami razvijaju takva programska okruženja i nude ih uz nju. *LabVIEW* je programsko okruženje koje je razvio *National Instruments Corporation* za svoje mjerne sustave. Koristeći odgovarajuće upravljačke programe moguće je kontrolirati i uređaje drugih proizvođača. *National Instruments* je razvio i druga programska okruženja (gdje se koristi tekst za programiranje mjernih aplikacija), a na korisniku je da izabere koji mu odgovara.

LabVIEW programsko okruženje u tom izboru ima određene prednosti:

- *LabVIEW* je grafički programski jezik koji koristi ikone umjesto linija teksta (*koda*) za izradu programskih aplikacija. Za razliku od tekstualnih programskih jezika gdje instrukcije određuju slijed izvršenja programa, u *LabVIEW*-u je bitan izmjeren podatak ili više njih, koji onda pokreću slijed izvršenja programa, i to paralelno u više različitih aplikacija što je omogućeno naprednom strukturom *LabVIEW*-a;
- *LabVIEW* koristi tehniku izrade aplikacija prihvatljivu kako već iskusnim programerima tako i ljudima koji nemaju nikakva programerska znanja. U *LabVIEW*-u korisnik gradi sučelje koristeći *alate* i *objekte*. Korisničko sučelje se naziva *front panel* (slika 4-18). Na njemu se nalaze virtualni instrumenti na kojima korisnik može vidjeti rezultate mjerenja kao na pravim instrumentima i prikaz rezultata obrade podataka koji se prikazuju u različitim oblicima. Kad se definira sučelje dodaje se *kod* koristeći grafičku prezentaciju funkcija za kontrolu objekata na *front panelu*. Ukoliko se pravilno organizira *blok dijagram* u *LabVIEW*-u nalikuje na dijagram toka (slika 4-19);



Slika 4-18. Korisničko sučelje *LabVIEW*-a s virtualnim instrumentima



Slika 4-19. *Blok dijagram* jednog *LabVIEW* programa s funkcijama i alatima

- Kod izrade specijaliziranih aplikacija moguće je koristiti dodatne *alate* koji se integriraju u sučelje *LabVIEW*-a:
- Komunikacija s uređajima je za korisnika riješena na potpuno jednostavan i prihvatljiv način koristeći gotove integrirane funkcije. Na taj način je omogućena komunikacija računala s eksternim uređajima putem *GPIB*, *VXI*, *PXI*, *RS-232*, *RS-485* sučelja ili internim uređajima (*DAQ* kartice) putem *PCI* sučelja. *LabVIEW* omogućuje i jednostavno spajanje aplikacija na Internet koristeći *LabVIEW web server* i programske standarde kao što su *TCP/IP* protokol za umrežavanje i *ActiveX* kontrole;
- Za programsku aplikaciju vrlo je bitna brzina njezinog izvođenja. *LabVIEW* omogućava izradu 32-bitnih aplikacija što daje potrebnu brzinu izvršavanja za prikupljanje i analizu podataka, te kontrolu procesa. Moguća je izrada samostalnih izvršnih paketa ili biblioteka funkcija (*DLL*-ova), koji se lako integriraju u druge programske pakete. Važno je da je *LabVIEW* programski paket preveden na različite računalne platforme (*Windows*, *Macintosh OS*, *Sun Solaris* i *Linux*), a *LabVIEW* programi (tzv. *VI*), napravljeni na jednoj platformi, mogu se pokrenuti na bilo kojoj drugoj bez potrebe za modifikacijom programa;
- *LabVIEW* sadrži opsežne rutine za prikupljanje podataka, analizu, prezentaciju i spremanje. *LabVIEW* sadrži i sve ostale standardne alate koji se mogu naći u drugim naprednim paketima za razvoj programskih aplikacija. U *VI* aplikaciji se mogu postaviti ispitne točke, pratiti tijek izvršenja programa, pratiti korak-po-korak izvršenje programa da bi se otkrivanje pogrešaka i razvoj obavili što lakše;
- *LabVIEW* sadrži brojne mehanizme za pokretanje programa napisanim u drugim programskim jezicima (onim koji imaju mogućnost izrade izvršnih programa ili dijeljenih

biblioteka funkcija *DLL*-ova), *ActiveX* kontrola i niz drugih naprednih programskih tehnologija. Postoji veliki broj nezavisnih programskih rješenja i široka baza podataka na Internetu.

4.1.12 Osobno računalo

Za prihvat *DAQ* kartice, prikupljanje i obradu mjerenih podataka koristi se *PC* sljedeće konfiguracije:

- Pentium 3 procesor, 800 MHz;
- 256 MB PC 133 radne memorije;
- 20 GB tvrdi disk;
- *GeForce2* grafička kartica s 32 MB radne memorije;
- Windows XP operacijski sustav.

Na računalu je instaliran *LabVIEW 7.1* programski paket i *Microsoft Office 2003*.

5 FIZIKALNA SVOJSTVA MATERIJALA

5.1 OLJUŠTENI JEČAM

Oljušteni ječam je zrno ječma pripremljeno za ljudsku upotrebu struganjem zrna pomoću brusnih diskova. Nakon tri brušenja dobiva se ječmeno zrno kojemu su uklonjeni ljuska i posije, a s dva do tri dodatna brušenja dobiva se ljušteni ječam. U istraživanju je upotrijebljen ječam koji se u trgovinama može naći u pakiranjima od 500 ili 1000 g, s vlažnosti do 14,5% i s lomom zrna do 5%. Zrno ječma je izduženog, elipsoidnog oblika s prosječnim veličinama zrna koje su dane u tablici 5-1.

Slika 5-1. Zrnje ječma

Tablica 5-1. Prosječne veličine zrna ječma [80]

Dužina, l	7 – 14 mm
Širina, a	2 – 5 mm
Debljina, b	1,4 – 4,5 mm
Gustoća, ρ	1,13 – 1,4 kg/dm^3
Masa 1000 zrna	31 – 51 g

U istraživanju se međutim za opisivanje oblika zrna koristi srednji geometrijski promjer D_g, m, koji je definiran sljedećim izrazom:

$$D_g = (l \cdot a \cdot b)^{1/3}, \tag{5-1}$$

gdje je l dužina, a širina i b debljina najmanjeg paralelepipeda koji popuno obuhvaća zrno.

Kako bi se ustanovila prosječna vrijednost srednjeg geometrijskog promjera upotrijebljenih zrna ječma, izmjerene su dimenzije l, a i b slučajno izabranih 100 zrna, te se za svako zrno izračunala vrijednost D_g iz čega je onda dobivena prosječna vrijednost.

Tablica 5-2. Dimenzije slučajno izabranih 100 zrna ječma upotrijebljenih u mjerenjima

Broj zrna	l, mm	a, mm	b, mm	D_g, mm
1	6,47	3,37	2,40	3,74
2	6,81	3,40	2,58	3,91
3	6,26	3,57	2,57	3,86
4	5,85	3,49	2,67	3,79
5	5,84	3,51	2,48	3,70
6	5,65	3,44	2,64	3,72
7	5,79	3,08	2,37	3,48
8	5,70	3,19	2,32	3,48
9	5,58	3,23	2,21	3,42
10	6,08	3,12	2,45	3,60
11	6,16	3,56	2,66	3,88

Broj zrna	l, mm	a, mm	b, mm	D_g, mm
51	6,76	3,54	2,58	3,95
52	5,47	3,13	2,36	3,43
53	5,42	3,52	2,65	3,70
54	6,41	3,66	2,68	3,98
55	6,06	3,22	2,42	3,61
56	5,16	2,48	1,82	2,86
57	5,26	3,32	2,49	3,52
58	5,79	3,22	2,30	3,50
59	5,83	3,22	2,41	3,56
60	5,69	3,23	2,40	3,53
61	6,61	3,47	2,65	3,93

12	6,23	3,51	2,57	3,83
13	4,73	3,02	2,11	3,11
14	6,36	2,58	1,72	3,04
15	5,51	3,27	2,26	3,44
16	6,49	3,83	2,58	4,00
17	6,02	3,10	2,16	3,43
18	6,24	3,19	1,98	3,40
19	6,74	3,47	2,35	3,80
20	5,88	3,71	2,62	3,85
21	6,57	3,85	2,64	4,06
22	5,46	3,12	2,24	3,37
23	6,77	3,56	2,50	3,92
24	5,49	3,59	2,53	3,68
25	6,25	3,22	2,39	3,64
26	6,41	3,59	2,56	3,89
27	6,39	3,51	2,52	3,84
28	5,22	3,23	2,39	3,43
29	6,58	3,36	2,45	3,78
30	6,68	3,19	2,48	3,75
31	5,94	3,49	2,67	3,81
32	6,60	3,18	2,12	3,54
33	5,51	3,28	2,36	3,49
34	5,38	3,26	2,42	3,49
35	6,00	3,52	2,51	3,76
36	6,59	3,77	2,89	4,16
37	6,67	3,71	2,72	4,07
38	5,97	3,66	2,70	3,89
39	6,54	3,55	2,64	3,94
40	6,76	2,85	2,08	3,42
41	6,78	3,34	2,29	3,73
42	5,68	3,08	2,16	3,36
43	6,57	3,14	2,31	3,63
44	6,36	3,31	2,60	3,80
45	6,38	3,54	2,73	3,95
46	6,53	3,34	2,53	3,81
47	6,03	3,63	2,67	3,88
48	6,45	3,66	2,75	4,02
49	6,14	3,56	2,66	3,87
50	5,56	3,33	2,61	3,64

62	6,00	3,58	2,67	3,86
63	6,19	2,90	2,04	3,32
64	6,06	3,50	2,54	3,78
65	5,10	2,93	2,07	3,14
66	6,24	3,39	2,59	3,80
67	5,80	2,95	2,12	3,31
68	5,34	3,35	2,37	3,49
69	5,94	3,19	2,41	3,57
70	6,30	3,59	2,62	3,90
71	5,78	2,66	1,99	3,13
72	5,63	3,22	2,39	3,51
73	6,17	3,69	2,79	3,99
74	5,97	3,34	2,47	3,67
75	6,28	3,36	2,48	3,74
76	6,40	3,69	2,77	4,03
77	6,11	2,97	2,26	3,45
78	5,86	3,60	2,69	3,84
79	5,79	3,30	3,28	3,97
80	5,89	3,08	2,32	3,48
81	6,27	3,55	2,71	3,92
82	5,87	3,45	2,53	3,71
83	6,01	3,29	2,35	3,60
84	6,32	3,57	2,80	3,98
85	6,29	3,35	2,57	3,78
86	5,66	3,35	2,65	3,69
87	4,92	2,73	1,98	2,98
88	5,55	3,46	2,46	3,61
89	6,16	3,37	2,51	3,74
90	5,82	3,61	2,87	3,92
91	6,02	3,35	2,68	3,78
92	6,85	3,54	2,70	4,03
93	6,31	3,61	2,77	3,98
94	5,71	3,20	2,32	3,49
95	5,77	3,45	2,70	3,77
96	6,05	3,44	2,59	3,78
97	5,53	3,06	2,15	3,31
98	6,68	3,53	2,88	4,08
99	6,07	2,95	2,21	3,41
100	5,71	3,50	2,58	3,72
			$\overline{D}_g$ =	3,68

Prosječna vrijednost srednjeg geometrijskog promjera iznosi D_g = 3,68 mm. Prosječni sfericitet zrna, Ψ_s, može se izračunati iz jednadžbe [81]:

$$\Psi_s = \frac{D_g}{l_{sr}}, \tag{5-2}$$

gdje je l_{sr} = 6,04 mm srednja dužina izabranih 100 zrna pa je Ψ_s = 0,61.

Toplinska provodnost ječma λ, W/(m K), računa se pomoću jednadžbe iz [82]:

$$\lambda = 0{,}173 + 7{,}51 \cdot 10^{-4} \vartheta + 1{,}51 \cdot 10^{-1} X_{\mathrm{w}}, \tag{5-3}$$

gustoća ρ, kg/m^3, prema [83]:

$$\rho = -858{,}7 X + 1396, \tag{5-4}$$

a specifični toplinski kapacitet c_p, J/(kg K), prema [84]:

$$c_p = 672 + 16{,}8\vartheta + 4200 X_{\mathrm{w}}. \tag{5-5}$$

Temperaturna provodnost ječma a, m^2/s, definirana kao:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p}, \tag{5-6}$$

može se izračunati pomoću jed. (5-3)-(5-5).

Ravnotežni sadržaj vlage ječma X_{r} dan je jednadžbom iz [85]:

$$\varphi = \exp\left[-\frac{A}{\vartheta + C}\exp\left(-BX_{\mathrm{r}}\right)\right], \tag{5-7}$$

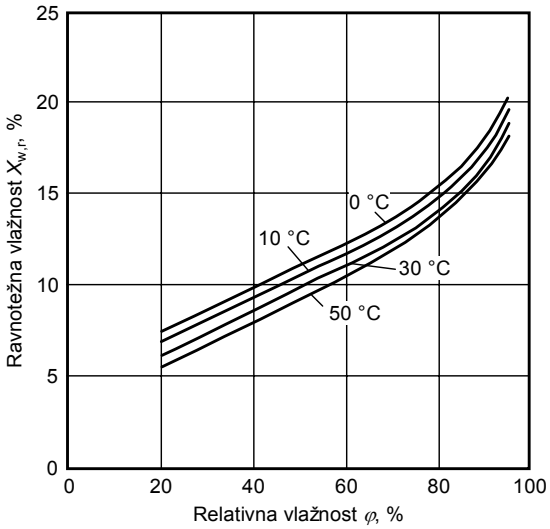
odakle slijedi:

$$X_{\mathrm{r}} = -\frac{1}{B}\ln\left[-\frac{\left(\vartheta + C\right)}{A}\ln\varphi\right]. \tag{5-8}$$

gdje su konstante A = 475,12, B = 0,14843 i C = 71,996.

U gornjoj jednadžbi relativnu vlažnost zraka φ treba uvrstiti kao decimalni broj, temperaturu ϑ u °C, a ravnotežni sadržaj vlage X_{r} se dobiva u postocima.

Dijagram na slici 5-2 prikazuje ovisnost ravnotežne vlažnosti ječma $X_{\mathrm{w,r}}$ o relativnoj vlažnosti zraka φ za različite temperature prema [85].



Slika 5-2. Ravnotežna vlažnost ječma

Zrnje ječma spada u grupu D čestica prema *Geldartovoj* podjeli što znači da se ne može dobiti kvalitetna fluidizacija. Ljuska ječma je teško propusna za vodu, međutim kod oljuštenog zrna je ona odstranjena, čime je jako smanjen otpor difuziji.

5.2 PŠENICA

U ispitivanjima je korištena obična ili meka pšenica (*Triticum vulgare*). Oblik i veličina zrna ovisi o vrsti, a prosječne veličine su navedene u tablici 5-3.

Slika 5-3. Zrnje pšenice

Tablica 5-3. Prosječne veličine zrna pšenice [80]

Dužina, l	4,2 – 8,6 mm
Širina, a	1,6 – 4,0 mm
Debljina, b	1,5 – 3,8 mm
Gustoća, ρ	0,95 – 1,33 kg/dm^3
Masa 1000 zrna	30 – 37 g

Izmjerene dimenzije l, a i b slučajno izabranih 100 zrna pšenice, te izračunate vrijednosti srednjeg geometrijskog promjera D_g prikazane su u tablici 5-4.

Tablica 5-4. Dimenzije slučajno izabranih 100 zrna pšenice upotrijebljenih u mjerenjima

Broj zrna	l, mm	a, mm	b, mm	D_g, mm
1	6,33	2,89	2,78	3,70
2	5,84	3,20	2,80	3,74
3	6,33	3,60	3,18	4,17
4	5,90	3,39	3,06	3,94

Broj zrna	l, mm	a, mm	b, mm	D_g, mm
51	5,84	3,39	3,26	4,01
52	5,84	3,41	2,73	3,79
53	6,57	3,14	3,02	3,96
54	5,91	3,47	3,25	4,05

5	7,78	3,54	2,69	4,20
6	5,70	3,31	2,32	3,52
7	6,62	3,72	3,21	4,29
8	5,56	3,12	2,94	3,71
9	6,21	3,64	3,24	4,18
10	6,58	3,48	3,04	4,11
11	5,74	3,47	3,02	3,92
12	6,18	3,13	2,89	3,82
13	5,38	3,12	3,30	3,81
14	5,29	3,49	3,01	3,82
15	6,30	3,51	3,20	4,14
16	5,75	3,58	2,92	3,92
17	6,28	3,02	2,75	3,74
18	6,50	3,90	3,02	4,25
19	6,32	3,27	2,83	3,88
20	5,13	2,64	2,18	3,09
21	6,07	3,75	3,07	4,12
22	6,68	3,79	3,13	4,30
23	5,57	3,21	2,86	3,71
24	5,83	3,29	3,16	3,93
25	6,24	3,79	3,11	4,19
26	6,20	3,34	3,06	3,99
27	5,70	3,52	3,05	3,94
28	5,85	3,25	2,99	3,85
29	6,64	4,04	3,35	4,48
30	6,01	3,20	2,84	3,79
31	6,12	3,57	3,27	4,15
32	6,16	3,33	2,87	3,89
33	6,51	3,70	3,24	4,27
34	6,14	3,32	3,03	3,95
35	6,15	3,53	2,92	3,99
36	5,84	2,97	2,63	3,57
37	5,27	3,39	2,66	3,62
38	6,18	3,64	2,83	3,99
39	6,23	3,57	3,20	4,14
40	6,23	3,57	3,20	4,14
41	6,69	3,82	3,15	4,32
42	6,42	3,40	3,15	4,10
43	5,72	3,76	3,20	4,10
44	6,43	3,29	3,08	4,02
45	5,85	3,38	2,78	3,80
46	6,34	3,40	2,80	3,92
47	6,42	3,58	3,07	4,13
48	6,32	3,36	3,13	4,05
49	6,87	3,54	3,10	4,22
50	6,33	3,60	3,09	4,13

55	6,16	3,52	2,66	3,86
56	5,78	3,02	2,68	3,60
57	6,03	3,20	3,04	3,89
58	6,41	3,73	3,01	4,16
59	6,48	3,55	3,14	4,16
60	6,19	3,32	3,03	3,96
61	6,22	3,34	3,28	4,08
62	6,05	3,08	2,97	3,81
63	6,32	3,44	2,98	4,02
64	6,35	3,67	3,12	4,17
65	6,04	3,56	3,08	4,05
66	6,08	3,32	2,64	3,76
67	5,57	3,28	2,70	3,67
68	5,73	3,17	2,90	3,75
69	5,28	2,67	3,09	3,52
70	6,02	3,36	3,00	3,93
71	5,78	3,34	2,56	3,67
72	6,33	3,89	2,76	4,08
73	6,34	3,44	2,99	4,03
74	5,61	2,91	3,14	3,71
75	6,00	3,46	3,21	4,05
76	5,80	2,96	2,58	3,54
77	5,75	3,14	2,82	3,71
78	5,90	3,46	2,82	3,86
79	5,53	2,94	2,54	3,46
80	6,11	3,72	3,12	4,14
81	5,81	3,83	3,21	4,15
82	6,49	3,45	3,24	4,17
83	5,32	3,16	2,61	3,53
84	6,04	3,57	3,21	4,11
85	6,26	3,82	3,17	4,23
86	6,24	3,42	2,94	3,97
87	6,03	3,31	2,59	3,73
88	6,19	3,12	2,98	3,86
89	6,57	3,45	3,17	4,16
90	5,74	3,28	2,77	3,74
91	5,92	3,77	3,11	4,11
92	6,24	3,79	3,29	4,27
93	4,92	2,90	2,40	3,25
94	6,67	3,64	3,04	4,19
95	5,69	3,44	2,98	3,88
96	6,58	3,27	3,36	4,17
97	6,62	3,65	2,80	4,07
98	5,73	3,27	3,07	3,86
99	6,05	3,31	2,73	3,80
100	5,94	3,52	2,59	3,78
			$\overline{D}_g$ =	3,94

Prosječna vrijednost srednjeg geometrijskog promjera za 100 zrna pšenice iznosi D_g = 3,94 mm, srednja dužina l_{sr} = 6,08 mm, te je prosječni sfericitet zrna Ψ_s = 0,65.

Druga fizikalna svojstva pšenice dana su jednadžbama kako slijedi:

- toplinska provodnost λ, W/(m K), prema [86]:

$$\lambda = 0{,}1170 + 0{,}11 X_{\mathrm{w}}\,, \tag{5-9}$$

- gustoća ρ, kg/m^3, prema [80]:

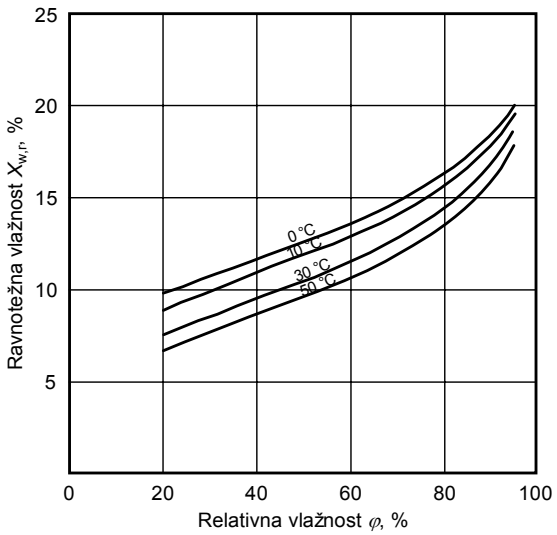
$$\rho = 1398{,}2 + 680 X_{\mathrm{w}} - 6086 X_{\mathrm{w}}^2 + 7470 X_{\mathrm{w}}^3\,, \tag{5-10}$$

- specifični toplinski kapacitet c_p, J/(kg K), prema [80]:

$$c_p = 1396 + 4084 X_{\mathrm{w}}\,, \tag{5-11}$$

- ravnotežni sadržaj vlage X_{r}, kg/kg, pomoću jed. (5-8) gdje su konstante A = 377,52, B = 0,16456 i C = 35,59.

Dijagram na slici 5-4 prikazuje ovisnost ravnotežne vlažnosti meke pšenice $X_{\mathrm{w,r}}$ o relativnoj vlažnosti zraka φ za različite temperature prema [85].



Slika 5-4. Ravnotežna vlažnost meke pšenice

Kao i ječam, zrnje pšenice spada u grupu D prema *Geldartovoj* podjeli.

5.3 TERMODINAMIČKA SVOJSTVA VLAŽNOG ZRAKA

Termodinamička svojstva vlažnog zraka računaju se prema sljedećim jednadžbama:

1. parcijalni tlak vodene pare zasićenog vlažnog zraka p_{s}, bar, prema jednadžbi iz [87]:

$$\ln p_{\mathrm{s}} = -\frac{7843{,}13}{T} - 11{,}714 \ln T + 0{,}010713 T + 86{,}405\,. \tag{5-12}$$

2. sadržaj vlage u vlažnom zraku, [89]:

$$x = \frac{0{,}622 \cdot \varphi \cdot p_{\mathrm{s}}}{p - \varphi \cdot p_{\mathrm{s}}}, \tag{5-13}$$

3. gustoća vlažnog zraka, [89]:

$$\rho = \frac{p \cdot (1 + x)}{461{,}5 \cdot T \cdot (0{,}622 + x)}, \tag{5-14}$$

4. dinamička viskoznost vlažnog zraka, [88]:

$$\eta = 1{,}691 \cdot 10^{-5} + 4{,}984 \cdot 10^{-8} \vartheta - 3{,}187 \cdot 10^{-11} \vartheta^2 + 1{,}319 \cdot 10^{-14} \vartheta^3, \tag{5-15}$$

5. specifična entalpija vlažnog zraka, [89]:

$$h_{1+\mathrm{x}} = 1005\vartheta + x\left(2500 \cdot 10^3 + 1930\vartheta\right). \tag{5-16}$$

U bezdimenzijskoj analizi računa se temperatura granice hlađenja ulaznog zraka ϑ_{sH} rješavanjem sljedećeg sustava jednadžbi iz [89]:

$$\frac{\left(h_{1+\mathrm{x}}\right)_{\mathrm{sH}} - \left(h_{1+\mathrm{x}}\right)_{1}}{x_{\mathrm{sH}} - x_{\mathrm{d1}}} = h_{\mathrm{vsH}} = c_{\mathrm{v}} \vartheta_{\mathrm{sH}} \tag{5-17}$$

i

$$x_{\mathrm{sH}} = 0{,}622 \frac{p_{\mathrm{s}}\left(\vartheta_{\mathrm{sH}}\right)}{p - p_{\mathrm{s}}\left(\vartheta_{\mathrm{sH}}\right)}. \tag{5-18}$$

Specifične entalpije u jednadžbi (5-17) računaju se pomoću jed. (5-16).

6 UMJERAVANJE INSTRUMENATA I ANALIZA MJERNE NESIGURNOSTI

6.1 ODREĐIVANJE NETOČNOSTI MJERENJA

Mjerenjem se utvrđuje vrijednost fizikalne veličine u odnosu prema odabranoj mjernoj jedinici. Pri tom će svaki mjerni rezultat imati neku pogrešku, odnosno neće biti jednak stvarnoj vrijednosti fizikalne veličine. Mjerna nesigurnost je podatak u mjernom rezultatu kojim se iskazuje s kolikom je nesigurnošću poznata izmjerena vrijednost fizikalne veličine [90].

6.1.1 Klasifikacija mjernih pogrešaka

Mjerne se pogreške prema tradicionalnom shvaćanju svrstavaju u dvije velike skupine: (a) na *odredljive pogreške* ili, kako se vrlo često nazivaju, *sustavne pogreške* i (b) *neodredljive pogreške* ili *slučajne pogreške*. Te dvije skupine pogrešaka nemaju čvrstu granicu, nego će klasifikacija neke pogreške ovisiti o subjektivnim okolnostima kao što su kakvoća mjerne opreme, znanje, iskustvo ili vrijeme.

6.1.1.1 Sustavne mjerne pogreške

Sustavne mjerne pogreške najčešće nastaju zbog nesavršenosti mjernog postupka, mjera, mjernih uređaja, mjerene fizikalne veličine kao i zbog utjecaja okoliša i subjektivnog utjecaja samog mjeritelja. Većina sustavnih pogrešaka ima stalnu vrijednost, a time i određen predznak, tj. sustavne pogreške djeluju jednostrano. Zbog njihove mnogobrojnosti, sustavne pogreške se klasificiraju u tri glavne skupine.

Prva skupina su *metodske sustavne pogreške* koje imaju izvor u samom mjernom postupku, metodi, druga skupina su sustavne pogreške *mjernih uređaja*, a treću skupinu tvore *osobne pogreške* mjeritelja uzrokovane njegovim psiho-fizičkim nedostacima.

Sustavne pogreške mogu se prepoznati, odrediti i otkloniti, pa se s njima može računati.

6.1.1.2 Slučajne mjerne pogreške

Slučajne mjerne pogreške rezultat su neizbježnih promjena koje nastaju u mjerama, mjernim uređajima, mjernom objektu, okolišu i mjeritelju, a koje on nije u stanju ocijeniti i korekcijom ispraviti. Te pogreške se prepoznaju kad se mjerenjem stalne fizikalne veličine, istim mjernim uređajem i pod istim okolišnim uvjetima (subjektivna ocjena mjeritelja), dobivaju rezultati koji međusobno odstupaju. Svi se oni gomilaju oko neke vrijednosti, ali se ne može protumačiti zašto su neke izmjerene vrijednosti iznad, a neke ispod te određene vrijednosti. Uzroci slučajnih pogrešaka mogu se svrstati u četiri glavne skupine: (a) nesavršenost mjera i mjernih uređaja, (b) nesavršenost ljudskih osjetila, (c) utjecaj i promjenjivost okoliša i (d) nedovoljno mjerno iskustvo i znanje ispitivača.

Slučajne mjerne pogreške mogu se smanjiti, npr. većim brojem ponovljenih mjerenja, ali se nikada ne mogu izbjeći. Analiza velikog broja ponovljenih mjerenja pokazuje da se pojavljivanje slučajnih pogrešaka pokorava zakonu slučaja, tj. teoriji vjerojatnosti, pa analiza tih pogrešaka spada u područje teorije pogrešaka i matematičke statistike.

Slučajne pogreške su prema zakonima statistike raspodijeljene oko neke vrijednosti, odnosno raspodijeljene su u određenom području. Interval koji je pokriven jednim dijelom cjelokupne raspodjele pogrešaka (sa specificiranom sigurnošću) naziva se *interval tolerancije*, a krajnje točke tog intervala *granice tolerancije* ili *tolerancija*.

Standardni zakon statističke raspodjele specificira sigurnost za tehnička mjerenja s 95%, što znači da će se rezultati mjerenja kretati unutar područja tolerancije s 95% sigurnošću, pri čemu se kod mjernih uređaja obično tolerancija odnosi na cjelokupno mjerno područje, a ne na trenutnu izmjerenu vrijednost.

6.1.2 Mjerna nesigurnost

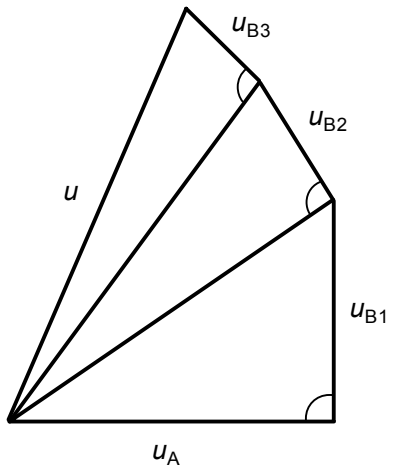
Prema [90] sastavnice mjerne nesigurnosti svrstavaju se u dvije skupine, i to prema načinu procjene nesigurnosti:

- *nesigurnost tipa A* (u_A): određuje se na temelju razdiobe učestalosti (frekvencija) pojedinih očitanja dobivenih ponavljanjem mjerenja;
- *nesigurnost tipa B* (u_B): procjenjuje se na temelju drugih izvora podataka kojima je opisana mjerna nesigurnost, npr. iz iskustva, iz umjernica, iz proizvođačevih podataka itd.

Ukupna nesigurnost definirana je kao ukupni geometrijski zbroj pojedinih komponenti prema sljedećem izrazu:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \ . \tag{6-1}$$

Kad postoji više komponenti nesigurnosti, one se geometrijski zbrajaju kako je prikazano na slici 6-1.



Slika 6-1. Ukupna nesigurnost kao geometrijski zbroj pojedinih komponenti

6.1.2.1 Procjena mjerne nesigurnosti tipa A

U većini slučajeva je najbolja procjena mjerene vrijednosti srednja vrijednost iz n mjerenja:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \,. \tag{6-2}$$

Zbroj odstupanja vrijednosti pojedine veličine x_i od njene srednje vrijednosti $\bar{x}$ jednaka je 0:

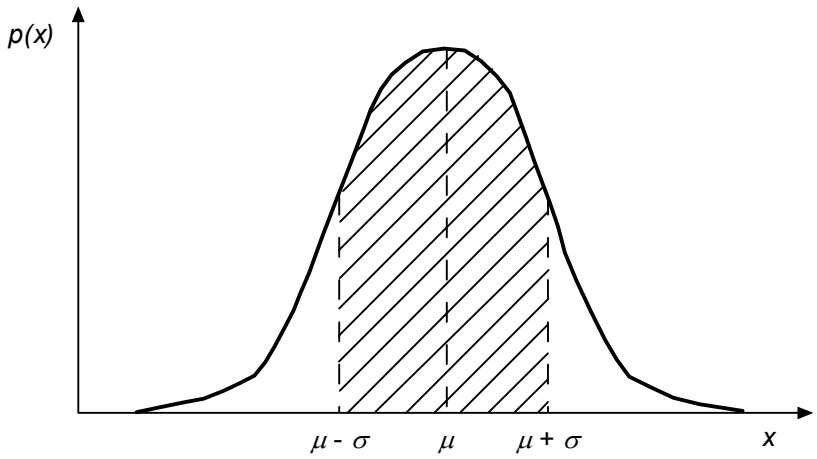
$$\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right) = 0 \,. \tag{6-3}$$

Srednja vrijednost $\bar{x}$ dakle ne predstavlja pravi iznos mjerene veličine nego samo najbolju aproksimaciju koja se može dobiti iz dotične serije mjerenja, uz pretpostavku da su pogreške nastale u mjernom postupku isključivo slučajne prirode. Mjera za disperziju rezultata oko srednje vrijednosti dana je izrazom *standardne devijacije*:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \,. \tag{6-4}$$

Za veliki broj mjerenja, $n > 25$, obično se umjesto $(n - 1)$ u nazivniku stavlja n. Standardna devijacija predstavlja točnost s kojom je izvršeno pojedino mjerenje. Što je ona manja, za niz mjerenja kaže se da je točniji.

Prema teoriji vjerojatnosti, za veliki broj mjerenja čije vrijednosti variraju prema načelu slučajnosti, rezultati mjerenja najčešće slijede *normalnu* razdiobu, slika 6-2. Na slici μ predstavlja očekivanu vrijednost mjernih rezultata koja je u većini slučajeva jednaka srednjoj vrijednosti iz mjerenja $\bar{x}$. Približno 68,3% rezultata bit će tada unutar intervala radijusa σ oko srednje vrijednosti, 95,44% rezultata nalazit će se unutar radijusa 2σ, a 99,73% unutar radijusa 3σ. Dakle, unutar intervala $\pm 3\sigma$ nalaze se praktički sve pogreške mjerenja.



Slika 6-2. Normalna razdioba

Prema gore navedenom standardna nesigurnost tipa A iskazuje se izrazom za standardnu devijaciju:

$$u_{\mathrm{A}}(x_i) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\,. \tag{6-5}$$

Ako postoji mali broj mjernih rezultata, onda određivanje standardne nesigurnosti tipa A pomoću normalne razdiobe nije dovoljno sigurno, pa se u mjeriteljstvu upotrebljava *Studentova* razdioba[7].

6.1.2.2 Mjerna nesigurnost tipa B

Kod određivanja mjerne nesigurnosti se osim statističkog pristupa mogu koristiti i drugi izvori podataka kojima je opisana mjerna nesigurnost, jer je često zbog ograničenih mogućnosti na raspolaganju samo jedan izmjeren podatak ili vrlo mali broj njih.

Mjerna nesigurnost tipa B se u tom slučaju procjenjuje iskustvenom prosudbom na temelju raznih izvora kao što su:

- prethodni mjerni podaci;
- podaci dostupni iz uputa mjerne opreme i osjetnika;
- podaci iz umjernica;
- podaci iz priručnika;
- podaci temeljeni na procjeni ili iskustvu poznavanja instrumenta.

U takvim se izvorima često nesigurnost navodi kao višekratnik normalnog odmaka, pa se standardna nesigurnost tipa B, $u_{\mathrm{B}}(x_i)$, dobiva dijeljenjem iskazane nesigurnosti tim višekratnikom. Također se može dati i područje pouzdanosti (npr. 90, 95 ili 99 postotna razina pouzdanosti), pa ako nije navedeno o kojoj se vjerojatnosnoj razdiobi radi, može se pretpostaviti da vrijedi normalna razdioba. Tada se standardna nesigurnost $u_{\mathrm{B}}(x_i)$ određuje dijeljenjem iskazane nesigurnosti odgovarajućim faktorom koji proizilazi iz normalne razdiobe (za navedene razine pouzdanosti faktori su 1,64; 1,960 i 2,576, vidi tablicu 6-1).

Katkad se maksimalna greška mjernog instrumenta deklarira pomoću intervala nesigurnosti $\pm a$ (pri čemu je a poluinterval nesigurnosti), pa ukoliko nema nikakvih podataka o distribuciji mjerne vrijednosti unutar tih sigurnih granica može se pretpostaviti *jednaka* vjerojatnost pojavljivanja izmjerene veličine unutar intervala $\pm a$. Takva se razdioba naziva *pravokutnom*, slika 6-3.

Očekivana vrijednost mjernih rezultata μ jednaka je sredini područja:

$$\mu = \frac{1}{2}(a_- + a_+), \tag{6-6}$$

a standardna nesigurnost izmjerene vrijednosti $u_{\mathrm{B}}(x_i)$:

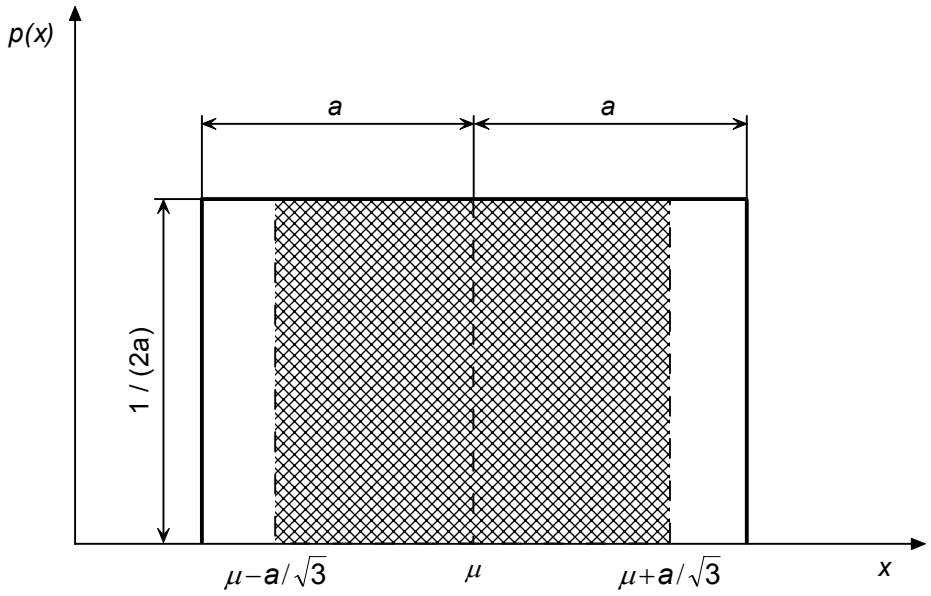
---

[7] *Student* je pseudonim *W. S. Gosseta*, 1908.

$$u_{\mathrm{B}}^2(x_i) = \frac{1}{12}(a_+ - a_-)^2 . \qquad (6\text{-}7$$

U posebnom slučaju je $a_+ - a_- = 2a$, pa je tada:

$$u_{\mathrm{B}}(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} . \qquad (6\text{-}8)$$



Slika 6-3. Pravokutna razdioba

Ukoliko se ne može pretpostaviti jednaka vjerojatnost pojavljivanja mjerene veličine unutar tog intervala onda se koriste i neke druge razdiobe kao što je npr. trapezna, trokutna itd.

6.1.3 Nesigurnost posrednih mjerenja

Većina se fizikalnih veličina mjeri posredno. Posredno mjerena fizikalna veličina Y općenito je funkcija niza međusobno nezavisnih veličina $X_1, X_2, \ldots X_N$, kojima se vrijednost određuje izravnim mjerenjem:

$$Y = f(X_1, X_2, \ldots X_N). \qquad (6\text{-}9)$$

Procijenjena vrijednost mjerene veličine Y označuje se s y i dobiva se prema prethodnoj jednadžbi uzimajući u obzir procijenjene vrijednosti $x_1, x_2, \ldots x_N$:

$$y = f(x_1, x_2, \ldots x_N), \qquad (6\text{-}10)$$

pri čemu svaka od vrijednosti x_i ima svoju mjernu nesigurnost $u(x_i)$. Pretpostavljeno je da se svaka procijenjena ulazna veličina ispravlja za vrijednost poznate sustavne pogreške.

Složena standardna mjerna nesigurnost rezultata mjerenja $u_c(y)$ aproksimira se izrazom koji predstavlja prvi član *Taylorova* razvoja u red:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} \,. \tag{6-11}$$

Parcijalne derivacije funkcije y po pojedinim ulaznim veličinama nazivaju se još i *koeficijenti osjetljivosti*, jer pokazuju za koliko se promijeni složena nesigurnost $u_c(y)$ kad se pojedina ulazna veličina x_i promijeni za mali iznos Δx_i.

6.1.4 Proširena mjerna nesigurnost

Kvaliteta mjernog rezultata najčešće se iskazuje kao standardna nesigurnost, no može se iskazati i kao tzv. *proširena mjerna nesigurnost U*, koja je definirana izrazom:

$$U = ku \,, \tag{6-12}$$

gdje je k faktor proširenja koji ovisi o odabranoj statističkoj sigurnosti P, kako to prikazuje tablica 6-1. Njegova vrijednost obično iznosi 2 ili 3, što odgovara razini statističke sigurnosti 95,44%, odnosno 99,73%.

Tablica 6-1. Ovisnost faktora proširenja k o statističkoj sigurnosti P

Statistička sigurnost P	Faktor proširenja k	Granice unutar kojih se nalazi $n \cdot P$ mjernih rezultata	Udio rezultata izvan granica $n(1-P)/n$ %	Proširena mjerna nesigurnost $U = ks/\sqrt{n}$
0,50	0,674	$\bar{x} \pm 0{,}674\sigma$	50	$0{,}674\sigma/\sqrt{n}$
0,683	1	$\bar{x} \pm \sigma$	31,7	$\sigma/\sqrt{n}$
0,95	1,960	$\bar{x} \pm 1{,}960\sigma$	5	$1{,}960\sigma/\sqrt{n}$
0,9544	2	$\bar{x} \pm 2\sigma$	4,56	$2\sigma/\sqrt{n}$
0,99	2,576	$\bar{x} \pm 2{,}576\sigma$	1	$2{,}576\sigma/\sqrt{n}$
0,9973	3	$\bar{x} \pm 3\sigma$	0,27	$3\sigma/\sqrt{n}$
0,99994	4	$\bar{x} \pm 4\sigma$	0,006	$4\sigma/\sqrt{n}$

Rezultat mjerenja se onda izražava:

$$x = \bar{x} \pm ku \,, \tag{6-13}$$

gdje je u ukupna nesigurnost izračunata prema jednadžbi (6-1).

6.2 UMJERAVANJE INSTRUMENATA I PROCJENA NJIHOVE MJERNE NESIGURNOSTI

Umjeravanje instrumenata provedeno je u Laboratoriju za procesna mjerenja (LPM) FSB. Za prikupljanje signala s osjetnika koristio se mjerni sustav *National Instruments* i aplikacije napisane u *LabVIEW*-u.

6.2.1 Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti pretvornika apsolutnog tlaka GS4102

Mjerna nesigurnost pretvornika apsolutnog tlaka GS4102 procijenjena je prema LPM metodi umjeravanja mjerila tlaka koja se temelji na DKD-R6-1 preporuci.

U tablici 6-2 navedeni su rezultati umjeravanja.

Tablica 6-2. Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti pretvornika apsolutnog tlaka GS4102

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona p_e	Pokazivanje mjerila		Srednja vrijednost M	Odstupanje $M - p_e$	Histereza h	Nesigurnost umjeravanja U
		Uzlazno	Silazno				
	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar
1	0,987	1,011	1,011	1,011	0,024	0,000	0,001
2	1,089	1,108	1,109	1,109	0,019	0,001	0,001
3	1,189	1,204	1,204	1,204	0,014	0,000	0,001
4	1,289	1,299	1,300	1,299	0,010	0,001	0,001
5	1,389	1,395	1,396	1,396	0,006	0,001	0,001
6	1,490	1,492	1,492	1,492	0,002	0,000	0,001
7	1,590	1,589	1,589	1,589	-0,001	0,000	0,001
8	1,690	1,684	1,685	1,685	-0,005	0,001	0,002
9	1,790	1,781	1,781	1,781	-0,009	0,000	0,001
10	1,890	1,878	1,877	1,878	-0,012	-0,001	0,002
11	1,940	1,926	1,926	1,926	-0,014	0,000	0,002

Nesigurnost navedena u tablici je proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju (k = 2), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95,44%.

Na osnovu rezultata umjeravanja dobiven je sljedeći polinom za korekciju apsulutnog tlaka koji se dalje koristio u mjerenjima:

$$y = 1{,}04094198x - 0{,}06408001, R^2 = 0{,}99999526\,. \tag{6-14}$$

6.2.2 Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti pretvornika razlike tlaka 3A20-1H5

Mjerna nesigurnost pretvornika razlike tlaka 3A20-1H5 procijenjena je prema LMP metodi umjeravanja mjerila tlaka koja se temelji na DKD-R6-1 preporuci.

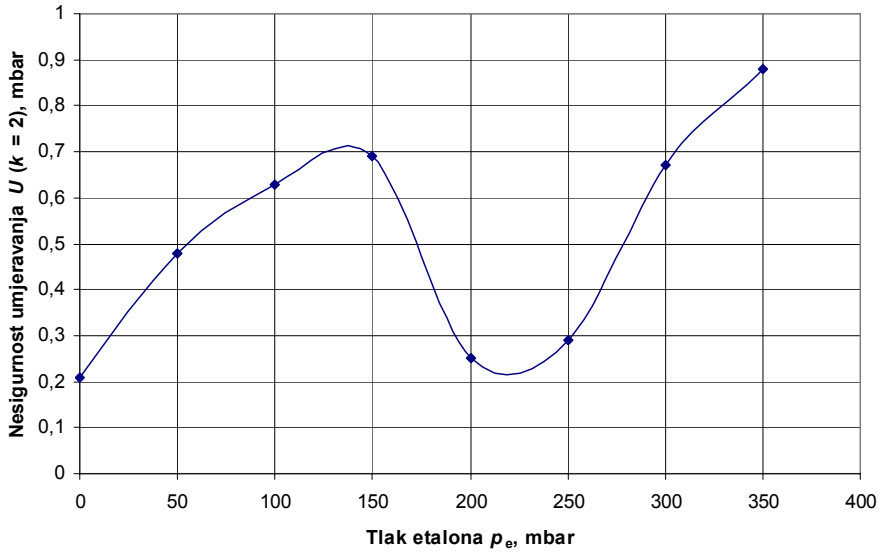
U tablici 6-3 navedeni su rezultati umjeravanja.

Tablica 6-3. Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti pretvornika tlaka 3A20-1H5

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona p_e	Pokazivanje mjerila		Srednja vrijednost M	Odstupanje $M - p_e$	Histereza h	Nesigurnost umjeravanja U
		Uzlazno	Silazno				
	mbar	mbar		mbar	mbar	mbar	mbar
1	0	-1,718	-1,979	-1,849	-1,849	-0,261	0,21
2	50	48,943	48,158	48,551	-1,449	-0,785	0,48
3	100	98,952	97,903	98,428	-1,572	-1,049	0,63
4	150	148,861	147,727	148,294	-1,706	-1,134	0,69
5	200	197,847	197,919	197,883	-2,117	0,072	0,25
6	250	247,780	247,737	247,758	-2,242	-0,043	0,29
7	300	297,347	296,343	296,845	-3,155	-1,004	0,67
8	350	347,117	345,735	346,426	-3,574	-1,382	0,88

Nesigurnost navedena u tablici je proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju (k = 2), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95,44%.

Ovisnost mjerne nesigurnosti U pretvornika tlaka 3A20-1H5 o tlaku etalona p_e prikazana je i na slici 6-4.



Slika 6-4. Ovisnost mjerne nesigurnosti U pretvornika tlaka 3A20-1H5 o tlaku etalona

Na osnovu rezultata umjeravanja dobiven je sljedeći polinom za korekciju razlike tlaka koji se dalje koristio u mjerenjima:

$$y = 1{,}00550281x + 1{,}25709391, R^2 = 0{,}99999059. \qquad (6\text{-}15)$$

6.2.3 Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti *Fluke* štapnih termoparova

Ispitivanje *Fluke* štapnih termoparova obavljeno je prema radnoj proceduri LPM za usporedbeno umjeravanje termometara. Kao zone kontrolirane temperature korištene su vodena kupka (*Haake N3*, oznaka *TEKUP-05*) i posuda s ledom (oznaka *TEFIX01*), etalonski termometar je bio *Fluke*/*Hart Scientific 5628*, a termometrijski otpornički most *Anton Paar MKT 100*. U *LabVIEW* aplikaciji se vrijednost temperature s *Fluke* termoparova (očitanje DUT-a, eng. *Device under test*) očitavala kao srednja vrijednost od 100 uzoraka (kao što se radilo i prilikom samih mjerenja) obzirom da SCXI-1102B modul omogućuje prikupljanje uzoraka s vrlo velikom brzinom uzorkovanja od 1000 Hz.

U sljedećim tablicama navedeni su rezultati umjeravanja.

Tablica 6-4. Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti *Fluke* štapnih termoparova

Red. br.	Etalonski termometar	Ispitivani termometar						Odstupanje mjerila						Mjerna nesigurnost $U\,(k = 2)$
		t1	t2	ts1	ts2	ts3	t3	t1	t2	ts1	ts2	ts3	t3	
	°C	°C						°C						K
1	0,0	1,8	2,0	1,6	2,7	0,5	-0,5	1,8	2,0	1,6	2,7	0,5	-0,5	1,2
2	30,4	31,8	32,0	32,0	32,1	30,2	29,8	1,4	1,6	1,6	1,7	-0,2	-0,6	1,2
3	60,0	61,5	61,7	61,7	61,7	59,8	59,4	1,5	1,7	1,7	1,7	-0,2	-0,6	1,2

Nesigurnost navedena u tablici 6-4 je proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju (k = 2), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95,44%.

Tablica 6-5. Procjena mjerne nesigurnosti *Fluke* štapnih termoparova za točku 1

Nesigurnost određivanja zone kontrolirane temperature								
Tip	Izvor nesigurnosti	Procjena		Nesigurnost		Razdioba	Koeficijent	Doprinos
A	Očitanje etalona	-0,01	°C	0,00	°C	normalna (1σ)	1,0 [-]	0,0 mK
B	Umjeravanje etalona	0,00	°C	0,02	°C	normalna (2σ)	1,0 [-]	10,0 mK
	Drift etalona	0,00	°C	0,02	°C	pravokutna	1,0 [-]	11,5 mK
	Umjeravanje mosta	0,00	mΩ	0,40	mΩ	normalna (2σ)	9,797 °C/Ω@ts	2,0 mK
	Rezolucija mosta	0,00	mΩ	0,04	mΩ	pravokutna	9,797 °C/Ω@ts	0,2 mK
	Gradijenti	0,00	°C	0,006	°C	pravokutna	1,0 [-]	3,5 mK
A&B	DUT temperature		°C	Standardna nesigurnost (1σ)				0,016 °C
Nesigurnost objekta umjeravanja								
Tip	Izvor nesigurnosti	Procjena		Nesigurnost		Razdioba	Koeficijent	Dopinos
A	Očitanje DUT-a	Tablica 6-4	°C	0,00	°C	normalna (1σ)	1,0 [-]	0,00 °C
B	Rezolucija indikatora	0,00	°C	0,00	°C	pravokutna	1,0 [-]	0,00 °C
	Utjecaj nehom.	0,00	°C	1,10	°C	pravokutna	1,0 [-]	0,64 °C
	Utjecaj zone k. t.	0,00	°C	0,02	°C	normalna (1σ)	1,0 [-]	0,02 °C
A&B	Indikacija		°C	Nesigurnost (1σ)				0,64 °C

Tablica 6-6. Procjena mjerne nesigurnosti *Fluke* štapnih termoparova za točku 2

Nesigurnost određivanja zone kontrolirane temperature								
Tip	Izvor nesigurnosti	Procjena		Nesigurnost		Razdioba	Koeficijent	Doprinos
A	Očitanje etalona	30,411	°C	0,00	°C	normalna (1σ)	1,0 [-]	0,0 mK
B	Umjeravanje etalona	0,00	°C	0,0200	°C	normalna (2σ)	1,0 [-]	10,0 mK
	Drift etalona	0,00	°C	0,0200	°C	pravokutna	1,0 [-]	11,5 mK
	Umjeravanje mosta	0,00	mΩ	0,40	mΩ	normalna (2σ)	9,887 °C/Ω@ts	2,0 mK
	Rezolucija mosta	0,00	mΩ	0,04	mΩ	pravokutna	9,887 °C/Ω@ts	0,2 mK
	Gradijenti	0,00	°C	0,008	°C	pravokutna	1,0 [-]	4,6 mK
A&B	DUT temperature		°C	Standardna nesigurnost (1σ)				0,016 °C
Nesigurnost objekta umjeravanja								
Tip	Izvor nesigurnosti	Procjena		Nesigurnost		Razdioba	Koeficijent	Doprinos
A	Očitanje DUT-a	Tablica 6-4	°C	0,00	°C	normalna (1σ)	1,0 [-]	0,00 °C
B	Rezolucija indikatora	0,00	°C	0,00	°C	pravokutna	1,0 [-]	0,00 °C
	Utjecaj nehom.	0,00	°C	1,10	°C	pravokutna	1,0 [-]	0,64 °C
	Utjecaj zone k. t.	0,00	°C	0,02	°C	normalna (1σ)	1,0 [-]	0,02 °C
A&B	Indikacija		°C	Nesigurnost (1σ)				0,64 °C

Tablica 6-7. Procjena mjerne nesigurnosti *Fluke* štapnih termoparova za točku 3

Nesigurnost određivanja zone kontrolirane temperature								
Tip	Izvor nesigurnosti	Procjena		Nesigurnost		Razdioba	Koeficijent	Doprinos
A	Očitanje etalona	60,037	°C	0,00	°C	normalna (1σ)	1,0 [-]	0,0 mK
B	Umjeravanje etalona	0,00	°C	0,0200	°C	normalna (2σ)	1,0 [-]	10,0 mK
	Drift etalona	0,00	°C	0,0200	°C	pravokutna	1,0 [-]	11,5 mK
	Umjeravanje mosta	0,00	mΩ	0,40	mΩ	normalna (2σ)	9,979 °C/Ω@ts	2,0 mK
	Rezolucija mosta	0,00	mΩ	0,04	mΩ	pravokutna	9,979 °C/Ω@ts	0,2 mK
	Gradijenti	0,00	°C	0,008	°C	pravokutna	1,0 [-]	4,6 mK
A&B	DUT temperature		°C	Standardna nesigurnost (1σ)				0,016 °C
Nesigurnost objekta umjeravanja								
Tip	Izvor nesigurnosti	Procjena		Nesigurnost		Razdioba	Koeficijent	Doprinos
A	Očitanje DUT-a	Tablica 6-4	°C	0,00	°C	normalna (1σ)	1,0 [-]	0,00 °C
B	Rezolucija indikatora	0,00	°C	0,00	°C	pravokutna	1,0 [-]	0,00 °C
	Utjecaj nehom.	0,00	°C	1,10	°C	pravokutna	1,0 [-]	0,64 °C
	Utjecaj zone k. t.	0,00	°C	0,02	°C	normalna (1σ)	1,0 [-]	0,02 °C
A&B	Indikacija		°C	Nesigurnost (1σ)				0,64 °C

Na osnovu umjeravanja dobiveni su sljedeći polinomi za korekciju temperature koji su se dalje upotrebljavali u mjerenjima:

- sonda t1

$$y = -0{,}00027090x^2 + 1{,}02382030x - 1{,}87756976, R^2 = 1{,}00000000; \quad (6\text{-}16)$$

- sonda t2

$$y = -0{,}00027038x^2 + 1{,}02403106x - 2{,}11937952, R^2 = 1{,}00000000; \quad (6\text{-}17)$$

- sonda ts1

$$y = -0{,}00000860x^2 + 0{,}99854966x - 1{,}57071212, R^2 = 1{,}00000000; \quad (6\text{-}18)$$

- sonda ts2

$$y = -0{,}00059569x^2 + 1{,}05544498x - 2{,}81326875, R^2 = 1{,}00000000; \quad (6\text{-}19)$$

- sonda ts3

$$y = -0{,}00037221x^2 + 1{,}03433722x - 0{,}52293969, R^2 = 1{,}00000000; \quad (6\text{-}20)$$

- sonda t3

$$y = -0{,}00006525x^2 + 1{,}00696368x + 0{,}50054736, R^2 = 1{,}00000000. \quad (6\text{-}21)$$

6.2.4 Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti pretvornika temperature i relativne vlažnosti HMP50

Ispitivanje pretvornika temperature i relativne vlažnosti HMP50 obavljeno je prema radnoj proceduri LPM za usporedbeno umjeravanje pretvornika relativne vlažnosti.

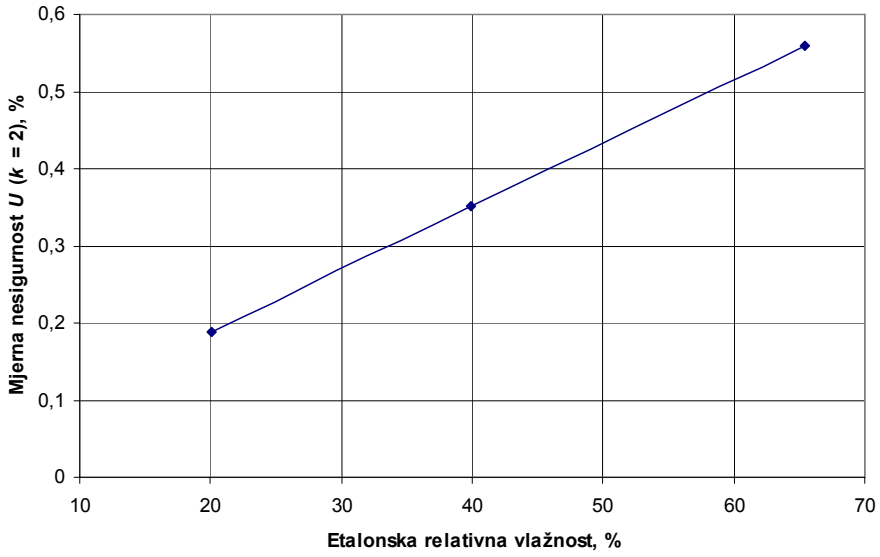
U tablici 6-8 navedeni su rezultati umjeravanja za sve ispitne točke.

Tablica 6-8. Umjeravanje i procjena mjerne nesigurnosti pretvornika temperature i relativne vlažnosti HMP50

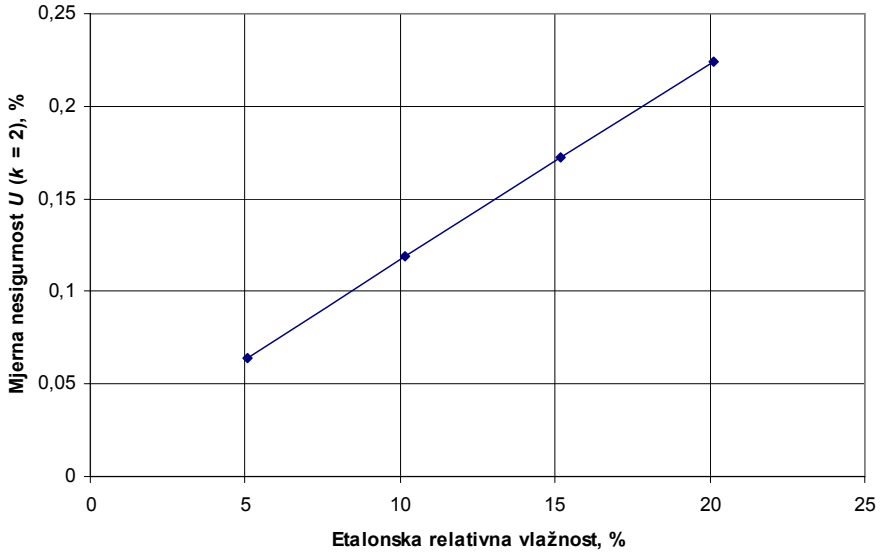
Oznaka sonde	Red. br.	Etalonska temperatura °C	Etalonska relativna vlažnost %	Temperatura na HMP50 °C	Relativna vlažnost na HMP50 %	Mjerna nesigurnost U (k = 2) %
Sonda 1	1	37,94	20,09	38,32	17,22	0,188714
	2	39,04	39,83	39,51	35,4	0,35156
	3	39,01	65,47	39,54	61,51	0,56018
Sonda 2	4	20,01	5,07	21,57	5,04	0,063672
	5	20,03	10,17	21,7	8,84	0,118734
	6	20,05	15,18	21,61	12,19	0,172244
	7	20,04	20,11	21,6	15,12	0,224388

Nesigurnost navedena u tablici je proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju (k = 2), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95,44%.

Mjerne nesigurnosti za pojedine sonde u ovisnosti o etalonskoj relativnoj vlažnosti prikazane su i na slici 6-5.



a) Sonda 1



b) Sonda 2

Slika 6-5. Mjerna nesigurnost pretvornika temperature i relativne vlažnosti HMP50

Na osnovu umjeravanja dobiveni su sljedeći polinomi za korekciju relativne vlažnosti koji su se dalje upotrebljavali u mjerenjima:

- sonda 1

$$y = 1{,}02164374x + 2{,}92993339, R^2 = 0{,}99921147; \tag{6-22}$$

- sonda 2

$$y = 1{,}48807167x - 2{,}69091799, R^2 = 0{,}99747478. \tag{6-23}$$

6.2.5 Procjena mjerne nesigurnosti digitalne vage PB303-S DeltaRange

Procjena mjerne nesigurnosti precizne vage PB303-S DeltaRange načinjena je prema proceduri opisanoj u [92] za određivanje nesigurnosti iz specifikacija proizvođača.

Mjerna nesigurnost rezultata dobivenih vaganjem općenito ovisi o tri vrste utjecaja: (a) onih koji potječu od same vage kao što su očitanje, ponovljivost pokazivanja, linearnost, osjetljivost i temperaturni koeficijent; (b) utjecaja iz okoliša kao što su vlažnost, temperatura i tlak zraka, toplinsko zračenje i izravno sunčevo zračenje i (c) utjecaja povezanih s objektom vaganja kao što su uzgon, ekscentrično opterećenje vage itd.

6.2.5.1 Očitanje vage

Očitanje vage predstavlja najmanju razliku u masi koju vaga može prikazati. Prilikom vaganja uvijek dolazi do pogreške zaokruživanja, a granice su ± polovina zadnje znamenke (*d*). Ukoliko se pretpostavi pravokutna razdioba standardna nesigurnost se može izračunati kao:

$$u_{\mathrm{RD}}^2 = \frac{1}{12}\left(\frac{d}{2} + \frac{d}{2}\right)^2 = \frac{d^2}{12}. \tag{6-24}$$

Iz priručnika proizvođača *Mettler Tolledo* poznato je očitanje vage PB303-S DeltaRange u iznosu od 0,001 g za područje mjerenja do 60 g. Prema tome standardna nesigurnost zbog zaokruživanja rezultata iznosi:

$$u_{\mathrm{RD}}^2 = \frac{0{,}001^2}{12} = 8{,}333 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{g}^2. \tag{6-25}$$

6.2.5.2 Ponovljivost pokazivanja

Ispitivanje ponovljivosti se sastoji od ponovljenih mjerenja pod što je više moguće istovjetnim uvjetima. Minimalno je potrebno načiniti 10 mjerenja i u tom slučaju se standardna nesigurnost iskazuje kao tip A izrazom za standardnu devijaciju, jed. (6-4).

Prema specifikacijama ponovljivost vage PB303-S DeltaRange za područje mjerenja do 60 g iznosi 0,001 g pa standardna nesigurnost ponovljivosti pokazivanja iznosi:

$$u_{\mathrm{RP}}^2 = 0{,}001^2 = 1 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{g}^2 . \tag{6-26}$$

6.2.5.3 Greška linearnosti

Linearnost predstavlja otklon od teoretskog nagiba karakterističnog za dvije nezavisne varijable. Kod vaganja je to varijacija između poznatih, standardnih vrijednosti i vrijednosti izmjerenih kroz cijelo područje vaganja u rasponu očekivanih vrijednosti.

Uz pretpostavku pravokutne razdiobe standardna nesigurnost jednog mjerenja uslijed pogreške nelinearnosti iznosi:

$$\left(u_{\mathrm{NL}}^2\right)_{\text{jedno mjerenje}} = \frac{NL_{\mathrm{maks}}^2}{3}, \tag{6-27}$$

no kako se nelinearnost javlja i kod vaganja tare (npr. Petrijeve zdjelice) i kod vaganja uzorka (uzorka zrnja) standardna nesigurnost se zbraja i za dva vaganja postaje:

$$u_{\mathrm{NL}}^2 = \frac{2}{3} NL_{\mathrm{maks}}^2 . \tag{6-28}$$

Prema priručniku linearnost iznosi ± 0,002 g za mjerenje do 60 g tako da standardna nesigurnost iznosi:

$$u_{\mathrm{NL}}^2 = \frac{2}{3} \cdot 0{,}002^2 = 2{,}667 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{g}^2 . \tag{6-29}$$

6.2.5.4 Temperaturni koeficijent

Temperaturni koeficijent predstavlja relativnu promjenu vrijednosti prilikom promjene temperature, a vrijednost se dijeli iznosom promjene temperature. Prikazuje se kao ppm/K ili 10^{-6}/K.

Standardna nesigurnost uz pretpostavku pravokutne razdiobe može se izračunati kao:

$$u_{\mathrm{TCS}}^2 = \frac{\left(TC \cdot \Delta\vartheta \cdot m\right)^2}{3}, \tag{6-30}$$

gdje je *TC*, ppm/K, iznos temperaturnog koeficijenta, $\Delta\vartheta$, °C, promjena temperature, a *m*, kg, izmjerena masa.

Iznos temperaturnog koeficijenta prema priručniku iznosi 6 ppm/°C za raspon temperatura od 10 °C do 30 °C, no kako se sobna temperatura prilikom vaganja nije značajnije mijenjala, a i

uzorci su se vagali u jutarnjim satima pri tom rasponu temperatura, onda se utjecaj temperaturnog koeficijenta može zanemariti:

$$u_{\mathrm{TCS}}^2 = 0\,. \tag{6-31}$$

6.2.5.5 Ukupna standardna nesigurnost vaganja

Ukupna standardna nesigurnost vaganja geometrijski je zbroj svih komponenti iz jed. (6-25), (6-26), (6-29) i (6-31):

$$u_{\mathrm{c}} = \sqrt{8{,}333 \cdot 10^{-8} + 1 \cdot 10^{-6} + 2{,}667 \cdot 10^{-6} + 0} = 1{,}937 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{g}\,, \tag{6-32}$$

za raspon mase od 0 do 60 g.

Pri tome još treba napomenuti da su zanemareni svi drugi utjecaji kao što su uzgon, gustoća zraka, greška ekscentričnog opterećenja vage, gustoće zraka itd.

6.2.6 Procjena mjerne nesigurnosti pomičnog mjerila s digitalnim pokazivačem mjere

Interval nesigurnosti (točnost) pomičnih mjerila definiran je standardom DIN 862 (ISO 2012) i za pomična mjerila s digitalnim pokazivačem mjere i očitanjem 0,01 mm iznosi ±0,02 mm, što vrijedi za mjerenje duljina do 100 mm.

Matematički model mjerenja definiran je pomoću izraza:

$$E_x = l_{ix} - l_s + \delta l_{ix} + \delta l_m + L_s \cdot \overline{\alpha} \cdot \Delta\vartheta\,, \tag{6-33}$$

gdje je l_{ix}, m, očitanje pomičnog mjerila, l_s, m, duljina etalona, $\overline{\alpha}$, K^{-1}, $\Delta\vartheta$, °C, razlika temperatura pomičnog mjerila i etalona, δl_{ix}, m, korekcija zbog procjene očitanja na skali pomičnog mjerila, δ_{lm}, m, korekcija zbog mehaničkih utjecaja i *Abbeovog* principa i L_s, m, nazivna duljina etalona.

Sastavnice standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja pomičnog mjerila prikazane su u tablici 6-9.

Tablica 6-9. Sastavnice standardne nesigurnosti u postupcima umjeravanja digitalnog i konvencionalnog pomičnog mjerila rezolucije 0,01 mm

Sastavnica standardne mjerne nesigurnosti	Izvor nesigurnosti	Iznos standardne nesigurnosti	Koeficijent osjetljivosti c_i	Razdioba	Doprinos mjernoj nesigurnosti, μm, L u m
$u(l_{ix})$	Ponovljivost mjerenja	$3{,}46 + 3{,}46 \cdot L$ μm	1	Normalna	$3{,}46 + 3{,}46 \cdot L$
$u(l_s)$	Nesigurnost umjeravanja mjerke	$0{,}1 + 1 \cdot L_s$ μm	1	Normalna	$0{,}1 + 1 \cdot L_s$
$u(\Delta\vartheta)$	Razlika temperature	0,289 °C	$L \cdot \overline{\alpha}$	Pravokutna	$0{,}289 \cdot 11{,}5\ L_s$
$u(\delta l_{ix})$	Očitanje skale	2,89 μm	1	Pravokutna	2,89
$u(\delta l_m)$	*Abbeova* pogreška i mehanički utjecaji	$1{,}732 + 2{,}309 \cdot L$ μm	1	Pravokutna	$1{,}732 + 2{,}309 \cdot L$
Sastavljena mjerna nesigurnost u_c:					$u_c = (4{,}8 + 4{,}5\ L)$ μm, L u m
Linearizirana proširena mjerna nesigurnost U, $k = 2$, $P = 95\%$					$U = (10{,}0 + 9{,}0\ L)$ μm, L u m

6.2.7 Procjena nesigurnosti mjerenja masenog protoka zraka

Mjerenje masenog protoka zraka mjernom prigušnicom spada u posredna mjerenja, pri čemu je matematički model definiran jednadžbama (4-1), (4-2) i (4-3) kojima se računaju maseni protok q_m, faktor protjecanja C i faktor ekspanzije e_1. Termodinamička svojstva vlažnog zraka, (p_s, x, ρ i η), računaju se prema jednažbama prikazanim u poglavlju 5.3. Jednadžba za mjerenje masenog protoka je iteracijska jer se u jednadžbi (4-2), za proračun faktora protjecanja C, pojavljuje i *Reynoldsova* značajka strujanja u cjevovodu ispred prigušnice, Re_D:

$$Re_D = \frac{4q_{m,f}}{D\pi\eta_1}. \tag{6-34}$$

Procjena nesigurnosti mjerenja protoka mjernom prigušnicom može se izračunati kao nesigurnost tipa A, iz mjerenih vrijednosti masenih protoka pomoću jed. (6-5), te kao nesigurnost tipa B, iz komponenti nesigurnosti. Ukupna nesigurnost je geometrijski zbroj tih komponenti, prema jed. (6-1), a proširena nesigurnost određena je jednadžbom (6-12).

U nastavku je izračunata mjerna nesigurnost za raspon izmjerenih masenih protoka prilikom mjerenja sadržaja vlage ječma: (a) brzina zraka w_f = 1,0 m/s, temperatura ϑ_f = 35 °C i prosječni izmjereni maseni protok kod tog mjerenja $q_{m,f}$ = 0,045186 kg/s; (b) w_f = 1,07 m/s, ϑ_f = 35 °C i $q_{m,f}$ = 0,05121 kg/s i (c) w_f = 1,15 m/s, ϑ_f = 35 °C i $q_{m,f}$ = 0,05753 kg/s. U tablicama 6-10 do 6-12 prikazan je budžet nesigurnosti s komponentama nesigurnosti mjerenja masenog protoka mjernom prigušnicom: Δp izmjerena razlika tlaka neposredno ispred i iza prigušnice, d svijetli otvor prigušnice, D svijetli otvor cjevovoda u koji je prigušnica ugrađena, p_1 statički tlak u cjevovodu ispred prigušnice, φ_1 relativna vlažnost zraka u cjevovodu prije prigušnice i ϑ_1 temperatura zraka u cjevovodu prije prigušnice. Temperaturno rastezanje cjevovoda i prigušnice je zanemareno zbog vrlo male promjene temperature. Izentropski eksponent κ u jed. (4-3) ima za izmjerene ulazne temperature zraka

približnu vrijednost $\kappa \approx 1{,}4$. Koeficijenti osjetljivosti, ($\frac{\partial q_{m,\mathrm{f}}}{\partial \Delta p}, \frac{\partial q_{m,\mathrm{f}}}{\partial d}, \frac{\partial q_{m,\mathrm{f}}}{\partial D}, \frac{\partial q_{m,\mathrm{f}}}{\partial p_1}, \frac{\partial q_{m,\mathrm{f}}}{\partial \varphi_1}$ i $\frac{\partial q_{m,\mathrm{f}}}{\partial \vartheta_1}$), izračunati su pomoću programskog paketa MATLAB za iznose pojedinih utjecajnih veličina. Standardna odstupanja utjecajnih veličina određena su u prethodnim poglavljima za odgovarajuća pojedina mjerila.

Tablica 6-10. Proračun nesigurnosti mjerenja masenog protoka zraka za točku 1 (w_f = 1,0 m/s i ϑ_f = 35 °C)

Tip	Izvor nesigurnosti	Iznos		Standardno odstupanje		Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Iznos koeficijenta osjetljivosti	Standardno odstupanje masenog protoka
A		0,045186	kg/s	$2{,}672\cdot10^{-5}$	kg/s	normalna (1σ)		1,0	$2{,}672\cdot10^{-5}$ kg/s
B	Δp	21523	Pa	13	Pa	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,\mathrm{f}}}{\partial \Delta p}$	$9{,}318\cdot10^{-7}$	$1{,}211\cdot10^{-5}$ kg/s
	d	0,02	m	$5{,}09\cdot10^{-6}$	m	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,\mathrm{f}}}{\partial d}$	4,664	$2{,}374\cdot10^{-5}$ kg/s
	D	0,051	m	$5{,}23\cdot10^{-6}$	m	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,\mathrm{f}}}{\partial D}$	-0,0586	$-3{,}065\cdot10^{-7}$ kg/s
	p_1	124440	Pa	50	Pa	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,\mathrm{f}}}{\partial p_1}$	$2{,}009\cdot10^{-7}$	$1{,}005\cdot10^{-5}$ kg/s
	φ_1	0,1536	-	$1{,}505\cdot10^{-3}$	-	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,\mathrm{f}}}{\partial \varphi 1}$	$-2{,}577\cdot10^{-4}$	$-3{,}878\cdot10^{-7}$ kg/s
	ϑ_1	27,9	°C	0,6	°C	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,\mathrm{f}}}{\partial \vartheta_1}$	$-7{,}640\cdot10^{-5}$	$-4{,}584\cdot10^{-5}$ kg/s
Standardna nesigurnost (1σ)									$5{,}397\cdot10^{-5}$ kg/s
A&B	Standardna nesigurnost (1σ)								$6{,}022\cdot10^{-5}$ kg/s
Proširena mjerna nesigurnost U (k = 2), P = 95%									$1{,}204\cdot10^{-4}$ kg/s

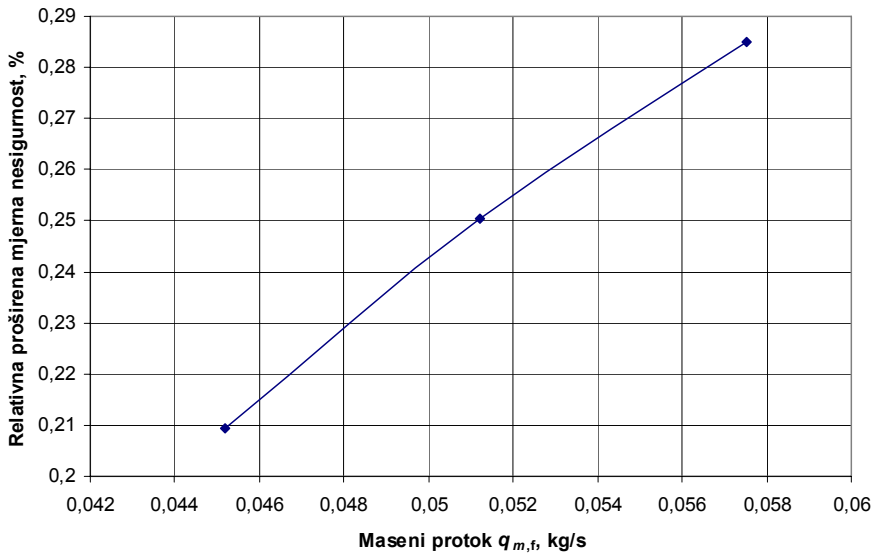
Tablica 6-11. Proračun nesigurnosti mjerenja masenog protoka zraka za točku 2 (w_f = 1,07 m/s i ϑ_f = 35 °C)

Tip	Izvor nesigurnosti	Iznos		Standardno odstupanje		Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Iznos koeficijenta osjetljivosti	Standardno odstupanje masenog protoka
A		0,05121	kg/s	$3{,}582\cdot10^{-5}$	kg/s	normalna (1σ)		1,0	$3{,}582\cdot10^{-5}$ kg/s
B	Δp	26732	Pa	21	Pa	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,f}}{\partial \Delta p}$	$8{,}309\cdot10^{-7}$	$1{,}745\cdot10^{-5}$ kg/s
	d	0,02	m	$5{,}09\cdot10^{-6}$	m	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,f}}{\partial d}$	5,283	$2{,}689\cdot10^{-5}$ kg/s
	D	0,051	m	$5{,}23\cdot10^{-6}$	m	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,f}}{\partial D}$	-0,0646	$-3{,}379\cdot10^{-7}$ kg/s
	p_1	130860	Pa	50	Pa	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,f}}{\partial p_1}$	$2{,}208\cdot10^{-7}$	$1{,}104\cdot10^{-5}$ kg/s
	φ_1	0,1991	-	$1{,}877\cdot10^{-3}$	-	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,f}}{\partial \varphi_1}$	$-2{,}546\cdot10^{-4}$	$-4{,}779\cdot10^{-7}$ kg/s
	ϑ_1	26,4	°C	0,6	°C	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,f}}{\partial \vartheta_1}$	$-8{,}755\cdot10^{-5}$	$-5{,}253\cdot10^{-5}$ kg/s
Standardna nesigurnost (1σ)									$6{,}252\cdot10^{-5}$ kg/s
A&B	Standardna nesigurnost (1σ)								$7{,}205\cdot10^{-5}$ kg/s
Proširena mjerna nesigurnost U (k = 2), P = 95%									$1{,}441\cdot10^{-4}$ kg/s

Tablica 6-12. Proračun nesigurnosti mjerenja masenog protoka zraka za točku 3 (w_f = 1,15 m/s i ϑ_f = 35 °C)

Tip	Izvor nesigurnosti	Iznos		Standardno odstupanje		Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Iznos koeficijenta osjetljivosti	Standardno odstupanje masenog protoka
A		0,05753	kg/s	$3{,}568\cdot10^{-5}$	kg/s	normalna (1σ)		1,0	$3{,}568\cdot10^{-5}$ kg/s
B	Δp	32560	Pa	39	Pa	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,f}}{\partial \Delta p}$	$7{,}469\cdot10^{-7}$	$2{,}913\cdot10^{-5}$ kg/s
	d	0,02	m	$5{,}09\cdot10^{-6}$	m	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,f}}{\partial d}$	5,935	$3{,}021\cdot10^{-5}$ kg/s
	D	0,051	m	$5{,}23\cdot10^{-6}$	m	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,f}}{\partial D}$	-0,0707	$-3{,}698\cdot10^{-7}$ kg/s
	p_1	136950	Pa	50	Pa	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,f}}{\partial p_1}$	$2{,}42\cdot10^{-7}$	$1{,}21\cdot10^{-5}$ kg/s
	φ_1	0,213	-	$1{,}991\cdot10^{-3}$	-	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,f}}{\partial \varphi_1}$	$-2{,}165\cdot10^{-4}$	$-4{,}311\cdot10^{-7}$ kg/s
	ϑ_1	22,5	°C	0,6	°C	normalna (1σ)	$\frac{\partial q_{m,f}}{\partial \vartheta_1}$	$-9{,}923\cdot10^{-5}$	$-5{,}954\cdot10^{-5}$ kg/s
Standardna nesigurnost (1σ)									$7{,}384\cdot10^{-5}$ kg/s
A&B	Standardna nesigurnost (1σ)								$8{,}201\cdot10^{-5}$ kg/s
Proširena mjerna nesigurnost U (k = 2), P = 95%									$1{,}640\cdot10^{-4}$ kg/s

Relativna proširena mjerna nesigurnost mjerenja masenog protoka za ove tri točke dobiva se djeljenjem U s iznosom maksimalnog masenog protoka, $q_{m,f}$ = 0,05753 kg/s, i množenjem sa 100%, te je prikazana na slici 6-6. Ukoliko bi se zanemarile vrlo malene promjene iznosa koeficijenata osjetljivosti, uslijed promjenjivih ulaznih veličina Δp, p_1, φ_1 i ϑ_1 u pojedinim mjerenjima, dobiveni dijagram na slici 6-6 predstavljao bi relativnu proširenu mjernu nesigurnost mjerenja za raspon masenih protoka $q_{m,f}$ = 0,045186÷0,05753 kg/s.



Slika 6-6. Relativna proširena mjerna nesigurnost mjerenja masenog protoka mjernom prigušnicom

6.2.8 Procjena nesigurnosti mjerenja sadržaja vlage zrna

Mjerenje sadržaja vlage zrna X također spada u posredna mjerenja. Sadržaj vlage zrna izračunava se pomoću jednadžbe:

$$X = \frac{m_{\mathrm{vt}} - m_{\mathrm{st}}}{m_{\mathrm{st}}}, \tag{6-35}$$

gdje je m_{vt}, kg, masa vlažne tvari prije sušenja, a m_{st}, kg, masa suhe tvari nakon potpunog sušenja u sušioniku. No, te mase se nisu mjerile izravno nego se mjerila ukupna masa uzorka vlažne ili suhe tvari zajedno s Petrijevom zdjelicom, kao što se može vidjeti u rezultatima mjerenja prikazanim u poglavlju 7.3. Stoga se jed. (6-35) može napisati kao:

$$X = \frac{\left(m_{\mathrm{uk,vt}} - m_{\mathrm{pz}}\right) - \left(m_{\mathrm{uk,st}} - m_{\mathrm{pz}}\right)}{m_{\mathrm{uk,st}} - m_{\mathrm{pz}}} = \frac{m_{\mathrm{uk,vt}} - m_{\mathrm{uk,st}}}{m_{\mathrm{uk,st}} - m_{\mathrm{pz}}}, \tag{6-36}$$

gdje je $m_{\mathrm{uk,vt}}$, kg, masa vlažne tvari prije sušenja zajedno s masom Petrijeve zdjelice, $m_{\mathrm{uk,st}}$, kg, masa suhe tvari nakon potpunog sušenja u sušioniku zajedno s masom Petrijeve zdjelice, a m_{pz}, kg, je masa samo Petrijeve zdjelice.

Koeficijenti osjetljivosti za jed. (6-36) su sljedeći:

$$c_i = \frac{\partial X}{\partial x_i}, \; c_1 = \frac{\partial X}{\partial m_{\mathrm{uk,vt}}} = \frac{1}{m_{\mathrm{uk,st}} - m_{\mathrm{pz}}},$$

$$c_2 = \frac{\partial X}{\partial m_{\mathrm{uk,st}}} = -\frac{1}{m_{\mathrm{uk,st}} - m_{\mathrm{pz}}} - \frac{m_{\mathrm{uk,vt}} - m_{\mathrm{uk,st}}}{\left(m_{\mathrm{uk,st}} - m_{\mathrm{pz}}\right)^2} \tag{6-37}$$

i

$$c_3 = \frac{\partial X}{\partial m_{\mathrm{pz}}} = \frac{m_{\mathrm{uk,vt}} - m_{\mathrm{uk,st}}}{\left(m_{\mathrm{uk,st}} - m_{\mathrm{pz}}\right)^2} .$$

Kao primjer izračunata je nesigurnost mjerenja sadržaja vlage zrna za jednu vrijednost, $X = 0{,}2118$, pri $w_{\mathrm{f}} = 1{,}0$ m/s i $\vartheta_{\mathrm{f}} = 35$ °C. Rezultati tog mjerenje prikazani su u tablici 7-7, poglavlje 7.3, iz koje se vidi da su ukupne mase $m_{\mathrm{uk,vt}} = 50{,}152$ g i $m_{\mathrm{uk,st}} = 47{,}547$ g, dok je masa Petrijeve zdjelice iznosila $m_{\mathrm{pz}} = 35{,}246$ g. Budžet nesigurnosti prikazan je u tablici 6-13.

Tablica 6-13. Primjer proračuna nesigurnosti mjerenja sadržaja vlage zrna za jedno mjerenje X

Utjecajna veličina	Iznos		Standardno odstupanje		Koeficijent osjetljivosti	Iznos koeficijenta osjetljivosti	Standardno odstupanje sadržaja vlage X
$m_{\mathrm{uk,vt}}$	50,152	g	$1{,}937\cdot10^{-3}$	g	$\frac{\partial X}{\partial m_{\mathrm{uk,vt}}}$	0,08129	$1{,}575\cdot10^{-4}$
$m_{\mathrm{uk,st}}$	47,547	g	$1{,}937\cdot10^{-3}$	g	$\frac{\partial X}{\partial m_{\mathrm{uk,st}}}$	-0,09851	$1{,}908\cdot10^{-4}$
m_{pz}	35,246	g	$1{,}937\cdot10^{-3}$	g	$\frac{\partial X}{\partial m_{\mathrm{pz}}}$	0,01722	$3{,}336\cdot10^{-5}$
						Standardna nesigurnost (1σ)	$2{,}496\cdot10^{-4}$
						Proširena mjerna nesigurnost U (k = 2), P = 95%	$4{,}992\cdot10^{-4}$

7 REZULTATI MJERENJA I NJIHOVA INTERPRETACIJA

7.1 OPIS MJERNOG POSTUPKA

Sušenje zrna ječma i pšenice u koloni s fluidiziranim slojem provedeno je s tri ulazne temperature zraka (35 °C, 42 °C i 50 °C) i tri brzine zraka za sušenje (1,0, 1,07 i 1,15 m/s). Tri različite temperature i brzine zraka su odabrane kako bi se istražio njihov utjecaj na brzinu sušenja. Temperature između 35 i 50 °C su odabrane jer maksimalno dozvoljena temperatura kod koje još neće doći do neželjenih promjena u strukturi i svojstvu zrna ovisi o njegovoj vlažnosti [80]. U praksi se za pšenicu uzimaju sljedeće vrijednosti: za vlažnost zrna preko 20% maksimalna temperatura zagrijavanja zrna je 36 °C, između 18 i 20% je 40 °C, i za vlažnost ispod 18% je 44 °C. Za ječam je preporuka da se zrno s više od 24% vlažnosti suši sa zrakom maksimalne temperature 43 °C, a za zrno s vlažnosti manjom od 24% temperatura zraka može biti viša od 48 °C. U [80] navedene su i maksimalne dozvoljene temperature zagrijavanja zrna pivarskog ječma koje su dane u tablici 7-1.

Tablica 7-1. Dozvoljene temperature zagrijavanja zrna pivarskog ječma [80]

X_w, %	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ϑ, °C	49	46	43	40	38	36	34	32	30

Najmanja brzina zraka od 1,0 m/s je odabrana zato što je upravo iznad minimalne brzine fluidizacije za početnu vlažnost zrna. Maksimalna brzina od 1,15 m/s je ograničena padom tlaka na mjernoj prigušnici i mjernim rasponom pretvornika razlike tlaka 3A20-1H5 Δp_{maks} = 350 mbar.

Za vrijeme svakog eksperimenta uzimani su uzorci zrna od približno 10-15 g u određenim vremenskim intervalima radi utvrđivanja sadržaja vlage. Sadržaj vlage uzoraka određivao se sušenjem uzoraka ječma u laboratorijskom sušioniku 20 sati, a pšenice 19 sati na temperaturi 130 °C (prema normi ASAE S352.2 DEC97, odnosno HRN ISO 712:1999), te se izračunavao pomoću jednadžbe:

$$X = \frac{m_{\text{vt}} - m_{\text{st}}}{m_{\text{st}}},$$

gdje je m_{vt}, kg, masa vlažne tvari prije sušenja, a m_{st}, kg, masa suhe tvari nakon potpunog sušenja u sušioniku. Uzorci zrna sušili su se u Petrijevim zdjelicama koje su se vagale prije svakog eksperimenta zbog eventualnih ostataka materijala u njima koji se nisu mogli odstraniti čišćenjem nakon prethodnog eksperimenta.

Početna vlažnost žitarica dobila se ovlaživanjem 5-6 sati prije svakog mjerenja, a ujednačenost sadržaja vlage se kontrolirala uzimanjem tri uzorka iz različitih dijelova posude.

Ulazni uvjeti sušenja ječma iz svih eksperimenata prikazani su u tablici 7-2, a pšenice u tablici 7-3. Treba napomenuti da su vrijednosti relativne vlažnosti, odnosno sadržaja vlage ulaznog zraka vrlo niski zbog kondenzacije u tlačnom spremniku smještenom vani u okolišu.

Svi signali s termoparova, pretvornika tlaka i pretvornika vlage prikupljani su svakih 10 s pomoću *National Instruments* mjernog sustava i *LabVIEW* softvera. Podaci su spremani u fajlove za kasniju analizu u *Microsoft Excelu*, tabličnom kalkulatoru.

Tablica 7-2. Ulazni uvjeti sušenja ječma iz svih eksperimenata

w_f, m/s	ϑ_f , °C	φ_f, % *	x_f, g/kg *	ϑ_{sH}, °C	X, kg/kg	m_b, kg	$\vartheta_{p,0}$, °C
1,0	35	15,36	3,474	16,19	0,2506	3,325	27,30
	42	16,49	3,475	18,53	0,2889	3,410	26,20
	50	17,25	3,216	20,77	0,2609	3,335	24,24
1,07	35	19,91	4,210	16,58	0,2484	3,340	25,93
	42	19,94	4,932	19,50	0,2662	3,385	28,57
	50	19,15	3,824	21,34	0,2524	3,345	23,10
1,15	35	21,30	3,638	16,52	0,2515	3,375	21,40
	42	20,30	4,693	19,57	0,2631	3,390	25,70
	50	21,79	3,850	21,60	0,2526	3,360	22,23

* Srednja vrijednost za cijelo mjerenje

Tablica 7-3. Ulazni uvjeti sušenja pšenice iz svih eksperimenata

w_f, m/s	ϑ_f , °C	φ_f, % *	x_f, g/kg *	ϑ_{sH}, °C	X_p, kg/kg	m_b, kg	$\vartheta_{p,0}$, °C
1,0	35	20,63	4,395	16,57	0,2651	3,295	26,24
	42	21,25	2,934	17,80	0,2761	3,295	19,21
	50	21,39	4,742	21,63	0,2676	3,295	26,92
1,07	35	18,53	1,979	14,78	0,2350	3,335	16,52
	42	18,24	2,077	17,51	0,2637	3,270	20,98
	50	19,60	2,616	20,48	0,2376	3,375	21,78
1,15	35	23,06	4,472	16,79	0,2524	3,330	24,52
	42	22,91	4,401	19,10	0,2593	3,325	23,89
	50	22,66	2,934	20,95	0,2351	3,360	21,67

* Srednja vrijednost za cijelo mjerenje

7.2 REZULTATI MJERENJA MINIMALNE BRZINE FLUIDIZACIJE

Minimalne brzine fluidizacije za ječam i pšenicu početnog sadržaja vlage $X \approx 0{,}25$ i visine sloja $Z_0 = 130$ mm određene su eksperimentalno, mjerenjem pada tlaka u fluidiziranom sloju. Izmjereni su sveukupni padovi tlaka, u ovisnosti o brzini zraka w_f, u fluidiziranom sloju i distributivnoj ploči, a onda padovi tlaka samo u distributivnoj ploči. Pad tlaka u fluidiziranom sloju je razlika između ta dva izmjerena pada tlaka. Napravljena su tri mjerenja, a potom su izračunate srednje vrijednosti za svaku mjernu točku.

Tablica 7-4. Rezultati mjerenja sveukupnog pada tlaka u fluidiziranom sloju i distributivnoj ploči za ječam

Točka br.	Prvo mjerenje			Drugo mjerenje			Treće mjerenje			Srednje vrijednosti		
	$q_{m,f}$ kg/s	w_f m/s	Δp_{uk} mbar	$q_{m,f}$ kg/s	w_f m/s	Δp_{uk} mbar	$q_{m,f}$ kg/s	w_f m/s	Δp_{uk} mbar	$q_{m,f}$ kg/s	w_f m/s	Δp_{uk} mbar
1	0,0079	0,2078	1,2511	0,0078	0,2051	1,4846	0,0079	0,2066	1,5177	0,0079	0,2065	1,4178
2	0,0118	0,3085	2,0348	0,0118	0,3080	2,4418	0,0118	0,3076	2,4640	0,0118	0,3080	2,3135
3	0,0157	0,4067	2,8777	0,0157	0,4048	3,6236	0,0156	0,4028	3,6093	0,0157	0,4048	3,3702
4	0,0197	0,5030	3,9742	0,0197	0,5022	5,0042	0,0200	0,5093	5,0496	0,0198	0,5048	4,6760
5	0,0241	0,6053	5,2650	0,0242	0,6060	6,7332	0,0240	0,6014	6,6201	0,0241	0,6042	6,2061
6	0,0285	0,7014	6,6899	0,0285	0,6987	8,5771	0,0288	0,7054	8,7388	0,0286	0,7018	8,0019
7	0,0338	0,8087	8,4551	0,0337	0,8050	9,8507	0,0336	0,8025	9,7179	0,0337	0,8054	9,3412
8	0,0389	0,9028	10,3846	0,0391	0,9067	10,3532	0,0390	0,9046	10,1885	0,0390	0,9047	10,3088
9	0,0447	1,0026	10,8487	0,0447	1,0013	10,8386	0,0448	1,0034	10,5339	0,0447	1,0025	10,7404
10	0,0463	1,0277	11,1666	0,0464	1,0288	10,6558	0,0462	1,0259	10,7450	0,0463	1,0274	10,8558
11	0,0474	1,0442	11,2558	0,0475	1,0455	10,6968	0,0473	1,0422	10,7109	0,0474	1,0440	10,8878
12	0,0485	1,0612	10,8138	0,0486	1,0621	10,7826	0,0489	1,0668	10,8100	0,0487	1,0633	10,8021
13	0,0504	1,0887	11,3990	0,0500	1,0824	10,8443	0,0504	1,0874	11,2179	0,0503	1,0862	11,1537

Tablica 7-5. Rezultati mjerenja sveukupnog pada tlaka u fluidiziranom sloju i distributivnoj ploči za pšenicu

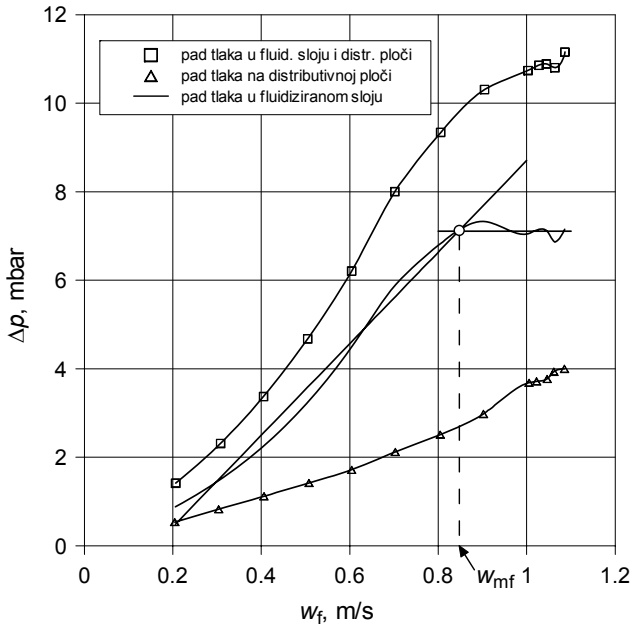
Točka br.	Prvo mjerenje			Drugo mjerenje			Treće mjerenje			Srednje vrijednosti		
	$q_{m,f}$ kg/s	w_f m/s	Δp_{uk} mbar	$q_{m,f}$ kg/s	w_f m/s	Δp_{uk} mbar	$q_{m,f}$ kg/s	w_f m/s	Δp_{uk} mbar	$q_{m,f}$ kg/s	w_f m/s	Δp_{uk} mbar
1	0,0078	0,2044	1,0774	0,0078	0,2044	1,3024	0,0076	0,1992	1,3405	0,0077	0,2027	1,2401
2	0,0117	0,3044	1,8494	0,0117	0,3045	2,3042	0,0119	0,3095	2,2598	0,0118	0,3061	2,1378
3	0,0156	0,4020	2,8417	0,0155	0,3994	3,4747	0,0158	0,4070	3,2939	0,0156	0,4028	3,2034
4	0,0198	0,5033	4,0966	0,0197	0,5008	4,9020	0,0198	0,5034	4,5886	0,0198	0,5025	4,5291
5	0,0243	0,6071	5,4984	0,0242	0,6041	6,6933	0,0244	0,6090	6,2552	0,0243	0,6067	6,1490
6	0,0286	0,7012	7,0096	0,0288	0,7040	8,5314	0,0287	0,7020	7,7592	0,0287	0,7024	7,7667
7	0,0337	0,8043	9,1173	0,0336	0,8026	9,2460	0,0336	0,8021	9,0376	0,0336	0,8030	9,1336
8	0,0391	0,9058	9,7570	0,0391	0,9058	9,6921	0,0391	0,9065	9,6409	0,0391	0,9060	9,6967
9	0,0450	1,0056	10,3372	0,0447	1,0007	10,2357	0,0450	1,0068	10,4104	0,0449	1,0044	10,3278
10	0,0461	1,0224	10,3484	0,0462	1,0243	10,4701	0,0461	1,0234	10,2544	0,0461	1,0234	10,3576
11	0,0473	1,0407	10,4591	0,0475	1,0429	10,6992	0,0475	1,0448	10,9214	0,0474	1,0428	10,6932
12	0,0486	1,0589	10,5360	0,0488	1,0647	10,1488	0,0488	1,0657	10,4071	0,0487	1,0631	10,3640
13	0,0500	1,0793	10,8592	0,0500	1,0815	11,3614	0,0501	1,0847	11,0053	0,0500	1,0818	11,0753

Tablica 7-6. Rezultati mjerenja pada tlaka na distributivnoj ploči

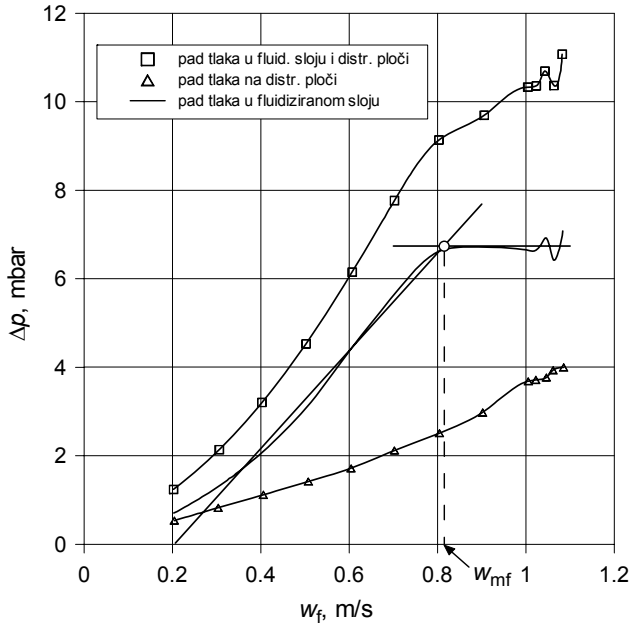
Točka br.	Prvo mjerenje			Drugo mjerenje			Treće mjerenje			Srednje vrijednosti		
	$q_{m,f}$ kg/s	w_f m/s	Δp mbar	$q_{m,f}$ kg/s	w_f m/s	Δp mbar	$q_{m,f}$ kg/s	w_f m/s	Δp mbar	$q_{m,f}$ kg/s	w_f m/s	Δp mbar
1	0,0079	0,2067	0,4534	0,0077	0,2017	0,5327	0,0078	0,2046	0,6213	0,0078	0,2043	0,5358
2	0,0118	0,3068	0,7664	0,0116	0,3020	0,8551	0,0116	0,3022	0,8582	0,0117	0,3037	0,8266
3	0,0159	0,4100	1,0585	0,0157	0,4046	1,1377	0,0156	0,4026	1,1554	0,0157	0,4057	1,1172
4	0,0199	0,5067	1,3577	0,0199	0,5066	1,4202	0,0200	0,5097	1,4839	0,0199	0,5076	1,4206
5	0,0242	0,6063	1,6700	0,0241	0,6040	1,7244	0,0240	0,6021	1,7619	0,0241	0,6041	1,7188
6	0,0287	0,7057	2,0689	0,0286	0,7036	2,1110	0,0284	0,6979	2,1787	0,0286	0,7024	2,1195
7	0,0336	0,8049	2,4582	0,0336	0,8063	2,4947	0,0334	0,8022	2,5469	0,0335	0,8045	2,5119
8	0,0386	0,9000	2,9831	0,0387	0,9027	2,8592	0,0387	0,9030	2,5827	0,0387	0,9019	2,9803
9	0,0446	1,0034	3,6333	0,0448	1,0065	3,7613	0,0447	1,0057	3,0985	0,0447	1,0052	3,6859
10	0,0457	1,0199	3,6144	0,0459	1,0240	3,6907	0,0458	1,0226	3,6632	0,0458	1,0222	3,7141
11	0,0473	1,0449	3,8122	0,0473	1,0453	3,7372	0,0474	1,0477	3,8371	0,0473	1,0460	3,7690
12	0,0484	1,0612	3,8734	0,0484	1,0624	4,0627	0,0483	1,0605	3,7576	0,0484	1,0614	3,9364
13	0,0501	1,0867	3,9975	0,0499	1,0840	3,8570	0,0499	1,0846	4,1447	0,0500	1,0851	3,9997

Izračunate srednje vrijednosti sveukupnog pada tlaka u fluidiziranom sloju i distributivnoj ploči, srednje vrijednosti pada tlaka na distributivnoj ploči, te njihove razlike (odnosno padovi tlaka samo u fluidiziranom sloju) prikazuju dijagrami na slikama 7-1 i 7-2, a ucrtane su i točke presjecišta uzlaznog i ravnog dijela krivulje pada tlaka. Apscisne vrijednosti tog presjecišta označuju vrijednosti minimalne brzine fluidizacije. Iz dijagrama se može iščitati da minimalna brzina fluidizacije za ječam iznosi $w_{mf} \approx 0{,}9$ m/s, a za pšenicu $w_{mf} \approx 0{,}85$ m/s.

Minimalna brzina fluidizacije za ječam je veća jer zrno ječma prosječno ima veću masu nego zrno pšenice.



Slika 7-1. Određivanje minimalne brzine fluidizacije za ječam



Slika 7-2. Određivanje minimalne brzine fluidizacije za pšenicu

Treba još naglasiti da je određivanje minimalne brzine fluidizacije kod vlažnog materijala daleko složenije nego kod suhih čestica jer je minimalna brzina fluidizacije povezana sa sadržajem vlage čestica, pa je za veći sadržaj vlage potrebna veća brzina w_{mf} kako bi se sloj mogao fluidizirati. Kako se i pukim prostrujavanjem zraka okolišne temperature fluidizirani

sloj čestica vrlo brzo suši, praktično se uvijek mora uzeti nešto veća brzina nego što je mjerenjem određena w_{mf}. No zbog velikih privlačnih sila između vlažnih čestica, čak i s povećanom brzinom, u sloju se znaju stvarati grudice vlažnog materijala koji ne fluidizira, a vlažne čestice se mogu i zalijepiti za unutarnje površine kolone te blokirati distributivnu ploču što na kraju može uzrokovati gubitak fluidizacije i prestanak rada sušionika. Razni prehrambeni proizvodi (pa i zrna žitarica) vlažni mogu biti vrlo ljepljivi pa ih je zbog toga vrlo teško fluidizirati na početku sušenja.

7.3 REZULTATI MJERENJA SADRŽAJA VLAGE

7.3.1 Oljušteni ječam

Rezultati mjerenja sadržaja vlage oljuštenog ječma za sve brzine i temperature zraka prikazani su u tablicama 7-7 do 7-15. Rezultati su prikazani i dijagramski na slikama 7-3 do 7-5. Treba napomenuti da su početni i konačni sadržaj vlage određeni kao srednja vrijednost mjerenja tri uzorka kako bi se na taj način provjerila ujednačenost sadržaja vlage u sloju.

Tablica 7-7. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,0 m/s i ϑ_f = 35 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	51,241	49,62	35,203	16,038	14,417	0,1124	0,1119*
2		48,669	47,334	35,304	13,365	12,03	0,1110	
3		49,087	47,672	35,072	14,015	12,6	0,1123	
4	0,00	53,153	49,661	35,595	17,558	14,066	0,2483	0,2506**
5		51,5	48,397	35,951	15,549	12,446	0,2493	
6		50,632	47,25	33,941	16,691	13,309	0,2541	
7	12,17	50,152	47,547	35,246	14,906	12,301	0,2118	
8	22,17	45,541	43,75	34,385	11,156	9,365	0,1912	
9	32,17	50,874	48,497	35,351	15,523	13,146	0,1808	
10	42,17	44,747	43,21	34,318	10,429	8,892	0,1729	
11	52,17	44,859	43,271	33,643	11,216	9,628	0,1649	
12	62,17	50,51	48,275	34,4	16,11	13,875	0,1611	
13	72,17	48,118	46,242	34,054	14,064	12,188	0,1539	
14	82,17	49,25	47,353	34,812	14,438	12,541	0,1513	
15	92,17	50,317	48,248	34,234	16,083	14,014	0,1476	
16	102,17	45,663	43,998	32,276	13,387	11,722	0,1420	
17	112,17	51,604	49,549	35,121	16,483	14,428	0,1424	
18	122,17	52,992	50,769	34,689	18,303	16,08	0,1382	
19	132,17	46,241	44,692	33,304	12,937	11,388	0,1360	0,1360***
20		47,604	45,991	34,085	13,519	11,906	0,1355	
21		52,257	49,881	32,48	19,777	17,401	0,1365	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

Tablica 7-8. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,0 m/s i ϑ_f = 42 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	51,329	49,206	35,203	16,126	14,003	0,1516	0,1511*
2		48,147	46,473	35,305	12,842	11,168	0,1499	
3		49,353	47,472	35,073	14,28	12,399	0,1517	
4	0,00	50,293	46,998	35,595	14,698	11,403	0,2890	0,2889**
5		52,422	48,725	35,95	16,472	12,775	0,2894	
6		48,498	45,241	33,94	14,558	11,301	0,2882	
7	9,33	48,143	45,729	35,247	12,896	10,482	0,2303	
8	19,33	50,243	47,526	34,384	15,859	13,142	0,2067	
9	29,33	49,92	47,603	35,351	14,569	12,252	0,1891	
10	39,33	50,155	47,768	34,317	15,838	13,451	0,1775	
11	49,35	47,546	45,54	33,643	13,903	11,897	0,1686	
12	59,35	52,454	49,941	34,399	18,055	15,542	0,1617	
13	69,35	49,054	47,044	34,052	15,002	12,992	0,1547	
14	79,35	50,359	48,325	34,811	15,548	13,514	0,1505	
15	89,35	56,25	53,462	34,232	22,018	19,23	0,1450	
16	99,35	46,656	44,887	32,274	14,382	12,613	0,1403	
17	109,35	54,89	52,514	35,116	19,774	17,398	0,1366	
18	119,35	50,492	48,622	34,685	15,807	13,937	0,1342	
19	129,35	52,034	49,825	33,3	18,734	16,525	0,1337	0,1324***
20		51,151	49,155	34,081	17,07	15,074	0,1324	
21		47,583	45,833	32,477	15,106	13,356	0,1310	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

Tablica 7-9. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,0 m/s i ϑ_f = 50 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	47,965	46,615	35,203	12,762	11,412	0,1183	0,1210*
2		47,49	46,156	35,305	12,185	10,851	0,1229	
3		48,511	47,053	35,073	13,438	11,98	0,1217	
4	0,00	49,376	46,496	35,595	13,781	10,901	0,2642	0,2609**
5		50,714	47,665	35,949	14,765	11,716	0,2602	
6		50,126	46,805	33,94	16,186	12,865	0,2581	
7	11,83	47,902	45,835	35,246	12,656	10,589	0,1952	
8	21,83	48,386	46,296	34,384	14,002	11,912	0,1755	
9	31,83	51,511	49,268	35,351	16,16	13,917	0,1612	
10	41,83	52,196	49,848	34,318	17,878	15,53	0,1512	
11	51,83	49,078	47,118	33,643	15,435	13,475	0,1455	
12	61,83	57,014	54,272	34,399	22,615	19,873	0,1380	
13	71,83	51,48	49,449	34,051	17,429	15,398	0,1319	
14	81,83	49,918	48,208	34,81	15,108	13,398	0,1276	
15	91,83	47,84	46,341	34,231	13,609	12,11	0,1238	
16	101,83	48,235	46,545	32,273	15,962	14,272	0,1184	
17	111,83	56,648	54,408	35,116	21,532	19,292	0,1161	
18	121,83	53,224	51,32	34,684	18,54	16,636	0,1145	
19	131,83	47,953	46,506	33,3	14,653	13,206	0,1096	0,1117***
20		54,285	52,219	34,081	20,204	18,138	0,1139	
21		50,699	48,869	32,477	18,222	16,392	0,1116	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

Tablica 7-10. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,07 m/s i ϑ_f = 35 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	50,391	49,133	35,203	15,188	13,93	0,0903	0,0988*
2		48,851	47,616	35,305	13,546	12,311	0,1003	
3		49,329	47,964	35,073	14,256	12,891	0,1059	
4	0,00	52,087	48,789	35,594	16,493	13,195	0,2499	0,2484**
5		48,958	46,365	35,949	13,009	10,416	0,2489	
6		51,273	47,846	33,938	17,335	13,908	0,2464	
7	6,83	52,452	49,515	35,246	17,206	14,269	0,2058	
8	11,83	51,927	49,037	34,386	17,541	14,651	0,1973	
9	21,83	56,855	53,523	35,352	21,503	18,171	0,1834	
10	31,83	53,937	51	34,317	19,62	16,683	0,1760	
11	41,83	56,513	53,275	33,643	22,87	19,632	0,1649	
12	51,83	55,309	52,397	34,399	20,91	17,998	0,1618	
13	61,83	50,888	48,602	34,051	16,837	14,551	0,1571	
14	71,83	56,034	53,259	34,811	21,223	18,448	0,1504	
15	81,83	52,273	49,963	34,232	18,041	15,731	0,1468	
16	91,83	52,967	50,373	32,274	20,693	18,099	0,1433	
17	101,83	51,969	49,909	35,116	16,853	14,793	0,1393	
18	111,83	54,67	52,267	34,684	19,986	17,583	0,1367	
19	121,85	49,698	47,755	33,299	16,399	14,456	0,1344	0,1342***
20		50,901	48,909	34,08	16,821	14,829	0,1343	
21		48,637	46,729	32,477	16,16	14,252	0,1339	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

Tablica 7-11. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,07 m/s i ϑ_f = 42 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	51,272	49,641	35,203	16,069	14,438	0,1130	0,1168*
2		49,164	47,727	35,305	13,859	12,422	0,1157	
3		49,618	48,041	35,073	14,545	12,968	0,1216	
4	0,00	49,836	46,854	35,595	14,241	11,259	0,2649	0,2662**
5		50,515	47,45	35,949	14,566	11,501	0,2665	
6		50,173	46,749	33,939	16,234	12,81	0,2673	
7	8,58	55,155	51,692	35,245	19,91	16,447	0,2106	
8	12,58	52,835	49,717	34,386	18,449	15,331	0,2034	
9	16,58	51,865	49,153	35,352	16,513	13,801	0,1965	
10	26,58	50,407	47,948	34,317	16,09	13,631	0,1804	
11	36,58	49,776	47,409	33,643	16,133	13,766	0,1719	
12	46,58	50,973	48,653	34,399	16,574	14,254	0,1628	
13	56,58	51,982	49,572	34,051	17,931	15,521	0,1553	
14	66,58	50,089	48,152	34,811	15,278	13,341	0,1452	
15	76,58	50,122	48,137	34,232	15,89	13,905	0,1428	
16	86,58	45,782	44,161	32,274	13,508	11,887	0,1364	
17	96,58	56,032	53,557	35,116	20,916	18,441	0,1342	
18	106,58	51,886	49,877	34,684	17,202	15,193	0,1322	
19	116,58	51,014	49,012	33,3	17,714	15,712	0,1274	
20	126,58	50,87	49,012	34,081	16,789	14,931	0,1244	0,1250***
21		51,12	49,041	32,478	18,642	16,563	0,1255	
22		54,764	52,407	33,567	21,197	18,84	0,1251	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

Tablica 7-12. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,07 m/s i ϑ_f = 50 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	49,678	48,328	35,202	14,476	13,126	0,1028	0,1133*
2		48,634	47,213	35,305	13,329	11,908	0,1193	
3		49,098	47,622	35,073	14,025	12,549	0,1176	
4	0,00	52,182	48,811	35,594	16,588	13,217	0,2551	0,2524**
5		52,134	48,886	35,948	16,186	12,938	0,2510	
6		50,112	46,865	33,938	16,174	12,927	0,2512	
7	3,67	53,33	50,195	35,244	18,086	14,951	0,2097	
8	7,67	53,034	49,984	34,385	18,649	15,599	0,1955	
9	13,67	50,633	48,265	35,351	15,282	12,914	0,1834	
10	23,67	50,659	48,312	34,316	16,343	13,996	0,1677	
11	33,68	48,528	46,572	33,643	14,885	12,929	0,1513	
12	43,67	49,935	47,974	34,398	15,537	13,576	0,1444	
13	53,68	52,532	50,316	34,051	18,481	16,265	0,1362	
14	63,68	50,955	49,096	34,81	16,145	14,286	0,1301	
15	73,68	50,726	48,868	34,231	16,495	14,637	0,1269	
16	83,68	49,839	47,907	32,273	17,566	15,634	0,1236	
17	93,68	51,993	50,219	35,116	16,877	15,103	0,1175	
18	103,68	51,731	49,992	34,684	17,047	15,308	0,1136	
19	113,68	49,573	47,916	33,299	16,274	14,617	0,1134	
20	123,68	52,642	50,846	34,08	18,562	16,766	0,1071	
21	133,68	49,673	48,016	32,477	17,196	15,539	0,1066	0,1066***
22		52,614	50,757	33,565	19,049	17,192	0,1080	
23		51,293	49,61	33,596	17,697	16,014	0,1051	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

Tablica 7-13. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,15 m/s i ϑ_f = 35 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	47,206	45,971	35,203	12,003	10,768	0,1147	0,1131*
2		47,967	46,669	35,305	12,662	11,364	0,1142	
3		47,854	46,583	35,073	12,781	11,51	0,1104	
4	0,00	48,346	45,749	35,595	12,751	10,154	0,2558	0,2515**
5		52,805	49,425	35,949	16,856	13,476	0,2508	
6		54,246	50,213	33,939	20,307	16,274	0,2478	
7	4,00	53,367	50,17	35,246	18,121	14,924	0,2142	
8	14,00	49,768	47,254	34,385	15,383	12,869	0,1954	
9	24,00	53,3	50,56	35,352	17,948	15,208	0,1802	
10	34,00	53,061	50,317	34,318	18,743	15,999	0,1715	
11	44,00	50,496	48,142	33,643	16,853	14,499	0,1624	
12	54,00	51,806	49,462	34,399	17,407	15,063	0,1556	
13	64,00	50,558	48,397	34,051	16,507	14,346	0,1506	
14	74,00	50,318	48,315	34,811	15,507	13,504	0,1483	
15	84,00	49,703	47,775	34,232	15,471	13,543	0,1424	
16	94,00	47,725	45,841	32,274	15,451	13,567	0,1389	
17	104,00	52,278	50,219	35,116	17,162	15,103	0,1363	
18	114,00	55,172	52,765	34,684	20,488	18,081	0,1331	
19	124,00	49,196	47,361	33,3	15,896	14,061	0,1305	0,1312***
20		51,578	49,528	34,081	17,497	15,447	0,1327	
21		49,562	47,592	32,477	17,085	15,115	0,1303	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

Tablica 7-14. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,15 m/s i ϑ_f = 42 °C

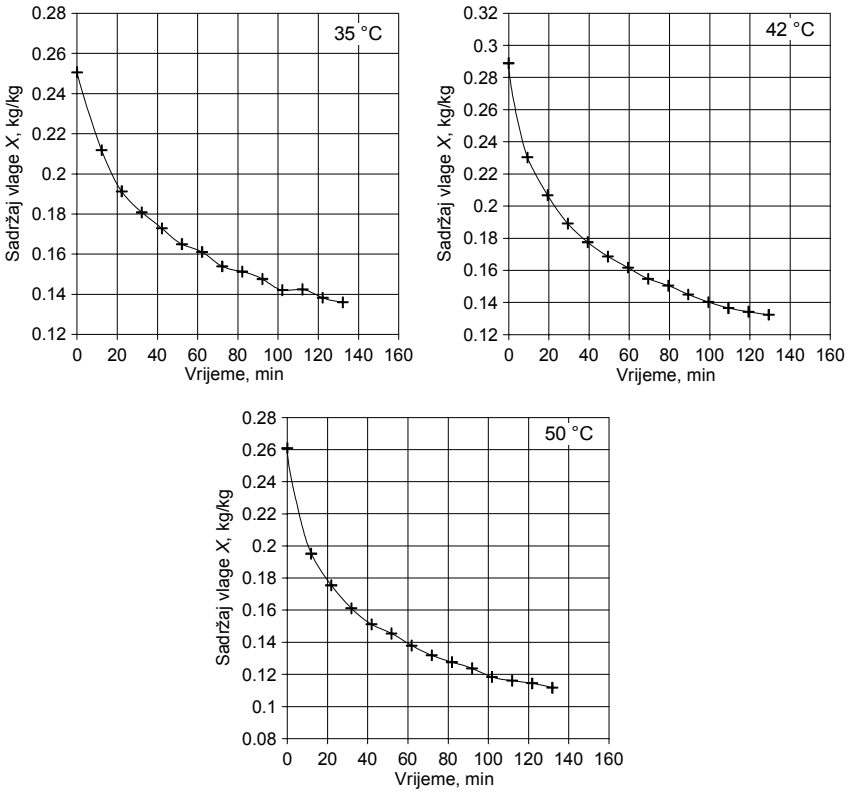
Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	50,416	48,914	35,204	15,212	13,71	0,1096	0,1163*
2		50,224	48,632	35,305	14,919	13,327	0,1195	
3		49,393	47,859	35,073	14,32	12,786	0,1200	
4	0,00	50,781	47,602	35,595	15,186	12,007	0,2648	0,2631**
5		52,037	48,702	35,949	16,088	12,753	0,2615	
6		49,532	46,286	33,939	15,593	12,347	0,2629	
7	12,00	53,91	50,819	35,245	18,665	15,574	0,1985	
8	22,00	54,177	51,133	34,385	19,792	16,748	0,1818	
9	32,00	55,349	52,461	35,351	19,998	17,11	0,1688	
10	42,00	55,341	52,447	34,317	21,024	18,13	0,1596	
11	52,00	54,538	51,805	33,643	20,895	18,162	0,1505	
12	62,00	49,891	47,909	34,399	15,492	13,51	0,1467	
13	72,00	54,851	52,265	34,051	20,8	18,214	0,1420	
14	82,00	54,939	52,509	34,81	20,129	17,699	0,1373	
15	92,00	54,48	52,075	34,231	20,249	17,844	0,1348	
16	102,00	45,78	44,205	32,274	13,506	11,931	0,1320	
17	112,00	52,529	50,574	35,116	17,413	15,458	0,1265	
18	122,00	55,381	53,074	34,684	20,697	18,39	0,1254	
19	132,00	54,081	51,818	33,299	20,782	18,519	0,1222	0,1224***
20		51,581	49,671	34,081	17,5	15,59	0,1225	
21		52,505	50,318	32,477	20,028	17,841	0,1226	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

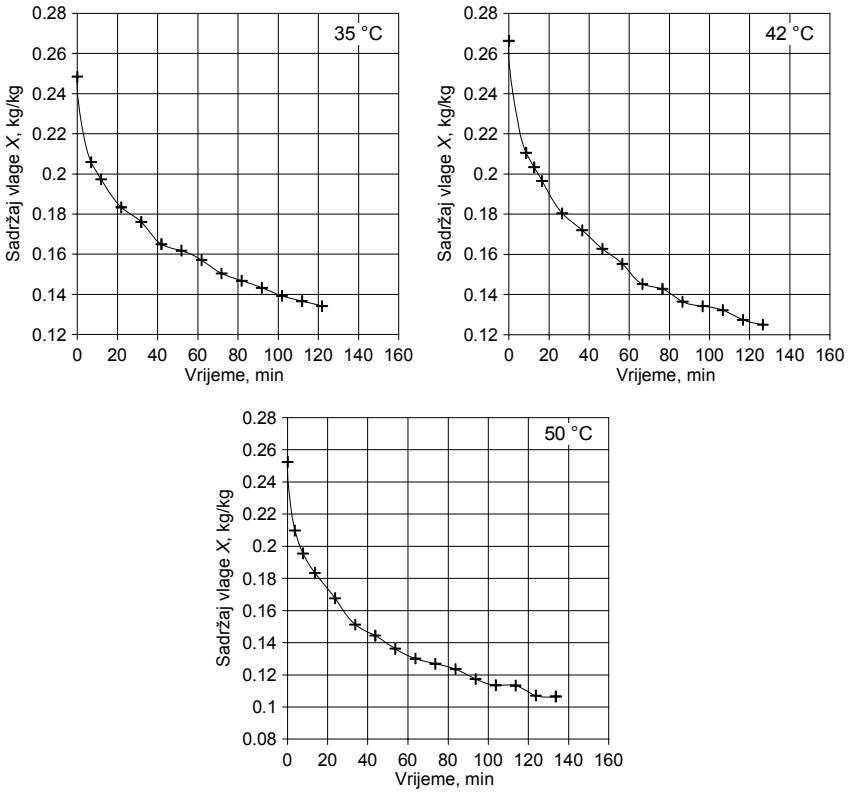
Tablica 7-15. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,15 m/s i ϑ_f = 50 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	49,199	47,731	35,203	13,996	12,528	0,1172	0,1182*
2		48,789	47,35	35,305	13,484	12,045	0,1195	
3		49,979	48,406	35,073	14,906	13,333	0,1180	
4	0,00	52,616	49,152	35,594	17,022	13,558	0,2555	0,2526**
5		51,281	48,22	35,949	15,332	12,271	0,2494	
6		50,097	46,835	33,939	16,158	12,896	0,2529	
7	4,17	53,11	50,124	35,246	17,864	14,878	0,2007	
8	14,17	53,863	50,918	34,386	19,477	16,532	0,1781	
9	24,17	54,759	52,087	35,354	19,405	16,733	0,1597	
10	34,17	53,702	51,218	34,318	19,384	16,9	0,1470	
11	44,17	53,35	50,875	33,643	19,707	17,232	0,1436	
12	54,17	53,403	51,159	34,399	19,004	16,76	0,1339	
13	64,17	53,111	50,98	34,051	19,06	16,929	0,1259	
14	74,17	53,628	51,571	34,81	18,818	16,761	0,1227	
15	84,17	51,305	49,511	34,232	17,073	15,279	0,1174	
16	94,17	49,891	48,084	32,275	17,616	15,809	0,1143	
17	104,17	52,905	51,127	35,116	17,789	16,011	0,1110	
18	114,17	50,482	48,922	34,684	15,798	14,238	0,1096	
19	124,17	48,94	47,418	33,3	15,64	14,118	0,1078	0,1067***
20		54,766	52,79	34,081	20,685	18,709	0,1056	
21		56,872	54,521	32,478	24,394	22,043	0,1067	

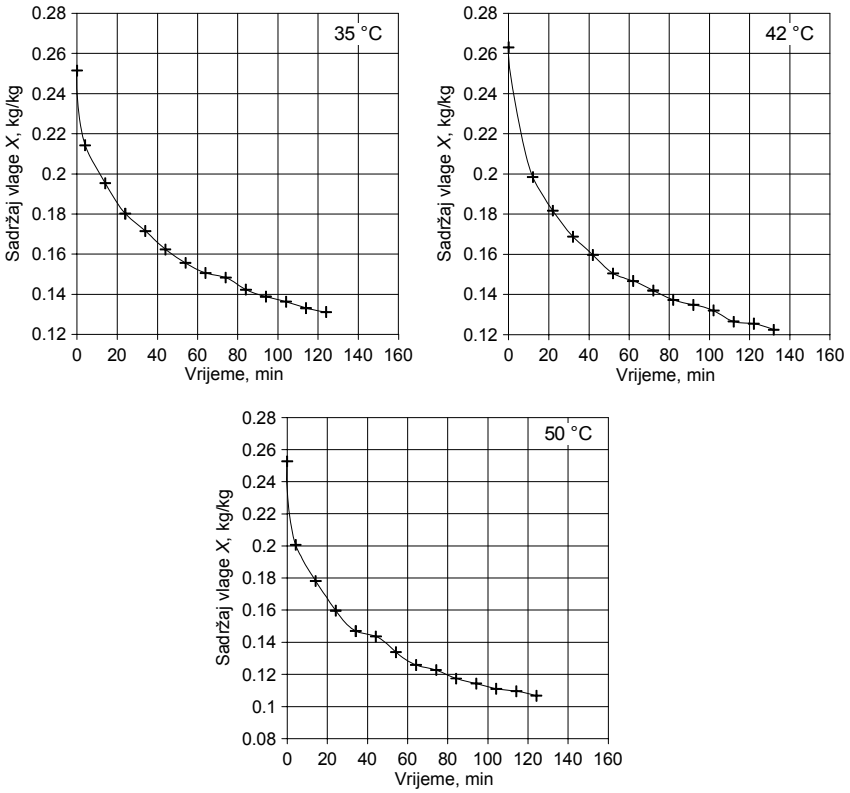
* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost



Slika 7-3. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,0 m/s i za različite ulazne tenperature zraka



Slika 7-4. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,07 m/s i za različite ulazne temperature zraka



Slika 7-5. Rezultati mjerenja sadržaja vlage ječma za w_f = 1,15 m/s i za različite ulazne temperature zraka

Krivulje sušenja ječma prikazane na slikama 7-3 do 7-5 imaju karakterističan zakrivljen oblik u obliku eksponencijalne funkcije tijekom cijelog sušenja što znači da se sušenje cjelokupno odvija samo u fazi „padajuće brzine sušenja“. Žitarice naime općenito imaju vrlo veliki kritični sadržaj vlage X_{krit} (primjerice, kod pšenice iznosi 50 – 55% svedeno na vlažnu tvar) pa se njihovo sušenje obično odvija samo u toj fazi. Kritični sadržaj vlage nije samo svojstvo materijala nego ovisi i o njegovoj geometriji, debljini i brzini sušenja, pa se stoga određuje eksperimentalno iako se u literaturi mogu naći neki aproksimativni podaci. Faza „padajuće brzine sušenja“ se obično dijeli na „prvu fazu padajuće brzine sušenja“ kad je površina čestica još djelomično zasićena, i na „drugu fazu padajuće brzine sušenja“ kad je površina čestica potpuno nezasićena. Tijekom „prve faze“ vlaga se zbog vrlo intenzivnog ishlapljivanja u fluidiziranom sloju počinje povlačiti u unutrašnjost zrna tako da pojedini dijelovi površine postaju suhi. Na taj način se smanjuje raspoloživa površina ishlapljivanja pa se i brzina sušenja počinje smanjivati. U „prvoj fazi“ brzina sušenja još uvijek ovisi o vanjskim parametrima (temperatura, brzina i vlažnost zraka) jer se veliki dio ishlapljivanja još uvijek odvija na zasićenom dijelu površine ili blizu nje u širim kapilarama zrna. Vlaga u kapilarama tada čini kontinuiranu a zrak disperziranu fazu. Kako tijek sušenja sve više napreduje tako se kapilare sve više ispunjavaju zrakom a smanjuje se količina vlage. U određenom trenutku više nema dovoljno vlage da se održava kontinuirani film uzduž kapilara pa zrak postaje kontinuirana, a vlaga koja ostaje izolirana u prostoru manjih kapilara postaje disperzirana faza. Kada se to dogodi nastupa tzv. „druga faza padajuće brzine sušenja“. Brzina sušenja u toj „drugoj fazi“ ponajviše ovisi o temperaturi zrna i sadržaju vlage čestica obzirom da je difuzija kontrolirajući mehanizam jer vlaga koja ishlapljuje u kapilarima mora difundirati kroz zrno. Brzina zraka ima u „drugoj fazi“ praktički neznatan utjecaj na brzinu sušenja, a vlažnost zraka u prvom redu utječe na ravnotežnu vlažnost zrna (vidi poglavlje 3.1.3 i jed. (5-7)).

Iz krivulja sušenja prikazanim na prethodnim slikama se još može vidjeti da su gradijenti sadržaja vlage zrna dX/dt najveći na početku procesa sušenja kad je i najveći sadržaj vlage zrna X, no kako se X sve više približava ravnotežnom sadržaju vlage zrna X_r tako se smanjuju i gradijenti. Na početku sušenja vrlo je nagla promjena sadržaja vlage zbog intenzivnog ishlapljivanja vlage s još zasićene površine zrna, osobito pri sušenju u fluidiziranom sloju, no kad potpuno ishlapi sva površinska vlaga, a fronta sušenja se premjesti unutar zrna, brzina sušenja se naglo smanjuje te bi bila jednaka nuli kad bi se postigao ravnotežni sadržaj vlage.

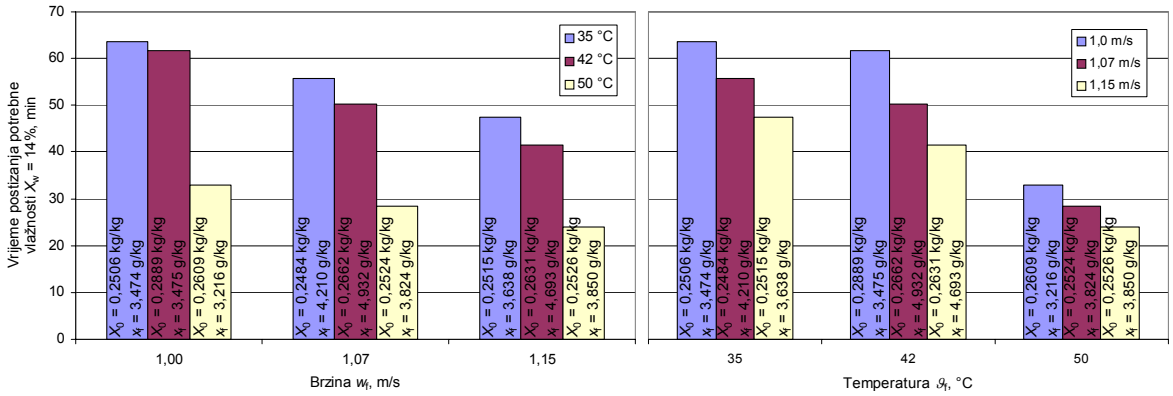
Kako bi se kvantificirao utjecaj temperature i brzine zraka na proces sušenja odabranih žitarica u fluidiziranom sloju, u tablici 7-16 su prikazane početne i konačne numeričke vrijednosti sadržaja vlage ječma te vremena sušenja iz obavljenih eksperimenata za sve brzine, temperature i vlažnosti zraka. Obzirom na to da su ukupna vremena trajanja sušenja u mjerenjima bila različita (trajala su između 122 i 134 minute) prikazane su i izračunate vrijednosti sadržaja vlage dobivene interpolacijom izmjerenih vrijednosti za vrijeme sušenja od 120 minuta kako bi se mogle međusobno usporediti za isto vrijeme sušenja. U tablici je još prikazano i vrijeme potrebno da se zrno osuši na potrebnu vlažnost $X_w = 14\%$ (odnosno sadržaj vlage $X = 16\%$) koja označava sigurni nivo ispod koga neće doći do rasta mikroorganizama i enzimskih promjena, a koje je također dobiveno interpolacijom izmjerenih vrijednosti.

Tablica 7-16. Vrijednosti konačnog sadržaja vlage ječma

w_f, m/s	ϑ_f, °C	x_f, g/kg *	Početni sadržaj vlage X_0, kg/kg	Vrijeme sušenja, min	Konačni sadržaj vlage X, kg/kg	Sadržaj vlage X nakon 120 minuta sušenja, kg/kg	Vrijeme postizanja potrebne vlažnosti $X_w = 14\%$; ($X = 16\%$), min
1,0	35	3,474	0,2506	132,17	0,1360	0,1392	63,67
	42	3,475	0,2889	129,35	0,1324	0,1341	61,77
	50	3,216	0,2609	131,83	0,1117	0,1148	33,01
1,07	35	4,210	0,2484	121,85	0,1342	0,1347	55,66
	42	4,932	0,2662	126,58	0,1250	0,1266	50,27
	50	3,824	0,2524	133,68	0,1066	0,1094	28,36
1,15	35	3,638	0,2515	124,00	0,1312	0,1320	47,49
	42	4,693	0,2631	132,00	0,1224	0,1257	41,59
	50	3,850	0,2526	124,17	0,1067	0,1079	24,00

* Srednja vrijednost za cijelo mjerenje

Vremena sušenja do postizanja potrebne vlažnosti, $X_w = 14\%$, prikazana su i na dijagramu na slici 7-6.



Slika 7-6. Vremena sušenja ječma do potrebne vlažnosti, X_w = 14%, za sve temperature i brzine zraka

Iz prikazanih se podataka jasno vidi kako se povećanjem temperature i brzine zraka smanjuje konačni sadržaj vlage zrna i potrebno vrijeme sušenja, dok se za veći početni sadržaj vlage X_0 vrijeme sušenja povećava. Primjerice, pri brzini zraka w_f = 1,0 m/s i temperaturi ϑ_f = 35 °C vrijeme sušenja do potrebne vlažnosti X_w = 14% iznosilo je 63,67 minuta, a pri 50 °C iznosilo je samo 33,01 minuta što je manje za 48,2%. Slično se pokazalo i kod drugih brzina, pa se tako pri 1,07 m/s vrijeme sušenja smanjilo s 55,66 na 28,36 minuta (što je manje za 49,05%), a pri 1,15 m/s smanjilo se s 47,49 na 24,00 minute (manje za 49,5%). Dakle, povećanjem temperature zraka s 35 °C na 50 °C vremena sušenja su se smanjila gotovo za polovinu.

Povećanjem brzine zraka se također smanjuje vrijeme sušenja, ali se može vidjeti da je efekt manji u odnosu na povećanje temperature. Tako je pri temperaturi zraka od 35 °C i brzini 1,0 m/s vrijeme sušenja iznosilo 63,67 minuta, no povećanjem brzine na 1,07 m/s smanjilo se na 55,66 minuta (manje za 12,6%), a pri 1,15 m/s smanjilo se na 47,49 minuta (manje za 25,4%). Slično je bilo i kod ostalih temperatura zraka. Pri temperaturi 42 °C vremena sušenja iznosila su 61,77 minuta (brzina zraka 1,0 m/s), 50,27 minuta (brzina zraka 1,07 m/s, a vrijeme sušenja je manje za 18,6%) i 41,59 minuta (brzina zraka 1,15 m/s, a vrijeme sušenja je manje za 32,7%). Pri temperaturi zraka od 50 °C vremena sušenja su bila 33,01 minuta (kod brzine zraka 1,0 m/s), 28,36 minuta (brzina zraka 1,07 m/s, vrijeme sušenja je manje za 14,1%) i na 24,00 minute (brzina zraka 1,15 m/s, a vrijeme sušenja je manje za 27,3%).

Vremena sušenja ovise i o početnom sadržaju vlage zrna X_0 te o relativnoj vlažnosti zraka φ_f. Utjecaj početnog sadržaja vlage zrna se najbolje to vidi kod brzine zraka 1,0 m/s i temperature 42 °C gdje je početni sadržaj vlage iznosio X_0 = 0,2889, dok je pri ostalim temperaturama bio 0,2506 i 0,2609. Zbog tako velikog početnog sadržaja vlage vrijeme sušenja pri temperaturi 42 °C od 61,77 minute bilo je skoro isto kao vrijeme sušenja pri manjoj temperature od 35 °C gdje je iznosilo 63,67 minuta.

Dakle, obzirom na različite vrijednosti X_0 i φ_f, koji uz temperaturu i brzinu zraka također u značajnoj mjeri utječu na vremena i brzinu sušenja, potrebno je normalizirati vrijednosti sadržaja vlage kako bi se moglo međusobno usporediti krivulje sušenja i vremena sušenja.

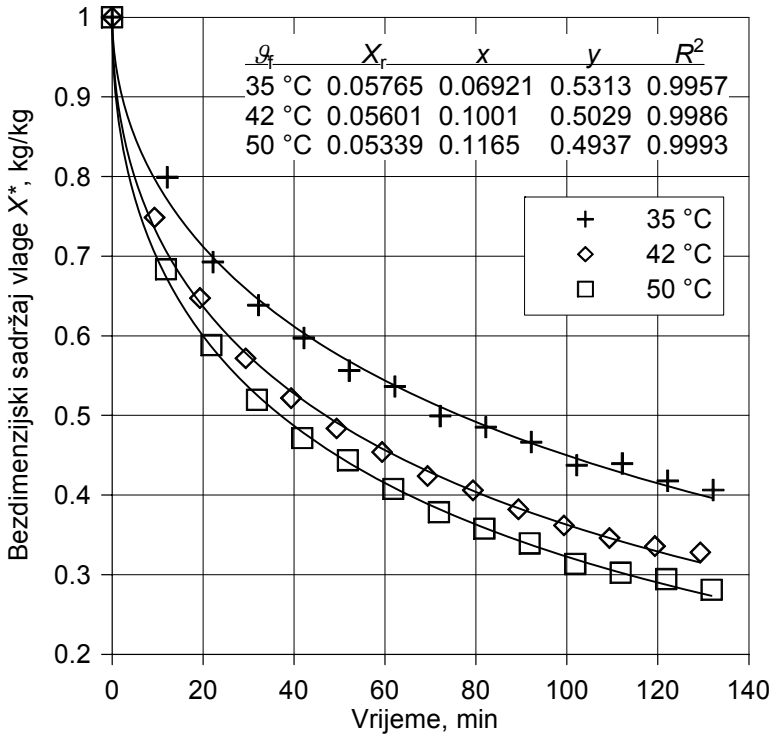
U literaturi se često može pronaći da se normalizirani sadržaj vlage definira kao omjer sadržaja vlage X i početnog sadržaja vlage X_0, (X/X_0), npr. u [6], no na taj način se uzima u obzir samo početni sadržaj vlage X_0 bez utjecaja relativne vlažnosti ulaznog zraka. Stoga je daleko prikladnije koristiti normalizirane vrijednosti u obliku bezdimenzijskog sadržaja vlage X^* definiranog pomoću jednadžbe (3-35), pri čemu će se eksperimentalni rezultati sušenja

korelirati pomoću *Pageove* jednadžbe (jed. (3-38)) koja prema literaturi najbolje aproksimira rezultate sušenja:

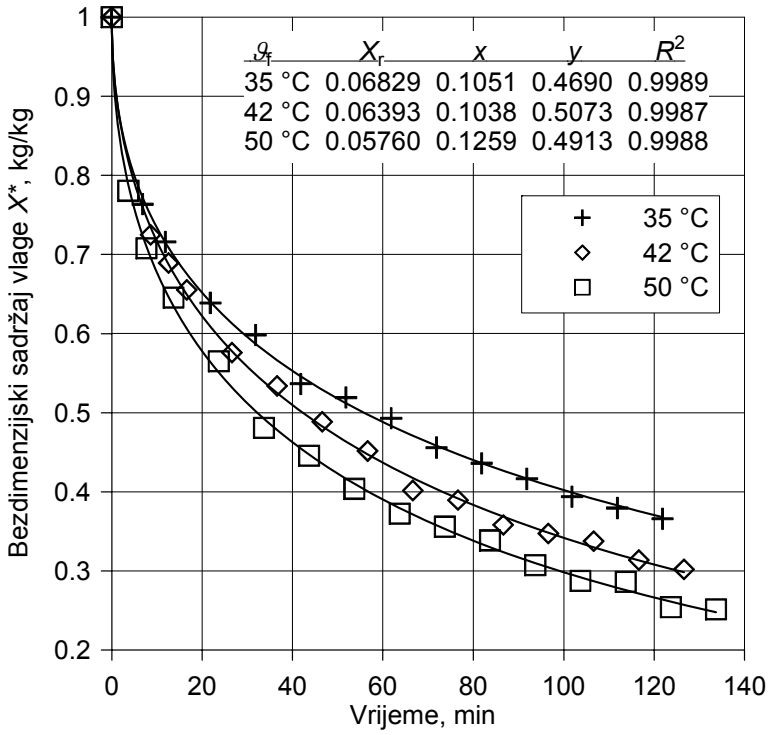
$$X^* = \frac{X - X_r}{X_0 - X_r} = e^{-xt^y} . \tag{7-1}$$

Ravnotežni sadržaj vlage ječma X_r u jed. (7-1) izračunat je pomoću jed. (5-7) za svako pojedino ulazno stanje zraka, a faktori x i y u *Pageovoj* jednadžbi izračunati su metodom najmanjih kvadratnih odstupanja pomoću programskog paketa MATLAB.

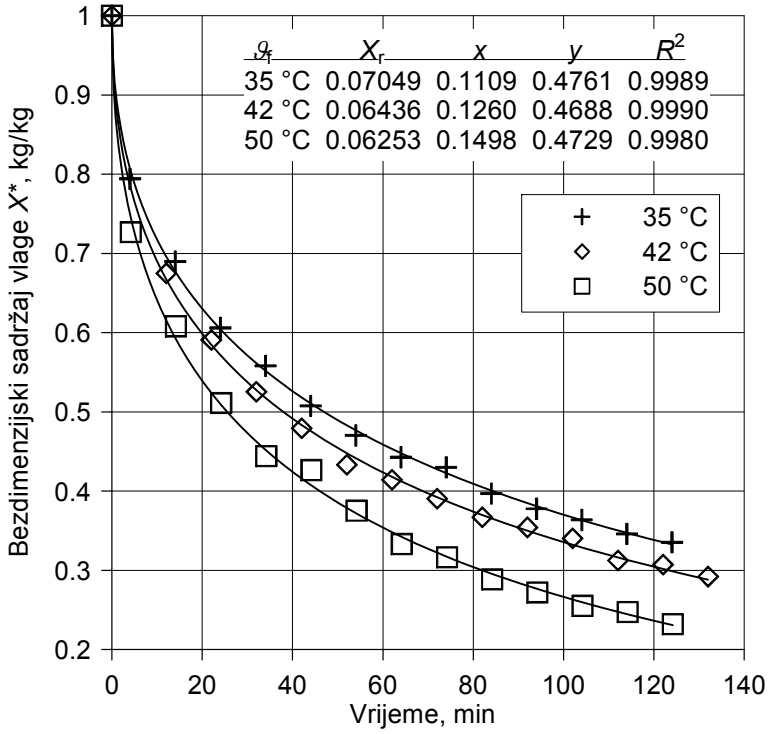
Rezultati su prikazani dijagramski na slikama 7-7 do 7-12 koje prikazuju promjenu bezdimenzijskog sadržaja vlage X^* u vremenu za sve temperature i brzine zraka, a na slikama su također naznačene i izračunate vrijednosti X_r, x i y zajedno s koeficijentom determinacije aproksimacijske funkcije (R-kvadratna vrijednost) kako bi se ocijenila dobrota aproksimacije.



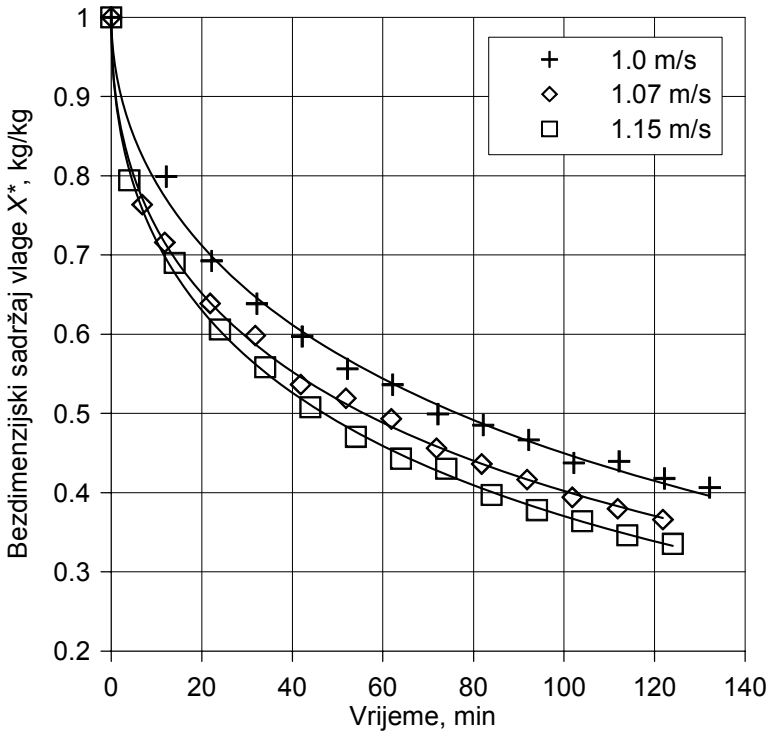
Slika 7-7. Utjecaj vremena i ulazne temperature zraka na sušenje ječma za w_f = 1,0 m/s



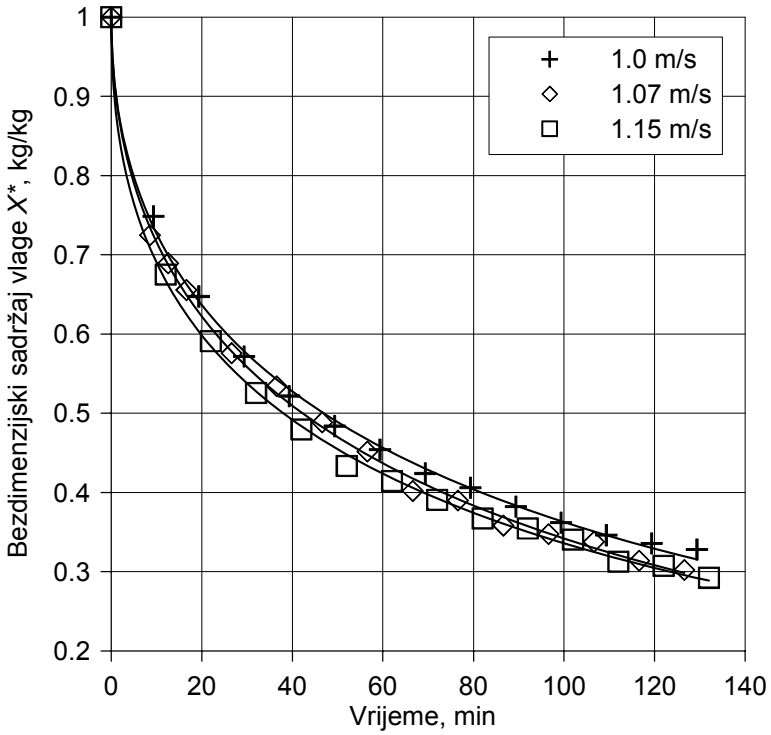
Slika 7-8. Utjecaj vremena i ulazne temperature zraka na sušenje ječma za w_f = 1,07 m/s



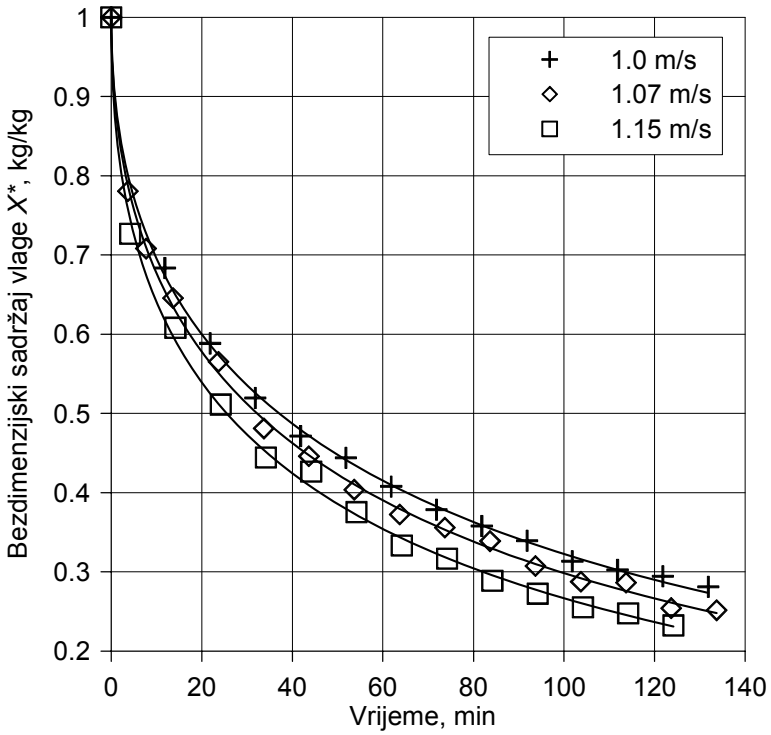
Slika 7-9. Utjecaj vremena i ulazne temperature zraka na sušenje ječma za w_f = 1,15 m/s



Slika 7-10. Utjecaj vremena i brzine zraka na sušenje ječma za $\vartheta_f = 35$ °C



Slika 7-11. Utjecaj vremena i brzine zraka na sušenje ječma za $\vartheta_f = 42$ °C



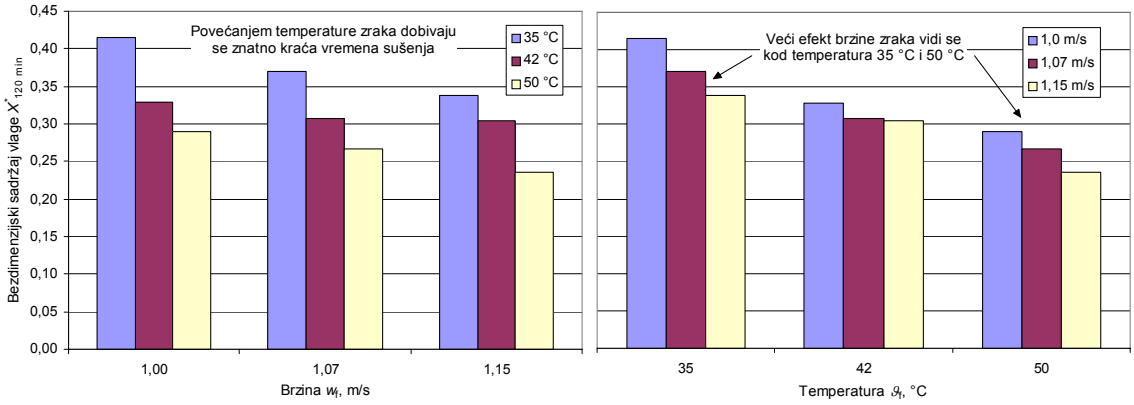
Slika 7-12. Utjecaj vremena i brzine zraka na sušenje ječma za ϑ_f = 50 °C

Na slikama 7-7 do 7-9 može se vidjeti utjecaj povećanja temperature zraka na konačni sadržaj vlage i vrijeme sušenja, a na slikama 7-10 do 7-12 utjecaj povećanja brzine zraka.

U tablici 7-17 prikazane su vrijednosti bezdimenzijskog sadržaja vlage za 120 minuta sušenja, $X^*_{120\,\mathrm{min}}$, izračunate pomoću *Pageove* jednadžbe, a isto je prikazano i na slici 7-13 za sve temperature i brzine zraka.

Tablica 7-17. Bezdimenzijski sadržaj vlage ječma $X^*_{120\,\mathrm{min}}$

w_f, m/s	ϑ_f, °C	$X^*_{120\,\mathrm{min}}$
1,0	35	0,4145
	42	0,3289
	50	0,2899
1,07	35	0,3706
	42	0,3080
	50	0,2664
1,15	35	0,3384
	42	0,3046
	50	0,2366



Slika 7-13. Vrijednosti bezdimenzijskog sadržaja vlage ječma $X^*_{120\,\mathrm{min}}$ za sve ulazne temperature i brzine zraka

Kao što se može vidjeti iz gornje tablice i dijagrama povećanjem temperature zraka najviše se reducira sadržaj vlage za isto vrijeme sušenja. Primjerice, povećanjem temperature s 35 °C na 42 °C pri brzini zraka w_f = 1,0 m/s dobiva se za 20,7% manji sadržaj vlage, a povećanjem temperature na 50 °C sadržaj vlage manji je za 30,1%, sve za isto vrijeme sušenja od 120 minuta. Kod ostalih brzina zraka (1,07 i 1,15 m/s) i za isto povećanje temperatura dobiva se manji sadržaj vlage za 16,9% i 28,1%, te za 10,0% i 30,1%. Dakle, kod većih temperatura zraka dobivaju se znatno kraća vremena sušenja.

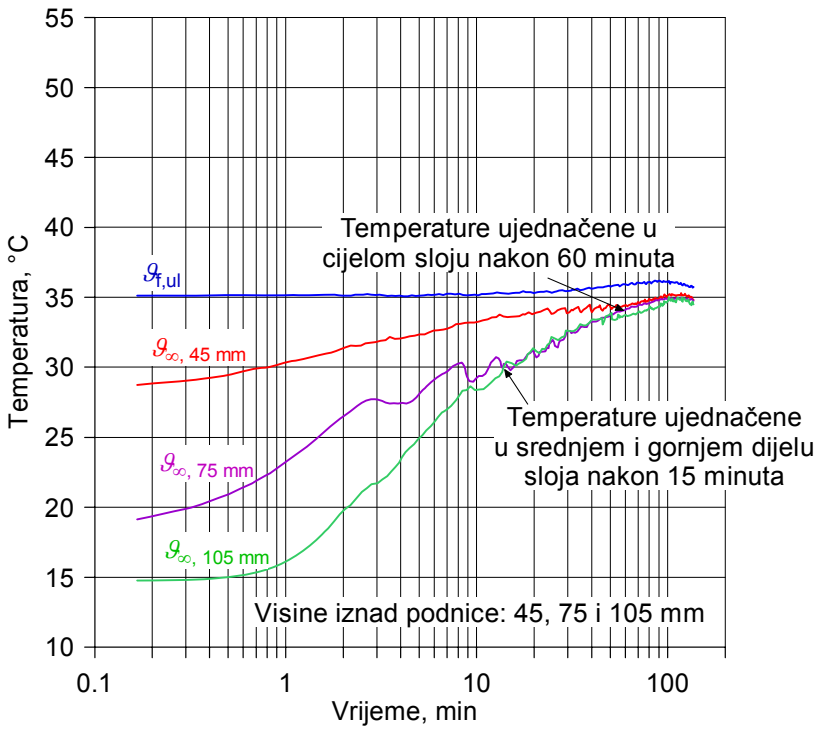
Brzina zraka, s druge strane, ima puno manji utjecaj na vrijeme sušenja u odnosu na temperaturu. Povećanjem brzine zraka s w_f = 1,0 m/s na 1,07 m/s pri 35 °C dobiva se 10,6% manji konačni bezdimenzijski sadržaj vlage, a povećanjem s 1,07 na 1,15 m/s manji je za 8,7%. Kod 42 °C efekt povećanja brzine zraka je nešto slabiji, a procentualne razlike su 6,4% i 1,1%, dok je kod 50 °C opet nešto veći pa tu razlike iznose 8,1% i 11,2%.

Dakle, utjecaj brzine zraka na vremena sušenja je puno manji od temperature, a nešto veći efekt se može vidjeti kod temperatura 35 °C i 50 °C.

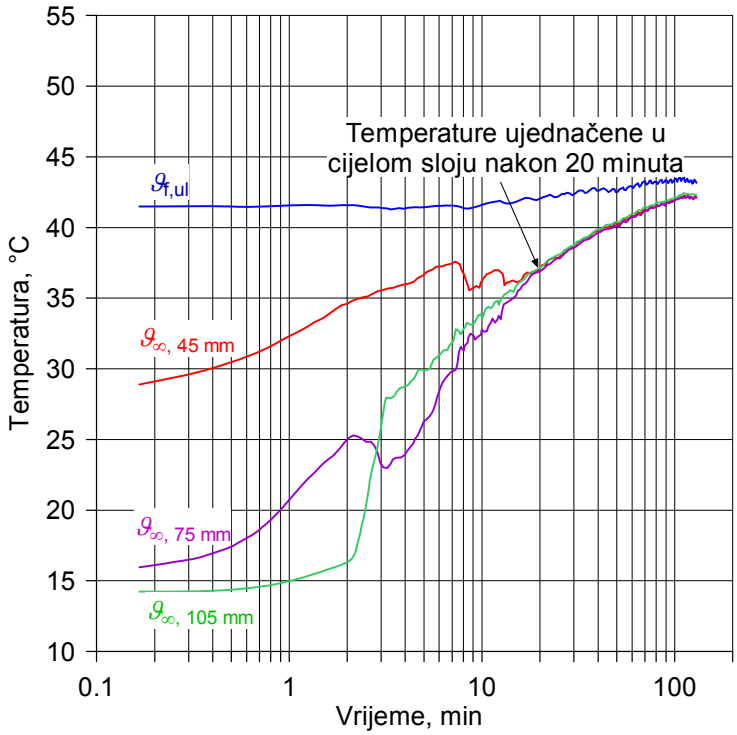
Kako bi se ipak vidjelo zašto je kod tih temperatura veći utjecaj brzine zraka potrebno je provjeriti da li pri tim temperaturama sloj pravilno fluidizira jer to izravno utječe na rezultate sušenja. Naime, slojevi s velikim česticama (koje prema *Geldartovoj* podjeli spadaju u grupu D) se teško fluidiziraju, pa se za njihovu fluidizaciju čak i češće upotrebljava fontanski sloj nego potpuno fluidiziran.

Provjera kvalitete fluidizacije se jednostavno može napraviti kontrolom temperatura u sloju za vrijeme sušenja. Prilikom pravilne fluidizacije u sloju se dobiva jednolik raspored temperatura zbog vrlo intenzivnog miješanja čestica. Međutim, ukoliko čestice miruju ili se vrlo slabo miješaju, fluidizacije je nepravilna, a u sloju nastaje neravnomjerna razdioba temperature. Zbog lošeg miješanja čestica dobivaju se i nejednolike brzine sušenja u pojedinim dijelovima sloja, kao i nejednolika razdioba sadržaja vlage čestica.

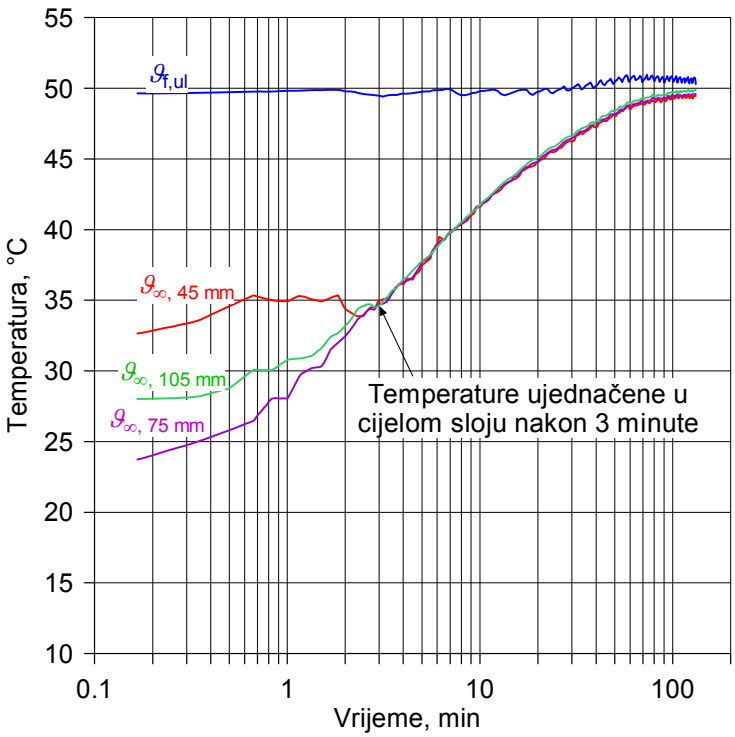
Tijekom ovih eksperimenata mjerile su su tri temperature u sloju, i to na visinama 45, 75 i 105 mm iznad podnice. Dijagrami temperatura su prikazani na slikama 7-14 do 7-16, a na njima je također prikazana i vrijednost ulazne temperature zraka u kolonu $\vartheta_{f,ul}$. Vrijeme je prikazano u logaritamskom mjerilu kako bi se bolje vidjele promjene temperatura na početku procesa sušenja.



a) $\vartheta_f = 35$ °C

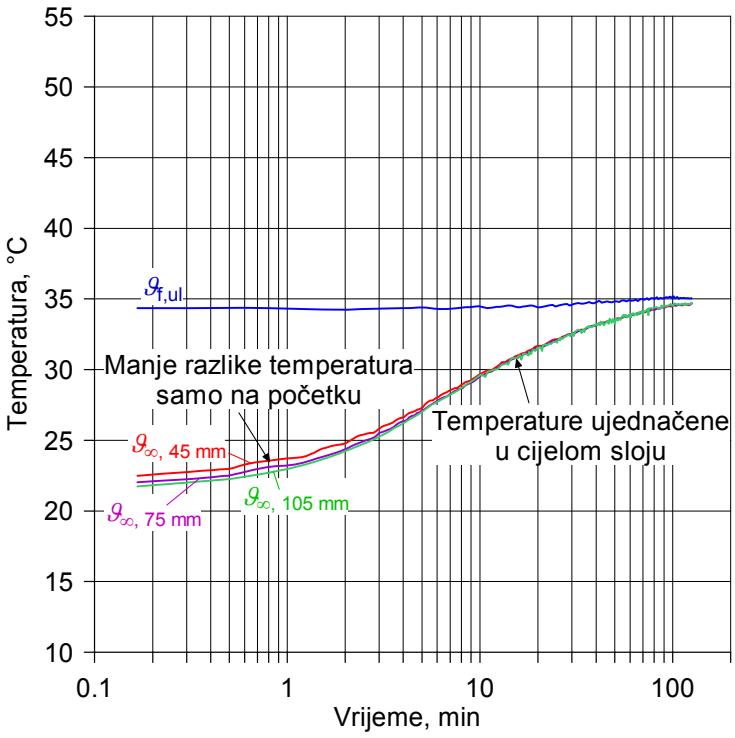


b) $\vartheta_f = 42$ °C

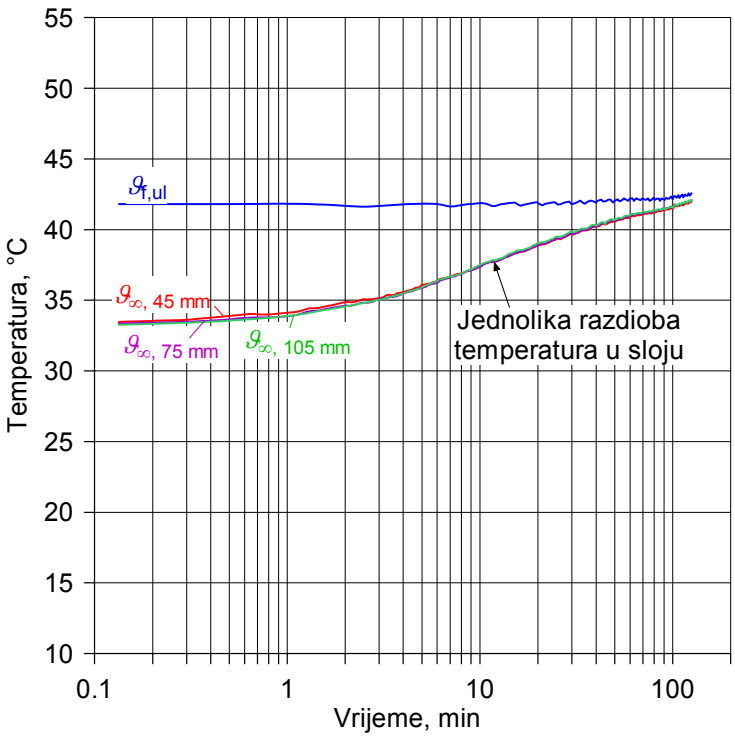


c) $\vartheta_f = 50$ °C

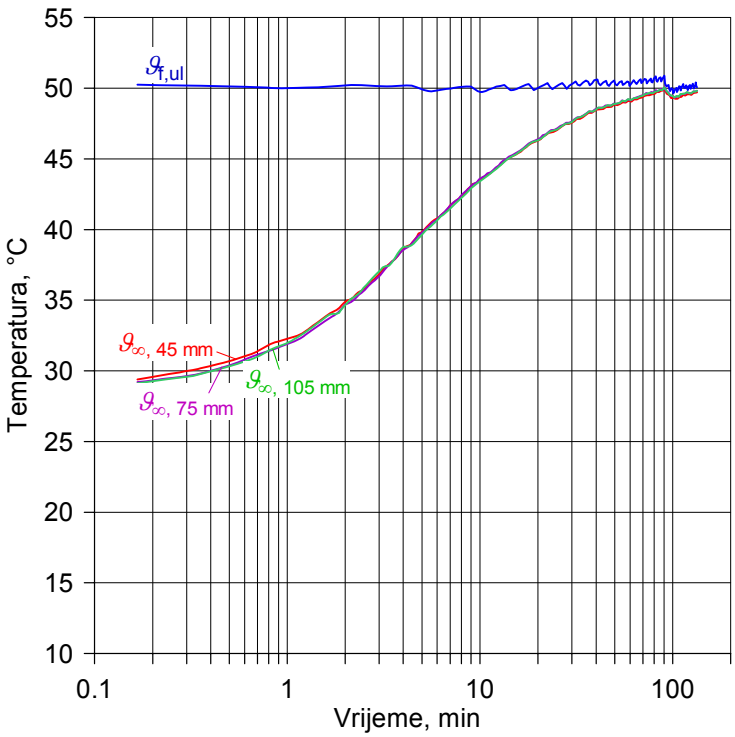
Slika 7-14. Temperature u sloju ječma za $w_f = 1{,}0$ m/s i različite ulazne temperature zraka



a) $\vartheta_f = 35$ °C

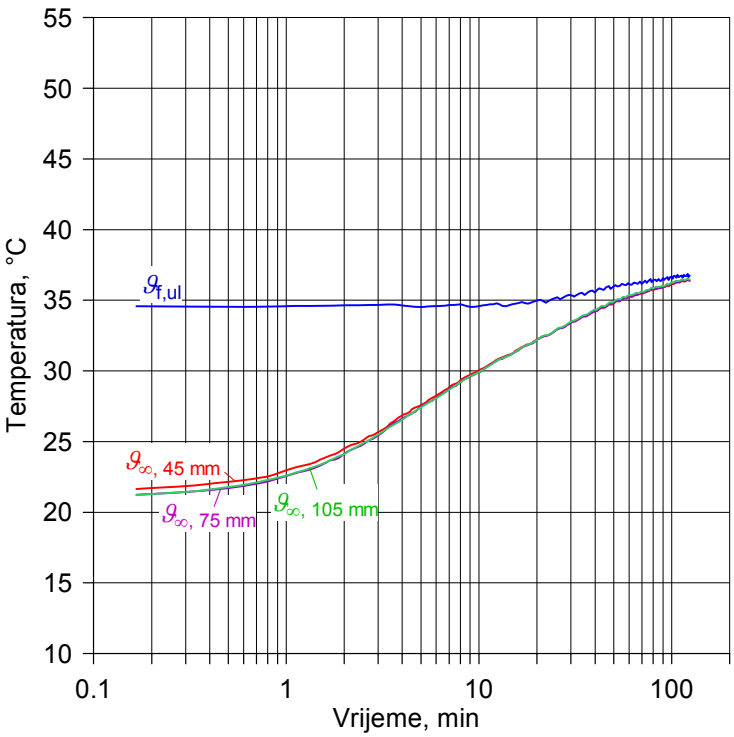


b) $\vartheta_f = 42$ °C

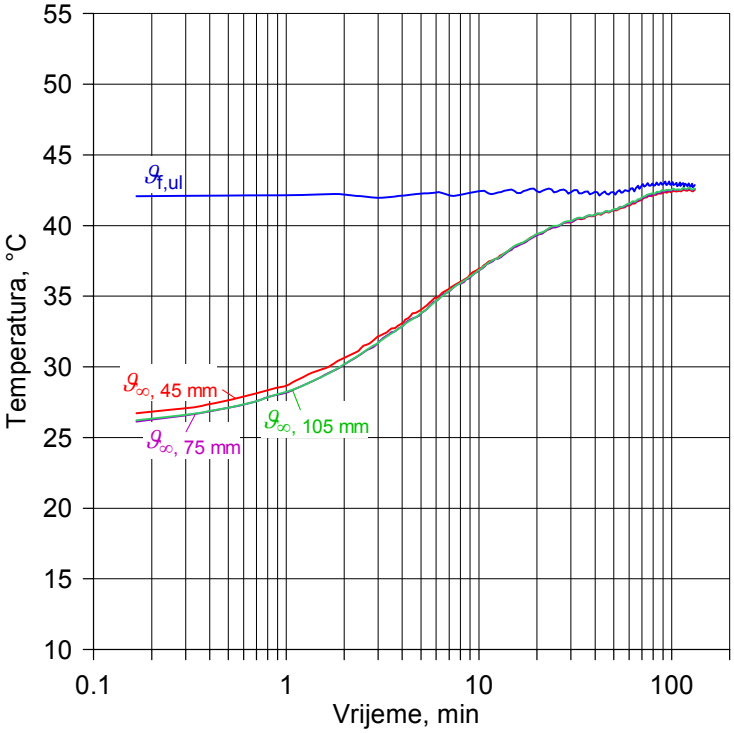


c) $\vartheta_f = 50$ °C

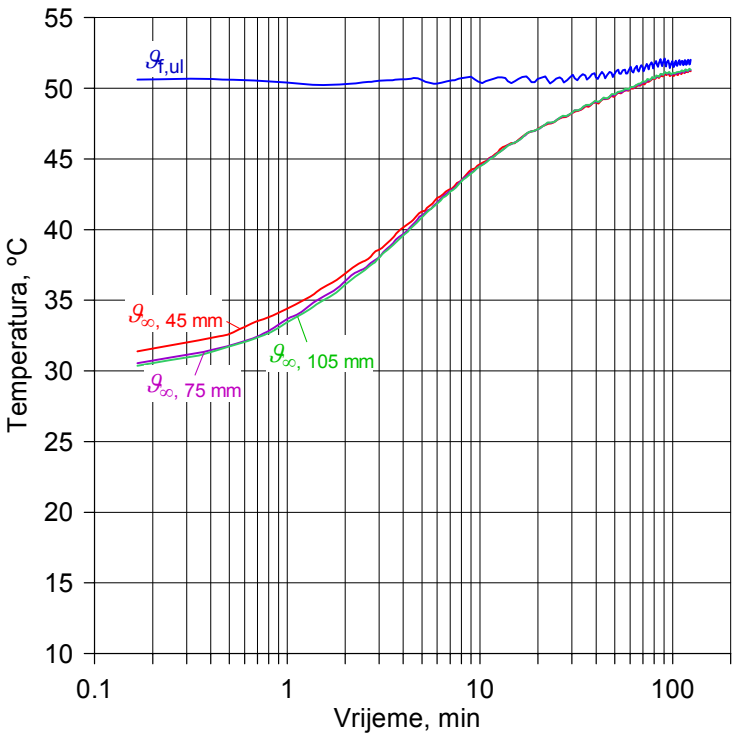
Slika 7-15. Temperature u sloju ječma za $w_f = 1{,}07$ m/s i različite ulazne temperature zraka



a) $\vartheta_f = 35$ °C



b) $\vartheta_f = 42$ °C



c) $\vartheta_f = 50$ °C

Slika 7-16. Temperature u sloju ječma za $w_f = 1{,}15$ m/s i različite ulazne temperature zraka

Prije analize dijagrama temperatura u sloju mora se napomenuti da je prikupljanje temperatura na mjernom sustavu započelo tek kad se završilo s ubacivanjem vlažnog zrnja u kolonu koje se vršilo ubacivanjem zrnja kroz otvor na gornjem cilindru kolone. Kako je to trajalo oko minutu vremena, u sloju su se temperature već smanjile zbog intenzivnog ishlapljivanja na početku sušenja.

Dakle, na slici 7-14 su prikazane temperature po visini sloja za brzinu zraka $w_f = 1{,}0$ m/s i sve temperature zraka, na slici 7-15 za brzinu zraka 1,07 m/s i na slici 7-16 za brzinu zraka 1,15 m/s.

Pri najmanjoj brzini zraka $w_f = 1{,}0$ m/s, slika 7-14, može se vidjeti kako na početku sušenja postoji vrlo nejednolika raspodjela temperatura u sloju što znači da još nije formiran fluidizirani sloj. Primjerice, pri brzini zraka 1,0 m/s i temperaturi 35 °C, slika 7-14a, najviša temperatura na početku procesa bila u dijelu iznad podnice, $\vartheta_{\infty,\,45\text{ mm}} = 28$ °C, nešto niža je bila u sredini sloja, $\vartheta_{\infty,\,75\text{ mm}} = 19$ °C, a najmanja je bila u gornjem dijelu sloja, $\vartheta_{\infty,\,105\text{ mm}} = 15$ °C. Temperature su se odmah nakon početka sušenja počele vrlo brzo povećavati, što znači da je na mjestima gdje su se mjerile temperature završio dio sušenja kada ishlapljuje površinska vlaga sa zrnja, ali s različitim gradijentima u svakom od dijelova sloja tako da su nakon minute sušenja temperature iznosile $\vartheta_{\infty,\,45\text{ mm}} = 30$ °C, $\vartheta_{\infty,\,75\text{ mm}} = 23$ °C i $\vartheta_{\infty,\,105\text{ mm}} = 16$ °C, nakon dvije minute 31 °C, 26 °C i 20, nakon četiri minute 32 °C, 27 °C i 23 °C itd. Do izjednačavanja temperatura u cijelom sloju, odnosno do nastanka potpuno fluidiziranog sloja, dolazi tek nakon određenog vremena sušenja koji ovisi o temperaturi zraka, odnosno o brzini sušenja pojedinih dijelova sloja.

I na ostalim slikama za istu brzinu zraka 1,0 m/s i temperature 42 °C i 50 °C, 7-14b i c, može se vidjeti sličan raspored temperatura u sloju na početku sušenja, što znači da niti pri tim temperaturama zraka nije odmah došlo do stvaranja fluidiziranog sloja. Također se i vizualno kroz otvore sa strane kolone moglo vidjeti kako se čestice u pojedinim dijelovima sloja vrlo slabo miješaju, i to osobito u dijelu iznad podnice (gdje se mjerila temperatura $\vartheta_{\infty,\,45\,\mathrm{mm}}$), a vidjelo se i probijanje sloja na nekim dijelovima, odnosno pojava „fontanske fluidizacije".

Zbog toga se može zaključiti da pri najmanjoj brzini zraka w_f = 1,0 m/s sloj na početku procesa sušenja nije pravilno fluidizirao, čestice su se miješale samo u pojedinim dijelovima sloja (najviše u gornjem), a do fluidizacije cijelog sloja je došlo tek kad se zrnje u svim dijelovima dovoljno osušilo pa se moglo razdvojiti i započeti fluidizirati. Kod temperature zraka 35 °C, slika 7-14a, može se tako vidjeti da su se prvo izjednačile temperature u srednjem i gornjem dijelu sloja nakon 15 minuta sušenja (dakle ti dijelovi sloja su tada započeli fluidizirati), a u cijelom sloju su se izjednačile tek nakon 60 minuta. Na slici 7-14b, koja prikazuje temperature u sloju za temperaturu zraka 42 °C, vidi se kako su se temperature u sloju izjednačile znatno brže, nakon 20 minuta sušenja, a kod 50 °C, slika 7-14c, do izjednačavanja temperatura je došlo vrlo brzo, i to nakon samo 3 minute sušenja.

Relativno visoka temperatura u dijelu sloja iznad podnice, $\vartheta_{\infty,\,45\,\mathrm{mm}}$, u odnosu prema temperaturama u srednjem i gornjem dijelu može se protumačiti time što se to zrnje prvo ubacilo u kolonu te se već dosta osušilo dok se nije ostatak ubacio, no ono ipak ne može započeti fluidizirati sve dok se dovoljno ne osuši i zrnje u ostalim dijelovima.

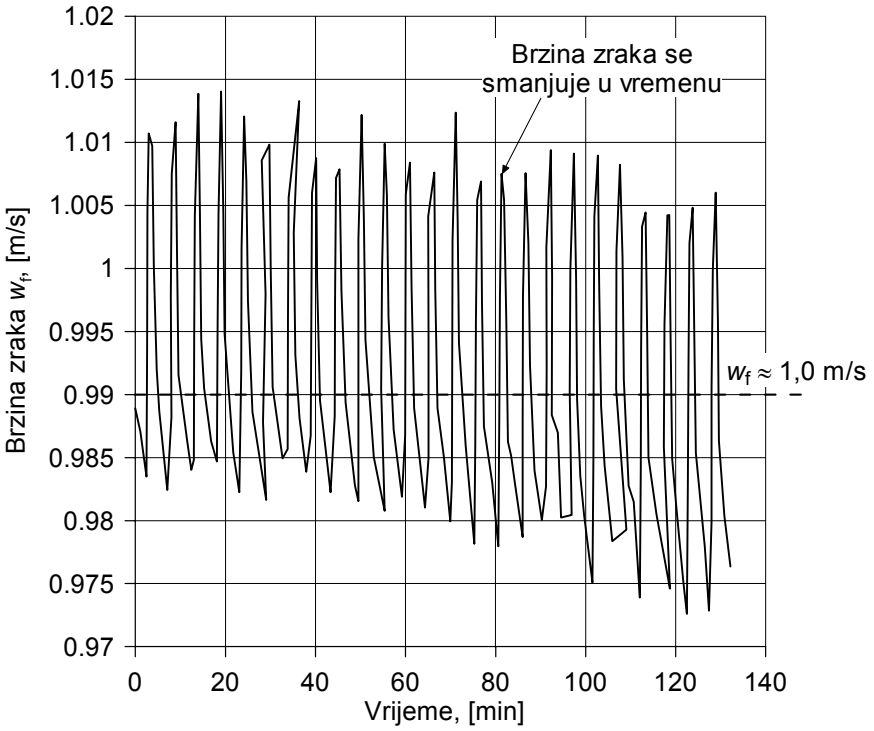
Treba napomenuti da je brzina zraka 1,0 m/s odabrana na temelju izmjerene minimalne brzine fluidizacije koja je za ječam iznosila w_{mf} = 0,9 m/s (pri sadržaju vlage X = 0,25), i maksimalne moguće brzine zraka w_f = 1,15 m/s koja međutim nije mogla biti veća zbog ograničenog mjernog raspona pretvornika razlike tlaka koji se koristio na mjernoj prigušnici. U mjerenjima se radi sigurnosti išlo s malo većom brzinom 1,0 m/s, no koja se ipak pokazala nedovoljnom da fluidizira sloj što se moglo desiti iz nekoliko razloga. Prvo, kako i prilikom pukog prostrujavanja čestica u fluidiziranom sloju za vrijeme mjerenja pada tlaka dolazi do sušenja čestica, izmjerena minimalna brzina fluidizacije može biti nešto manja od potrebne za početni sadržaj vlage jer se smanjio sadržaj vlage čestica. Drugo, ovlaživanjem čestica prije svakog mjerenja dobivale su se i nešto veće vrijednosti od traženog početnog sadržaja vlage (X_0 = 0,25). I konačno, vlažno zrnje žitarica je dosta ljepljivo što otežava stvaranje fluidiziranog sloja.

Pri većim brzinama zraka 1,07 i 1,15 m/s zrnje je međutim odmah započelo fluidizirati jer je sila zbog pada tlaka u sloju bila dovoljna da trenutačno razdvoji vlažne čestice, pa su se onda i temperature u sloju praktički odmah izjednačile. Tako se na slikama 7-15 i 7-16 vidi kako su temperature u svim dijelovima sloja vrlo jednolike uz vrlo male početne razlike na samom početku sušenja dok se zrnje još nije pomiješalo. Gradijenti temperatura se nakon početne faze miješanja čestica naglo povećavaju i ostaju gotovo konstantni u prvom dijelu sušenja, da bi se počeli smanjivati kad se temperatura u sloju počne približavati ulaznoj temperaturi zraka $\vartheta_{f,ul}$. No, iako se razlika temperatura između ulaznog zraka i čestica sve više smanjuje tako da je na kraju procesa sušenja manja od 1 °C, ona postoji sve dok čestice ne bi došle u ravnotežu s ulaznim zrakom dane vlažnosti i temperature što bi se desilo nakon dugo vremena sušenja pri istom ulaznom stanju zraka.

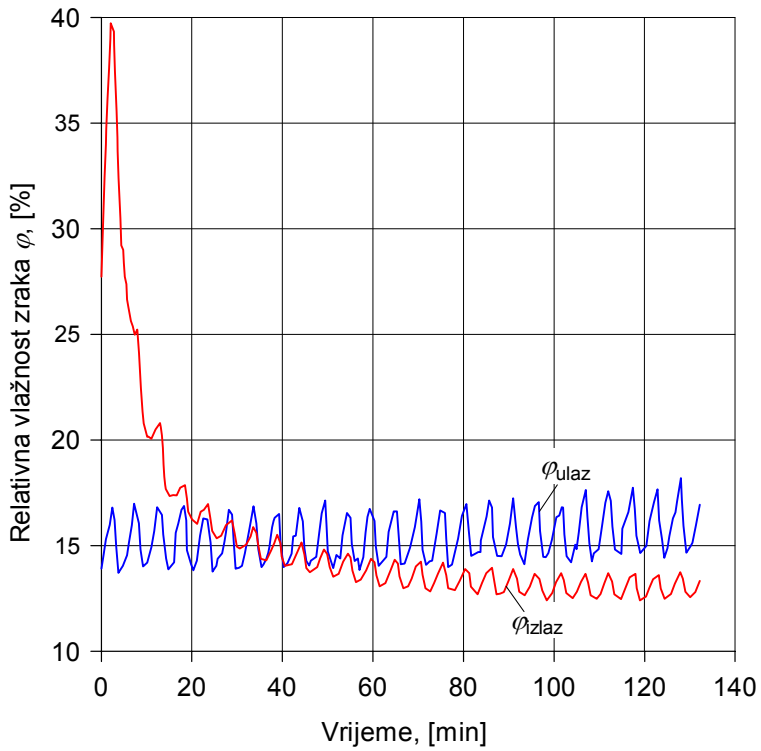
Osim problema s postizanjem fluidiziranog sloja pri brzini zraka 1,0 m/s prilikom mjerenja je bilo dosta problema i sa stanjem zraka na ulazu. Naime, zbog korištenja kompresora za dobavu zraka u kolonu za fluidizaciju nikako nije bilo moguće dobiti stalne vrijednosti ulaznih temperatura i relativne vlažnosti zraka. Kao prvo, obično se maseni protok zraka nakon nekog vremena počeo smanjivati što se manifestiralo povećanjem ulazne temperature

zraka u kolonu. Iako se maseni protok zraka pokušao povećati otvaranjem finog regulacijskog ventila, sustav je vrlo tromo reagirao pa je zato ulazna temperatura zraka na kraju pokusa znala biti malo povišena u odnosu na predviđenih 35, 42 ili 50 °C kao što se može vidjeti i na dijagramima temperatura. I kao drugo, relativna vlažnost zraka na ulazu se isto mijenjala zbog stalnog uključivanja i isključivanja kompresora jer se tlak zraka u tlačnom spremniku održavao pomoću presostata koji bi uključio stapni kompresor kad bi tlak pao ispod zadane minimalne vrijednosti, a isključio ga kad bi tlak zraka prešao maksimalnu vrijednost. Kompresor zbog toga nije radio konstantno nego povremeno kad bi se potrošio zrak iz spremnika. Zbog takvog načina rada se stalno miješao zrak iz spremnika i svježi stlačeni zrak pa na ulazu nije bilo moguće dobiti zrak konstantne vlažnosti. Obzirom da ventilatori ne mogu dati dovoljan tlak zraka na ulazu u kolonu (do 1 bar pretlaka), jedini uređaj koji bi se mogao koristiti za dobavu zraka konstantnog ulaznog stanja je *Rootsovo* puhalo, no u ovom istraživanju je jedino kompresor bio dostupan. Naravno, kod vrlo dubokih slojeva jedino kompresor može dati dovoljan pretlak.

Na slici 7-17 radi primjera se može vidjeti kako ustvari izgleda promjena brzine zraka w_f u vremenu kod mjerenja za w_f = 1,0 m/s i ϑ_f = 35 °C, a na slici 7-18 kako izgleda promjena relativne vlažnosti zraka φ na ulazu i izlazu iz kolone. U analizi su se stoga morale koristiti prosječne vrijednosti brzina zraka w_f, sadržaja vlage zraka x_f itd.



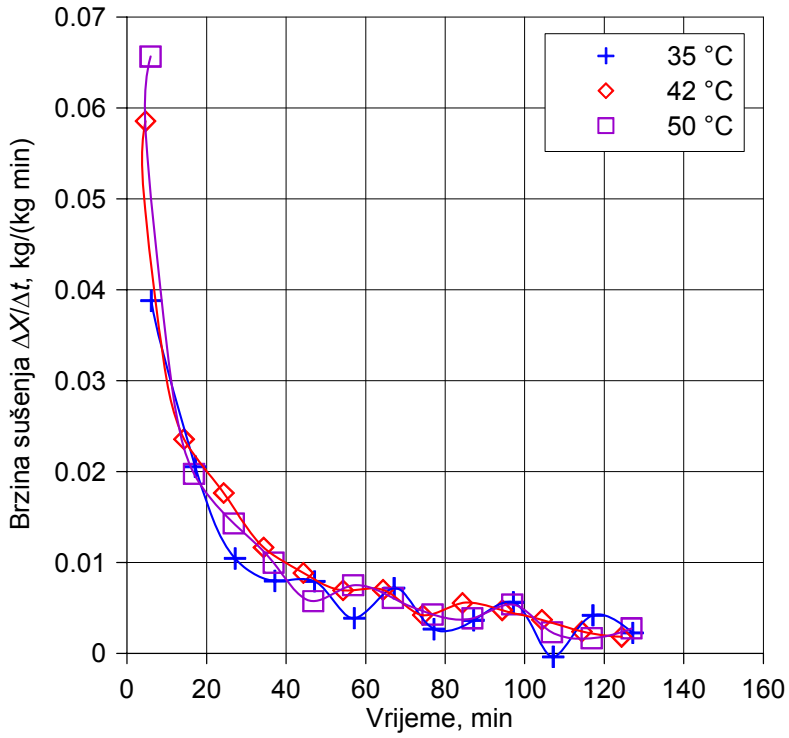
Slika 7-17. Promjena brzine zraka w_f u vremenu



Slika 7-18. Promjena relativne vlažnosti zraka φ na ulazu i izlazu iz kolone

Dakle, nešto veći efekt brzine zraka na vremena sušenja što se može vidjeti kod određenih temperatura posljedica je i lošije fluidizacije sloja ili povećanja temperature zraka zbog smanjenog protoka zraka u koloni.

Na sljedećim slikama prikazane su još i brzine sušenja ječma $\Delta X/\Delta t$. Na slici 7-19 su prikazane brzine sušenja ječma izračunate diferenciranjem *izmjerenih* vrijednosti sadržaja vlage za sve temperature zraka kod brzine zraka $w_f = 1{,}0$ m/s.



Slika 7-19. Krivulje pravih brzina sušenja ječma za $w_f = 1{,}0$ m/s

Međutim, kako vremenski intervali uzimanja uzoraka na početku sušenja (kad su brzine sušenja i najveće) većinom nisu bili isti, usporedbom ovako izračunatih brzina sušenja bi se mogli izvući i neki krivi zaključci. Stoga su brzine sušenja $\Delta X/\Delta t$ ipak izračunate diferenciranjem *aproksimativnih* vrijednosti sadržaja vlage izračunatih pomoću *Pageove* jednadžbe (7-1) jer je ona vrlo dobro aproksimirala rezultate sušenja kao što se vidjelo na slikama 7-7 do 7-12:

$$X_{\text{apr}} = X_{\text{r}} + \left(X_0 - X_{\text{r}}\right)e^{-xt^y}, \tag{7-2}$$

pri čemu su se koristile vrijednosti ravnotežnog sadržaja vlage X_r i faktora x i y navedene na tim slikama. Zgodno je i što su se na ovaj način „ispeglale“ krivulje brzina sušenja koje je sad puno lakše pratiti nego „prave“ krivulje prikazane na slici 7-19, tako da se i bolje vidi utjecaj pojedinih parametara na brzine sušenja.

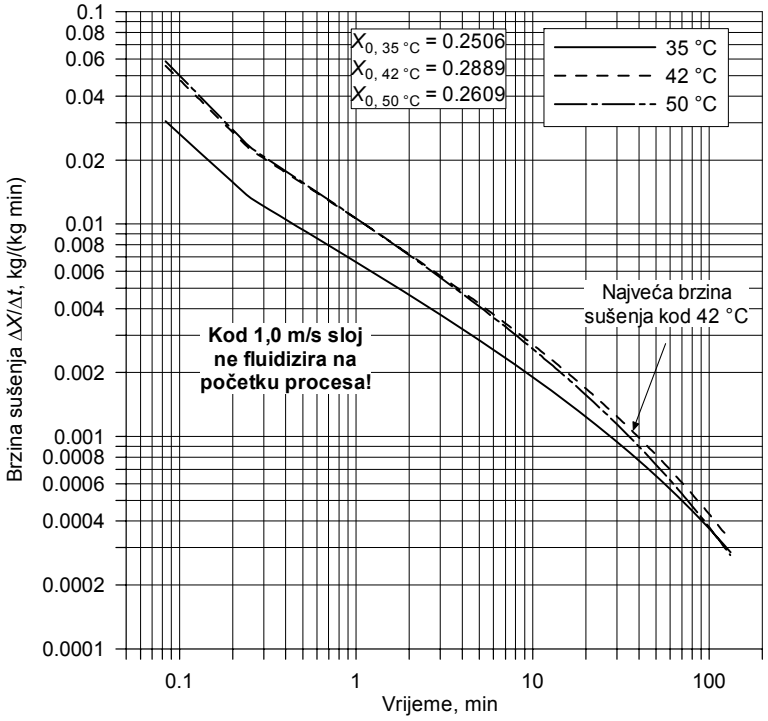
Brzina sušenja je dakle izračunata kao:

$$\left.\begin{aligned} \Delta X_1 &= X_0 - X_{1,\text{apr}} \\ \Delta t_1 &= t_1 - t_0 \end{aligned}\right\} \Rightarrow \frac{\Delta X_1}{\Delta t_1}, \tag{7-3}$$

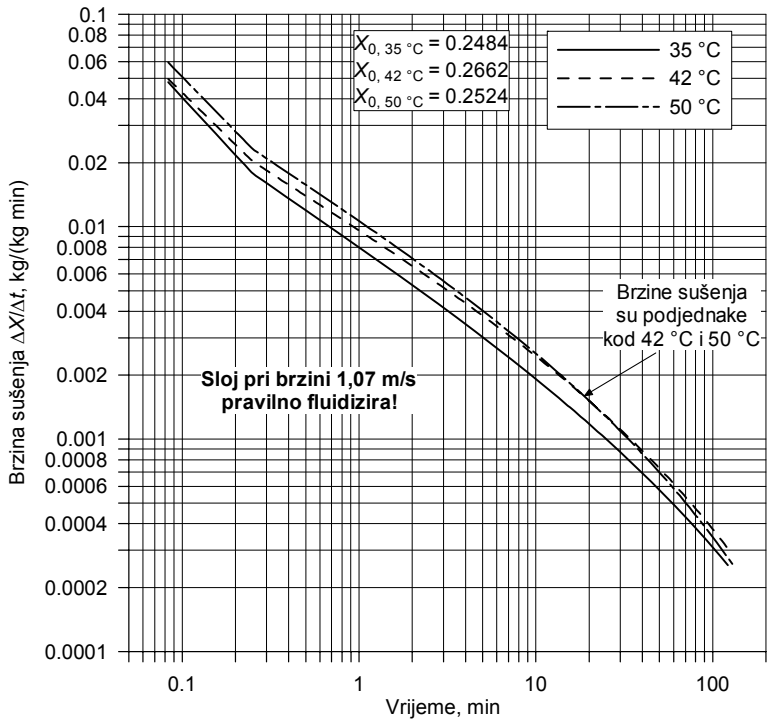
a dobivene vrijednosti su unesene u dijagram za srednje vrijeme odgovarajućeg intervala sadržaja vlage:

$$X_{1,\text{sr}} = \frac{X_{1,\text{apr}} + X_0}{2}. \tag{7-4}$$

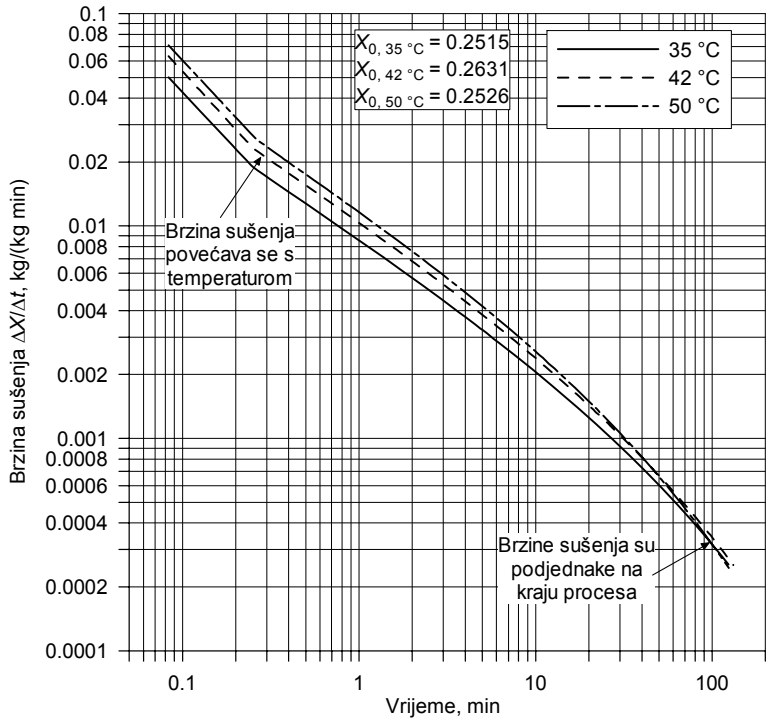
Dijagrami izračunatih aproksimativnih brzina sušenja su prikazani na slikama 7-20 i 7-21. Mjerila obiju osi nacrtana su u logaritamskom mjerilu kako bi se bolje vidjele promjene brzine sušenja na kraju procesa. Slika 7-20 prikazuje dijagrame aproksimativnih brzina sušenja za sve brzine zraka i na njima se može vidjeti utjecaj temperature na brzinu sušenja, dok slika 7-21 prikazuje dijagrame brzine sušenja za sve temperature zraka i na njima se može vidjeti utjecaj brzine zraka. Kako brzine sušenja ovise i o početnom sadržaju vlage zrna X_0 na dijagramima su naznačene i te vrijednosti.



a) w_f = 1,0 m/s

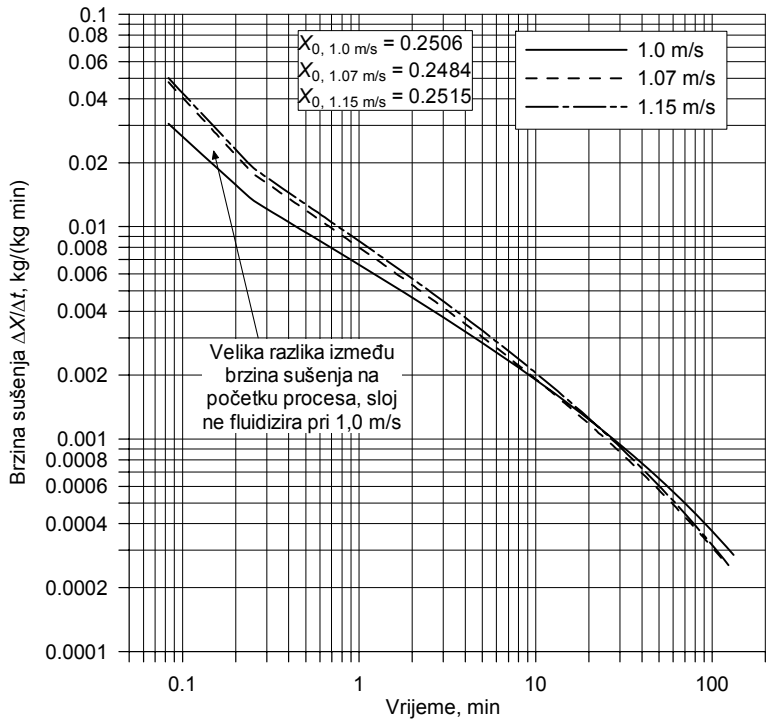


b) w_f = 1,07 m/s

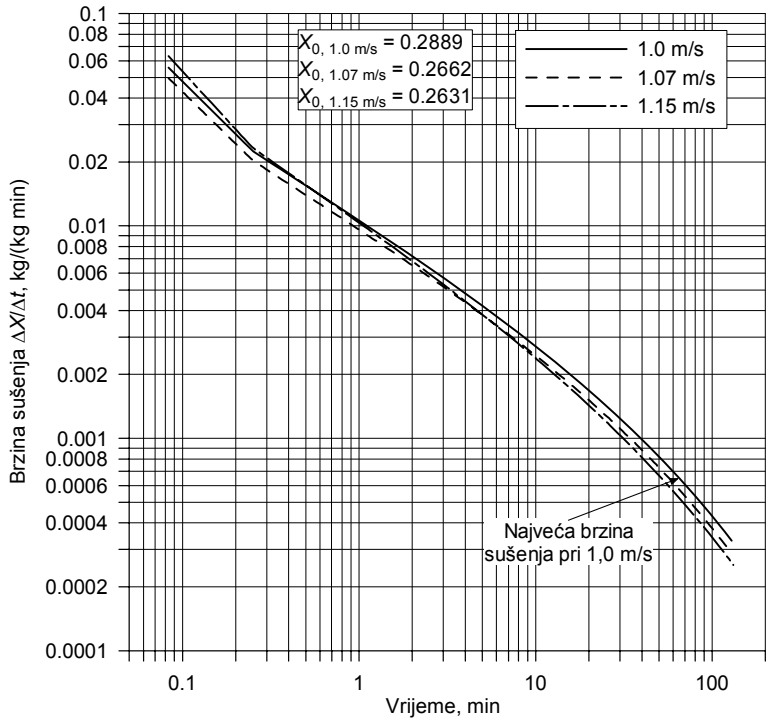


c) w_f = 1,15 m/s

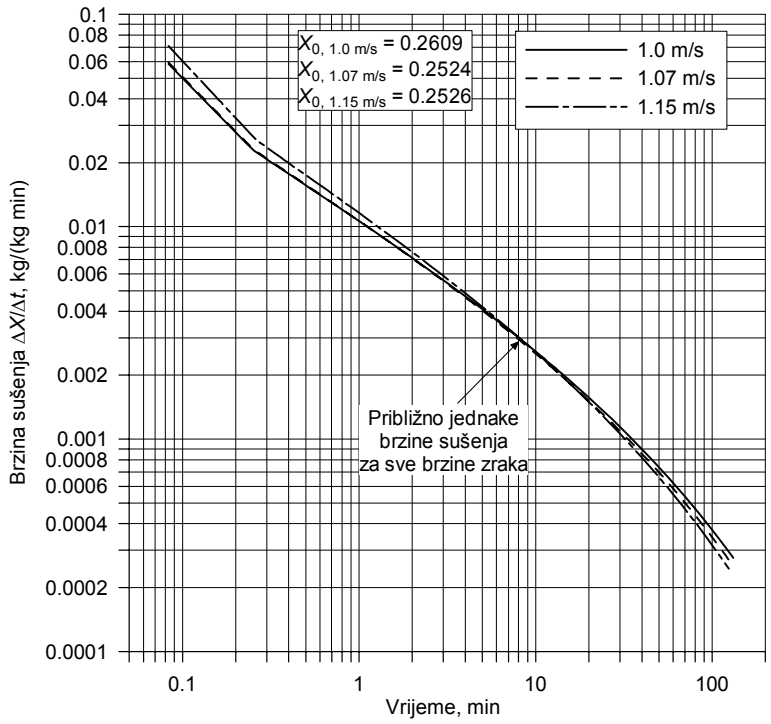
Slika 7-20. Aproksimativne brzine sušenja ječma u ovisnosti o vremenu za sve brzine zraka



a) $\vartheta_f = 35$ °C



b) $\vartheta_f = 42$ °C



c) ϑ_f = 50 °C

Slika 7-21. Aproksimativne brzine sušenja ječma u ovisnosti o vremenu za sve temperature zraka

Na slici 7-20 prikazane su aproksimativne brzine sušenja ječma u ovisnosti o vremenu za sve brzine zraka i na njoj se jasno mogu vidjeti razlike između brzina sušenja pri različitim temperaturama zraka. Te razlike su najveće na početku procesa sušenja kad sušenjem još dominiraju vanjski uvjeti vezani za zrak („prva faza padajuće brzine sušenja“), no sa smanjenjem sadržaja vlage (kad brzinu sušenja počne kontrolirati difuzija, „druga faza“) razlike između brzina su sve manje.

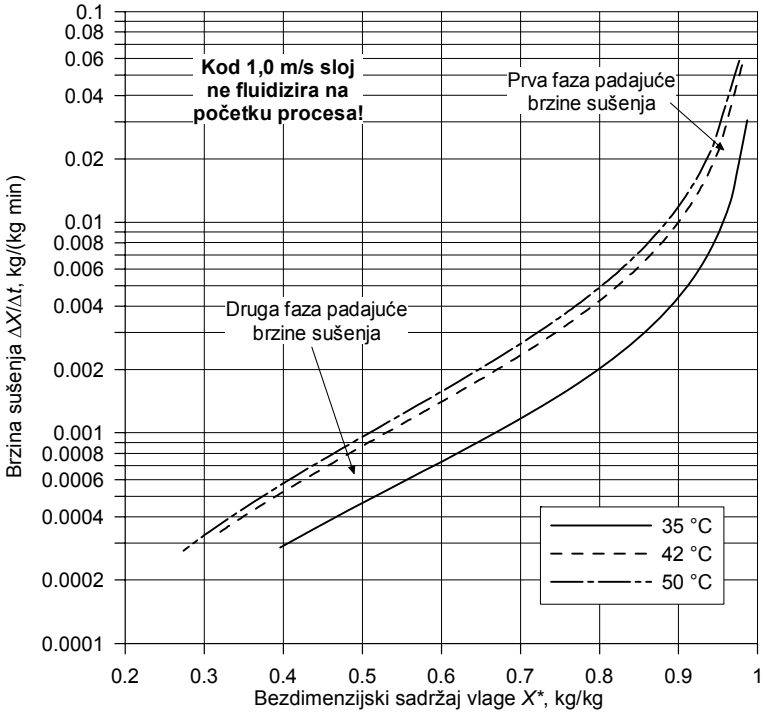
Velika je i razlika u iznosima brzina sušenja na početku i na kraju sušenja. Na početku su brzine sušenja jako velike zato što vlaga ishlapljuje s mokre površine čestica, no eksponencijalno se smanjuju kako se fronta sušenja seli u unutrašnjost zrna. Primjerice, aproksimativna brzina sušenja kod 1,0 m/s i 35 °C na početku iznosi 0,03051 kg/(kg min), a na kraju samo 0,0002847 kg/(kg min) što je manje čak za 107 puta. Kad bi se dostigao ravnotežni sadržaj vlage brzina sušenja bila bi jednaka nuli.

Na slikama se može jasno vidjeti i kako se brzina sušenja povećava sa sadržajem vlage. Najbolje se to vidi na slici 7-20a koja prikazuje dijagram brzina sušenja za brzinu zraka 1,0 m/s. Kod te je brzine zraka i temperature 42 °C početni sadržaj vlage $X_{0,\ 42\ °C}$ = 0,2889 bio dosta veći od početnog sadržaja vlage pri drugim temperaturama, $X_{0,\ 35\ °C}$ = 0,2506 i $X_{0,\ 50\ °C}$ = 0,2609. Stoga je kod te temperature brzina sušenja bila praktički jednaka kao kod 50 °C, a na kraju sušenja čak nešto i veća zbog većeg sadržaja vlage na kraju. Slično se vidi i na slici 7-20b gdje su brzine sušenja kod 42 °C i 50 °C isto praktički bile jednake zbog velikog početnog sadržaja vlage $X_{0,\ 42\ °C}$ = 0,2662.

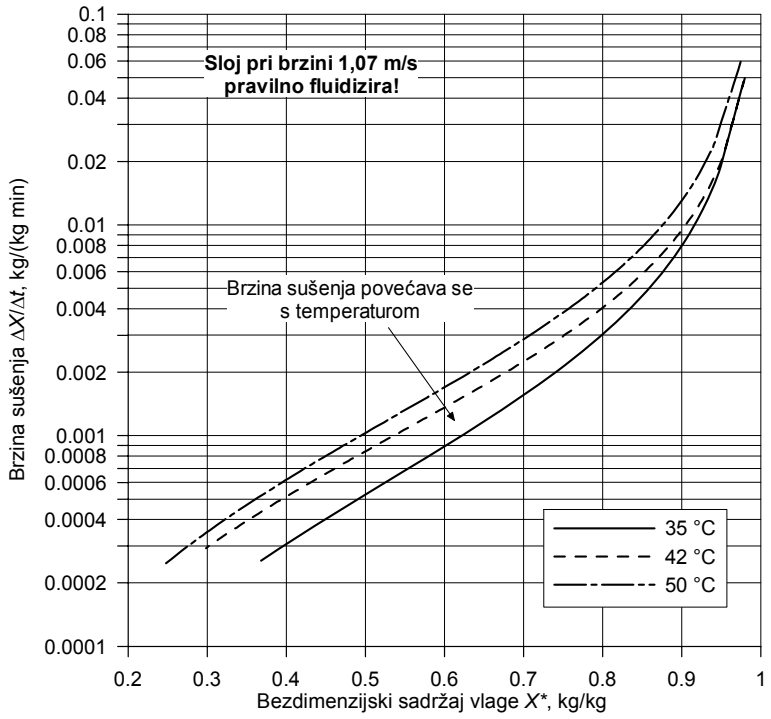
Povećanjem brzine zraka se vrlo malo mijenjaju brzine sušenja, efekt povećanja brzine je najveći u „prvoj fazi“ dok je površina zrna još djelomično zasićena. Iako na krivulje brzina

sušenja u ovisnosti o vremenu za sve temperature zraka prikazane na slici 7-21 utječe i početni sadržaj vlage X_0, ipak se može vidjeti da su razlike između brzina sušenja puno manje nego na slici 7-20, a najveće razlike su kod temperature zraka 35 °C, slika 7-21a, i to zato što pri brzini 1,0 m/s sloj nije niti fluidizirao. Međutim pri ostalim temperaturama se može vidjeti vrlo malo povećanje brzine sušenja s brzinom zraka.

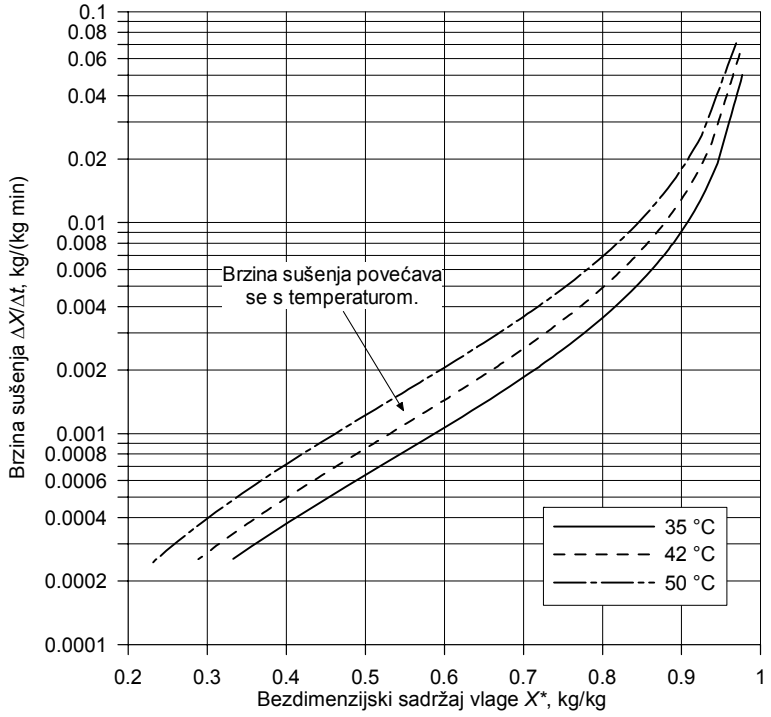
Brzine sušenja je zgodno prikazati i u ovisnosti o sadržaju vlage kao na slici 3-3b jer se na taj način vidi kako brzina sušenja opada sa smanjujem sadržaja vlage, odnosno pojedine faze sušenja. Zbog različitih vrijednosti početnog sadržaja vlage i relativne vlažnosti ulaznog zraka opet će se koristiti normalizirane vrijednosti sadržaja vlage X^* pa će se na taj način vidjeti utjecaj samo temperature i brzine zraka na brzinu sušenja. Dijagrami su prikazani na slikama 7-22 i 7-23, a mjerilo ordinate je nacrtano u logaritamskom mjerilu kako bi se bolje vidjele promjene na kraju procesa sušenja.



a) $w_f = 1{,}0$ m/s

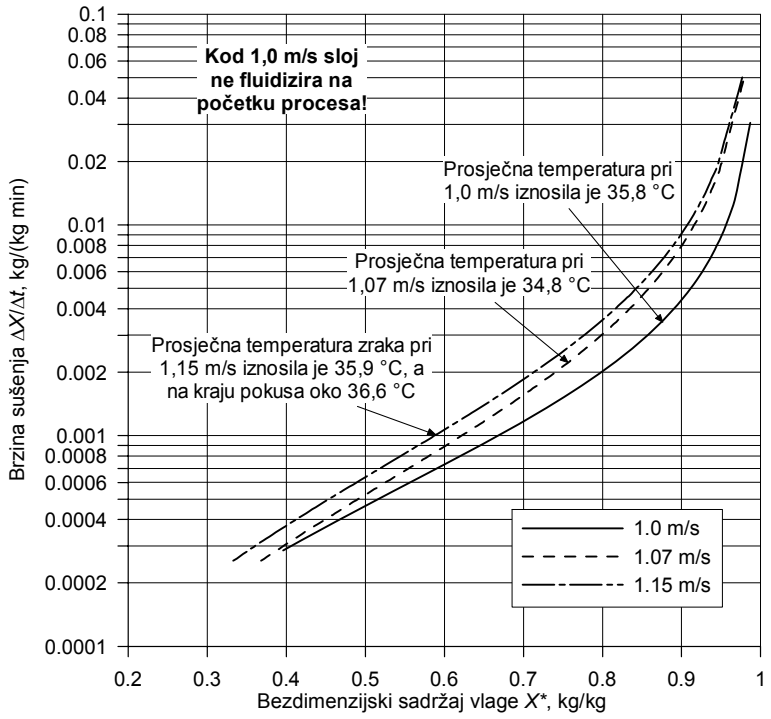


b) w_f = 1,07 m/s

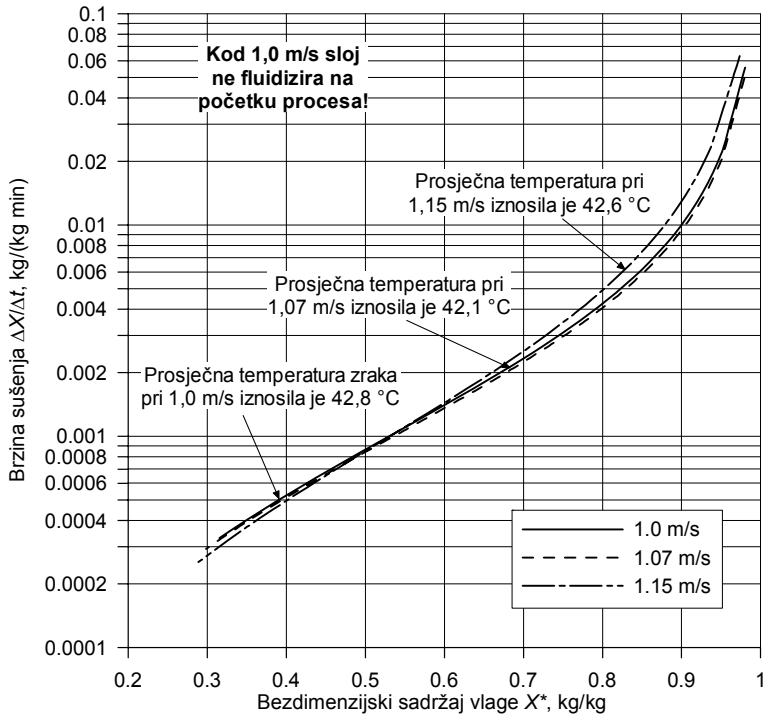


c) w_f = 1,15 m/s

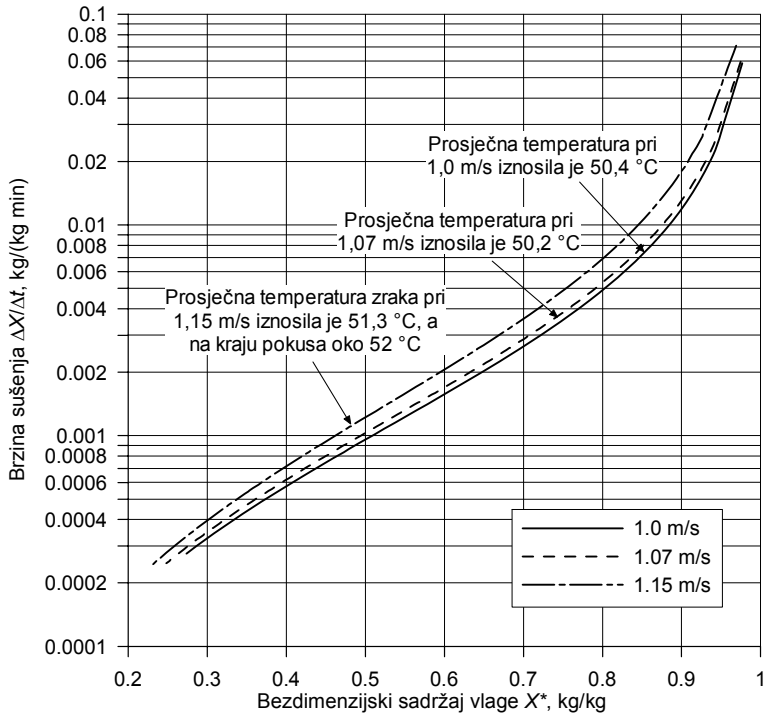
Slika 7-22. Aproksimativne brzine sušenja ječma u ovisnosti o bezdimenzijskom sadržaju vlage X^* za sve brzine zraka



a) $\vartheta_f = 35$ °C



b) $\vartheta_f = 42$ °C



c) $w_f = 50$ °C

Slika 7-23. Aproksimativne brzine sušenja ječma u ovisnosti o bezimenzijskom sadržaju vlage X^* za sve temperature zraka

Kao što se može vidjeti sa slike 7-22 povećanje temperature zraka ima najveći efekt na brzine sušenja, dok povećanje brzine ima manji utjecaj što se najbolje vidi na slici 7-23b. Na ostalim slikama, 7-23a i c, do izražaja nažalost dolaze problemi s nastankom fluidiziranog sloja kod brzine zraka 1,0 m/s (manja brzina sušenja) i problemi sa smanjenjem protoka zraka što je rezultiralo povećanjem temperature zraka pri određenim brzinama zraka, i to osobito pri 1,15 m/s (veća brzina sušenja).

7.3.2 Pšenica

Kao i kod ječma prvo su tablično prikazani rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za sve brzine i temperature zraka. Rezultati su prikazani i dijagramski na slikama 7-24 do 7-26.

Tablica 7-18. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,0 m/s i ϑ_f = 35 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	48,148	47,242	35,202	12,946	12,04	0,0752	0,0998*
2		46,987	45,671	35,305	11,682	10,366	0,1270	
3		50,077	48,749	35,073	15,004	13,676	0,0971	
4	0,00	48,605	45,844	35,594	13,011	10,25	0,2694	0,2651**
5		50,484	47,468	35,948	14,536	11,52	0,2618	
6		51,445	47,786	33,939	17,506	13,847	0,2642	
7	1,50	52,131	48,844	35,244	16,887	13,6	0,2417	
8	5,50	51,659	48,476	34,385	17,274	14,091	0,2259	
9	8,50	53,555	50,363	35,352	18,203	15,011	0,2126	
10	11,50	53,126	49,91	34,317	18,809	15,593	0,2062	
11	15,50	47,276	45,055	33,643	13,633	11,412	0,1946	
12	18,50	50,918	48,283	34,399	16,519	13,884	0,1898	
13	28,50	49,489	47,133	34,051	15,438	13,082	0,1801	
14	38,50	48,798	46,732	34,81	13,988	11,922	0,1733	
15	48,50	49,406	47,241	34,231	15,175	13,01	0,1664	
16	58,50	45,436	43,611	32,274	13,162	11,337	0,1610	
17	68,50	51,401	49,234	35,116	16,285	14,118	0,1535	
18	78,50	49,613	47,672	34,684	14,929	12,988	0,1494	
19	88,50	50,508	48,318	33,3	17,208	15,018	0,1458	
20	98,50	49,818	47,882	34,081	15,737	13,801	0,1403	
21	108,50	50,943	48,676	32,477	18,466	16,199	0,1399	
22	118,50	49,455	47,531	33,566	15,889	13,965	0,1378	
23	128,50	50,116	48,151	33,595	16,521	14,556	0,1350	0,1349***
24		55,515	53,119	35,318	20,197	17,801	0,1346	
25		51,935	49,978	35,478	16,457	14,5	0,1350	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

Tablica 7-19. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,0 m/s i ϑ_f = 42 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	50,142	48,626	35,202	14,94	13,424	0,1129	0,1172*
2		49,202	47,74	35,305	13,897	12,435	0,1176	
3		50,003	48,391	35,073	14,93	13,318	0,1210	
4	0,00	49,342	46,244	35,594	13,748	10,65	0,2909	0,2761**
5		50,524	47,447	35,948	14,576	11,499	0,2676	
6		48,962	45,769	33,938	15,024	11,831	0,2699	
7	1,50	50,348	47,436	35,244	15,104	12,192	0,2388	
8	5,33	50,858	48,039	34,385	16,473	13,654	0,2065	
9	8,33	51,502	48,821	35,351	16,151	13,47	0,1990	
10	18,33	48,994	46,746	34,317	14,677	12,429	0,1809	
11	28,33	48,377	46,273	33,643	14,734	12,63	0,1666	
12	38,33	53,06	50,603	34,399	18,661	16,204	0,1516	
13	48,33	50,425	48,352	34,051	16,374	14,301	0,1450	
14	58,33	55,877	53,272	34,81	21,067	18,462	0,1411	
15	68,33	49,353	47,524	34,231	15,122	13,293	0,1376	
16	78,33	47,256	45,51	32,274	14,982	13,236	0,1319	
17	88,45	51,336	49,477	35,116	16,22	14,361	0,1294	
18	98,45	50,263	48,513	34,684	15,579	13,829	0,1265	
19	108,45	51,296	49,33	33,299	17,997	16,031	0,1226	
20	118,45	51,963	50,037	34,081	17,882	15,956	0,1207	
21	128,45	47,985	46,346	32,477	15,508	13,869	0,1182	0,1188***
22		52,497	50,485	33,566	18,931	16,919	0,1189	
23		49,443	47,755	33,595	15,848	14,16	0,1192	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

Tablica 7-20. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,0 m/s i ϑ_f = 50 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	48,53	47,056	35,203	13,327	11,853	0,1244	0,1243*
2		47,81	46,426	35,306	12,504	11,12	0,1245	
3		48,285	46,828	35,074	13,211	11,754	0,1240	
4	0,00	50,614	47,429	35,595	15,019	11,834	0,2691	0,2676**
5		51,756	48,429	35,949	15,807	12,48	0,2666	
6		50,379	46,914	33,939	16,44	12,975	0,2671	
7	1,67	52,809	49,577	35,245	17,564	14,332	0,2255	
8	5,67	50,801	48,013	34,386	16,415	13,627	0,2046	
9	8,67	50,404	47,948	35,352	15,052	12,596	0,1950	
10	11,67	49,991	47,554	34,318	15,673	13,236	0,1841	
11	15,67	48,784	46,511	33,644	15,14	12,867	0,1767	
12	18,67	49,637	47,447	34,399	15,238	13,048	0,1678	
13	28,67	50,815	48,565	34,052	16,763	14,513	0,1550	
14	38,67	51,658	49,526	34,811	16,847	14,715	0,1449	
15	48,67	52,252	50,127	34,232	18,02	15,895	0,1337	
16	58,67	48,238	46,408	32,274	15,964	14,134	0,1295	
17	68,67	49,43	47,853	35,117	14,313	12,736	0,1238	
18	78,67	50,365	48,683	34,685	15,68	13,998	0,1202	
19	88,67	51,547	49,656	33,3	18,247	16,356	0,1156	
20	98,67	51,346	49,597	34,081	17,265	15,516	0,1127	
21	108,67	46,138	44,783	32,478	13,66	12,305	0,1101	
22	118,67	49,504	47,955	33,566	15,938	14,389	0,1077	
23	128,67	47,914	46,554	33,596	14,318	12,958	0,1050	0,1057***
24		50,426	48,97	35,317	15,109	13,653	0,1066	
25		49,986	48,603	35,476	14,51	13,127	0,1054	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

Tablica 7-21. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,07 m/s i ϑ_f = 35 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	50,943	49,634	35,202	15,741	14,432	0,0907	0,0941*
2		49,268	48,05	35,305	13,963	12,745	0,0956	
3		52,056	50,566	35,071	16,985	15,495	0,0962	
4	0,00	51,846	48,754	35,595	16,251	13,159	0,2350	0,2350**
5		51,069	48,197	35,948	15,121	12,249	0,2345	
6		50,461	47,311	33,939	16,522	13,372	0,2356	
7	1,33	53,248	50,154	35,245	18,003	14,909	0,2075	
8	5,33	50,795	48,181	34,386	16,409	13,795	0,1895	
9	8,33	52,462	49,81	35,35	17,112	14,46	0,1834	
10	11,33	53,798	50,943	34,316	19,482	16,627	0,1717	
11	15,33	51,994	49,361	33,643	18,351	15,718	0,1675	
12	18,33	52,995	50,379	34,399	18,596	15,98	0,1637	
13	28,33	51,389	49,142	34,051	17,338	15,091	0,1489	
14	38,33	51,971	49,849	34,811	17,16	15,038	0,1411	
15	48,33	53,384	51,078	34,231	19,153	16,847	0,1369	
16	58,33	49,515	47,502	32,274	17,241	15,228	0,1322	
17	68,33	51,245	49,419	35,116	16,129	14,303	0,1277	
18	78,33	52,405	50,434	34,684	17,721	15,75	0,1251	
19	88,33	52,93	50,82	33,299	19,631	17,521	0,1204	
20	98,33	52,454	50,494	34,081	18,373	16,413	0,1194	
21	108,33	53,826	51,586	32,477	21,349	19,109	0,1172	
22	118,33	53,851	51,755	33,565	20,286	18,19	0,1152	
23	128,33	50,458	48,738	33,595	16,863	15,143	0,1136	0,1140***
24		55,709	53,616	35,316	20,393	18,3	0,1144	
25		56,139	54,025	35,474	20,665	18,551	0,1140	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

Tablica 7-22. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,07 m/s i ϑ_f = 42 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	53,679	52,121	35,203	18,476	16,918	0,0921	0,0968*
2		50,802	49,494	35,306	15,496	14,188	0,0922	
3		51,154	49,612	35,073	16,081	14,539	0,1061	
4	0,00	53,311	49,606	35,594	17,717	14,012	0,2644	0,2637**
5		52,567	49,064	35,948	16,619	13,116	0,2671	
6		49,465	46,264	33,938	15,527	12,326	0,2597	
7	2,33	49,824	47,196	35,244	14,58	11,952	0,2199	
8	6,33	47,8	45,537	34,385	13,415	11,152	0,2029	
9	9,33	50,691	48,196	35,35	15,341	12,846	0,1942	
10	12,33	51,004	48,414	34,314	16,69	14,1	0,1837	
11	16,33	47,963	45,836	33,643	14,32	12,193	0,1744	
12	19,33	51,746	49,234	34,399	17,347	14,835	0,1693	
13	29,33	55,094	52,269	34,051	21,043	18,218	0,1551	
14	39,33	52,739	50,413	34,81	17,929	15,603	0,1491	
15	49,33	50,061	48,113	34,231	15,83	13,882	0,1403	
16	59,33	49,632	47,568	32,274	17,358	15,294	0,1350	
17	69,33	50,564	48,772	35,116	15,448	13,656	0,1312	
18	79,33	50,151	48,4	34,685	15,466	13,715	0,1277	
19	89,33	51,409	49,395	33,299	18,11	16,096	0,1251	
20	99,33	49,52	47,855	34,08	15,44	13,775	0,1209	
21	109,33	48,285	46,637	32,477	15,808	14,16	0,1164	
22	119,33	51,423	49,58	33,565	17,858	16,015	0,1151	
23	129,33	51,702	49,848	33,595	18,107	16,253	0,1141	0,1143***
24		49,647	48,179	35,316	14,331	12,863	0,1141	
25		50,841	49,261	35,474	15,367	13,787	0,1146	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

Tablica 7-23. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,07 m/s i ϑ_f = 50 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	46,925	46,155	35,204	11,721	10,951	0,0703	0,0797*
2		50,172	49,062	35,305	14,867	13,757	0,0807	
3		50,842	49,567	35,074	15,768	14,493	0,0880	
4	0,00	50,758	47,817	35,593	15,165	12,224	0,2406	0,2376**
5		50,557	47,759	35,948	14,609	11,811	0,2369	
6		49,751	46,739	33,938	15,813	12,801	0,2353	
7	1,83	51,235	48,483	35,245	15,99	13,238	0,2079	
8	5,83	51,968	49,252	34,385	17,583	14,867	0,1827	
9	8,83	53,008	50,454	35,351	17,657	15,103	0,1691	
10	12,83	52,386	49,842	34,316	18,07	15,526	0,1639	
11	16,83	50,2	47,996	33,643	16,557	14,353	0,1536	
12	21,83	52,227	49,953	34,399	17,828	15,554	0,1462	
13	31,83	49,731	47,851	34,051	15,68	13,8	0,1362	
14	41,83	51,289	49,445	34,811	16,478	14,634	0,1260	
15	51,83	50,631	48,84	34,231	16,4	14,609	0,1226	
16	61,83	47,468	45,88	32,274	15,194	13,606	0,1167	
17	71,83	53,631	51,726	35,116	18,515	16,61	0,1147	
18	81,83	50,002	48,461	34,684	15,318	13,777	0,1119	
19	91,83	48,408	46,954	33,299	15,109	13,655	0,1065	
20	101,83	51,941	50,24	34,081	17,86	16,159	0,1053	
21	111,83	50,687	48,998	32,477	18,21	16,521	0,1022	
22	121,83	49,674	48,242	33,565	16,109	14,677	0,0976	
23	131,83	48,661	47,286	33,595	15,066	13,691	0,1004	0,0989***
24		53,011	51,425	35,316	17,695	16,109	0,0985	
25		54,575	52,872	35,474	19,101	17,398	0,0979	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

Tablica 7-24. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,15 m/s i ϑ_f = 35 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	49,204	47,774	35,203	14,001	12,571	0,1138	0,1123*
2		47,676	46,439	35,306	12,37	11,133	0,1111	
3		49,6	48,135	35,073	14,527	13,062	0,1122	
4	0,00	51,626	48,371	35,595	16,031	12,776	0,2548	0,2524**
5		52,044	48,812	35,949	16,095	12,863	0,2513	
6		48,467	45,551	33,939	14,528	11,612	0,2511	
7	1,67	49,121	46,585	35,245	13,876	11,34	0,2236	
8	5,50	47,329	45,113	34,386	12,943	10,727	0,2066	
9	9,50	49,371	47,041	35,352	14,019	11,689	0,1993	
10	12,50	49,96	47,446	34,317	15,643	13,129	0,1915	
11	16,50	48,177	45,923	33,644	14,533	12,279	0,1836	
12	19,50	48,506	46,361	34,399	14,107	11,962	0,1793	
13	29,50	51,374	48,859	34,051	17,323	14,808	0,1698	
14	39,50	50,902	48,672	34,81	16,092	13,862	0,1609	
15	49,50	49,861	47,761	34,232	15,629	13,529	0,1552	
16	59,50	48,657	46,532	32,274	16,383	14,258	0,1490	
17	69,50	53,52	51,175	35,117	18,403	16,058	0,1460	
18	79,52	50,828	48,817	34,684	16,144	14,133	0,1423	
19	89,52	48,637	46,774	33,3	15,337	13,474	0,1383	
20	99,52	50,394	48,435	34,081	16,313	14,354	0,1365	
21	109,52	50,518	48,388	32,478	18,04	15,91	0,1339	
22	119,52	50,566	48,591	33,566	17	15,025	0,1314	
23	129,52	49,253	47,46	33,595	15,658	13,865	0,1293	0,1288***
24		53,741	51,628	35,317	18,424	16,311	0,1295	
25		53,815	51,741	35,475	18,34	16,266	0,1275	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

Tablica 7-25. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,15 m/s i ϑ_f = 42 °C

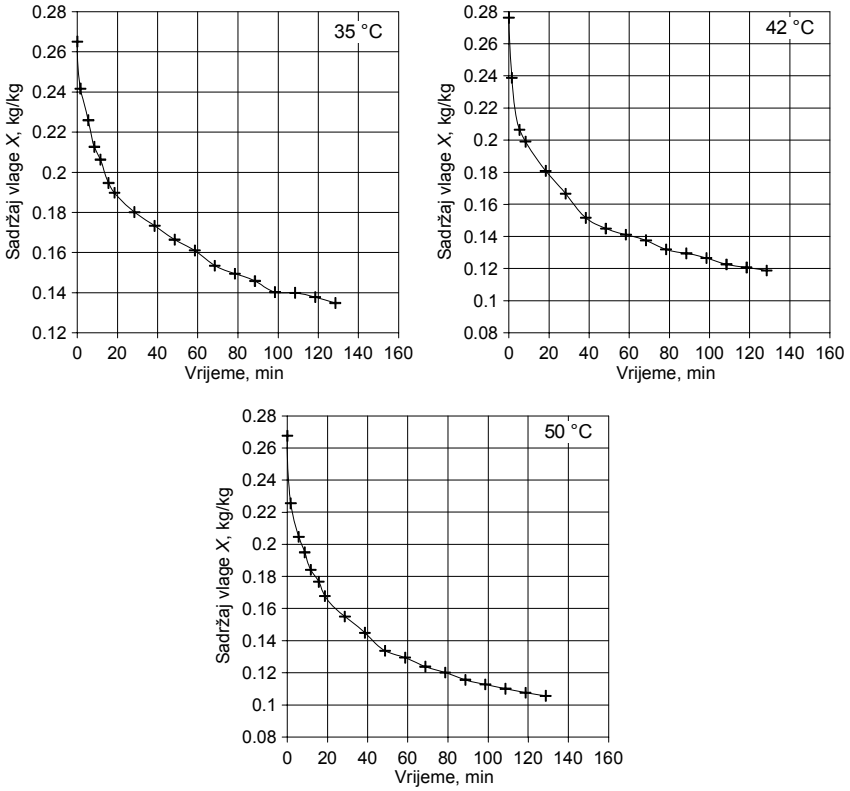
Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	49,076	47,866	35,202	13,874	12,664	0,0955	0,0965*
2		49,993	48,764	35,305	14,688	13,459	0,0913	
3		48,108	46,896	35,072	13,036	11,824	0,1025	
4	0,00	52,114	48,691	35,595	16,519	13,096	0,2614	0,2593**
5		51,962	48,655	35,948	16,014	12,707	0,2603	
6		49,683	46,471	33,938	15,745	12,533	0,2563	
7	2,00	49,491	46,986	35,245	14,246	11,741	0,2134	
8	6,00	50,074	47,462	34,385	15,689	13,077	0,1997	
9	9,00	52,308	49,585	35,352	16,956	14,233	0,1913	
10	12,00	49,004	46,781	34,317	14,687	12,464	0,1784	
11	16,00	51,868	49,165	33,643	18,225	15,522	0,1741	
12	19,00	50,369	48,068	34,399	15,97	13,669	0,1683	
13	29,00	52,009	49,55	34,052	17,957	15,498	0,1587	
14	39,00	52,011	49,77	34,811	17,2	14,959	0,1498	
15	49,00	49,295	47,413	34,232	15,063	13,181	0,1428	
16	59,00	48,816	46,85	32,274	16,542	14,576	0,1349	
17	69,00	49,468	47,777	35,116	14,352	12,661	0,1336	
18	79,00	49,116	47,458	34,685	14,431	12,773	0,1298	
19	89,00	48,018	46,383	33,3	14,718	13,083	0,1250	
20	99,00	47,526	46,032	34,081	13,445	11,951	0,1250	
21	109,00	46,053	44,59	32,478	13,575	12,112	0,1208	
22	119,00	50,952	49,115	33,565	17,387	15,55	0,1181	
23	129,00	48,42	46,876	33,595	14,825	13,281	0,1163	0,1162***
24		49,87	48,342	35,317	14,553	13,025	0,1173	
25		52,306	50,568	35,475	16,831	15,093	0,1152	

* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost

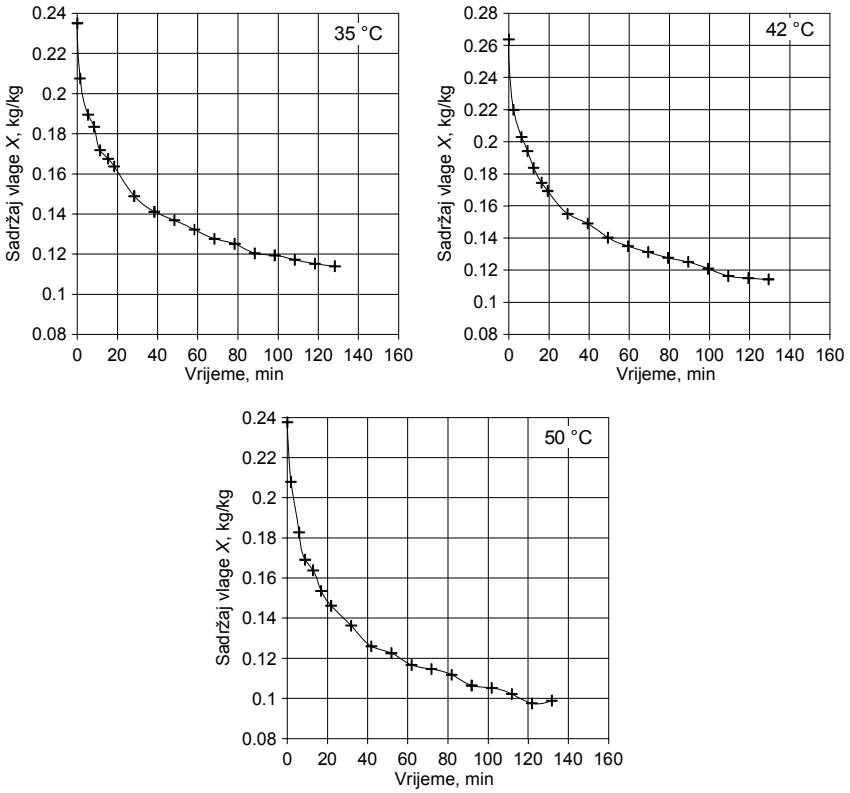
Tablica 7-26. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,15 m/s i ϑ_f = 50 °C

Uzorak br.	Vrijeme sušenja, min	Masa vlažne tvari m_{vt} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa suhe tvari m_{st} + masa Petrijeve zdjelice, g	Masa Petrijeve zdjelice, g	Masa vlažne tvari m_{vt}, g	Masa suhe tvari m_{st}, g	Sadržaj vlage X, kg/kg	
1	Prije ovlaživanja	48,533	47,496	35,202	13,331	12,294	0,0844	0,0885*
2		47,235	46,243	35,305	11,93	10,938	0,0907	
3		50,401	49,129	35,073	15,328	14,056	0,0905	
4	0,00	51,947	48,827	35,594	16,353	13,233	0,2358	0,2351**
5		53,331	50,053	35,949	17,382	14,104	0,2324	
6		49,87	46,817	33,939	15,931	12,878	0,2371	
7	2,17	51,23	48,604	35,245	15,985	13,359	0,1966	
8	6,17	51,652	49,063	34,385	17,267	14,678	0,1764	
9	9,17	52,45	49,995	35,352	17,098	14,643	0,1677	
10	13,17	51,534	49,165	34,317	17,217	14,848	0,1596	
11	16,17	51,635	49,254	33,644	17,991	15,61	0,1525	
12	20,17	52,824	50,49	34,399	18,425	16,091	0,1451	
13	30,17	50,937	48,944	34,051	16,886	14,893	0,1338	
14	40,17	52,512	50,539	34,811	17,701	15,728	0,1254	
15	50,17	52,291	50,378	34,232	18,059	16,146	0,1185	
16	60,18	54,138	51,886	32,274	21,864	19,612	0,1148	
17	70,18	52,73	50,982	35,116	17,614	15,866	0,1102	
18	80,18	53,523	51,679	34,684	18,839	16,995	0,1085	
19	90,18	51,965	50,208	33,3	18,665	16,908	0,1039	
20	100,18	53,168	51,371	34,081	19,087	17,29	0,1039	
21	110,18	51,091	49,383	32,477	18,614	16,906	0,1010	
22	120,18	53,435	51,656	33,566	19,869	18,09	0,0983	
23	130,18	53,01	51,283	33,595	19,415	17,688	0,0976	0,0973***
24		54,221	52,538	35,316	18,905	17,222	0,0977	
25		56,708	54,838	35,474	21,234	19,364	0,0966	

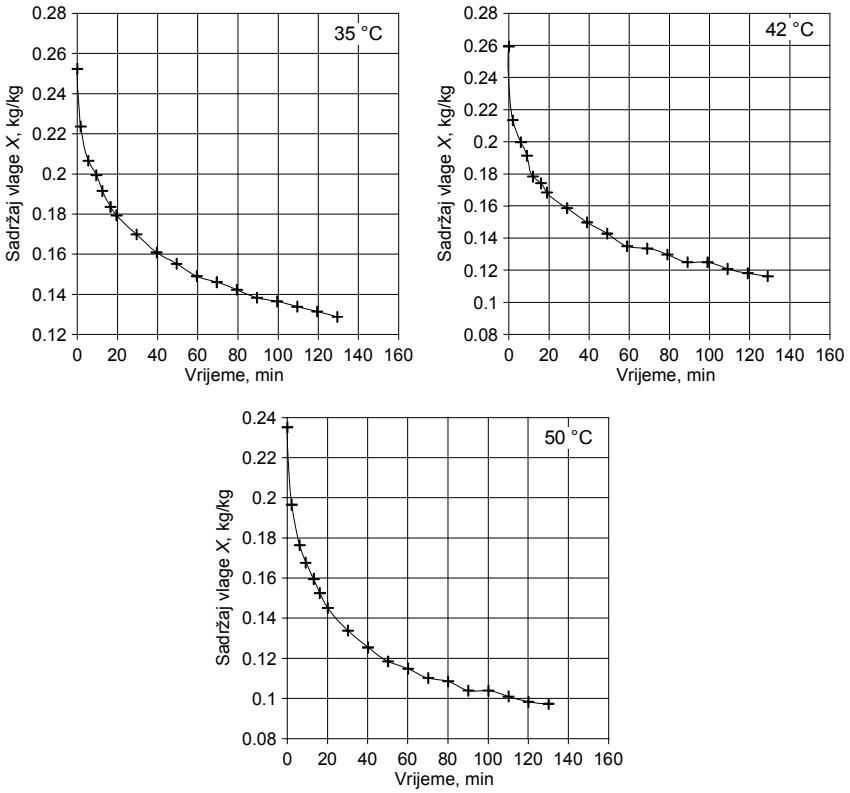
* Sadržaj vlage prije ovlaživanja, srednja vrijednost
** Početni sadržaj vlage, srednja vrijednost
*** Konačni sadržaj vlage, srednja vrijednost



Slika 7-24. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,0 m/s i za različite ulazne temperature zraka



Slika 7-25. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,07 m/s i za različite ulazne temperature zraka



Slika 7-26. Rezultati mjerenja sadržaja vlage pšenice za w_f = 1,15 m/s i za različite ulazne temperature zraka

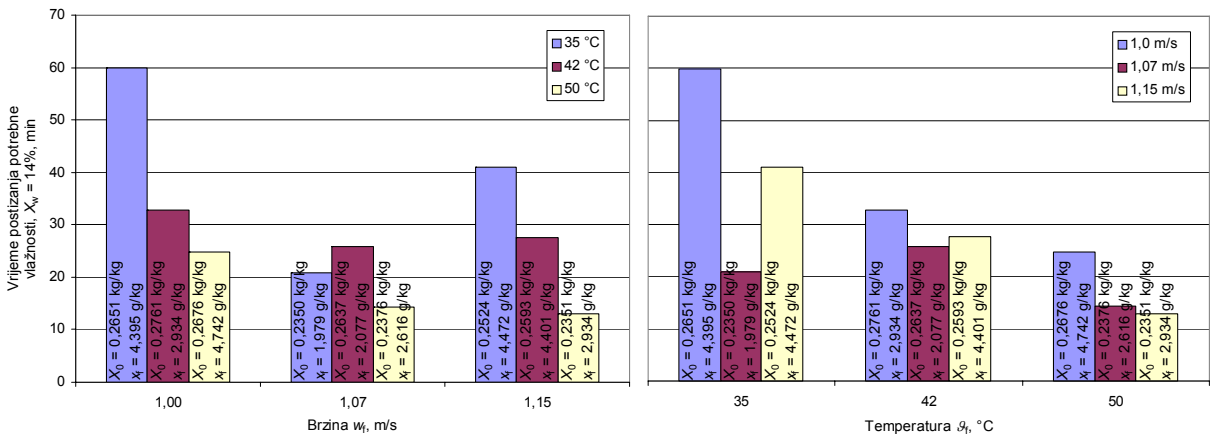
Krivulje sušenja pšenice imaju karakterističan zakrivljeni oblik u obliku eksponencijalne funkcije (kao i kod ječma) što znači da se sušenje u cjelosti odvija u fazi „padajuće brzine sušenja“. U tablici 7-27 su prikazane početne i konačne vrijednosti sadržaja vlage pšenice te vremena sušenja iz obavljenih eksperimenata za sve brzine, temperature i vlažnosti zraka. U tablici je još dan i sadržaj vlage za vrijeme sušenja od 120 minuta izračunat interpolacijom iz izmjerenih vrijednosti sadržaja vlage te vrijeme sušenja do vlažnosti X_w = 14%.

Tablica 7-27. Vrijednosti konačnog sadržaja vlage pšenice

w_f, m/s	ϑ_f, °C	x_f, g/kg *	Početni sadržaj vlage X_0, kg/kg	Vrijeme sušenja, min	Konačni sadržaj vlage X, kg/kg	Sadržaj vlage X nakon 120 minuta sušenja, kg/kg	Vrijeme postizanja potrebne vlažnosti X_w = 14% (X = 16%), min
1,0	35	4,395	0,2651	128,50	0,1349	0,1373	59,81
	42	2,934	0,2761	128,45	0,1188	0,1204	32,74
	50	4,742	0,2676	128,67	0,1057	0,1074	24,79
1,07	35	1,979	0,2350	128,33	0,1140	0,1150	20,84
	42	2,077	0,2637	129,33	0,1143	0,1150	25,87
	50	2,616	0,2376	131,83	0,09892	0,09842	14,33
1,15	35	4,472	0,2524	129,52	0,1288	0,1313	41,04
	42	4,401	0,2593	129,00	0,1162	0,1180	27,62
	50	2,934	0,2351	130,18	0,09731	0,09839	12,94

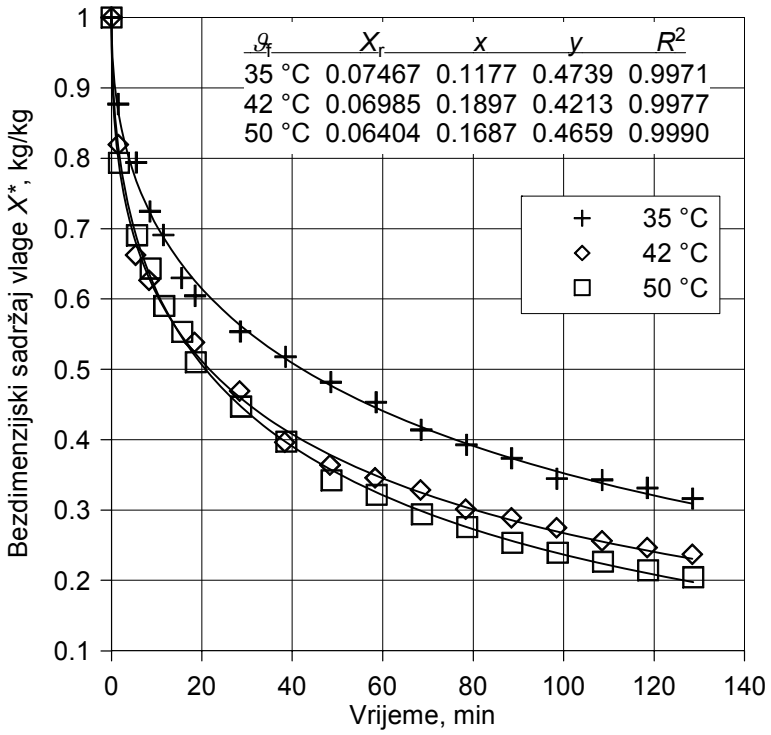
* Srednja vrijednost za cijelo mjerenje

Vremena postizanja potrebne vlažnosti, X_w = 14%, iz tablice 7-27 prikazana su i na dijagramu na slici 7-27.

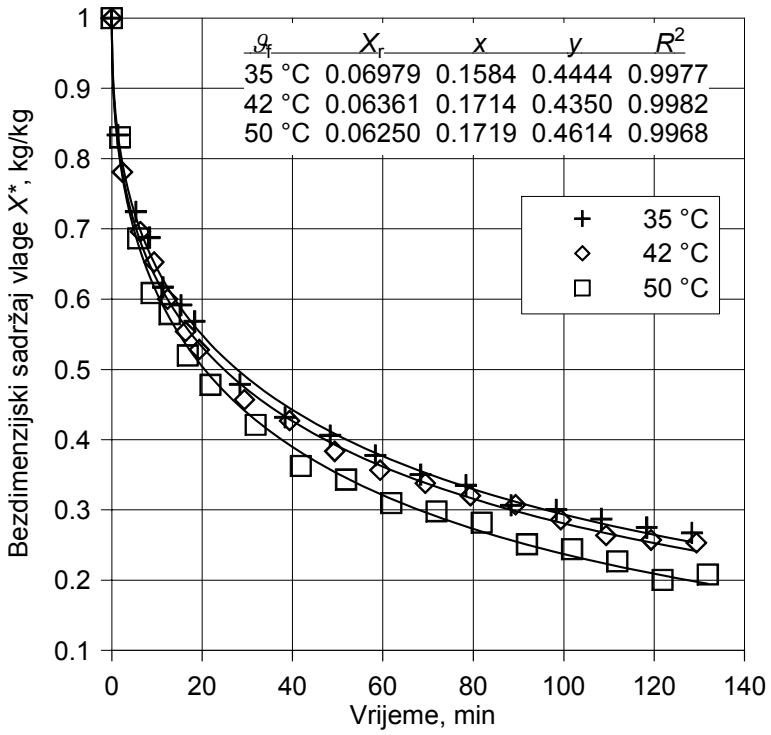


Slika 7-27. Vremena sušenja pšenice do potrebne vlažnosti, X_w = 14%, za sve temperature i brzine zraka

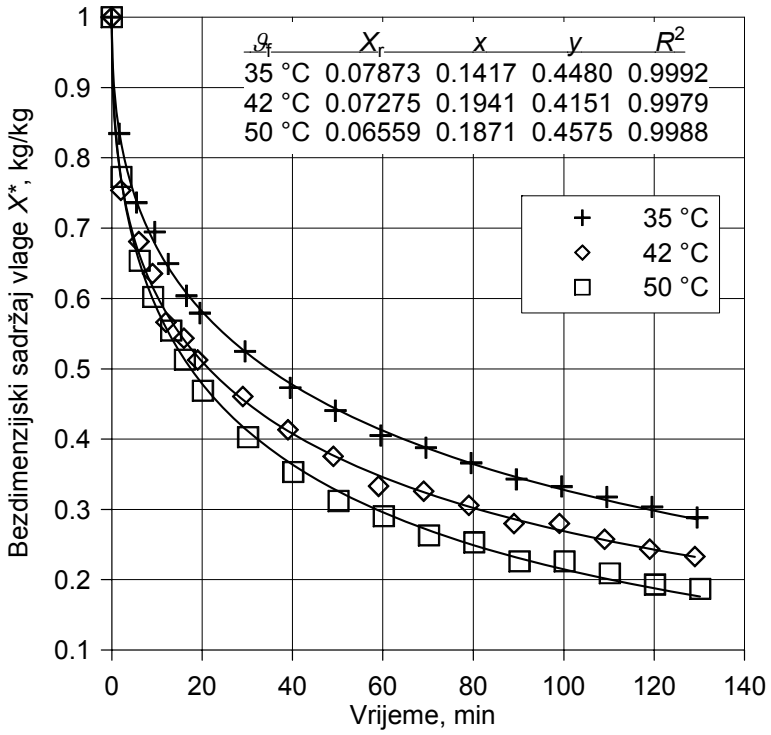
Kao što se vidi sa slike 7-27, vremena sušenja, osim o temperaturi i brzini zraka, značajno ovise i o početnom sadržaju vlage zrna X_0 i relativnoj vlažnosti ulaznog zraka φ_f, pa je krivulje sušenja opet potrebno prikazati u obliku normaliziranih vrijednosti sadržaja vlage X^* koreliranih pomoću *Pageove* jednadžbe. Dobiveni rezultati su prikazani dijagramski na slikama 7-28 do 7-33.



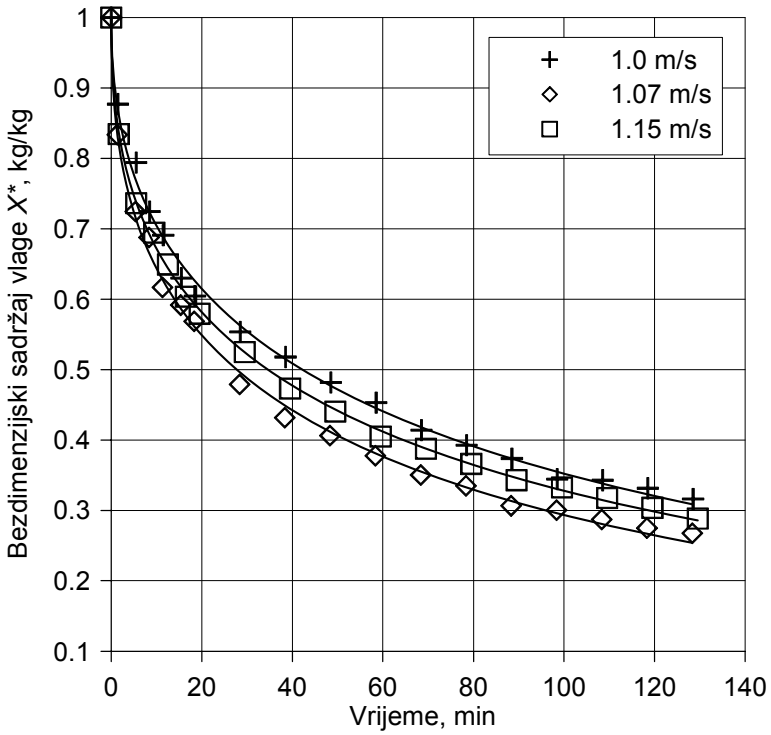
Slika 7-28. Utjecaj ulazne temperature zraka na sušenje pšenice za w_f = 1,0 m/s



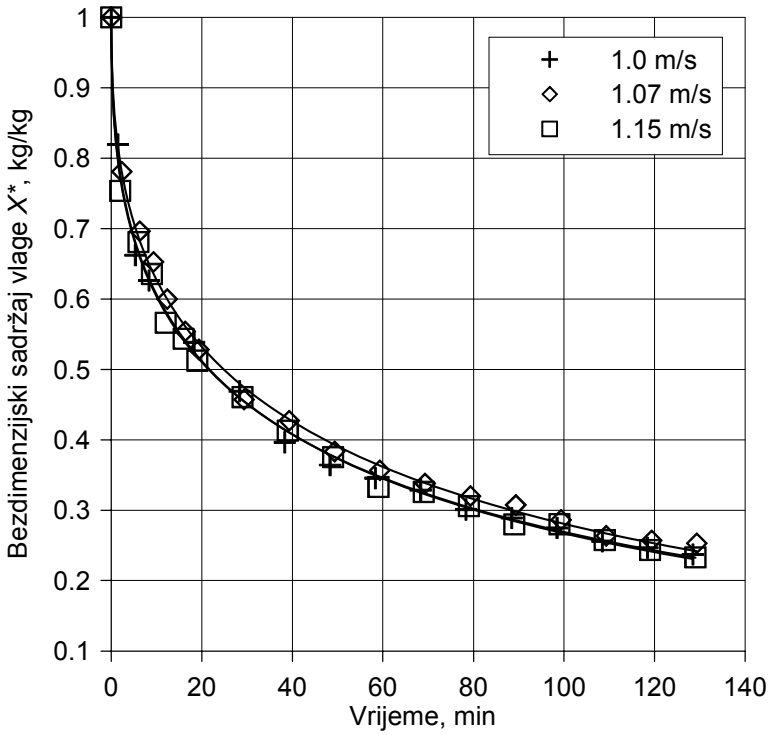
Slika 7-29. Utjecaj ulazne temperature zraka na sušenje pšenice za w_f = 1,07 m/s



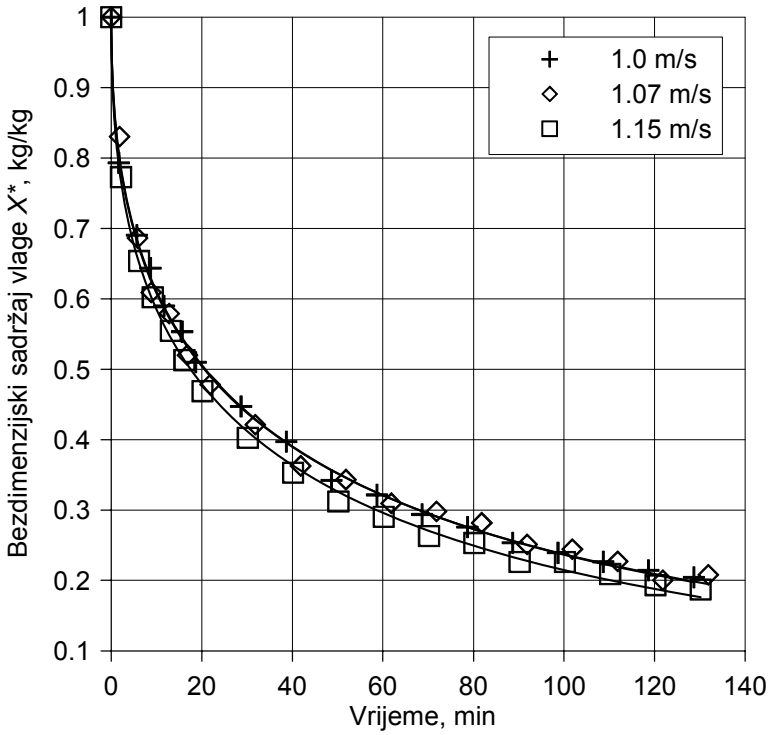
Slika 7-30. Utjecaj ulazne temperature zraka na sušenje pšenice za w_f = 1,15 m/s



Slika 7-31. Utjecaj brzine zraka na sušenje pšenice za ϑ_f = 35 °C



Slika 7-32. Utjecaj brzine zraka na sušenje pšenice za $\vartheta_f = 42$ °C

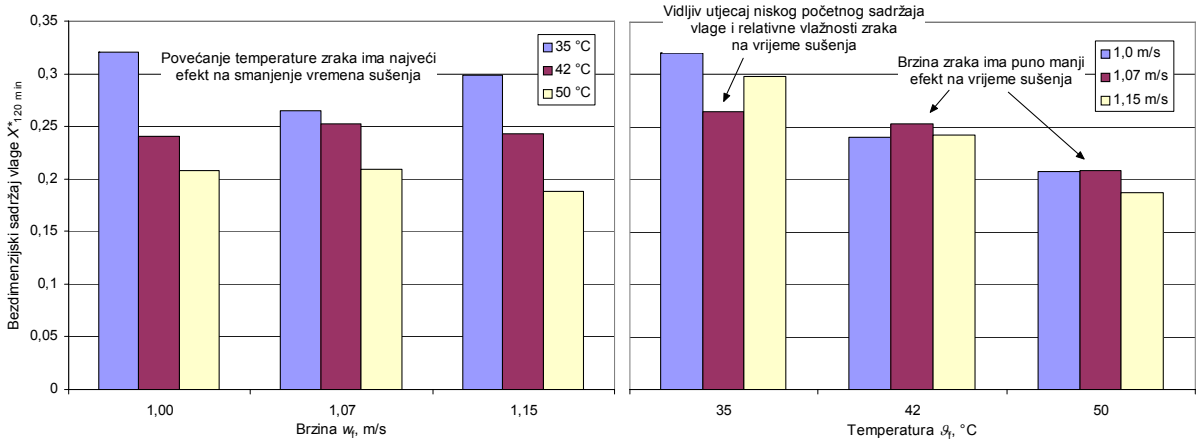


Slika 7-33. Utjecaj brzine zraka na sušenje pšenice za $\vartheta_f = 50$ °C

U tablici 7-28 i dijagramu na slici 7-34 prikazane su numeričke vrijednosti bezdimenzijskog sadržaja vlage $X^*_{120\,\mathrm{min}}$ za vrijeme sušenja od 120 minuta dobivene iz *Pageove* jednadžbe za sve brzine i temperature zraka.

Tablica 7-28. Bezdimenzijski sadržaj vlage pšenice $X^*_{120\,\mathrm{min}}$

w_f, m/s	ϑ_f, °C	$X^*_{120\,\mathrm{min}}$
1,0	35	0,3205
	42	0,2403
	50	0,2081
1,07	35	0,2646
	42	0,2527
	50	0,2090
1,15	35	0,2981
	42	0,2427
	50	0,1878



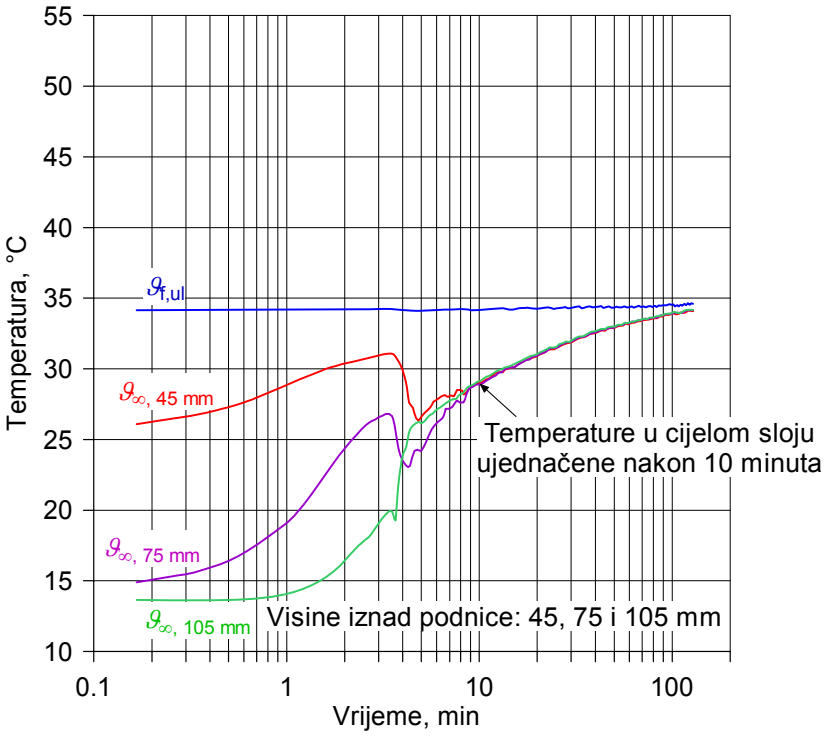
Slika 7-34. Vrijednosti bezdimenzijskog sadržaja vlage pšenice $X^*_{120\,\mathrm{min}}$ za sve ulazne temperature i brzine zraka

Iz krivulja sušenja i vrijednosti konačnog sadržaja vlage može se opet vidjeti da temperatura zraka ima najveći utjecaj na vrijeme sušenja, te se povećanjem temperature najviše reducira sadržaj vlage. Primjerice, pri brzini zraka 1,0 m/s, slika 7-28, konačni sadržaj vlage je kod 42 °C za 25% manji u odnosu na 35 °C, a kod 50 °C je manji za 35,1%. Može se primijetiti i da je razlika između konačnog sadržaja vlage kod 42 °C i 50 °C dosta mala, samo 13,4%, no kod 42 °C je ulazna vlažnost zraka bila dosta niža nego kod ostale dvije temperature pa se to odrazilo na ravnotežni sadržaj vlage zrna. Pri brzini zraka w_f = 1,07 m/s, slika 7-29, konačni sadržaj vlage kod 42 °C je manji za samo 4,5% u odnosu na 35 °C, no i početni sadržaj vlage X_0 = 0,2637 je bio prilično veći u odnosu na ostale dvije temperature gdje je iznosio 0,2350 i 0,2376. Konačni sadržaj vlage kod 50 °C je bio manji za 21% u odnosu na 35 °C. I na kraju, pri brzini zraka w_f= 1,15 m/s, slika 7-30, konačni sadržaj vlage kod 42 °C i 50 °C je bio manji za 18,6% i za 37% u odnosu na 35 °C, a razlika između konačnog sadržaja vlage kod te dvije temperature iznosi 22,6%.

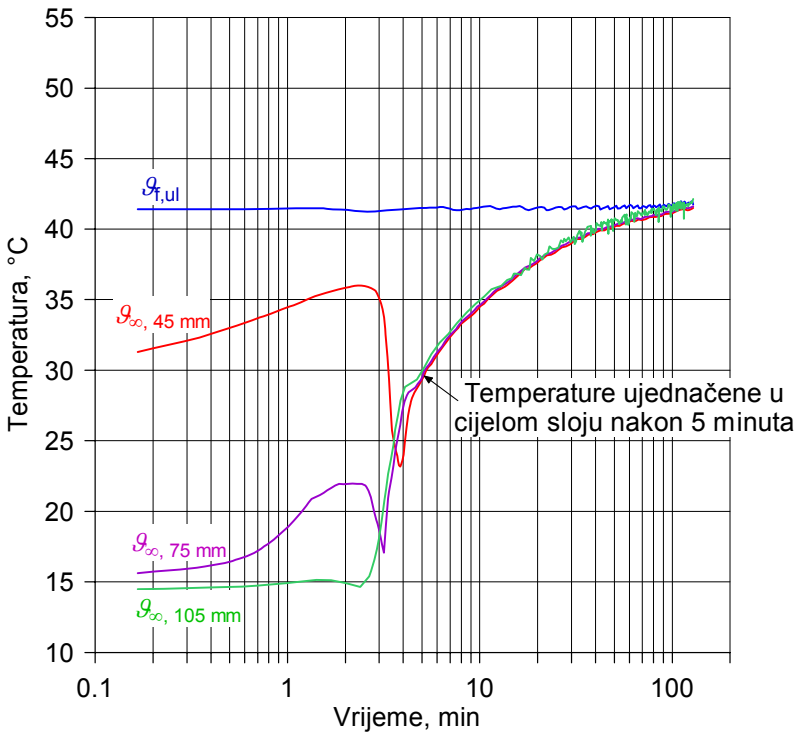
Brzina zraka pokazuje vrlo mali efekt na krivulje sušenja kao što se vidi na slikama 7-32 i 7-33, a nešto veći efekt se vidi kod temperature 35 °C, slika 7-31. Kod te temperature je

zanimljivo i da je konačni sadržaj vlage pri 1,07 m/s manji nego pri 1,15 m/s što je posljedica vrlo malenog početnog sadržaja vlage pri 1,07 m/s (0,2350 u odnosu na 0,2524 pri 1,15 m/s) i sadržaja vlage ulaznog zraka (1,979 g/kg u odnosu na 4,472 g/kg pri 1,15 m/s).

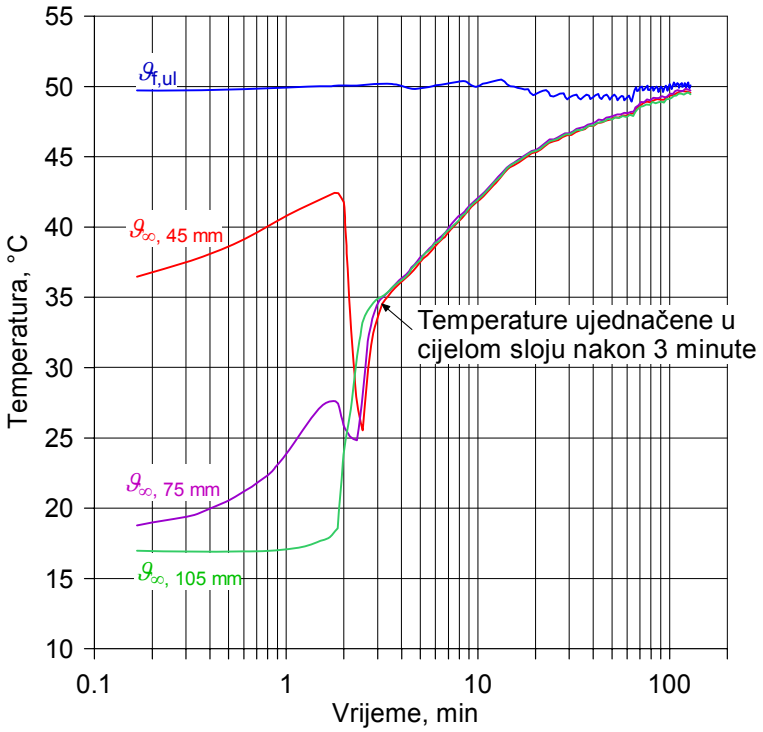
Za pšenicu je također potrebno provjeriti kvalitetu fluidizacije. Dijagrami temperatura su prikazani na slikama 7-35 do 7-37 za sve brzine i temperature zraka, a na njima je također važno i pogledati ulazne temperature zraka $\vartheta_{f,ul}$ zbog problema s održavanjem konstantnog masenog protoka zraka.



a) $\vartheta_f = 35$ °C

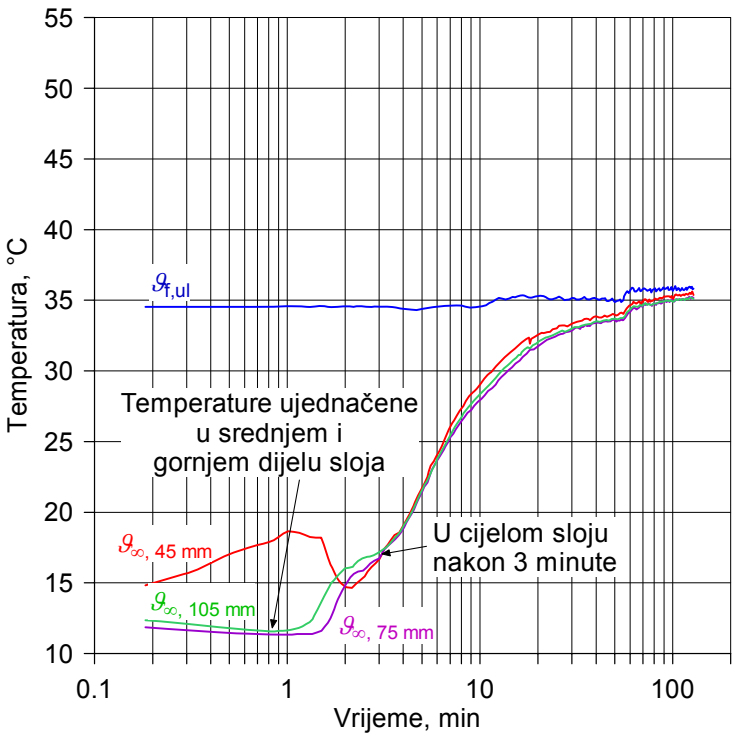


b) $\vartheta_f = 42$ °C

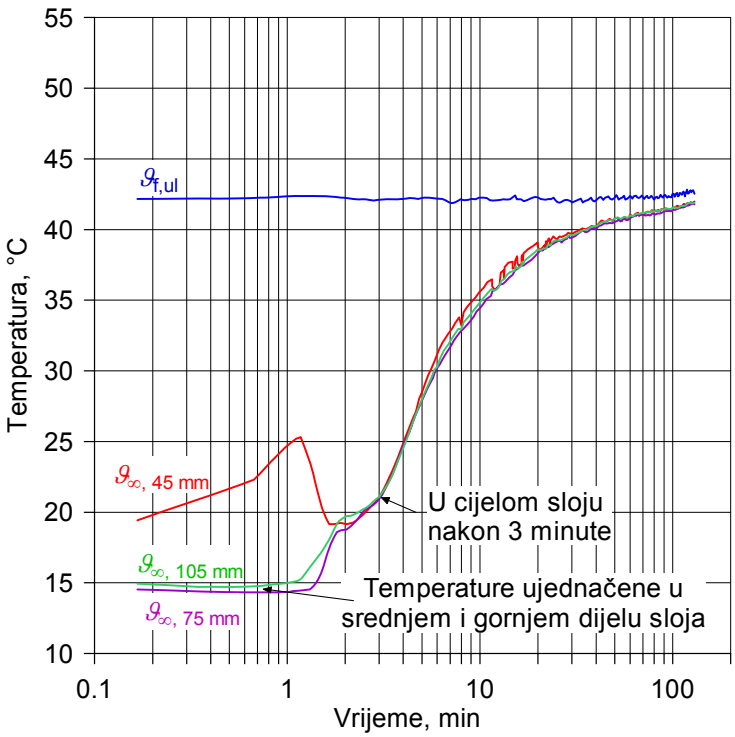


c) $\vartheta_f = 50$ °C

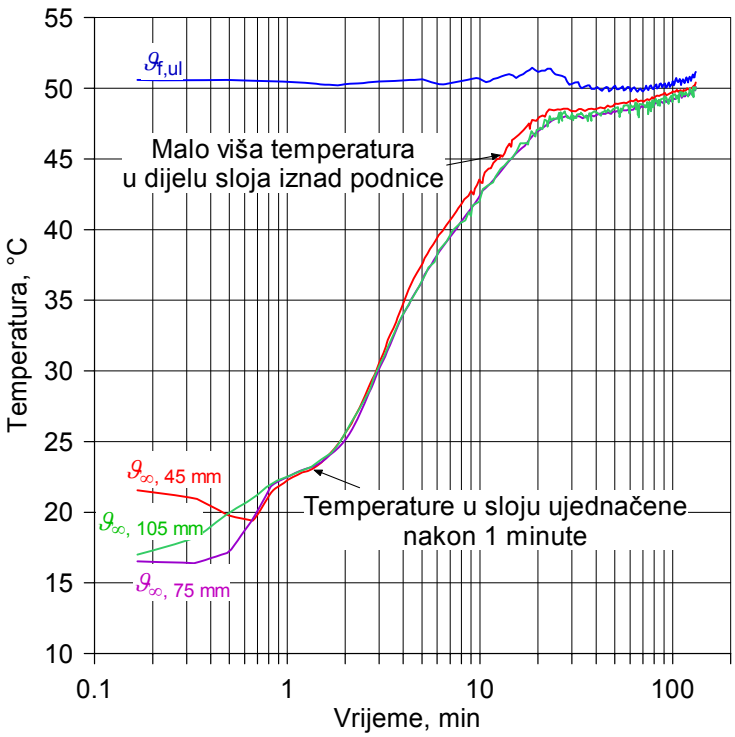
Slika 7-35. Temperature u sloju pšenice za $w_f = 1{,}0$ m/s i različite ulazne temperature zraka



a) $\vartheta_f = 35$ °C

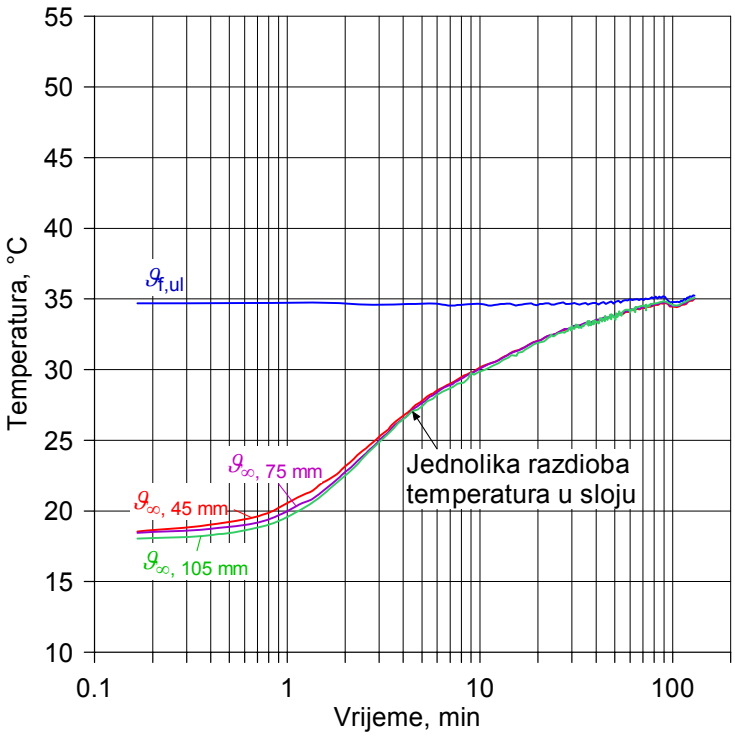


b) $\vartheta_f = 42$ °C

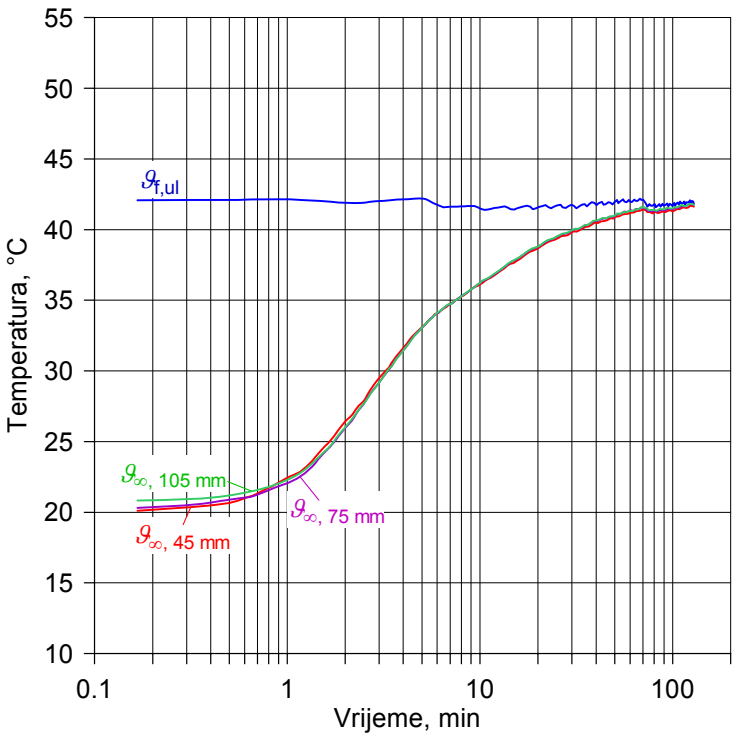


c) $\vartheta_f = 50$ °C

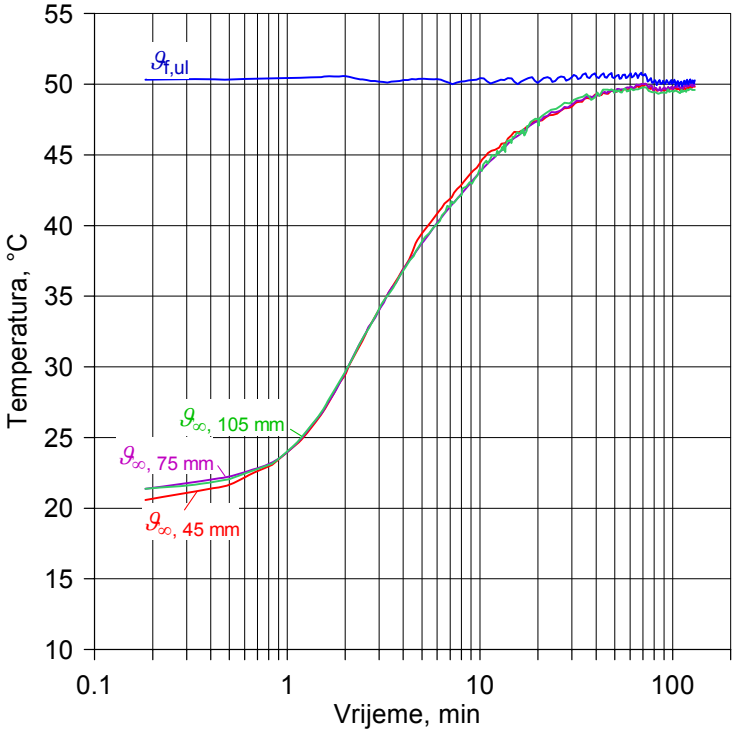
Slika 7-36. Temperature u sloju pšenice za $w_f = 1{,}07$ m/s i različite ulazne temperature zraka



a) $\vartheta_f = 35$ °C



b) $\vartheta_f = 42$ °C



c) $\vartheta_f = 50$ °C

Slika 7-37. Temperature u sloju pšenice za $w_f = 1{,}15$ m/s i različite ulazne temperature zraka

Na slici 7-35 prikazane su temperature u sloju za najmanju brzinu zraka w_f = 1,0 m/s, te se opet mogu vidjeti velike razlike između temperatura u sloju na početku sušenja. No, do izjednačavanja temperatura u sloju (odnosno do fluidizacije sloja) dolazi ipak puno ranije nego kod ječma, pa se tako kod temperature zraka ϑ_f = 35 °C temperature izjednačavaju nakon 10 minuta sušenja (ječam 60 minuta!), kod 42 °C nakon 5 minuta (ječam 15 minuta), a kod 50 °C nakon samo 3 minute (ječam 3 minuta). Kako se početni sadržaj vlage kod mjerenja s pšenicom nije puno razlikovao od onog kod mjerenja s ječmom, može se zaključiti da je do fluidizacije sloja došlo ranije zato što pšenica ipak ima nešto manju masu od ječma, primjerice prosječna masa 1000 zrna pšenice iznosi 30-37 g, a ječma 31-51 g. Za pšenicu je bila izmjerena i nešto manja minimalna brzina fluidizacije, w_{mf} = 0,85 m/s (pri sadržaju vlage X = 0,25).

Razlike između temperatura u sloju se međutim mogu vidjeti i kod brzine zraka w_f = 1,07 m/s, slika 7-36, što nije bio slučaj kod ječma, no međutim one vrlo brzo i nestaju, nakon samo 1 do 3 minute sušenja (ovisno o temperaturi zraka), pa je vjerojatno da nastaju zato što je pšenica dosta ljepljiva zbog pšeničnog škroba te je ipak potrebno jedno kratko vrijeme da se čestice posuše kako bi zrak mogao raskinuti privlačne sile između zrnja.

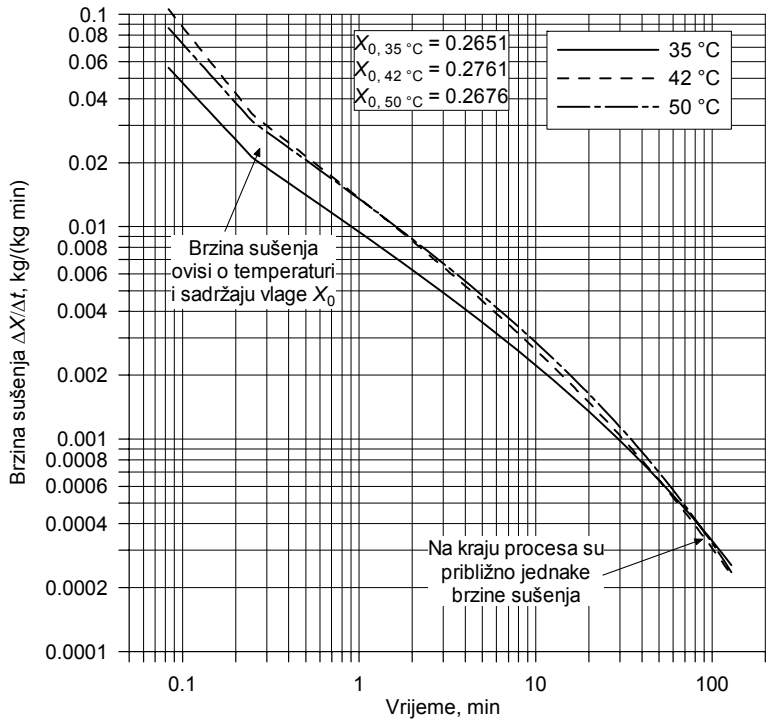
Pri najvećoj brzini zraka w_f = 1,15 m/s, slika 7-37, sloj je od trenutka ubacivanja zrnja fluidizirao, a temperature u sloju su vrlo ujednačene.

Dakle, iz razdiobe temperatura u sloju može se vidjeti da je pšenica ipak bolje fluidizirala nego ječam, a manji problemi su jedino bili izraženi kod najmanje brzine zraka w_f = 1,0 m/s i temperature 35 °C.

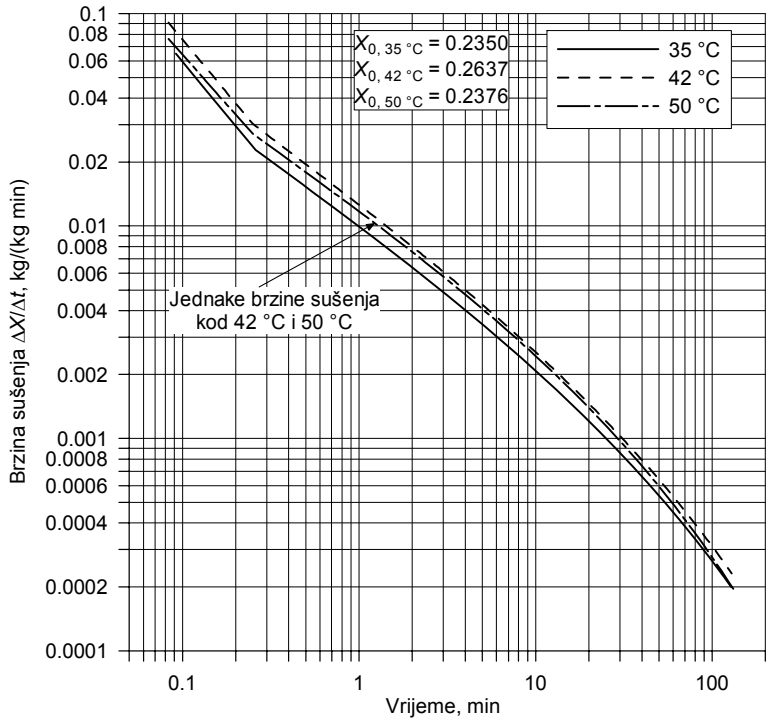
Tijek temperatura je u osnovi sličan kao i kod ječma. Gradijenti temperature se u prvom dijelu povećavaju i ostaju gotovo konstantni neko vrijeme sve dok se temperatura sloja ne počne približavati ulaznoj temperaturi zraka ϑ_{ul} kada se počinju smanjivati. Na kraju sušenja je razlika temperatura između ulaznog zraka i čestica vrlo mala i iznosi manje od 1 °C.

Prilikom mjerenja su nažalost opet bili izraženi i problemi s masenim protokom zraka. Tako se može vidjeti da je kod brzine 1,0 m/s i temperature zraka 35 °C, slika 7-35a, temperatura bila malo niža od zadane ϑ_f = 35 °C, kod 1,07 m/s, slika 7-36a i 7-36c, temperatura je bila malo viša od zadanih 35 °C i 50 °C, a kod 1,15 m/s je temperatura bila malo viša od zadane 50 °C, slika 7-37c.

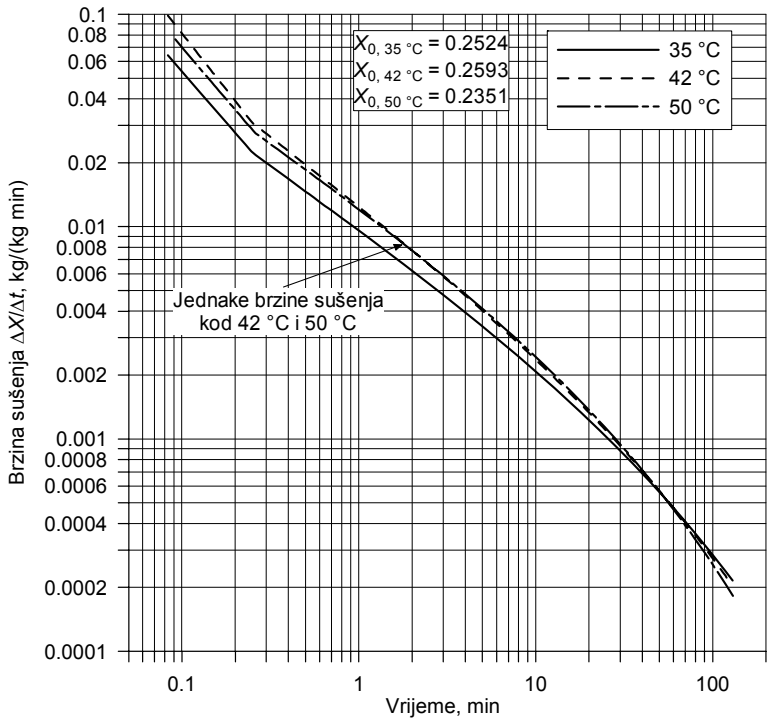
Na sljedećim slikama su još prikazane i brzine sušenja $\Delta X/\Delta t$ za sve brzine i temperature zraka. One su izračunate na isti način kao i kod ječma, diferencijacijom aproksimativnih vrijednosti sadržaja vlage X izračunatih pomoću *Pageove* jednadžbe.



a) w_f = 1,0 m/s

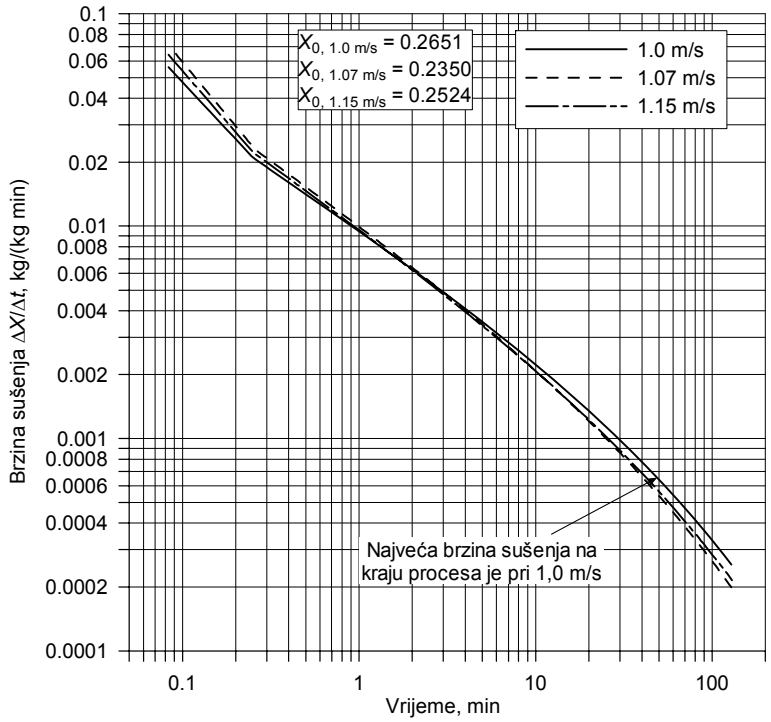


b) w_f = 1,07 m/s

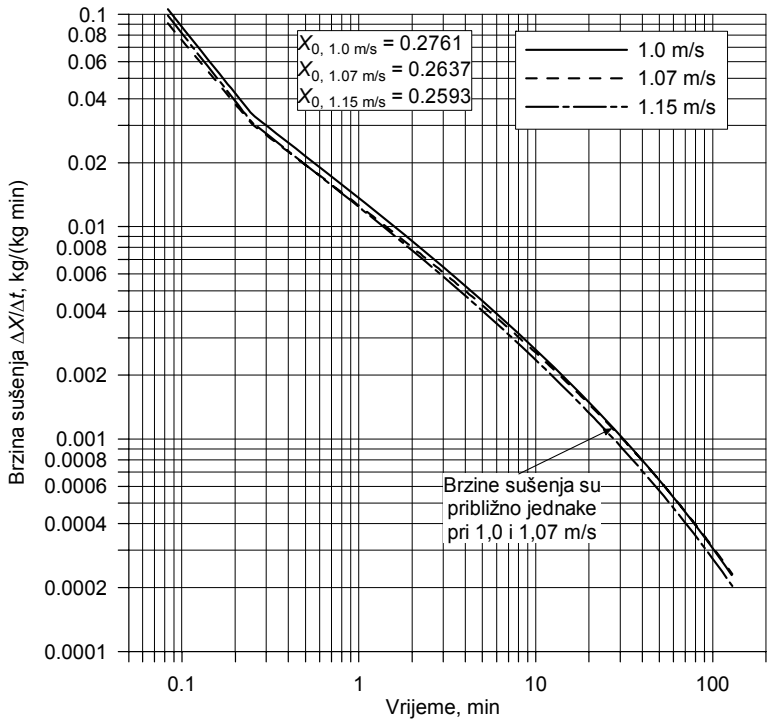


c) w_f = 1,15 m/s

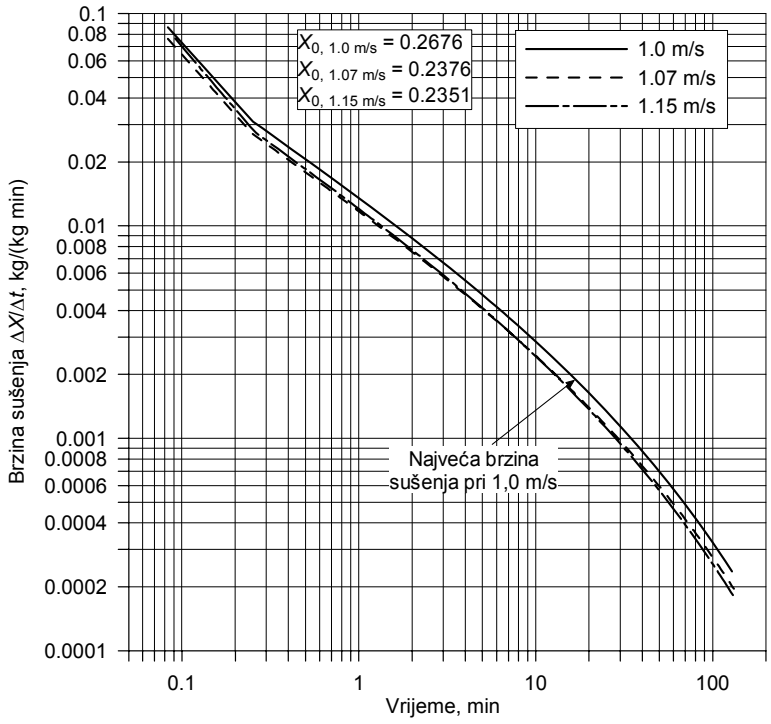
Slika 7-38. Aproksimativne brzine sušenja pšenice za sve brzine zraka



a) ϑ_f = 35 °C



b) ϑ_f = 42 °C



c) ϑ_f = 50 °C

Slika 7-39. Aproksimativne brzine sušenja pšenice za sve temperature zraka

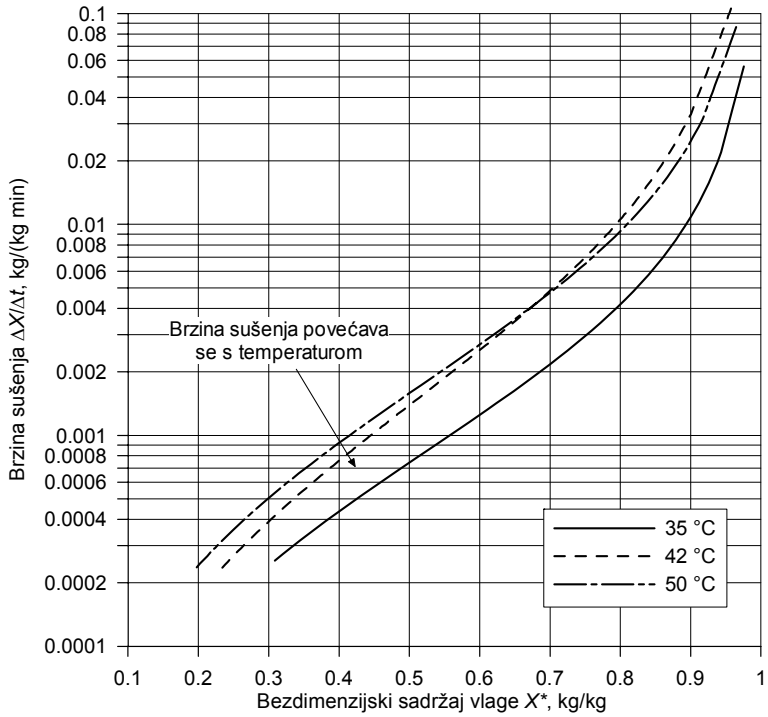
Na slikama se opet može jasno vidjeti kako se brzina sušenja povećava s temperaturom zraka i početnim sadržajem vlage, dok je utjecaj brzine zraka vrlo malen.

Na slici 7-38a prikazane su brzine sušenja za w_f = 1,0 m/s i sve temperature. Može se vidjeti da su na početku procesa velike razlike između brzina sušenja pri 35 °C i pri ostalim dvjema temperaturama, no razlog za to može biti nepravilna fluidizacija kao i nešto manja temperatura zraka od zadane 35 °C zbog problema s protokom zraka. Brzine sušenja su kod 42 °C i 50 °C praktički jednake jer je početni sadržaj vlage kod 42 °C bio najveći, a sadržaj vlage ulaznog zraka najmanji. Sa smanjenjem sadržaja vlage te približavanjem ravnotežnom sadržaju vlage X_r razlike između brzina sušenja postaju sve manje.

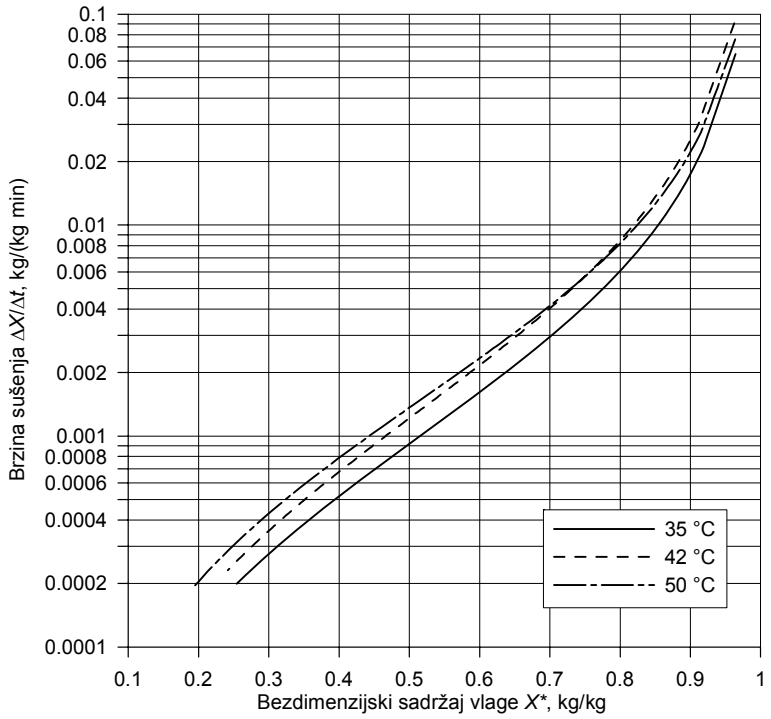
I pri brzini zraka w_f = 1,07 m/s, slika 7-38b, brzine sušenja su 42 °C i 50 °C praktički jednake zbog vrlo velikog početnog sadržaja vlage kod 42 °C, kao i pri brzini zraka w_f = 1,15 m/s, slika 7-38c, gdje je međutim početni sadržaj vlage kod 50 °C bio dosta manji nego kod ostale dvije temperature.

Povećanje brzine zraka ima vrlo mali utjecaj na brzine sušenja kao što se vidi na slikama 7-39a, b i c jer su brzine sušenja praktički jednake pri svim brzinama zraka za zadane temperature, iako naravno na brzine sušenja utječe i početni sadržaj vlage X_0.

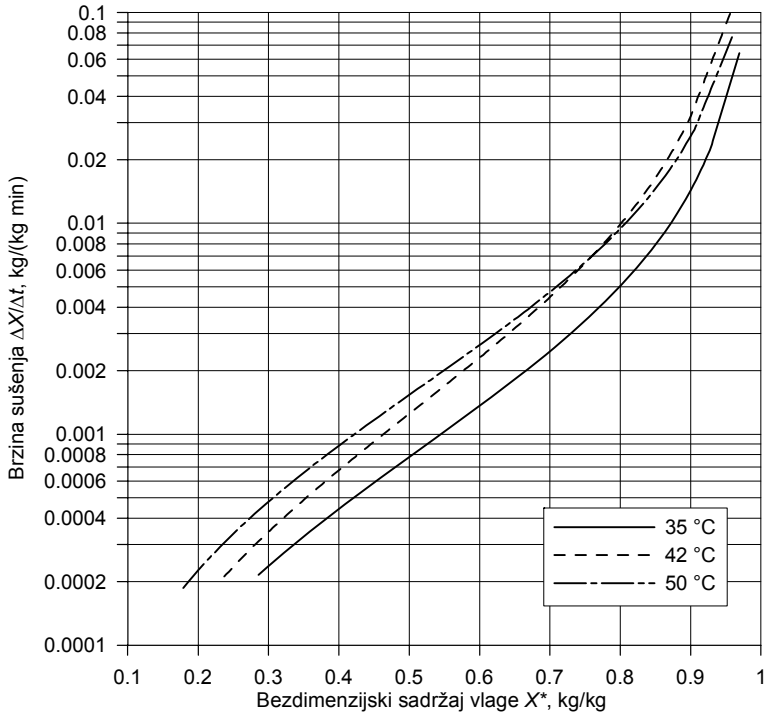
Stoga je brzine sušenja potrebno prikazati u ovisnosti o bezdimenzijskom sadržaju vlage X^*, a dijagrami su prikazani na slikama 7-40 i 7-41.



a) w_f = 1,0 m/s

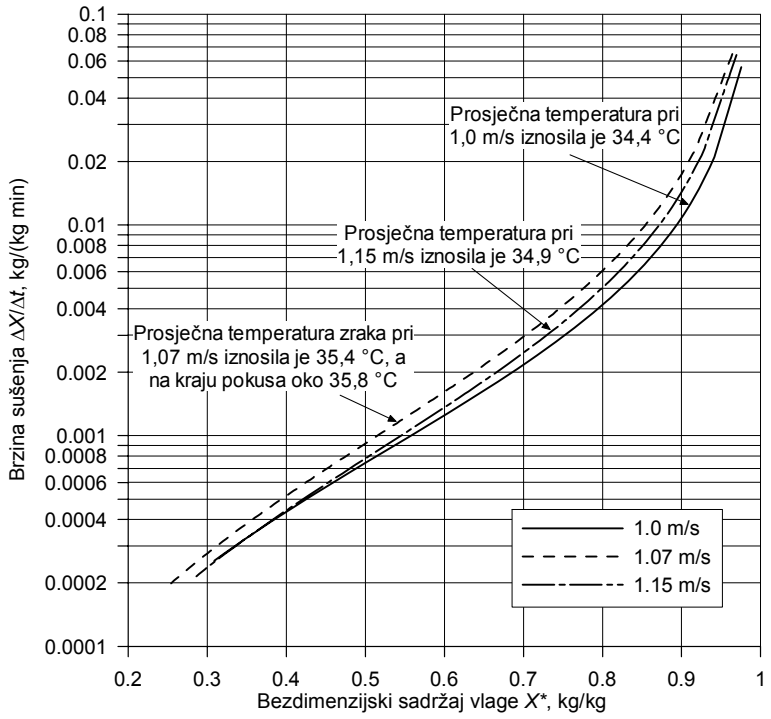


b) w_f = 1,07 m/s

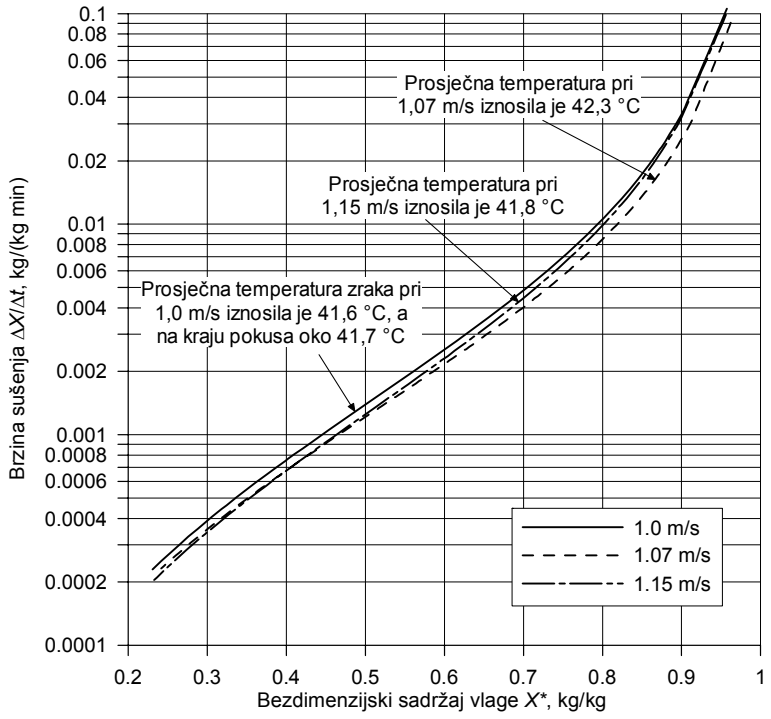


c) w_f = 1,15 m/s

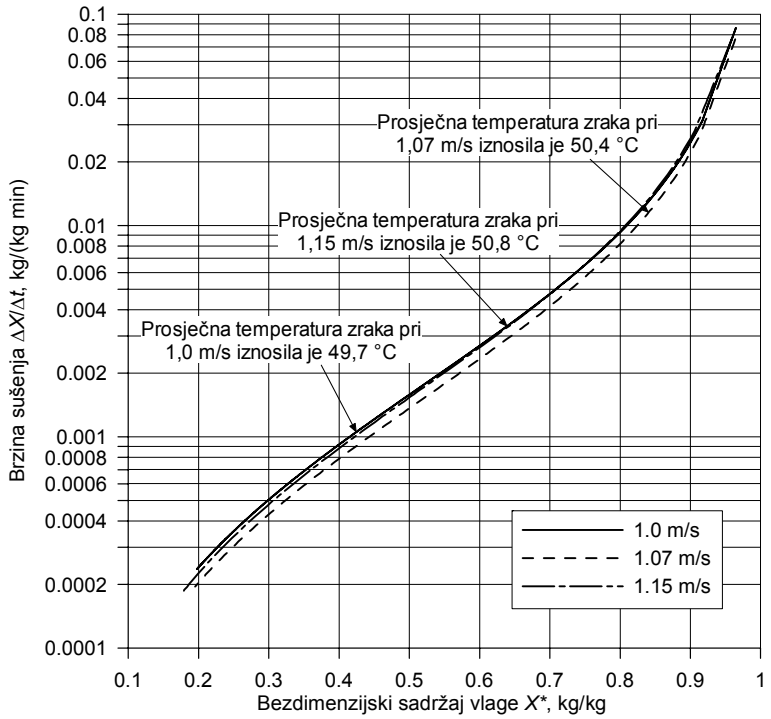
Slika 7-40. Aproksimativne brzine sušenja pšenice u ovisnosti o bezdimenzijskom sadržaju vlage X^* za sve brzine zraka



a) $\vartheta_f = 35$ °C



b) $\vartheta_f = 42$ °C



c) $\vartheta_f = 50$ °C

Slika 7-41. Aproksimativne brzine sušenja pšenice u ovisnosti o bezdimenzijskom sadržaju vlage X^* za sve temperature zraka

Na slikama se može vidjeti kako se brzina sušenja znatno povećava s temperaturom zraka, a razlike između brzina su vidljive i kod niskih vrijednosti bezdimenzijskog sadržaja vlage X^* zbog utjecaja temperature na prijenos vlage difuzijom u unutrašnjosti zrna. Brzina zraka s druge strane ima manji utjecaj na brzinu sušenja, a nešto veći efekt se jedino može vidjeti u početnoj fazi sušenja pri većim vrijednostima X^*. Na slici 7-41a se može vidjeti kako brzina sušenja pri 1,07 m/s malo više odstupa od brzina pri ostalim brzinama zraka, no to je samo posljedica povećane temperature zraka u odnosu na zadanih 35 °C.

7.4 FLUIDIZACIJSKA SVOJSTVA ŽITARICA

Važno je naglasiti da žitarice spadaju u grupu D čestica prema *Geldartovoj* podjeli što znači da se ne može dobiti fluidizacija optimalne kvalitete. U provedenim se pokusima tako moglo vidjeti niz pojava koje su karakteristične za nepravilnu fluidizaciju, npr. prostrujni kanali u sloju i pojava „fontanske fluidizacije“ s probojima sloja u obliku vertikalnih kanala i šikljanjem čestica u obliku fontane kod malih brzina zraka. Ti proboji sloja su se uglavnom dešavali na istim mjestima na što je vjerojatno utjecala i izvedba distributivne ploče. Kod velikih brzina zraka nastajala je i stapna fluidizacija kad se cijeli gornji sloj zrnja dizao u zrak. No i kod takve fluidizacije miješanje zrnja u sloju je bilo vrlo intenzivno što se vidjelo i na dijagramima temperatura po visini sloja.

Slika 7-42 prikazuje miješanje zrnja pšenice kod malih brzina zraka, nastajanje „fontanske fluidizacije“ i miješanje zrnja kod velike brzine zraka uz nastajanje stapne fluidizacije.

a) mala brzina zraka,
polagano miješanje zrnja

b) "fontanska fluidizacija"

c) velika brzina zraka,
intenzivno miješanje zrnja,
stapna fluidzacija

Slika 7-42. Fluidizirani sloj s pšenicom

7.5 APROKSIMACIJA REZULTATA MJERENJA BEZDIMENZIJSKIM FUNKCIJSKIM OBLIKOM

Rezultate mjerenja moguće je izraziti općom korelacijskom jednadžbom pomoću bezdimenzijskih veličina T^*, *Fo* i *Re*:

$$\overline{X}^* = C \cdot T^{*n} \cdot Fo^m \cdot Re^p \,. \tag{7-5}$$

Bezdimenzijska temperatura, T^*, *Fourierovi* i *Reynoldsovi* brojevi definirani su kao:

$$T^* = \frac{T_{\mathrm{f,u}} - T_{\mathrm{sH}}}{T_{\mathrm{p,0}} - T_{\mathrm{sH}}} \,, \tag{7-6}$$

$$Fo = \frac{a_{\mathrm{p}} \cdot t}{D_{\mathrm{g}}^2} \tag{7-7}$$

i

$$Re = \frac{w_{\mathrm{f}} \cdot D_{\mathrm{g}} \cdot \rho_{\mathrm{f}}}{\eta_{\mathrm{f}}}. \tag{7-8}$$

Vrijednosti koeficijenata C, m, n i p određuju se iz uvjeta minimuma funkcije:

$$y = \sum \left(\overline{X}^* - X^*\right)^2, \tag{7-9}$$

koja kaže da suma kvadrata između aproksimacijskih vrijednosti bezdimenzijskog sadržaja vlage $\overline{X}^*$ i pridruženih izmjerenih vrijednosti X^* bude minimalna.

Ako se u jednadžbu (7-9) uvrsti jed. (7-5) dobiva se:

$$y = \sum \left(C \cdot T^{*n} \cdot Fo^m \cdot Re^p - X^*\right)^2. \tag{7-10}$$

Aproksimacijska jednadžba (7-5) može se napisati u logaritamskom obliku:

$$\ln \overline{X}^* = \ln C + n \ln T^* + m \ln Fo + p \ln Re, \tag{7-11}$$

pa njezinim uvrštenjem u jed. (7-10) slijedi jednadžba:

$$y_1 = \sum \left(\ln C + n \ln T + m \ln Fo + p \ln Re - \ln X^*\right)^2. \tag{7-12}$$

Uvjet minimuma gornje funkcije slijedi iz:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial y_1}{\partial \ln C} = 0; \\ &\frac{\partial y_1}{\partial n} = 0; \\ &\frac{\partial y_1}{\partial m} = 0; \\ &\frac{\partial y_1}{\partial p} = 0. \end{aligned} \tag{7-13}$$

Uvrštavanjem jed. (7-12) u sustav jednadžbi (7-13) dobiva se sustav linearnih algebarskih jednadžbi s nepoznanicama ln*C*, *m*, *n* i *p*:

$$\begin{aligned}
&\ln C + n\sum \ln T^* + m\sum \ln Fo + p\sum \ln Re - \sum \ln X^* = 0,\\
&\ln C\sum \ln T^* + n\sum \ln^2 T^* + m\sum \left(\ln Fo \ln T^*\right) +\\
&+ p\sum \left(\ln Re \ln T^*\right) - \sum \left(\ln X^* \ln T^*\right) = 0,\\
&\ln C\sum \ln Fo + n\sum \left(\ln T^* \ln Fo\right) + m\sum \ln^2 Fo +\\
&+ p\sum \left(\ln Re \ln Fo\right) - \sum \left(\ln X^* \ln Fo\right) = 0,\\
&\ln C\sum \ln Re + n\sum \left(\ln T^* \ln Re\right) + m\sum \left(\ln Fo \ln Re\right) +\\
&+ p\sum \ln^2 Re - \sum \left(\ln X^* \ln Re\right) = 0.
\end{aligned} \tag{7-14}$$

Sume *T**, *Fo*, *Re* i *X** računaju se iz izmjerenih podataka. Uvrštavanjem svih veličina u sustav jednadžbi (7-14) i njegovim rješavanjem dobiju se koeficijenti *C*, *n*, *m* i *p*:

- za ječam:

C = 1,001; n = -0,1072; m = -0,2731 i p = 0,1026,

pa aproksimacijska jednadžba konačno glasi:

$$\overline{X}^* = 1{,}001 \cdot \overline{T}^{*-0{,}1072} \cdot Fo^{-0{,}2731} \cdot Re^{0{,}1026}. \tag{7-15}$$

- za pšenicu:

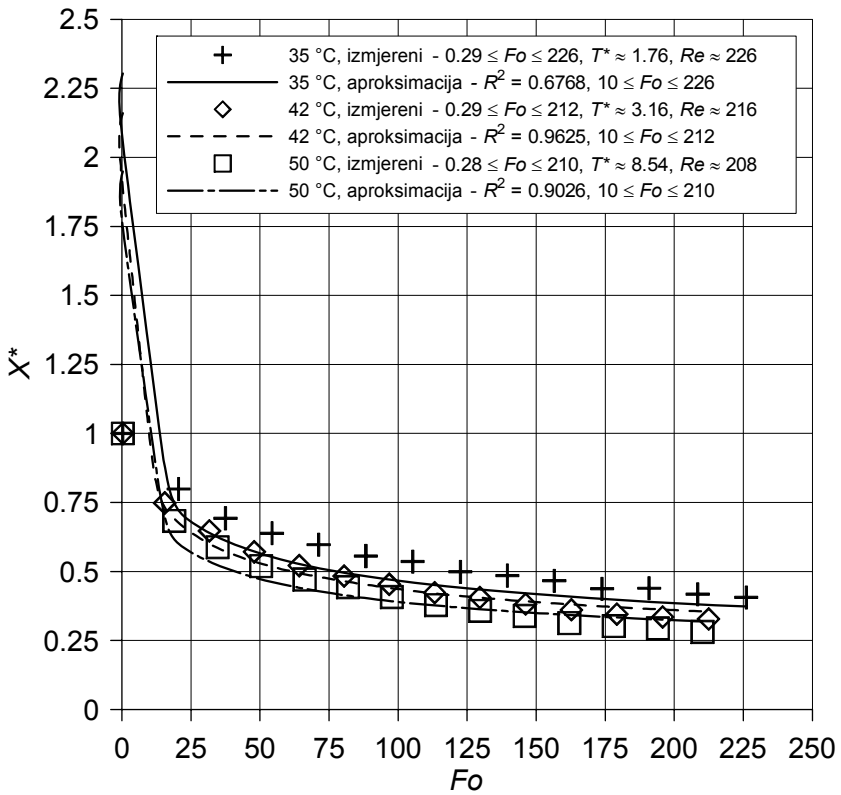
C = 1,000; n = -0,09183; m = -0,3144 i p = 0,05593,

pa je aproksimacijska jednadžba:

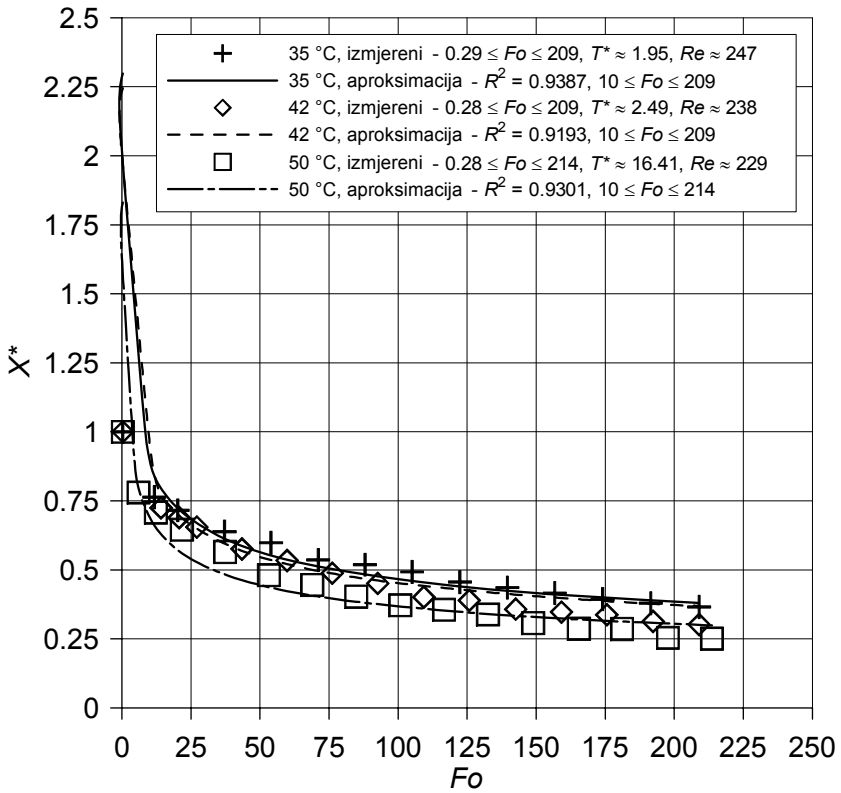
$$\overline{X}^* = \overline{T}^{*-0{,}09183} \cdot Fo^{-0{,}3144} \cdot Re^{0{,}05593}. \tag{7-16}$$

U dijagramima na slikama 7-43 do 7-48 ucrtane su izmjerene i izračunate vrijednosti bezdimenzijskog sadržaja vlage *X** u istraženom intervalu sljedećih fizikalnih karakteristika:

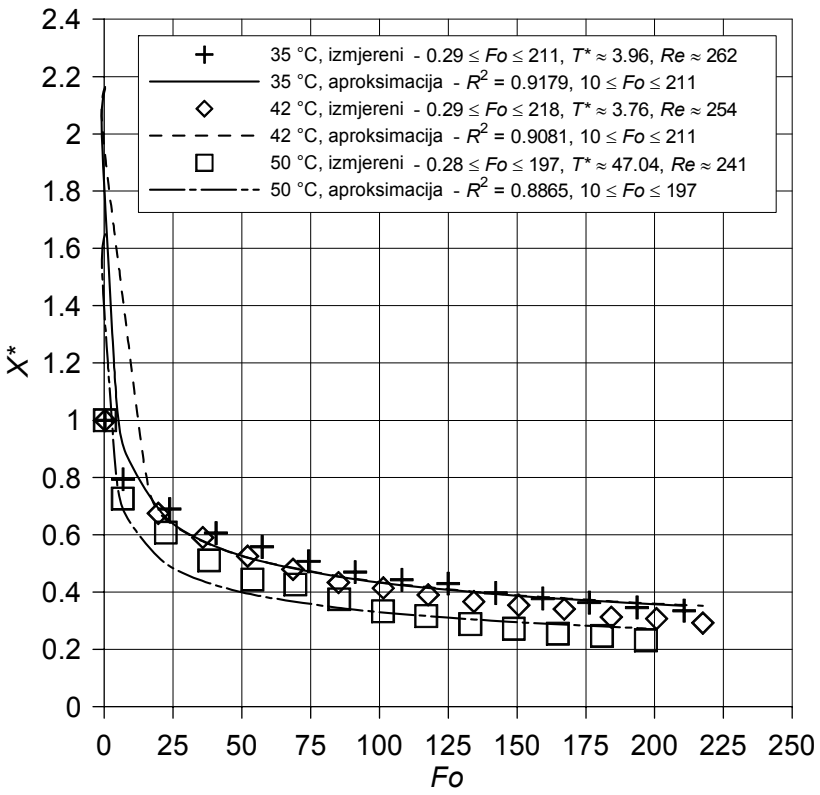
- za ječam: $1{,}70 \le T^* \le 48$; $0{,}28 \le Fo \le 226$ i $207 \le Re \le 269$.
- za pšenicu: $1{,}82 \le T^* \le 42{,}08$; $0{,}12 \le Fo \le 104$ i $226 \le Re \le 288$.



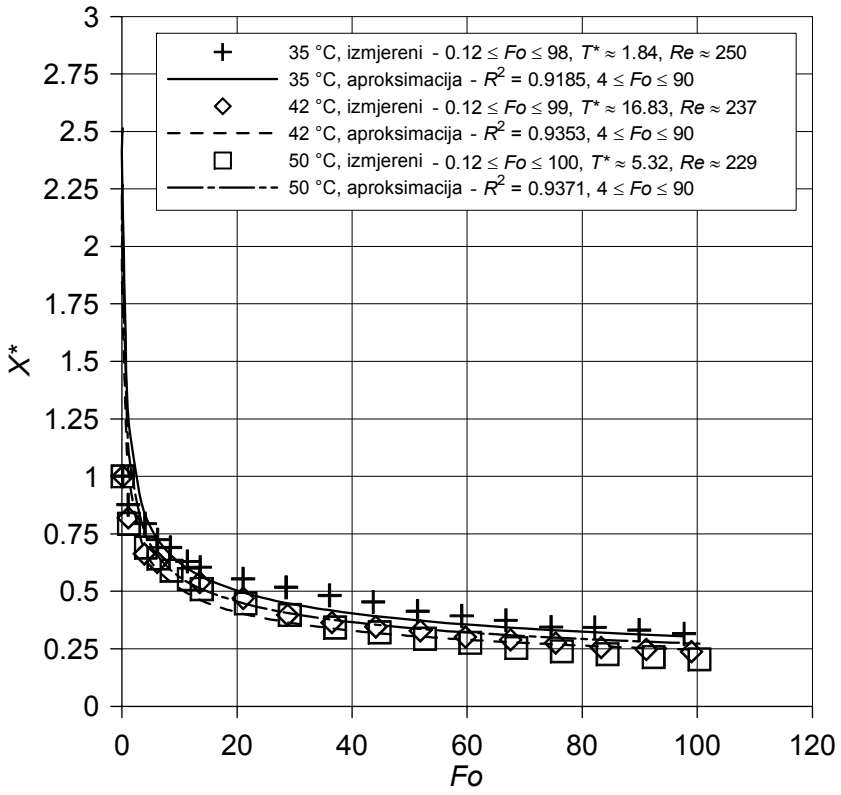
Slika 7-43. Prikaz izmjerenih i izračunatih bezdimenzijskih rezultata za ječam i w_f = 1,0 m/s



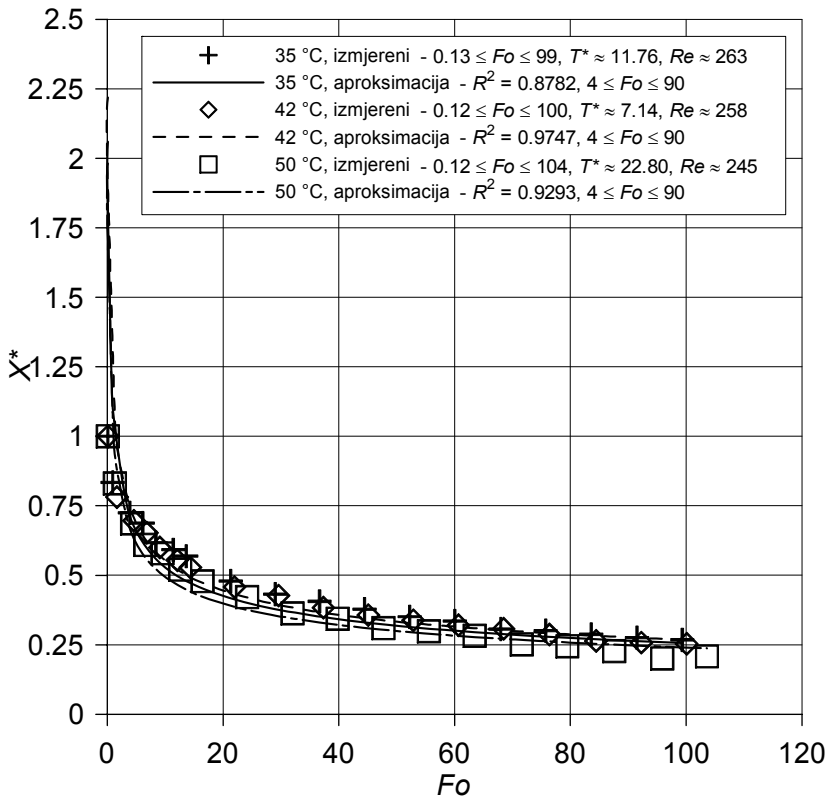
Slika 7-44. Prikaz izmjerenih i izračunatih bezdimenzijskih rezultata za ječam i w_f = 1,07 m/s



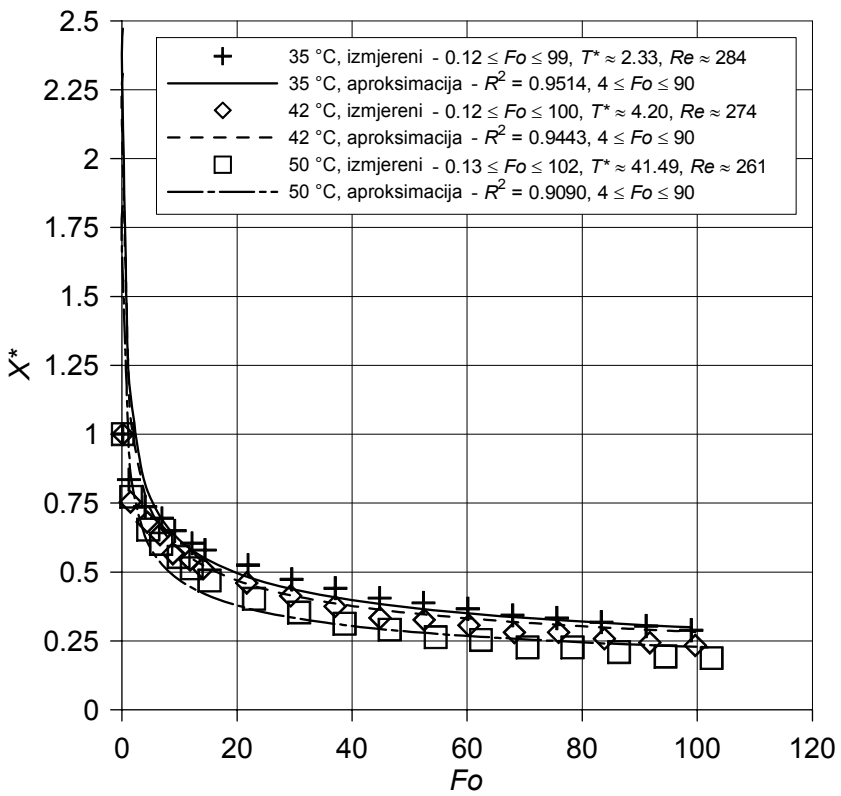
Slika 7-45. Prikaz izmjerenih i izračunatih bezdimenzijskih veličina za ječam i w_f = 1,15 m/s



Slika 7-46. Prikaz izmjerenih i izračunatih bezdimenzijskih veličina za pšenicu i w_f = 1,0 m/s



Slika 7-47. Prikaz izmjerenih i izračunatih bezdimenzijskih veličina za pšenicu i w_f = 1,07 m/s



Slika 7-48. Prikaz izmjerenih i izračunatih bezdimenzijskih veličina za pšenicu i w_f = 1,15 m/s

Usporedbene rezultate izmjerenih i računskih dobivenih vrijednosti bezdimenzijskog sadržaja vlage X^* te njihove procentualne razlike prikazuju tablice 7-29 i 7-30.

Tablica 7-29. Usporedba mjerenih i proračunskih vrijednosti X^* prema korelacijskoj jednadžbi (7-15) za ječam

w_f, m/s	ϑ_f, °C	*Fourierov* broj *Fo*	Mjereno X^*	Proračunato prema (7-15) $\overline{X}^*$	$\frac{\overline{X}^* - X^*}{X^*}$, %
1,0	35	0,29	1,0000	2,3040	+130,40
		20,52	0,7989	0,7215	-9,69
		37,44	0,6925	0,6118	-11,66
		54,29	0,6385	0,5526	-13,44
		71,21	0,5972	0,5126	-14,16
		88,32	0,5561	0,4829	-13,16
		105,28	0,5362	0,4601	-14,18
		122,55	0,4990	0,4414	-11,56
		139,54	0,4853	0,4264	-12,14
		156,56	0,4665	0,4135	-11,37
		173,84	0,4375	0,4014	-8,24
		190,88	0,4395	0,3901	-11,23
		208,48	0,4178	0,3812	-8,76
		226,08	0,4062	0,3731	-8,15
	42	0,29	1,0000	2,1597	+115,97
		15,44	0,7485	0,7323	-2,16
		31,68	0,6474	0,6002	-7,28
		47,92	0,5716	0,5358	-6,26
		64,14	0,5216	0,4945	-5,20
		80,49	0,4836	0,4648	-3,90
		96,80	0,4539	0,4408	-2,89
		113,17	0,4239	0,4205	-0,81
		129,58	0,4059	0,4053	-0,13
		146,15	0,3821	0,3923	+2,66
		162,69	0,3618	0,3807	+5,22
		179,23	0,3460	0,3708	+7,18
		195,83	0,3357	0,3623	+7,93
		212,41	0,3280	0,3545	+8,09
	50	0,28	1,0000	1,9492	+94,92
		18,91	0,6835	0,6174	-9,68
		34,63	0,5883	0,5232	-11,07
		50,38	0,5195	0,4717	-9,20
		66,15	0,4714	0,4376	-7,17
		81,86	0,4437	0,4124	-7,05
		97,74	0,4077	0,3927	-3,68
		113,71	0,3784	0,3770	-0,38
		129,68	0,3578	0,3637	+1,64
		145,79	0,3393	0,3524	+3,87
		161,99	0,3134	0,3426	+9,30
		178,04	0,3023	0,3339	+10,45
		194,05	0,2943	0,3263	+10,87
		210,22	0,2811	0,3197	+13,75
1,07	35	0,29	1,0000	2,2980	+129,80
		11,73	0,7635	0,8396	+9,97
		20,18	0,7159	0,7232	+1,02
		37,09	0,6388	0,6129	-4,06
		53,95	0,5982	0,5524	-7,66
		71,07	0,5365	0,5127	-4,44
		88,00	0,5191	0,4842	-6,72
		105,06	0,4930	0,4600	-6,70
		122,35	0,4559	0,4405	-3,38
		139,50	0,4361	0,4246	-2,63
		156,69	0,4165	0,4110	-1,33
		174,05	0,3939	0,4002	+1,58
		191,46	0,3796	0,3904	+2,86
		208,97	0,3659	0,3805	+3,99
	42	0,28	1,0000	2,2444	+124,44
		14,17	0,7248	0,7725	+6,57
		20,66	0,6894	0,6975	+1,18
		27,14	0,6554	0,6487	-1,03

		43,46	0,5758	0,5690	-1,18
		59,76	0,5340	0,5210	-2,44
		76,14	0,4886	0,4871	-0,31
		92,60	0,4516	0,4614	+2,18
		109,30	0,4017	0,4420	+10,03
		125,76	0,3897	0,4259	+9,29
		142,60	0,3581	0,4105	+14,63
		159,15	0,3474	0,3981	+14,58
		175,58	0,3377	0,3870	+14,63
		192,38	0,3139	0,3771	+20,16
		208,94	0,3020	0,3697	+22,40
	50	0,28	1,0000	1,8306	+83,06
		5,97	0,7806	0,7952	+1,87
		12,28	0,7079	0,6533	-7,73
		21,67	0,6455	0,5604	-13,19
		37,33	0,5651	0,4831	-14,51
		53,19	0,4809	0,4374	-9,05
		68,90	0,4458	0,4073	-8,63
		84,85	0,4037	0,3846	-4,73
		100,76	0,3723	0,3678	-1,21
		116,60	0,3559	0,3532	-0,75
		132,54	0,3386	0,3403	+0,48
		148,90	0,3073	0,3300	+7,41
		165,42	0,2874	0,3207	+11,57
		181,11	0,2862	0,3130	+9,37
		197,69	0,2542	0,3062	+20,47
		213,64	0,2514	0,2990	+18,93
1,15	35	0,29	1,0000	2,1579	+115,79
		6,91	0,7942	0,9105	+14,65
		23,75	0,6899	0,6489	-5,95
		40,60	0,6060	0,5585	-7,84
		57,38	0,5582	0,5068	-9,21
		74,29	0,5076	0,4725	-6,92
		91,23	0,4704	0,4450	-5,39
		108,17	0,4428	0,4240	-4,26
		125,02	0,4301	0,4088	-4,95
		142,28	0,3971	0,3933	-0,96
		159,34	0,3778	0,3806	+0,74
		176,27	0,3638	0,3709	+1,95
		193,60	0,3461	0,3612	+4,36
		210,75	0,3354	0,3524	+5,07
	42	0,29	1,0000	2,1640	+116,40
		19,65	0,6750	0,6810	+0,90
		35,84	0,5908	0,5764	-2,44
		52,14	0,5256	0,5202	-1,01
		68,56	0,4795	0,4848	+1,11
		85,11	0,4334	0,4558	+5,15
		101,39	0,4144	0,4335	+4,59
		117,74	0,3906	0,4174	+6,84
		134,30	0,3671	0,4013	+9,33
		150,68	0,3544	0,3883	+9,56
		167,19	0,3405	0,3788	+11,25
		184,24	0,3126	0,3682	+17,78
		200,72	0,3074	0,3593	+16,87
		217,53	0,2923	0,3525	+20,61
	50	0,28	1,0000	1,6495	+64,95
		6,73	0,7268	0,6917	-4,83
		22,38	0,6081	0,5001	-17,76
		38,11	0,5111	0,4313	-15,60
		53,86	0,4443	0,3915	-11,88
		69,48	0,4266	0,3663	-14,15
		85,40	0,3754	0,3451	-8,05
		101,29	0,3332	0,3287	-1,35
		116,99	0,3167	0,3168	+0,03
		133,02	0,2887	0,3053	+5,74
		148,84	0,2723	0,2955	+8,51
		164,86	0,2552	0,2882	+12,91
		180,84	0,2474	0,2807	+13,43
		196,83	0,2323	0,2737	+17,82

Tablica 7-30. Usporedba mjerenih i proračunskih vrijednosti X^* prema korelacijskoj jednadžbi (7-16) za pšenicu

w_f, m/s	ϑ_f, °C	*Fourierov* broj *Fo*	Mjereno X^*	Proračunato prema (7-16) $\overline{X}^*$	$\frac{\overline{X}^* - X^*}{X^*}$, %
1,0	35	0,12	1,0000	2,5128	+151,28
		1,08	0,8769	1,2570	+43,35
		3,98	0,7939	0,8346	+5,12
		6,19	0,7244	0,7271	+0,38
		8,39	0,6908	0,6598	-4,49
		11,37	0,6298	0,5998	-4,76
		13,60	0,6044	0,5674	-6,12
		21,05	0,5535	0,4946	-10,64
		28,54	0,5178	0,4493	-13,23
		36,09	0,4817	0,4175	-13,31
		43,67	0,4531	0,3930	-13,26
		51,39	0,4138	0,3732	-9,82
		59,05	0,3926	0,3571	-9,04
		66,74	0,3736	0,3434	-8,08
		74,58	0,3445	0,3315	-3,77
		82,17	0,3427	0,3218	-6,11
		89,89	0,3313	0,3126	-5,64
		97,70	0,3160	0,3044	-3,66
	42	0,12	1,0000	2,0435	+104,35
		1,08	0,8193	1,0228	+24,84
		3,89	0,6623	0,6835	+3,20
		6,10	0,6263	0,5938	-5,19
		13,53	0,5382	0,4623	-14,11
		21,08	0,4690	0,4020	-14,28
		28,79	0,3965	0,3644	-8,10
		36,47	0,3641	0,3384	-7,07
		44,14	0,3454	0,3185	-7,80
		51,84	0,3284	0,3029	-7,75
		59,70	0,3009	0,2896	-3,75
		67,54	0,2889	0,2785	-3,60
		75,36	0,2749	0,2690	-2,12
		83,29	0,2559	0,2605	+1,81
		91,12	0,2466	0,2534	+2,78
		98,99	0,2372	0,2469	+4,09
	50	0,12	1,0000	2,2669	+126,69
		1,21	0,7933	1,0939	+37,90
		4,14	0,6905	0,7428	+7,58
		6,35	0,6433	0,6490	+0,89
		8,60	0,5899	0,5896	-0,05
		11,59	0,5532	0,5374	-2,86
		13,88	0,5099	0,5092	-0,15
		21,48	0,4470	0,4447	-0,52
		29,18	0,3972	0,4039	+1,69
		37,04	0,3422	0,3746	+9,46
		44,80	0,3215	0,3527	+9,70
		52,68	0,2937	0,3342	+13,79
		60,55	0,2757	0,3198	+16,01
		68,52	0,2534	0,3076	+21,39
		76,46	0,2392	0,2970	+24,18
		84,42	0,2264	0,2876	+27,05
		92,41	0,2143	0,2796	+30,52
		100,39	0,2044	0,2725	+33,28
1,07	35	0,13	1,0000	2,0598	+105,98
		0,97	0,8337	1,1017	+32,15
		3,92	0,7245	0,7112	-1,83
		6,14	0,6877	0,6178	-10,17
		8,41	0,6169	0,5587	-9,44
		11,40	0,5915	0,5066	-14,35
		13,66	0,5684	0,4786	-15,81
		21,32	0,4788	0,4166	-13,00
		29,01	0,4317	0,3779	-12,46
		36,69	0,4061	0,3511	-13,54
		44,44	0,3777	0,3299	-12,65
		52,26	0,3503	0,3134	-10,54

		60,03	0,3350	0,3001	-10,44
		67,97	0,3065	0,2884	-5,91
		75,73	0,3004	0,2785	-7,28
		83,60	0,2871	0,2703	-5,86
		91,48	0,2750	0,2628	-4,46
		99,33	0,2674	0,2558	-4,35
	42	0,12	1,0000	2,2191	+121,91
		1,69	0,7809	0,9661	+23,72
		4,63	0,6961	0,7041	+1,14
		6,84	0,6527	0,6219	-4,71
		9,09	0,6000	0,5692	-5,14
		12,10	0,5538	0,5204	-6,04
		14,36	0,5283	0,4924	-6,79
		21,98	0,4570	0,4318	-5,51
		29,59	0,4271	0,3931	-7,96
		37,35	0,3833	0,3648	-4,83
		45,11	0,3565	0,3438	-3,56
		52,87	0,3379	0,3270	-3,22
		60,67	0,3201	0,3137	-2,01
		68,46	0,3074	0,3015	-1,90
		76,40	0,2861	0,2911	+1,73
		84,44	0,2637	0,2818	+6,86
		92,27	0,2572	0,2742	+6,61
		100,08	0,2531	0,2674	+5,62
	50	0,12	1,0000	1,9823	+98,23
		1,34	0,8303	0,9325	+12,31
		4,30	0,6864	0,6458	-5,92
		6,56	0,6088	0,5644	-7,31
		9,56	0,5789	0,5011	-13,44
		12,63	0,5200	0,4590	-11,75
		16,46	0,4780	0,4219	-11,74
		24,18	0,4211	0,3750	-10,95
		32,04	0,3627	0,3441	-5,12
		39,81	0,3432	0,3213	-6,40
		47,74	0,3096	0,3033	-2,06
		55,56	0,2981	0,2891	-3,01
		63,47	0,2819	0,2769	-1,76
		71,60	0,2512	0,2670	+6,31
		79,49	0,2442	0,2580	+5,65
		87,56	0,2269	0,2501	+10,23
		95,86	0,2003	0,2428	+21,25
		103,58	0,2080	0,2368	+13,84
1,15	35	0,12	1,0000	2,4713	+147,13
		1,21	0,8344	1,1969	+43,43
		4,01	0,7362	0,8201	+11,38
		6,95	0,6945	0,6901	-0,63
		9,18	0,6493	0,6325	-2,58
		12,16	0,6037	0,5791	-4,08
		14,41	0,5792	0,5496	-5,11
		21,91	0,5247	0,4811	-8,29
		29,49	0,4730	0,4381	-7,38
		37,09	0,4405	0,4077	-7,44
		44,77	0,4049	0,3836	-5,25
		52,40	0,3876	0,3654	-5,72
		60,12	0,3660	0,3496	-4,48
		67,88	0,3428	0,3361	-1,96
		75,57	0,3325	0,3262	-1,91
		83,33	0,3176	0,3159	-0,54
		91,11	0,3036	0,3065	+0,95
		98,95	0,2883	0,2989	+3,68
	42	0,12	1,0000	2,3073	+130,73
		1,46	0,7537	1,0677	+41,67
		4,39	0,6807	0,7551	+10,92
		6,61	0,6356	0,6632	+4,35
		8,87	0,5661	0,6051	+6,89
		11,85	0,5435	0,5523	+1,62
		14,12	0,5124	0,5233	+2,14
		21,68	0,4605	0,4566	-0,86
		29,33	0,4131	0,4152	+0,52

		37,03	0,3754	0,3856	+2,73
		44,86	0,3330	0,3626	+8,88
		52,51	0,3260	0,3456	+6,03
		60,31	0,3058	0,3309	+8,21
		68,21	0,2799	0,3181	+13,65
		75,88	0,2801	0,3081	+9,97
		83,85	0,2575	0,2980	+15,74
		91,76	0,2433	0,2901	+19,23
		99,64	0,2331	0,2825	+21,17
	50	0,13	1,0000	1,8279	+82,79
		1,59	0,7728	0,8382	+8,47
		4,56	0,6537	0,6017	-7,94
		6,82	0,6022	0,5302	-11,95
		9,84	0,5543	0,4724	-14,79
		12,14	0,5129	0,4426	-13,71
		15,22	0,4688	0,4123	-12,06
		22,95	0,4026	0,3617	-10,15
		30,77	0,3531	0,3301	-6,53
		38,67	0,3120	0,3070	-1,62
		46,55	0,2905	0,2894	-0,38
		54,52	0,2630	0,2757	+4,81
		62,39	0,2532	0,2644	+4,43
		70,49	0,2261	0,2547	+12,63
		78,31	0,2262	0,2464	+8,91
		86,38	0,2091	0,2387	+14,17
		94,49	0,1932	0,2324	+20,28
		102,46	0,1871	0,2262	+20,87

Tablični rezultati ukazuju na dobro podudaranje izmjerenih i aproksimacijskih vrijednosti. Koristeći jednadžbu (7-15) u rasponu *Fourierovih* brojeva $10 \leq Fo \leq 226$, odstupanje aproksimiranih i izmjerenih vrijednosti uglavnom ne prelazi 10%, uz maksimalnu vrijednost od oko 20% (kod $w_f = 1{,}07$ m/s, $\vartheta_f = 42$ °C i $Fo > 190$). U rasponu $Fo < 10$ odstupanje naglo raste s maksimalnom vrijednosti od oko 130% za minimalne *Fo* brojeve. Koeficijenti determinacije R^2 za raspon $10 \leq Fo \leq 226$ su veći od 0,9, jedino je kod $w_f = 1{,}0$ m/s i $\vartheta_f = 35$ °C R^2 manji i iznosi 0,6768.

Kod jednadžbe (7-16) u rasponu $4 \leq Fo \leq 104$ odstupanja također uglavnom ne prelaze 10%, a jedino je kod $w_f = 1{,}0$ m/s, $\vartheta_f = 50$ °C i $Fo > 90$ odstupanje oko 30%, pa se zbog toga interval korištenja jednadžbe može smanjiti na $4 \leq Fo \leq 90$. Za $Fo > 90$ sadržaj vlage je ionako već manji od potrebnog $X = 14\%$ pa niti nema smisla ići na manje vlažnosti. U rasponu $Fo < 4$ odstupanje započinje naglo rasti i iznosi oko 150% za najmanje *Fo* brojeve. Koeficijenti determinacije R^2 su svi jednaki ili veći od 0,9.

7.6 USPOREDBA S REZULTATIMA ISTRAŽIVANJA DRUGIH AUTORA

Kako je već objašnjeno u poglavlju 1.2, u literaturi se mogu naći brojni radovi u kojima su prikazani eksperimentalni rezultati sušenja raznih žitarica, a negdje su prikazani i odgovarajući matematički modeli, no za sušenje ječma u fluidiziranom sloju se nisu mogli naći nikakvi podaci, a za sušenje pšenice su pronađeni rezultati u radu *Dimattia* i ostalih [4], *Hajidavallooa* i *Hamdullahpura* [6], te *Ginera* i *Calvela* [16]. Međutim, ta istraživanja su bila rađena s drugim vrijednostima procesnih parametara (brzina i relativna vlažnost ulaznog zraka, te visina sloja) što znatno utječe na vremena i brzine sušenja, pa stoga direktna usporedba rezultata ipak nije moguća, no mogu se usporediti izvedeni zaključci.

U [6] je tako zaključeno da se sušenja pšenice odvija samo u fazi „padajuće brzine sušenja“, te da je sušenje vlage s površine vlažnih čestica vrlo intenzivno na početku procesa zbog malenog vanjskog otpora prijenosu topline i tvari, no kasnije se brzina sušenja značajno smanjuje zbog velikog unutarnjeg otpora difuziji. U provedenim eksperimentima mjerila se temperatura u sloju na različitim visinama, relativna vlažnost izlaznog zraka, pad tlaka u sloju, brzina zraka i sadržaj vlage čestica za vrijeme sušenja. Temperature ulaznog zraka su bile 40 °C, 49,5 °C i 65 °C, dok je brzina bila 1,95 m/s. Razvijeni matematički model sušenja žitarica u fluidiziranom sloju dobro se slaže s dobivenim eksperimentalnim rezultatima sušenja pšenice. Zaključeno je još da je sušenje žitarica kontrolirano s unutarnjim parametrima prijenosa tvari i da na brzinu sušenja važan utjecaj ima temperatura zraka, dok brzina zraka i visina sloja ne pokazuju značajan utjecaj na brzinu sušenja.

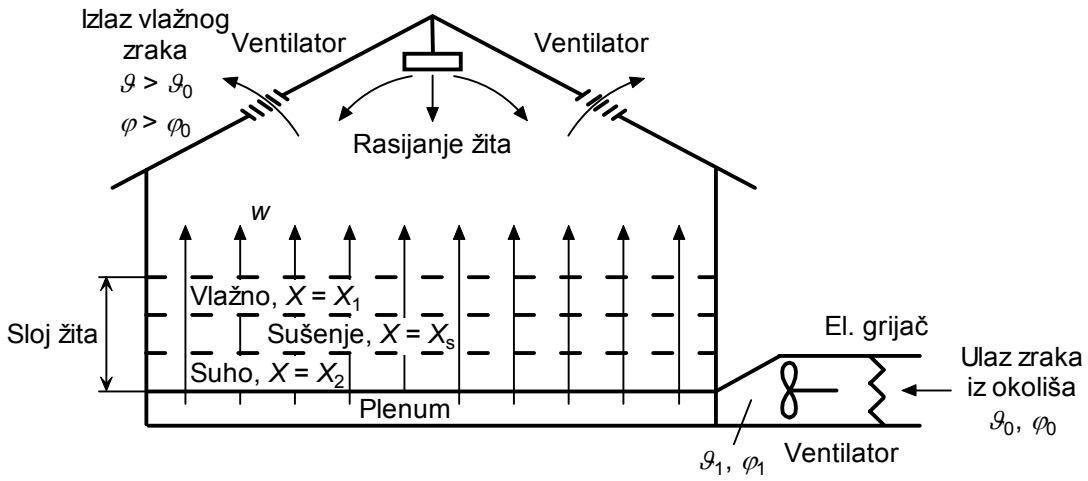
Zaključci su bili vrlo slični i u drugim radovima koji se bave sušenjem žitarica u fluidiziranom sloju. Tako je npr. u radu *Srinivasakannana* i *Balasubramaniama* [8] zaključeno da brzina sušenja značajno raste s porastom temperature sušenja te vrlo malo s porastom masenog protoka zraka, a slično su zaključili i kod sušenja prosa [9]. U radu *Syahrula* i ostalih [93] prikazan je matematički model sušenja vlažnih čestica u šaržnom fluidiziranom sloju, te su usporedili modelirane s eksperimentalnim rezultatima sušenja kukuruza u fluidiziranom sloju iz literature. Također je istražen i efekt ulazne temperature zraka, brzine zraka i početnog sadržaja vlage kukuruza na vrijeme sušenja i toplinsku efikasnost procesa. U radu je pokazano da povećanje temperature zraka značajno smanjuje vrijeme sušenja, no da pri tome treba biti oprezan jer prevelike temperature mogu smanjiti kvalitetu žitarica zbog toplinska naprezanja koja se javljaju u zrnu i promjena fizikalnih svojstava materijala. Smanjenje brzine zraka od oko 15%, s 2,22 m/s na 1,88 m/s, samo neznatno povećava vrijeme sušenja pa je stoga zaključeno da je utjecaj brzine zraka vrlo malen. Raspon brzina je bio vrlo malen kako se ona ne bi smanjila ispod minimalne brzine fluidizacije. Brzina sušenja zrnja kukuruza s većim početnim sadržajem vlage X_0 veća je nego kod zrnja s manjim početnim sadržajem vlage jer je difuzivnost kukuruza funkcija sadržaja vlage. Stoga povećanje sadržaja vlage zrna pomaže bržem prijenosu vlage do njegove površine. Toplinska efikasnost procesa sušenja veća je na početku procesa nego na kraju, a mijenja se između 4% i 17% za različite procesne parametre pri normaliziranom sadržaju vlage (X/X_0) koji se mijenja između 55% i 85%. Pri različitim temperaturama zraka (50-63 °C) toplinska efikasnost se na kraju procesa vrlo malo mijenja, kao i kod smanjenja brzine zraka od oko 15%. Početni sadržaj vlage X_0 nema utjecaja na toplinsku efikasnost u početnoj fazi sušenja dok ishlapljuje površinska vlaga, no kad se sušenje odvija difuzijom vlage iz unutrašnjosti toplinska efikasnost je veća kod zrnja s većim X_0.

7.7 USPOREDBA REZULTATA S KONVENCIONALNIM NAČINOM SUŠENJA ŽITARICA

Dobivene rezultate sušenja odabranih žitarica u fluidiziranom sloju potrebno je usporediti s postizivim brzinama sušenja žitarica konvencionalnim načinom. Također je potrebno usporediti i dobiveni sadržaj vlage u sloju, te toplinsku efikasnost oba procesa. Detaljni in situ eksperimentalnih rezultata učinka komercijalne šaržne sušare pod stvarnim radnim uvjetima tijekom sušenja ječma opisani su u radu *Chena* i ostalih [94]. U radu se mogu naći rezultati mjerenja distribucije ključnih parametara za sušenje kao što su temperatura zraka, relativna vlažnost, protok, sadržaj vlage zrna, vrijeme sušenja i iznos upotrijebljene energije.

Konvencionalna sušara u [94] okrugli je silos napravljen iz valovitog pocinčanog čelika bez elemenata toplinske izolacije. Podnica koja nosi sloj žita i raspodjeljuje zrak za sušenje napravljena je od perforirane ploče, a drže je četvrtasti čelični okviri koji leže na betonskoj podlozi. Visina sloja ječma tijekom mjerenja iznosila je 0,8 – 0,9 m, što je oko 20 – 30 tona po šarži. Za zagrijavanje zraka koriste se el. grijači ukupne snage 85-86 kW. Sušara je kupljena 1984. godine i bila je u dobrom stanju.

Kod sušenja u šaržnim konvencionalnim sušarama (slika 7-49) roba se tijekom sušenja ne pokreće, odnosno ostaje u sušari do trenutka postizanja tražene vlažnosti. Sušenje u njima se odvija sporo, tako da je mogućnost smanjivanja vlažnosti malena i ne preporučuje se sušiti više od 3 do 5% vlažnosti. Zrak za sušenje se propuhuje odozdo prema gore pa se zbog toga donji slojevi prvo suše. Zona sušenja napreduje prema vrhu ovisno o temperaturi i brzini zraka, a zadnji se osuši gornji sloj.



Slika 7-49. Sušenje u konvencionalnoj šaržnoj sušari

U [94] ukupno su načinjena dva mjerenja, prvo 29. veljače 2000. god. u trajanju od 10:58 kada je upaljen ventilator, a el. grijač je upaljen u 11:15, do 19:50 kad je ugašen el. grijač, odnosno 22:00 kad je ugašen i ventilator. U tom mjerenju se sušio ječam prosječne vlažnosti 15,7% na 13,3%. Drugo mjerenje započelo je 1. ožujka 2000. god. Ventilator je upaljen u 11:50, a el. grijač u 12:23. Sušenje je završilo u 02:55 sljedećeg dana kada su isključeni i el. grijač i ventilator. Početna prosječna vlažnost iznosila je 17,2%, a konačna 13,7%. Ukupna vremena sušenja iznosila su 8 sati 35 minuta u prvom mjerenju i 14 sati i 30 minuta u drugom mjerenju. Osim što je vlažnost u sloju ovisila o napredovanju zone sušenja, mjerenja su pokazala i da je brzina sušenja u svim slojevima znatno veća u zadnjih nekoliko sati sušenja (3-4 sata) nego na početku.

Vrijeme sušenja u fluidiziranom sloju iznosilo je oko dva sata, a sušilo se zrno početne vlažnosti s oko 21% na 14%. U fluidiziranom sloju se prema tome dobivaju puno veće brzine sušenja nego kod konvencionalnog sušenja.

Kod konvencionalne sušare ustanovilo se da u sloju žitarica postoje veliki horizontalni i vertikalni gradijenti vlažnosti i temperature. Vertikalni gradijenti se javljaju zbog napredovanja zone sušenja prema vrhu sloja, a horizontalni zbog zbog nejednolike distribucije

zraka po presjeku sloja. Na kraju sušenja, razlika vlažnosti između donjeg i gornjeg sloja iznosila je u prvom mjerenju prosječno 3,1% i u drugom mjerenju 3,3%.

U fluidiziranom sloju na kraju sušenja nisu ustanovljeni nikakvi gradijenti vlažnosti i temperature. To se provjerilo na način da su uzimana dva uzorka s različitih mjesta u koloni. Unatoč tome što je bilo problema s nastankom fluidiziranog sloja na početku sušenja kod brzine zraka w_f = 1,0 m/s, sloj je ipak na kraju fluidizirao pa je primjerice kod ječma sadržaj vlage ta dva uzorka pri brzini zraka w_f = 1,0 m/s i temperaturi ϑ_f = 35 °C iznosio X = 0,1197 i 0,1196, pri temperaturi 42 °C X = 0,1324 i 0,1319 itd. I kod ostalih temperatura i brzina zraka zbog ujednačenosti temperatura u sloju također se može zaključiti da je sadržaj vlage ujednačen.

U tablici 7-31 prikazani su podaci o toplinskoj efikasnosti konvencionalne sušare [94].

Tablica 7-31. Toplinska efikasnost konvencionalne sušare [94]

	Mjerenje 1	Mjerenje 2
Ukupno vrijeme sušenja, h	8:35	14:30
Ukupno odstranjeno vlage Δm_v, kg	542	791
Ukupno utrošeno el. energije Q_z, kWh	810	1360
Odstranjeno vlage po kWh, kg/kWh	0,68	0,58
Ukupna toplinska efikasnost procesa sušenja E_f, %	48,4	41,5

Toplinska efikasnost procesa sušenja E_f definirana je kao:

$$E_f = \frac{r^* \Delta m_v}{Q_z}, \tag{7-17}$$

gdje je r^* latentna toplina isparivanja vlage iz zrnja, J/kg, Δm_v masa isparene vlage, kg, a Q_z, J, toplina predana zraku za sušenje.

U literaturi [95] se može naći izraz po kojem se može proračunati r^* u ovisnosti o sadržaju vlage X:

$$r^* = r(\vartheta_f)\left(1 + e^{bX}\right), \tag{7-18}$$

gdje je $r(\vartheta_f)$ toplina isparivanja vode pri temperaturi sušenja ϑ_f, J/kg, a a i b empirijski koeficijenti za pojedine vrste žitarica [96]. Za ječam je a =1,0 i b = -19,9 u rasponu sadržaja vlage $0{,}09 \le X \le 0{,}22$, a za meku pšenicu a = 3,9 i b = -23,6 u rasponu $0{,}10 \le X \le 0{,}20$.

Toplinska efikasnost u [94] iznosila je u prvom mjerenju 48,4%, a u drugom 41,5%. Manja efikasnost u drugom mjerenju bila je zbog niže ulazne temperature zraka prije grijača koja je iznosila 15,7 °C, dok je u prvom mjerenju bila 20,0 °C. Zaključak iz [94] je da je efikasnost mala zbog velike količine topline potrebne za zagrijavanje zraka, sloja žitarica i ostalih toplinskih gubitaka, no da postoji veliki potencijal za njezino povećanje korištenjem različitih metoda rekuperacije topline kao što je npr. recirkulacija izlaznog zraka, te smanjenjem vršne snage i poboljšanem kontrole procesa.

Pomoću jednadžbe (7-18) izračunate su toplinske efikasnosti za mjerenja u ovom radu, a rezultati su prikazani u tablicama 7-32 i 7-33. Vrijednosti r^* izračunate su za srednje vrijednosti sadržaja vlage X u svakom mjerenju.

Tablica 7-32. Toplinska efikasnost procesa sušenja ječma u koloni za fluidizaciju

w_f, m/s	ϑ_f, °C	Temperatura zraka prije grijača ϑ_1, °C	Ukupno odstranjeno vlage, kg	Utrošena el. energija na grijaču zraka, kWh	Odstranjeno vlage po kWh, kg/kWh	Toplinska efikasnost E_f, %
1,0	35	27,89	0,3201	0,6826	0,4689	32,17
	42	26,61	0,4306	1,487	0,2896	19,61
	50	24,66	0,4089	2,416	0,1692	11,47
1,07	35	26,42	0,3284	0,8496	0,3865	26,54
	42	29,04	0,3963	1,352	0,2931	19,55
	50	23,97	0,4057	3,076	0,1319	8,972
1,15	35	22,46	0,3427	1,571	0,2181	14,65
	42	26,11	0,3968	1,956	0,2029	13,82
	50	23,06	0,4063	3,386	0,1200	8,162

Tablica 7-33. Toplinska efikasnost procesa sušenja pšenice u koloni za fluidizaciju

w_f, m/s	ϑ_f, °C	Temperatura zraka prije grijača ϑ_1, °C	Ukupno odstranjeno vlage, kg	Utrošena el. energija na grijaču zraka, kWh	Odstranjeno vlage po kWh, kg/kWh	Toplinska efikasnost E_f, %
1,0	35	26,55	0,3689	0,7952	0,4639	32,24
	42	19,27	0,4063	2,302	0,1765	12,21
	50	27,12	0,4383	2,373	0,1847	12,80
1,07	35	15,72	0,3515	2,250	0,1562	11,16
	42	16,97	0,4068	2,934	0,1387	9,665
	50	19,27	0,3965	3,711	0,1068	7,589
1,15	35	24,98	0,3516	1,258	0,2795	19,59
	42	24,86	0,3973	2,153	0,1845	12,88
	50	19,13	0,3938	4,198	0,09381	6,686

Iz literature je poznato da je toplinska efikasnost sušenja u fluidiziranom sloju manja nego kod konvencionalnih sušara, a to pokazuju i dobivene vrijednosti. Također se vidi i da efikasnost procesa sušenja u fluidiziranom sloju jako opada s povećanjem temperature i brzine zraka, pa je stoga potrebno pažljivo odabrati te ulazne parametre. Kao i kod konvencionalne sušare također se mogu primijeniti rekuperacija topline, smanjenje vršne snage i poboljšanje kontrole procesa.

Šira analiza utjecaja temperature zraka i rekuperacije topline na toplinsku efikasnost sušionika s fluidiziranim slojem može se naći u radu *Ginera* i *deMichelisa* [17], koji su primjerice proračunali da bi se primjenom recirkulacije zraka toplinska efikasnost procesa sušenja pšenice u fluidiziranom sloju povećala s 28 na 53%. Naravno, pri tom se treba kontrolirati sadržaj vlage u izlaznom zraku jer se povećanjem vlažnosti zraka smanjuje i brzina sušenja, te se prema tome određuje koliki udio zraka odlazi u recirkulaciju. Zrak se prije povrata u proces mora i filtrirati kako bi se odstranile odnešene čestice, a za protok zraka iz recirkulacije je potrebno imati i poseban ventilator.

8 ZAKLJUČAK

Fluidizacija se zbog zbog svojih svojstava u smislu poboljšanja prijenosa topline i tvari koristi u nizu fizikalnih operacija i kemijskih reakcija. Ona se koristi i kod sušenja, pa se tako u fluidiziranom sloju suše razni zrnati materijali, primjerice žitarice (pšenica, riža, kukuruz, proso, ječam i druge). Žitarice se obično žanju s visokim postotkom vlage kako bi se smanjili gubici zbog oštećivanja zrna i rasipanja koji nastupaju prilikom strojnog ubiranja. Za njihovo skladištenje potrebno im je smanjiti vlažnost na sigurni nivo od 10-14%. Kako godišnja proizvodnja žitarica konstantno bilježi stalni rast zbog porasta čovječanstva kojemu su žitarice primarni izvor hrane, tako raste i potrošnja energije obzirom na velike količine vode koje se pritom moraju odstraniti sušenjem. Primjenom različitih konstrukcijskih rješenja značajno se može smanjiti potrošnja energije kod konvencionalnih sušara, no veliki potencijal za to ima i primjena novih tehnologija među koje spada i fluidizacija.

Budući da postoji mogućnost primjene fluidiziranog sloja na području sušenja žitarica čime bi se ostvarile prednosti u odnosu na sušenje u konvencionalnim sušarama, u ovom radu je stoga provedeno eksperimentalno istraživanje sušenja žitarica (odabrani su ječam i pšenica) u fluidiziranom sloju sa svrhom kvantifikacije intenziteta prijenosa topline i tvari. Ječam je bio oljušten (naziva se i ječmena kaša) i kao takav se koristi za ljudsku prehranu. Pšenica je bila obična ili meka (*Triticum vulgare*) koja se koristi za proizvodnju kruha.

Rad se temelji na hipotezi da je procesom sušenja zrnatih materijala u fluidiziranom sloju moguće ostvariti veću brzinu sušenja (a time i kraće vrijeme sušenja materijala) u odnosu na konvencionalni način sušenja, te jednoličniji sadržaj vlage osušenog materijala. Postavljena hipoteza provjerena je na projektiranoj i izrađenoj mjernoj liniji koja se sastoji od električnog grijača zraka i fluidizirane kupke s pripadajućim mjernim uređajima.

Za ciljeve istraživanja postavljeno je sljedeće:

- provesti eksperimentalna istraživanja sušenja odabranih žitarica sa svrhom definiranja kinetike sušenja (krivulje sušenja, periodi sušenja, utjecaj procesnih parametara na kinetiku sušenja), te kvantifikacije intenziteta prijenosa topline i tvari u fluidiziranom sloju;
- dobivene rezultate prikazati pomoću korelacijskih jednadžbi koje su strukturirane od odgovarajućeg broja relevantnih bezdimenzijskih značajki koje se u literaturi najčešće navode u prikazu ovakvih problema, te im pridružiti, u bezdimenzijskoj formi, i područje njihove valjanosti;
- dobivene rezultate kritički izanalizirati i usporediti kako s rezultatima sličnih novijih istraživanja drugih autora, tako i s postizivim brzinama sušenja žitarica konvencionalnim načinom.

Fluidizirana kupka koja se koristila u istraživanju cilindrična je kolona s perforiranom pločom kao distributorom zraka. Mjernom linijom bilo je obuhvaćeno mjerenje sljedećih parametara procesa: ulazni i izlazni sadržaj vlage u zraku, ulazna i izlazna relativna vlažnost zraka, ulazna i izlazna temperatura zraka, ulazni i izlazni sadržaj vlage u česticama, te maseni protok zraka. Te su se vrijednosti mjerile *on-line* budući je mjerni sustav bio izravno spojen na osobno računalo. Za određivanje mase sušenih uzoraka (fluidiziranih čestica), a time i za određivanje mase iz njih ishlapljene vlage, koristila se precizna vaga. Budući su rezultati svedeni na masu suhe tvari, za potpuno odstranjivanje vlage iz uzoraka i dobivanje mase suhe tvari koristila se standardna laboratorijska peć.

Provedeno istraživanje sušenja žitarica u fluidiziranom sloju rezultiralo je sljedećim:

1. Čestice s većim početnim sadržajem vlage zahtijevaju veću minimalnu brzinu fluidizacije nego sloj od suhih čestica. Stoga su prvo eksperimentalno, mjerenjem pada tlaka u fluidiziranom sloju, određene minimalne brzine fluidizacije za početni sadržaj vlage od približno 25% kako bi se mogao odrediti režim brzina zraka za fluidizaciju koji će se koristiti u ispitivanjima. Izmjerena minimalna brzina fluidizacije iznosila je za ječam 0,9 m/s, a za pšenicu 0,85 m/s, stoga je za ispitivanja odabrana najmanja brzina fluidizacije w_f = 1,0 m/s za obje žitarice. Najveća brzina odabrala se na osnovu maksimalnog pada tlaka koji se mogao mjeriti na mjernoj prigušnici pomoću ugrađenog pretvornika razlike tlaka i iznosila je w_f = 1,15 m/s, a za srednju se odabrala brzina w_f = 1,07 m/s. No, kako se u mjerenjima nije mogao dobiti baš taj početni sadržaj vlage X_0 = 0,25 nego su vrijednosti bile i veće pri čemu je zrnje početne vlažnosti dosta i ljepljivo, odabrana najmanja brzina pokazala se nedovoljnom pa se nije odmah u početku mogao dobiti fluidizirani sloj, nego tek nakon određenog vremena kad se zrnje dovoljno osušilo.
2. Mjerenjem je dobivena ovisnost sadržaja vlage ječma i pšenice o vremenu sušenja (krivulje sušenja) za tri ulazne temperature zraka (35 °C, 42 °C i 50 °C) i tri brzine zraka (1,0, 1,07 i 1,15 m/s). Na osnovu sadržaja vlage izračunate su brzine sušenja, te nacrtane u ovisnosti o vremenu sušenja. Izmjerene vrijednosti sadržaja vlage prikazane su i u bezdimenzijskom obliku kako bi se mogao analizirati utjecaj temperature i brzine zraka na vrijemena sušenja za različite vrijednosti početnog sadržaja vlage i ulaznog stanja zraka.
3. Prikazana je projena temperature fluidiziranog sloja s vremenom sušenja. Temperature su mjerene na tri visine u sloju kako bi se provjerila kvaliteta fluidizacije jer temperature u fluidiziranom sloju moraju biti ujednačene. Veoma je važno načiniti takvu provjeru kod sušenja žitarica jer one spadaju u čestice grupe D prema *Geldartovoj* podjeli koje ne mogu dati fluidizaciju optimalne kvalitete. Dodatne poteškoće mogu nastati jer su žitarice (kao i mnoge druge čestice prehrambenih proizvoda) dosta ljepljive, pa ako se krene s premalom brzinom fluidizacije (kao što je bilo i kod ovih mjerenja), do nastanka fluidiziranog sloja uopće ne mora niti doći. Tada se naravno smanjuju brzine sušenja u sloju i povećava vrijeme sušenja, a negativno je i što se dobiva nejednolik sadržaj vlage u sloju.
4. Dobiveni rezultati prikazani su pomoću opće bezdimenzijske korelacijske jednadžbe (7-5) zajedno s područjem njihove valjanosti.
5. Dobiveni rezultati su izanalizirani te su se usporedili s rezultatima sličnih novijih istraživanja drugih autora, te s rezultatima sušenja žitarica konvencionalnim načinom.

Na osnovu dobivenih rezultata i provedene eksperimentalno-računske analize izvedeni su sljedeći zaključci:

1. Dobivene krivulje sušenja žitarica u fluidiziranom sloju imaju zakrivljen oblik što je karakteristično za tvari kod kojih se sušenje odvija u fazi „padajuće brzine sušenja“. Žitarice općenito naime imaju vrlo velik kritični sadržaj vlage, a u fluidiziranom sloju su i veliki koeficijenti prijelaza topline i tvari pa površinska vlaga brzo ishlapi a fronta sušenja se premjesti u unutrašnjost zrna.
2. Na osnovu dobivenih krivulja sušenja i izračunatih brzina sušenja za različite ulazne temperature i brzine zraka može se zaključiti da je utjecaj procesnih parametara na kinetiku sušenja žitarica sljedeći:

a) temperatura zraka

Povećanje temperature zraka ima dominantan utjecaj na povećanje brzine sušenja žitarica i smanjenje vremena sušenja. Brzina sušenja povećava se s temperaturom i kod mokre površine zrna jer se tada povećava razlika parcijalnih tlakova vodene pare neposredno uz zasićenu površinu zrna i podalje od nje, ali i kad se površina osuši a fronta sušenja se preseli u unutrašnjost zrna jer se tada povećava koeficijent difuzije. Pri tome treba voditi računa o maksimalnim preporučenim temperaturama zrna tijekom sušenja kako ne bi došlo do smanjenja njegove kvalitete. Brzo sušenje s temperaturama iznad preporučenih dovodi do toplinskih naprezanja u zrnu, te može doći i do raznih neželjenih fizikalnih i kemijskih promjena.

b) brzina zraka

Iako je raspon brzina zraka u obavljenim istraživanjima bio relativno malen, samo 15%, na osnovu dobivenih rezultata može se zaključiti da je brzina zraka vrlo važna u početnoj fazi sušenja kad je površina zrna još potpuno ili djelomično zasićena i kad su najveće brzine sušenja zbog vrlo intenzivnog ishlapljivanja površinske vlage. Povećanjem brzine zraka povećava se naime količina mjehura u sloju koji poboljšavaju miješanje čestica te se na taj način intenzivira prijenos topline i tvari u sloju. Kod većih brzina zraka se osigurava i stalni dotok svježeg zraka male vlažnosti jer je vrlo važno da se u toj početnoj fazi sušenja on ne zasiti vlagom te se na taj način smanji brzina sušenja. U kasnijoj fazi sušenja, kada se ono odvija difuzijom vlage iz unutrašnjosti zrna, utjecaj brzine zraka postaje vrlo malen. Zbog manjih količina vlage koju treba osušiti može se tada i smanjiti količina dovedenog zraka. Važna je i veza između brzine zraka i njegove vlažnosti. Za zadanu temperaturu zraka i za njegovu malu brzinu potrebno je dovoditi zrak manje vlažnosti kako bi se dobila tražena brzina sušenja. I obrnuto, kod veće brzine zraka može se dovoditi zrak i veće relativne vlažnosti.

Brzina zraka je dakle vrlo važan parametar, kako za dobivanje pravilno fluidiziranog sloja, tako i za skraćenje vremena sušenja. Zrnje žitarica, kao i većinu čestica drugih prehrambenih proizvoda, kao što se moglo vidjeti je vrlo teško fluidizirati na samome početku procesa pa je zato preporučljivo krenuti i s nešto većim brzinama od potrebne kako bi se osiguralo pravilna fluidizacija i miješanje čestica.

c) sadržaj vlage zraka

Pri manjem sadržaju vlage zraka veća je razlika parcijalnih tlakova vodene pare pa je i veća brzina sušenja. Vlažnost zraka povezana je s njegovom brzinom na način kako je prethodno opisano.

d) početni sadržaj vlage

Žitarice s većim početnim sadržajem vlage na početku se brže suše nego one s manjim sadržajem. Kod većeg sadržaja vlage veći je koeficijent difuzije pa je onda i brzina sušenja veća.

e) *visina sloja* i *veličina čestica*

Utjecaj visine sloja i veličine čestica na vrijeme i brzinu sušenja se u ovom istraživanju nije ispitivao, no primjerice u [16] se mogu naći eksperimentalni rezultati koji pokazuju da se s povećanjem visine sloja povećava i vrijeme sušenja do određenog sadržaja vlage čestica. Također se i u [97] spominje da se kod čestica s velikim unutarnjim otporom difuziji, kao što su npr. žitarice, brzina sušenja smanjuje s povećanjem visine sloja. Za utjecaj veličine čestica se u [97] može naći općeniti podatak da se za čestice grupe B prema *Geldartovoj* podjeli vrijeme sušenja potrebno za odstranjivanje dane količine vlage

povećava s kvadratom promjera čestice uz uvjet da svi ostali uvjeti sušenja ostanu nepomijenjeni. Taj efekt je za čestice grupe A mnogo manji zbog toga što su to finije čestice koje prvo stvaraju homogeni fluidizirani sloj prije nastanka heterogenog. Utjecaj veličine čestica za grupu D se ne spominje, no može se pretpostaviti da se zbog lošije kvalitete fluidizacije i smanjenja specifične površine čestica smanjuje brzina sušenja i povećava vrijeme sušenja.

3. Mjerenje temperature u pojedinim dijelovima sloja praktičan je način kontrole kvalitete fluidizacije. U pravilno fluidiziranom sloju se zbog vrlo intenzivnog miješanja čestica i velikog intenziteta prijenosa topline i tvari dobivaju velike brzine sušenja, te uniformna razdioba temperature i sadržaja vlage u sloju. No, može biti veoma teško dobiti pravilnu fluidizaciju kad se radi s velikim i ljepljivim česticama poput žitarica. Ukoliko takve čestice odmah nakon ulaska u kolonu ne počnu fluidizirati, npr. zbog prevelikog početnog sadržaja vlage, čestice se počinju međusobno lijepiti te nastaju grude materijala, a mogu se lijepiti i za stijenku kolone ili distributivnu ploču, te čak i zatvoriti dovod fluidizatora. Sve to u konačnici dovodi do nepravilnog rada uređaja za sušenje u fluidiziranom sloju jer se dobivaju manje brzine sušenja i neravnomjerna razdioba sadržaja vlage u produktu, a može doći i do prestanka rada uređaja.

4. Na osnovu izmjerenih vrijednosti sadržaja vlage zrnja za tri različite temperature zraka (35 °C, 42 °C i 50 °C) i tri brzine zraka (1,0, 1,07 i 1,15 m/s), računskom analizom dobivena je korelacijska jednadžba (7-15) za oljušteni ječam i (7-16) za pšenicu koje se mogu koristiti za proračun sadržaja vlage u drugim sličnim uvjetima rada tako izvedenih sušionika s fluidiziranim slojem. Dobivena jednadžba (7-15) vrijedi u intervalu bezdimenzijskih temperatura definiranih jednadžbom (7-6) $1{,}70 \leq T^* \leq 48$, *Fourierovih* brojeva $10 \leq Fo \leq 226$ i *Reynoldsovih* brojeva $207 \leq Re \leq 269$. Jednadžba (7-16) vrijedi u intervalu $1{,}82 \leq T^* \leq 42{,}08$, $4 \leq Fo \leq 90$ i $226 \leq Re \leq 288$. Usporedbom računskih dobivenih vrijednosti sadržaja vlage pomoću korelacijskih jednadžbi (7-15) i (7-16) vidi se njihovo vrlo dobro podudaranje, pri čemu procentualna razlika uglavnom ne prelazi 10% uz maksimalne vrijednosti od oko 20% za jed. (7-15) kod brzine 1,07 m/s, temperature 42 °C i $Fo > 190$, i 10% za jed. (7-16) u cijelom intervalu valjanosti. Korelacijske jednadžbe mogle bi biti i preciznije ukoliko bi ispitivanja obuhvatila veći broj različitih ulaznih stanja zraka (druge vlažnosti i temperature), te širi raspon brzina.

5. Dobiveni rezultati sušenja žitarica u fluidiziranom sloju usporedili su se s rezultatim sušenja u konvencionalnoj sušari kako bi se provjerila hipoteza rada da se u fluidiziranom sloju dobivaju veće brzine sušenja i jednoličniji sadržaj vlage. Općenito se sušenje u konvencionalnim sušarama odvija sporo, tako da je mogućnost smanjivanja vlažnosti malena i ne preporučuje se sušenje više od 3 do 5% vlažnosti. Zrak za sušenje se propuhuje odozdo prema gore pa se zbog toga donji slojevi prvo suše. Zona sušenja napreduje prema vrhu ovisno o temperaturi i brzini zraka, a zadnji se osuši gornji sloj. Rezultati mjerenja vlažnosti u takvim sušarama pokazuju postojanje velikih horizontalnih i vertikalnih gradijenata vlažnosti. Vertikalni gradijenti se javljaju zbog napredovanja zone sušenja prema vrhu sloja, a horizontalni zbog nejednolike distribucije zraka po presjeku sloja. Razlika vlažnosti između donjeg i gornjeg sloja iznosila je oko 3% u literaturi [93] koja se koristila za usporedbu. Rezultati sušenja žitarica u fluidiziranom sloju pokazali su pak da se u veoma kratkom vremenu dobiva jednoliko osušeno zrno (ukoliko sloj pravilno fluidizira).

6. Iz literature je poznato da je toplinska efikasnost procesa sušenja u fluidiziranom sloju manja nego kod konvencionalnih sušara, a to su potvrdile i izračunate efikasnosti za provedena mjerenja u ovom radu. Iako su te vrijednosti samo orijentacijske zbog ovisnosti

o ulaznom stanju zraka, one ipak pokazuju da povećanje brzine i temperature zraka kod sušenja u fluidiziranom sloju znatno smanjuju efikasnost procesa sušenja, te je potrebno pažljivo odabrati procesne parametre. Također je nužno koristiti i rekuperaciju topline, primjerice recirkulaciju otpadnog zraka koji ima visoku temperaturu i nisku vlažnost, te druge metode za poboljšanje energetske učinkovitosti kao što su smanjenje vršne snage i poboljšana kontrola procesa.

7. Rezultati istraživanja u ovom radu i izvedeni zaključci u skladu su sa sličnim novijim istraživanjima drugih autora koji su navedeni u Uvodu.

8.1 ZNANSTVENI DOPRINOS

Fluidizacija je proces koji ima vrlo važne prednosti kao što su odlično miješanje čestica, intenzivan prijenos topline i tvari u sloju, te jednostavan transport čestica. Fluidizirani sustavi omogućuju izvedbu raznolikih fizikalnih procesa i kemijskih reakcija pri čemu u usporedbi s konvencionalnim sustavima, u kojima se isto zbivaju ti procesi, postižu značajne prednosti. No fluidizacija nije uvijek i najbolje rješenje jer postoji i niz nedostataka o kojima se mora voditi računa, a svakako jedan od najvažnijih je velika složenost procesa. Zbog složenih hidrodinamičkih i termodinamičkih pojava u sloju cijeli je niz problema s kojima se treba suočiti u konstrukciji i pogonu reaktora s fluidiziranim slojem. Na ravnotežu hidrodinamičkih i međučestičnih sila u fluidiziranom sloju, a time i na efikasnost dodira i intenzitet prijenosa topline i tvari između fluidizirajućeg medija i čestica, utječe niz veličina kako što su temperatura, tlak, brzina fluidizirajućeg medija, karakteristike čestica krute tvari, prisustvo mjehura u sloju, konstrukcija distributivne ploče itd. Između tih veličina postoji i međusobna ovisnost kao npr. između mjehura i distributivne ploče. Kod zraka kao fluidizatora mjehuri se kod većine čestica javljaju odmah po postizanju minimalne brzine fluidizacije. Oni imaju vrlo važan utjecaj na hidrodinamiku sloja jer kako se dižu prema površini povlače sa sobom i dio čestica. Na nastanak mjehura te na njihovu veličinu i broj vrlo važan utjecaj ima distributivna ploča, no ta veza još nije potpuno teorijski opisana. Dalje, fluidizacijska svojstva čestica krute tvari se mijenjaju s promjenom vlažnosti. Suhe čestice fluidiziraju kod jedne brzine minimalne fluidizacije, a vlažne fluidiziraju kod neke veće. Međutim, i kod te veće brzine ne mora značiti da će fluidizirati cijeli sloj. Čestice raznih prehrambenih i ratarskih proizvoda, kao što su primjerice žitarice, mogu biti ljepljive zbog vlage ili nekih drugih razloga pa ih je zbog toga teško fluidizirati. Čestice tada stvaraju nakupine vlažnog materijala koje se prihvaćaju za unutarnje površine kolone, a mogu i začepiti otvore na distributivnoj ploču uzrokujući zastoj u radu reaktora.

Svi ti nedostaci imaju za posljedicu da ne postoje pouzdani matematički modeli koji se mogu primijeniti kod konstruiranja uređaja s fluidiziranim slojem. U literaturi se doduše mogu naći razni matematički modeli fluidiziranog sloja pa tako i za sušenje u fluidiziranom sloju, no svi oni upotrebljavaju različite idealizacije kako bi se pojednostavnio postupak pa dobiveni numerički rezultati često odstupaju od eksperimentalnih. Zbog toga konstruiranje uređaja s fluidiziranim slojem i dalje počiva na znanju i iskustvu projektanata, te na eksperimentalnom istraživanju u laboratorijima i na pokusnim uređajima. U velikom broju slučajeva različiti empirijski modeli koji proizlaze iz takvih istraživanja daju puno polje slaganje s eksperimentalnim rezultatima nego općeniti, iako su dobivene jednadžbe empirijske i ovise o materijalu koji se suši, uvjetima sušenja, te o geometriji kolone za fluidizaciju.

U ovom radu su dobiveni eksperimentalni rezultati sušenja odabranih žitarica (ječma i pšenice) u fluidiziranom sloju, koji zajedno s izvedenim zaključcima, te opisom mjernog

postupka i primijenjene mjerne linije, predstavljaju kvantitativne i pouzdane pokazatelje za praktičnu primjenu, npr. konstrukciju sušare za žitarice s fluidiziranim slojem. Dobiveni podaci također mogu poslužiti i za provjeru postojećih matematičkih modela, jer se, treba naglasiti, pokazalo da teorijske ekstrapolacije, bez čvrste osnove na izmjerenim podacima, mogu dovesti do potpuno pogrešnih zaključaka o ponašanju fluidiziranog sloja. Eksperimentalni rezultati pomažu u razvoju novih modela koji bi s većom pouzdanošću mogli simulirati zbivanja u fluidiziranom sloju, te bi njihova primjena, npr. u *CFD* (*Computational Fluid-Dynamics*) softverskim alatima, omogućila jednostavniju analizu zbivanja u sloju što bi onda olakšalo i konstruiranje sušionika s fluidiziranim slojem.

8.2 SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

Dobivene opće korelacijske jednadžbe (7-15) i (7-16) mogle bi biti i preciznije ukoliko bi ispitivanja obuhvatila veći broj različitih ulaznih stanja zraka (druge vlažnosti i temperature), te širi raspon brzina zraka i visine sloja. Za dobavu zraka bilo bi zgodno koristiti *Rootsovo* puhalo umjesto stapnog kompresora, čime bi se dobio konstantan maseni protok zraka i ulazna relativna vlažnost, što nije bilo moguće s korištenim kompresorom. Također bi se dobile veće vrijednosti ulaznog sadržaja vlage jer su one u provedenim mjerenjima bile vrlo niske zbog kondenzacije u tlačnom spremniku smještenom vani u okolišu. U suprotnom bi se ulazni zrak morao ovlaživati kako bi se dobio širi raspon vlažnosti. Ispitivanja bi mogla obuhvatiti i druge žitarice koje se mogu fluidizirati kao što su zob, heljda, proso, sirak, riža i kukuruz.

Dobivene korelacijske jednadžbe se baziraju na *Pageovom* empirijskom modelu i kao takve vrijede samo za određeni materijal koji se suši, primijenjene procesne parametre i određenu geometriju kolone za fluidizaciju. Daljnja istraživanja bi trebala ići u smjeru razvoja matematičkog modela (difuzijski, dvofazni) za sušenje zrnatih materijala (npr. žitarica) u šaržnim ili kontinuiranim sušionicima s fluidiziranim slojem, i njegovu primjenu u *CFD* softverskim alatima, što bi se onda moglo koristiti prilikom konstruiranja takvih uređaja.

Također bi još bilo potrebno napraviti i širu analizu utjecaja procesnih parametara na toplinsku efikasnost i analizirati mogućnost primjene recirkulacije toplog izlaznog zraka obzirom na vrlo niske efikasnosti bez rekuperacije topline.

9 LITERATURA

1. Geldard, D.: ***Types of fluidization***, Powder Technology 7, pp. 285-292, 1973.

2. Sutherland, J. W., Ghaly, T. F.: ***Rapid Fluid Bed Drying of Paddy Rice in the Humid Tropics***, Proceedings of 13th ASEAN Seminar on Grain Post-harvest Technology, Surabaya. Manila: South East Asia Co-operative Post-harvest Research and Development Programme, 1990.

3. Tumambing, J. A., Driscoll, R. H.: ***Modelling the Performance of a Continuous Fluidised Bed Dryer for Rapid Pre-drying of Paddy***, Proceedings of the 14th ASEAN Seminar on Grain Post-harvest Technology, Manila, Canberra: Australian Cenre for International Agricultural Research, 5-8 November 1991.

4. Dimattia, D. G., Amyotte, P. R. and Hamdullahpur, F.: ***Fluidized bed drying of large particles***, Transactions of the ASAE 39 (5), pp. 1745-1750, 1996.

5. Hajidavalloo, E. and Hamdullahpur, F.: ***Thermal analysis of a fluidized bed drying process for crops, Part I: Mathematical modeling***, Int. J. Energy Res. 2000; **24**: 791-807.

6. Hajidavalloo, E. and Hamdullahpur, F.: ***Thermal analysis of a fluidized bed drying process for crops, Part II: Experimental results and model verification***, Int. J. Energy Res. 2000, **24**: 809-820.

7. Soponronnarit, S., Pongtornkulpanich, A. and Prachayawarakorn, S.: ***Drying characteristics of corn in fluidized bed dryer***, Drying Technology-An International Journal, Vol. 15, no. 5, pp. 1603-1615, 1997.

8. Srinivasakannan, C. and Balasubramaniam, N.: ***An Experimental and Modeling Investigation on Drying of Ragi (Eleusine corocana) in Fluidized Bed***, Drying Technology, 24, pp. 1683-1689, 2006.

9. Srinivasakannan, C. and Balasubramaniam, N.: ***An investigation of drying of millet in fluidized beds***, Advanced Powder Technology 20, pp. 298-302, 2009.

10. Izadifar, M. and Mowla, D.: ***Simulation of a cross-flow continuous fluidized bed dryer for paddy rice***, Journal of Food Engineering 58, pp. 325-329, 2003.

11. Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Wetchacama, S. and Wutiwiwatchai, W.: ***Fluidised bed drying of soybeans***, Journal of Stored Products Research 37, pp. 133-151, 2001.

12. Markowski, M., Sobieski, W., Konopka, I., Tańska, M. and Białobrzewski, I.: ***Drying characteristics of barley grain dried in a spouted-bed and combined IR-convection driers***, Drying Technology 25, 1621-1632, 2007.

13. Sobieski, W.: ***Numerical analysis of sensitivity of eulerian multiphase model for a spouted-bed grain dryer***, Drying Technology 26, 1438-1456.

14. Bruce, D. M.: ***Exposed-layer barley drying: Three models fitted to new data up to 150 °C***, Journal of Agricultural Engineering Research, Volume 32, Issue 4, pp. 337-348, 1985.

15. Mandas, N. and Habte, M.: ***Numerical Simulation Static-Bed Drying of Barley***, *Biosystems Engineering* **82** (3), pp. 313-319, 2002.

16. Giner, S. A., and Calvelo, A.: ***Modeling of Wheat Drying in Fluidized Beds***, Journal of Food Science, 52(5), 1358-1363.

17. Giner, S. A. and deMichelis, A.: ***Evaluation of the thermal efficiency of wheat drying in fluidized beds: Influence of air temperature and heat recovery***, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 41 (1), pp. 11-23, 1988.

18. Davidson, J. F., Harrison, D.: ***Fluidization***, Academic Press, London, 1971.

19. Geldart, D.: ***Gas Fluidization Technology***, Wiley Interscience, 1986.

20. Kunii, D., Levenspiel, O.: ***Fluidization Engineering***, 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991.

21. Wilhelm, R. H., Kwauk, M.: Chem. Eng. Prog. **44** (1948) 201. ***Fluidization of solid particles***

22. Jackson, R.: *Trans. Inst. Chem. Eng.* 41 (1963) 13, 22 ***The mechanisms of fluidised beds.*** Part 1. The stability of the state of uniform fluidisation. Part 2. The motion of fully developed bubbles.

23. Murray, J. D.: *J. Fluid Mech.* **21** (1965) 465; **22** (1965) 57. ***On the mathematics of fluidization.*** Part 1. Fundamental equations and wave propagation. Part 2. Steady motion of fully developed bubbles.

24. Romero, J. B., Johanson, L. N.: ***Factors affecting fluidized bed quality***, *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, 58(38), 28, 1962.

25. Zenz, F. A.: ***Regimes of fluidized behavior***, in: Davidson, J. F. and Harrison, D., (eds.), Fluidization, Academic Press, London, 1971.

26. Rowe, P. N.: ***Experimental properties of bubbles***, in: Davidson, J. F. and Harrison, D., (eds.), Fluidization, Academic Press, London, 1971.

27. Abrahamson, A. R., Geldart, D.: ***Behavior of gas-fluidized beds of fine powders part I. Homogeneous expansion***, *Powder Tech.*, **26** (1980) 35-46.

28. Davidson, J. F. and Harrison, D.: ***Fluidized Particles***, Cambridge University Press, New York, 1963.

29. Botterill, J. S. M.: ***Fluid-bed heat transfer***, Academic Press, London, 1975.

30. Foust, A. S., Wenzel, L. A., Clump, C. W., Maus, L., Andersen, L. B.: ***Principles of Unit Operations***, Wiley, New York, 1960.

31. ***VDI*** Wärmeatlas, VDI Verlag, Düesseldorf, 1988.

32. Saxena, S. C., Ganzha, V. L.: ***Heat transfer to immersed surfaces in gas fluidized beds of large particles and powder characterization***, *Powder Technol.*, 39, 199, 1984.

33. Botterill, J. S. M., Teomman, Y., Yuregir, K. R.: ***The effect of temperature on fluidized bed behavior***, Chem. Eng. Commun. 15, 1982.

34. Leva, M.: ***Fluidization***, McGraw-Hill, New York, 1959.

35. Wen, C. Y., Yu, Y. H.: ***A generalized method for predicting minimum fluidization velocity***, AIChE J. 12, pp 610, 1966.

36. Baeyens, J., Geldart, D.: ***An investigation into slugging fluidized beds***, Chem. Eng. Sci. 29, pp 255, 1974.

37. Rumpf, H.: ***Mechaniche Verfahrenstechnik***, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1975.

38. Werther, J.: ***Effect of the gas distributor on the hydrodynamics of gas fluidized beds***, Ger. Chem. Eng. 1, pp 166, 1978.

39. Wollheim, R.: ***Pneumatischer Transport***, Leipzig, 1971.

40. Lee, G. S., Kim, S. D.: ***Pressure fluctuations in turbulent fluidized beds***, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 21, 515, 1988.

41. Saxena, S. C., Sathiyamoorthy, D., Sundaram, C. V.: ***Design principles and characteristics of distributors in gas fluidized beds***, in ***Transport Processes in Fluidized Bed Reactors***, Doraiswamy, L. K., Kulkarni, B. P., Eds., Wiley Eastern Ltd., New Delhi, 1987, chap. 6.

42. Sathiyamoorthy, D., Vogelpohl, A.: ***On the distributors and design criteria for gas-solid and gas-liquid-solid fluidized beds***, *Miner. Process. Extract. Metall. Rev.*, 12, 125, 1995.

43. Basu, P.: ***Fluidized Bed Boilers: Design and Application***, Ed., Pergamon Press, New York, 1984.

44. Richardson, J. F.: ***Incipient fluidization and particulate systems***, in: Davidson, J. F. and Harrison, D., (eds.): ***Fluidization***, Academic Press, London, 1971.

45. Hiby, J. W.: ***Untersuchungen über den kritischen Mindestdruckverlust des Anströmbodens bei Fluidalbetten (Fließbetten)***, Chem. Ing. Techn., 36 (1964) 228-229

46. Siegel, R.: ***Effect of distributor plate-to-bed resistance ratio on onset of fluidized bed channeling***, *A.I.Ch.E.J.*, 22 (1976) 590-592.

47. Shi, Y. F. and Fan, L. T.: ***Effect of distributor to bed resistance ratio on uniformity of fluidization***, *A.I.Ch.E.J.*, 30 (1984) 860-865.

48. Mathur, K. B., Gishler, P. E.: ***A technique for contacting gases with coarse solid particles***, *A.I.Chem.E.J.*, 1, 157-164, 1955.

49. Mathur, K. B.: ***Spouted beds***, in: Davidson, J. F. and Harrison, D., (eds.), Fluidization, Academic Press, London, 1971.

50. Ranz, W. E.: ***Friction and transfer coefficients for single particles and packed beds***, Chem Eng Progress 48, no. 5:247-253, 1952.

51. Zabrodsky, S. S., ***Hydrodynamics and Heat Transfer in Fluidized Beds***, MIT Press, Cambridge, MA, 1966.

52. Khan, A. R., Richardson, J. F.: Chem. Eng. Comm. 78, pp 111, 1989.

53. Baskakov, A. P. et al.: ***Heat Transfer to Objects Immersed in Fluidized Beds***, Powder Technol., Vol. 8, pp 273-282, 1973.

54. Botterill, J. S. M., Denloye, A. O. O.: ***Bed to surface heat transfer in fluidized bed of large particles***, Powder Technol., 19, 197, 1978.

55. George, S., Grace, J.: ***Heat Transfer to Horizontal Tubes in the Freeboard Region of a Gas Fluidized Bed***, *AIChE Journal.* Vol. 28, No. 5, pp. 759-765

56. Toomey, R. D., Johnstone, H. F.: ***Gas fluidisation of solid particles***, *Chem. Eng. Prog.*, 48, 220, 1952.

57. Rowe, P. N., Partridge, B. A., Proc Symp on Interaction Between Fluids and Particles, Inst Chem Eng London, 1962, pp 135.

58. Kato, K., Wen, C. Y.: ***Bubble assemblage model for fluidized bed catalytic reactors***, Chem Eng Sci 24:1351-1369, 1969.

59. Chavarie, C., Grace, J. R.: ***Performance analysis of a fluidized bed reactor. II. Observed reactor behavior compared with simple two-phase models***. Ind Eng Chem Fund 14:79-86, 1975.

60. Harrison, D., Davidson, J. F., De Kock, J. W.: ***On the nature of aggregative and particulate fluidisation***, Trans Inst Chem Engrs 39:202-211, 1961.

61. Cooke, M. J., Harris, W., Highley, J., Williams, D. F.: Intn Chem Engrs Symp Ser 30:21, 1968.

62. Rowe, P. N., Partridge, B. A.: ***An x-ray study of bubbles in fluidized beds***, Trans Inst Chem Eng 43:157-175, 1965.

63. Latham, R., Hamilton, C., Potter, O. E.: ***Back-mixing and chemical reaction in fluidised beds***, Brit Chem Eng 13:666-671, 1968.

64. Kunii D., Levenspiel O.: ***Fluidization Engineering***, New York, John Wiley, 1969.

65. Kobayashi, H., Arai, F., Sunugawa, T.: Chemical Engineering (Japan) 31:239, 1967.

66. Mujumdar, A. S.: ***Drying fundamentals***, in: Baker, C. G. J., (ed.), Industrial drying of foods, Blackie, London, 1997.

67. Okos, M. R., Narsimhan, G., Singh, R. K., Weitnauer, A. C.: ***Food Dehydration***, pp 437-562, in Heldman, D. R., Lund, D. B. (Eds.): Handbook of Food Engineering, Marcel Dekker, New York, 1992.

68. Zogzaz, N. P., Maroulis, Z. B., Marinos-Kouris, D.: ***Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs***, *Drying Technology – An International Journal*, 14, pp. 2225-2253, 1996.

69. Bošnjaković, F.: ***Nauka o toplini, II dio***, Tehnička knjiga, Zagreb, 1990.

70. Lewis, W. K.: ***The rate of drying of solid materials***, *J. Ind. Eng.*, 13(5): 427-432, 1921.

71. Henderson, S. M. and Pabis, S.: ***Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient***, *J. Agric. Eng. Res.*, 6: 169-174, 1961.

72. Page, G.: ***Factors Influencing the Maximum Rate of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers***, M. Sc. thesis, Purdue University, West Lafayette, 1949.

73. Sharma, A. D., Kunre, O. R., and Tolley, H. D.: ***Rough rice drying as a two compartment model***, Trans. ASAE, 27: 195-200, 1982.

74. ***SCXI™-1102/B/C User Manual***, 32-Channel Thermocouple Amplifier Modules, National Instruments Corporation (www.ni.com), Part Number 320975B-01, August 1997 Edition.

75. ***SCXI™-1300/1301 Terminal Block***, National Instruments Corporation (www.ni.com), Part Number 322715A-01, May 2000.

76. ***SCXI™-1122 User Manual***, Sixteen-Channel Isolated Transducer Multiplexer Module for Signal Conditioning, National Instruments Corporation (www.ni.com), September 1999 Edition, Part Number 320516B-01

77. ***SCXI™-1322 High-Voltage Terminal Block***, National Instruments Corporation (www.ni.com), Part Number 321925B-01, November 1999.

78. ***SCXI™-1308 32 Channel Current Input Terminal Block***, National Instruments Corporation (www.ni.com), Part Number 322203A-01, November 1998.

79. ***SCXI™***, SCXI Chassis User Manual, National Instruments Corporation (www.ni.com), Part Number 320423E-01, February 1999 Edition.

80. Katić, Z.: ***Sušenje i sušare u poljoprivredi***, Multigraf, 1997.

81. Mohsenin, N. N.: ***Physical Properties of Plant and Animal Materials***, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1970.

82. Alagusundaram, K., Jayas, D. S., and Muir, W. E.: ***Thermal conductivity of bulk barley lentils and peas***, *Trans. ASAE*, 34, 1784-1788, 1991.

83. Tavakoli, M., Tavakoli, H., Rajabipour, A., Ahmadi, H. and Gharib-Zahedi S. M. T.: ***Moisture-dependent physical properties of barley grains***, Int J Agric & Biol Eng, Vol 2 No 4, pp. 84-91, 2009.

84. Toftdahl, O. H.: ***Grain Drying***, Lyngby Denmark, Innovation Development Engineering Aps., 1987.

85. ASAE D245.5 OCT95, ***Moisture relationships of plant-based agricultural products***, 43rd ed., Standards, Engineering Practices, and Data (Am. Soc. Ag. Eng.), St. Joseph, MI, p. 512, 1996.

86. Kazarian, E. A. and Hall, C. W.: ***Thermal properties of grains***, *Trans. ASAE*, 8:33-38, 1965.

87. Galović, A., Boras, I.: ***Analiza krivulje napetosti kapljevina – para za vodu***, XXI. Zbornik radova, FSB-Zagreb, 1997.

88. Mujumdar, A. S.: ***Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying, Fundamental Principles of Drying***, Exergex Corp., Montreal, 2000.

89. Galović, A.: ***Termodinamika II***, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.

90. Brezinšćak, M.: ***Mjerna nesigurnost***, Tehnička enciklopedija, Hrvatski leksikografski zavod, str. 604-610.

91. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008

92. Reichmuth, A.: ***Estimating Weighing Uncertainty From Balance Data Sheet Specifications***, Mettler Tolledo, 2000.

93. Syahrul, S., Hamdullahpur, F., Dincer, I.: ***Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles***, Applied Thermal Engineering 22, 1763-1775, 2002.

94. Chen, G., Anderson, J. A., Bannister, P., Carrington, C. G.: ***Monitoring and Performance of a Commercial Grain Dryer***, Biosystems Engineering, 81 (1), 73 - 83, 2002.

95. Gallaher, G. L.: ***A method of determing the latent heat of agricultural crops***, *Agric. Eng.*, 32:34-38, 1951.

96. Cenkowski, S., Jayas, D. S., and Hao, D.: *Can. Agric. Eng.*, 34, 281, 1992.

97. Mujumdar, A. S.: ***Handbook of industrial drying***, Third Edition, CRC/Taylor & Francis, 2007

KRATKI ŽIVOTOPIS

Saša Mudrinić rođen je 08. svibnja 1972. godine u Vukovaru, Republika Hrvatska. Osnovnu školu završio je u Karlovcu 1987. godine nakon čega je upisao Gimnaziju u Karlovcu, smjer matematičko-informatički. Godine 1991. maturirao je, te se iste godine upisuje na studij strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirao je u siječnju 1998. godine, smjer: Procesno-energetski.

Od 01. rujna 1998. godine radi na Katedri za tehničku termodinamiku kao znanstveni novak na projektu 120 032: „Intenziviranje izmjene topline na izmjenjivačkim površinama“, voditelj prof. dr. sc. Antun Galović. Iste godine upisao je i poslijediplomski studij Procesno-energetskog smjera. Nakon odslušanih predavanja i položenih ispita obranio je magistarski rad pod nasovom „Analiza prijelaza topline između fluidiziranog sloja i uronjene zavojnice“ 2003. godine. Odmah po završenom magisteriju izabran je u suradničko zvanje asistenta, za znanstveno polje strojarstvo, znanstvenu granu opće strojarstvo (konstrukcije), ogranak Nauka o toplini u Zavodu za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku. U razdoblju od 2002-05. godine radio je i kao suradnik na projektu 120 043: „Izmjena topline i tvari pri kondenzaciji, ishlapljivanju i sušenju“.

Nastavni rad obuhvaća održavanje vježbi iz kolegija „Termodinamika I i II“, „Uvod u termodinamiku“ i „Osnove termodinamike A“. Znanstveni rad sadrži istraživanja na području fluidizacije, pri čemu je autor i koautor više znanstvenih radova. Radio je i na vođenju informatizacije Katedre za tehničku termodinamiku, kao i u grafičkoj (računalnoj) opremi objavljenih termodinamičkih udžbenika.

Govori engleski, a služi se njemačkim jezikom.

POPIS RADOVA

1. Magistarski rad

1.1 Mudrinić, S.: ***Analiza prijelaza topline između fluidiziranog sloja i uronjene zavojnice***, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2003.

2. Izvorni znanstveni i pregledni radovi u CC časopisima

2.1 Galović, A., Ferdelji, N., Mudrinić, S.: ***Izračunavanje specifične topline isparivanja vode korištenjem Clausius – Clayperonove jednadžbe***, Strojarstvo 52 (2010), 3, 343-348.

2.2 Galović, A., Mudrinić, S.: ***Analiza eksergijskih gubitaka kod istosmjernih i protusmjernih izmjenjivača topline***, Strojarstvo 47 (2005), 5-6, 177-184.

2.3 Galović, A., Andrassy, M., Mudrinić, S.: ***Analysis of temperal and spatial temperature gradients at pronouncedly fluctuating cooling conditions***, Journal de physique. IV. 120 (2004), 528-535.

2.4 Galović, A., Andrassy, M., Mudrinić, S.: ***Analiza koeficijenta prijelaza topline između fluidiziranog sloja i horizontalno uronjene cijevne zavojnice***, Strojarstvo 42 (2000), 1,2, 25-30.

3. Znanstveni radovi u drugim časopisima

3.1 Galović, A., Ferdelji, N., Mudrinić, S.: ***Entropy generation and exergy efficiency in adiabatic mixing of nitrogen and oxygen streams of different temperatures and environmental pressures***, Strojniški vestnik 56 (2010), 12, 817-822.

3.2 Galović, A., Virag, Z., Mudrinić, S.: ***Non-dimensional entropy analysis of condenser and/or evaporator type heat exchanger***, Transactions of FAMENA 27 (2003), 1, 1-11.

3.3 Galović, A., Andrassy, M., Mudrinić, S.: ***Analysis of Vapour Content at Isochoric Heating of the Vapour for Subcritical Specific Volumes***, Transactions of FAMENA 26 (2002), 1, 27-33.

4. Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom

4.1 Mudrinić, S., Halasz, B., Galović, A.: ***An Experimental Study of Fluidized Bed Drying of Pearl Barley***, Drying 2010 – Proceedings of the 17th International Drying Symposium (IDS 2010), Magdeburg, Germany, 3-6 Oktober 2010., Tsotsas, E., Metzger, T., Peglow, M. (ed.), Magdeburg, University of Magdeburg, 2010., 1736-1743.

4.2 Mudrinić, S., Andrassy, M., Tadić, M.: ***Heat Transfer Coefficient Analysis between Fluidised Bed and Horizontally Immersed Coil***, 4th European Thermal Sciences Conference, Birmingham, UK, 2004.

4.3 Galović, A., Andrassy, M., Mudrinić, S.: ***Heat Transfer in the Fluidized Bed at Superoptimal Fluidization***, 12th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry, Benko, I. (ed.), Budapest, Scientific Society of Measurement, Automation and Informatics, 2001., 311-317.

4.4 Galović, A., Andrassy, M., Mudrinić, S.: ***Quantitive Differences Between Relative Humidity and Saturation Degree of Moist Air***, 12th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry, Budapest, Scientific Society of Measurement, Automation and Informatics, 2001., 70-76.

4.5 Galović, A., Mudrinić, S.: ***Ohlađivanje cilindra u fluidiziranom sloju uzduh-čestice korunda***, Revitalization and Modernization of Production 2001. (RIM 2001), Jurković, M., Karabegović, I. (ur.), Bihać, University of Bihać, Faculty of Technical Engineering Bihać, 2001., 385-390.

4.6 Galović, A., Andrassy, M., Mudrinić, S.: ***Heat transfer coefficents at a pipe coil submerged to the fluidized bed***, 3rd European Thermal-Sciences Conference 2000, Hahne, E. W. P., Heidemann, W., Spindler, K. (ed.), Pisa, Italia, Edizioni ETS, 2000., 523-526.

5. Sažeci u zbornicima skupova

5.1 Galović, A., Andrassy, M., Mudrinić, S.: ***The analytical solution of the non-dimensional entropy generation in the lumped problem***, 15th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry (THERMO), Benko, I. (ed.), Budapest, 2007., 73-75.

5.2 Halasz, B., Tadić, M., Mudrinić, S.: ***Analysis of the entropy production in a counterflow cooling tower***, Proceedings of the 13th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry (THERMO), Budapest, 2003., 221-228.

SHORT BIOGRAPHY

Saša Mudrinić was born on May 8, 1972 in Vukovar, Croatia. He completed his primary education in 1987 and graduated from high school in 1991, both in Karlovac. Later same year, Mr. Mudrinić began undergraduate study at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Zagreb. He graduated in January of 1998, in Process and Power Engineering program.

After graduation, later same year, he started to work as junior assistant at the Chair for Technical Thermodynamics on Project 120 032: "Increasing Heat Transfer Intensity on Exchange Surfaces", led by Prof. Antun Galović, PhD. He also began postgraduate study, in Power Engineering program, and in 2003 he defended his master thesis titled "Heat Transfer Analysis between Fluidized Bed and Immersed Coil". Upon completion of the postgraduate study he was ellected assistant, in the field of engineering, scientific branch of general engineering (construction), a branch of Thermodynamics, in the Department of Thermodynamics, Thermall and Process Engineering. During the period from 2002-05. he worked on Project 120 043: "Heat and Mass Transfer during Condensation, Evaporation and Drying".

His education work involves participation in several subjects in the field of theoretical thermodynamics at the study of mechanical engineering and naval arhitecture: "Thermodynamics I and II", "Introduction to Thermodynamics" and "Fundamentals of Thermodynamics A", while his scientific research interests mainly include fluidization. He is author and coauthor of several scientific papers. He also worked on the computerization of the Chair for Technical Thermodynamics, as well on graphic (computer) design of published thermodynamics textbooks.

Saša Mudrinić, MSc, is of Croatian nationality. He speaks English, and uses German language.

LIST OF PAPERS

1. Master thesis

1.1 Mudrinić, S.: ***Heat Transfer Analysis between Fluidized Bed and Immersed Coil,*** Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture Zagreb, 2003.

2. Journal articles and review articles in CC journals

2.1 Galović, A., Ferdelji, N., Mudrinić, S.: ***Calculating the specific heat of water evaporation by using Clausius – Clayperon equation***, Strojarstvo 52 (2010), 3, 343-348.

2.2 Galović, A., Mudrinić, S.: ***Analysis of exergy losses in parallelflow and counterflow heat exchangers***, Strojarstvo 47 (2005), 5-6, 177-184.

2.3 Galović, A., Andrassy, M., Mudrinić, S.: ***Analysis of temperal and spatial temperature gradients at pronouncedly fluctuating cooling conditions***, Journal de physique. IV. 120 (2004), 528-535.

2.4 Galović, A., Andrassy, M., Mudrinić, S.: ***Heat transfer coefficient analysis between fluidized bed and horizontally imersed coil***, Strojarstvo 42 (2000), 1, 2, 25-30.

3. Scientific papers in other journals

3.1 Galović, A., Ferdelji, N., Mudrinić, S.: ***Entropy generation and exergy efficiency in adiabatic mixing of nitrogen and oxygen streams of different temperatures and environmental pressures***, Strojniški vestnik 56 (2010), 12, 817-822.

3.2 Galović, A., Virag, Z., Mudrinić, S.: ***Non-dimensional entropy analysis of condenser and/or evaporator type heat exchanger***, Transactions of FAMENA 27 (2003), 1, 1-11.

3.3 Galović, A., Andrassy, M., Mudrinić, S.: ***Analysis of Vapour Content at Isochoric Heating of the Vapour for Subcritical Specific Volumes***, Transactions of FAMENA 26 (2002), 1, 27-33.

4. Scientific conference papers with international peer-review

4.1 Mudrinić, S., Halasz, B., Galović, A.: ***An Experimental Study of Fluidized Bed Drying of Pearl Barley***, Drying 2010 – Proceedings of the 17th International Drying Symposium (IDS 2010), Magdeburg, Germany, 3-6 Oktober 2010., Tsotsas, E., Metzger, T., Peglow, M. (ed.), Magdeburg, University of Magdeburg, 2010., 1736-1743.

4.2 Mudrinić, S., Andrassy, M., Tadić, M.: ***Heat Transfer Coefficient Analysis between Fluidised Bed and Horizontally Immersed Coil***, 4th European Thermal Sciences Conference, Birmingham, UK, 2004.

4.3 Galović, A., Andrassy, M., Mudrinić, S.: ***Heat Transfer in the Fluidized Bed at Superoptimal Fluidization***, 12th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry, Benko, I. (ed.), Budapest, Scientific Society of Measurement, Automation and Informatics, 2001., 311-317.

4.4 Galović, A., Andrassy, M., Mudrinić, S.: ***Quantitive Differences Between Relative Humidity and saturation Degree of Moist Air***, 12th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry, Budapest, Scientific Society of Measurement, Automation and Informatics, 2001., 70-76.

4.5 Galović, A., Mudrinić, S.: ***Cylinder cooling in the air-corundum particles fluidized bed***, Revitalization and Modernization of Production 2001. (RIM 2001), Jurković, M., Karabegović, I. (ed.), Bihać, University of Bihać, Faculty of Techival Engineering Bihać, 2001., 385-390.

4.6 Galović, A., Andrassy, M., Mudrinić, S.: ***Heat transfer coefficients at a pipe coil submerged to the fluidized bed***, 3rd European Thermal-Sciences Conference 2000, Hahne, E. W. P., Heidemann, W., Spindler, K. (ed.), Pisa, Italia, Edizioni ETS, 2000., 523-526.

5. Abstracts in Book of abstracts

5.1 Galović, A., Andrassy, M., Mudrinić, S.: ***The analytical solution of the non-dimensional entropy generation in the lumped problem***, 15th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry (THERMO), Benko, I. (ed.), Budapest, 2007., 73-75.

5.2 Halasz, B., Tadić, M., Mudrinić, S.: ***Analysis of the entropy production in a counterflow cooling tower***, Proceedings of the 13th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry (THERMO), Budapest, 2003., 221-228.