

Primjena neuronskih mreža u toplinskoj obradi metala

Kocijan, Gordan

Master's thesis / Diplomski rad

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:098352>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering
and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Gordan Kocijan

Zagreb, 2012.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada:
Prof. dr. sc. Dubravko Majetić

Gordan Kocijan

Zagreb, 2012.

Izjava studenta:

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno i da odgovaram za sve što je u njemu napisano.

G. K.

Zahvala:

Ovom prilikom bih se zahvalio svom mentoru prof.dr.sc. Dubravku Majetiću te doc.dr.sc. Darku Landeku na odličnoj suradnji i bezrezervnoj pomoći.

Isto tako bih se zahvalio laborantu Laboratorija za toplinsku obradu Željku Kostanjskom te znanstvenom novaku mag.ing. Josipu Županu na pomoći pri snimanju krivulja hlađenja.

G. K.

SADRŽAJ

I.	POPIS SLIKA	I
II.	POPIS TABLICA	V
III.	POPIS OZNAKA I KRATICA	IX
1.	UVOD	1
2.	OPIS PROBLEMA	2
2.1	Kaljenje čelika i krivulje gašenja	2
2.2	Koncept matematičkog modela za analizu i predviđanje krivulja gašenja	12
2.3	Primjena regresijske analize u određivanju parametara gašenja	13
2.4	Primjena neuronske mreže u određivanju parametara gašenja	18
3.	PLAN I PROVEDBA POKUSA	26
4.	REZULTATI ISPITIVANJA I ANALIZA REZULTATA	30
5.	DISKUSIJA I PRIMJENA REZULTATA	43
5.1	Osnovni matematički model za predviđanje tehnoloških svojstava	43
5.2	Matematički model za predviđanje parametara gašenja ovisnih o koncentraciji i temperaturi vodene otopine polimera	66
5.3	Rezultati analize i predviđanja parametara gašenja neuronskom mrežom	83
5.4	Usporedba vrijednosti tehnoloških svojstava predviđenih regresijskim modelom, neuronskom mrežom i ispitanih pokusom	86
6.	ZAKLJUČAK	88
7.	LITERATURA	89
8.	PRILOG	91

I. POPIS SLIKA

Slika 1. Opći dijagram kaljenja čelika	2
Slika 2. Pojava Leidenfrost-ovog fenomena u kapljevitim sredstvima za gašenje: a) Promjena temperature na površini obratka ovisno o fazama gašenja; b) Promjena brzine gašenja na površini obratka ovisno o temperaturi površine obratka.	3
Slika 3. "Idealna" krivulja gašenja u TTT-dijagramu za kontinuirano kaljenje čelika s manje od 0,8%C("F" ... ferit, "P" ... perlit, "M" ... martenzit, "A _p " austenit) [3,12]	4
Slika 4. Shematski prikaz određivanja gornje kritične brzine gašenja (na primjeru kaljenja čelika s manje od 0,8%C) [1]	5
Slika 5. Izvedba mjerne sonde za snimanje krivulja gašenja prema normi ISO 9950 [8]	7
Slika 6. Dijagram postupka snimanja krivulje gašenja prema normi ISO 9950	8
Slika 7. Shematski prikaz određivanja brzine i intenziteta gašenja iz snimljene krivulje hlađenja [17]	8
Slika 8. Formalni opis problema snimanja krivulje gašenja s prikazom utjecajnih faktora na snimljenu krivulju [17]	10
Slika 9. Linearna regresija	13
Slika 10. Analiza varijance varijable Y za jedno opažanje [18]	15
Slika 11. Nelinearna regresija	17
Slika 12. Model umjetnog neurona	19
Slika 13. Tan-sigmoid prijenosna funkcija	20
Slika 14. Linearna prijenosna funkcija	20
Slika 15. Ilustracija postavljene neuronske mreže	24

Slika 16. Ugrijavanje mjerne sonde u električnoj komornoj peći:	
a) Mjerna oprema za snimanje krivulje hlađenja;	
b) Naprava za uranjanje mjerne sonde u ispitivano sredstvo za gašenje;	
c) Blok dijagram spajanja mjerne opreme.	28
Slika 17. Algoritam matematičkog modela za analizu krivulja hlađenja i određivanje tehnoloških svojstava sredstava za gašenje.....	40
Slika 18. Određivanje Leidenfrost-ove točke - linearna regresija na primjeru krivulje hlađenja 25%-tne otopine PAG-a u vodi temperature 20°C.....	41
Slika 19. Određivanje točke prijelaza iz faze mjehurastog vrenja u fazu konvekcije linearnom regresijom na primjeru krivulje hlađenja 25%-tne otopine PAG-a u vodi temperature 20°C	41
Slika 20. Algoritam matematičkog modela za predviđanje tehnoloških svojstava vodenih otopina polimera PAG na temelju zadane koncentracije polimera otopljenog u vodi.....	44
Slika 21. Ovisnost intenziteta gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 20°C	47
Slika 22. Ovisnost maksimalne brzine gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 20°C	49
Slika 23. Ovisnost temperature na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja o koncentraciji PAG u vodi na 20°C	49
Slika 24. Ovisnost brzine gašenja na 700°C o koncentraciji polimera PAG u vodi na 20°C	50
Slika 25. Ovisnost temperature hlađenja od 800 do 500°C o koncentraciji polimera PAG u vodi na 20°C.....	50
Slika 26. Ovisnost intenziteta gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 30°C	53
Slika 27. Ovisnost maksimalne brzine gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 30°C	53
Slika 28. Ovisnost temperature na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja o koncentraciji PAG u vodi na 30°C	54

Slika 29. Ovisnost brzine gašenja na 700°C o koncentraciji polimera PAG u vodi na 30°C	54
Slika 30. Ovisnost temperature hlađenja od 800 do 500°C o koncentraciji polimera PAG u vodi na 30°C	55
Slika 31. Ovisnost intenziteta gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 40°C	56
Slika 32. Ovisnost maksimalne brzine gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 40°C	58
Slika 33. Ovisnost temperature na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja o koncentraciji PAG u vodi na 40°C	58
Slika 34. Ovisnost brzine gašenja na 700°C o koncentraciji polimera PAG u vodi na 40°C	59
Slika 35. Ovisnost temperature hlađenja od 800 do 500°C o koncentraciji polimera PAG u vodi na 40°C	59
Slika 36. Ovisnost intenziteta gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 50°C	62
Slika 37. Ovisnost maksimalne brzine gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 50°C	62
Slika 38. Ovisnost temperature na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja o koncentraciji PAG u vodi na 50°C	63
Slika 39. Ovisnost brzine gašenja na 700°C o koncentraciji polimera PAG u vodi na 50°C	63
Slika 40. Ovisnost temperature hlađenja od 800 do 500°C o koncentraciji polimera PAG u vodi na 50°C	64
Slika 41. Intenzitet gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava	67
Slika 42. Maksimalna brzina gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava	69
Slika 43. Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava	71

Slika 44. Brzina gašenja na 700°C – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava	73
Slika 45. Vrijeme gašenja od 800 na 500°C – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava	75
Slika 46. Intenzitet gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 15%-tnoj koncentraciji polimera PAG	78
Slika 47. Maksimalna brzina gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 15%-tnoj koncentraciji polimera PAG	78
Slika 48. Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 15%-tnoj koncentraciji polimera PAG.....	79
Slika 49. Brzina gašenja na 700°C – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 15%-tnoj koncentraciji polimera PAG	79
Slika 50. Vrijeme gašenja od 800 na 500°C – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 15%-tnoj koncentraciji polimera PAG	80
Slika 51. Intenzitet gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 25%-tnoj koncentraciji polimera PAG	80
Slika 52. Maksimalna brzina gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 25%-tnoj koncentraciji polimera PAG	81
Slika 53. Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 25%-tnoj koncentraciji polimera PAG.....	81
Slika 54. Brzina gašenja na 700°C – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 25%-tnoj koncentraciji polimera PAG	82
Slika 55. Vrijeme gašenja od 800 na 500°C – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 25%-tnoj koncentraciji polimera PAG	82

II. POPIS TABLICA

Tablica 1. Oprema i radni parametri postupka snimanja krivulja hlađenja prema važećim svjetskim normama [7-10]	6
Tablica 2. Karakteristike ulja za kaljenje za kalibraciju i usporedbu točnosti i preciznost snimanja krivulja hlađenja [7-10]	6
Tablica 3. Parametri opreme koji utječu na snimljenu krivulju gašenja [17]	11
Tablica 4. Algoritmi učenja dostupni u <i>Neural Network Toolbox-u</i> [21]	21
Tablica 5. Tijek gašenja mjerne sonde Ø12,5x60 mm u 10%-tnoj vodenoj otopini PAG	24
Tablica 6. Plan ispitivanja krivulja hlađenja čiste mirne vode i vodenih otopina polimera PAG namijenjen razvoju matematičkog modela	26
Tablica 7. Plan ispitivanja krivulja hlađenja čiste mirne vode i vodenih otopina polimera polimera PAG sobne temperature namijenjen verifikaciji matematičkog modela	27
Tablica 8. Tijek gašenja mjerne sonde Ø12,5x60 mm u 10%-tnoj vodenoj otopini PAG	29
Tablica 9. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodnih otopina PAG temperature 20°C namijenjene postavljanju matematičkog modela	30
Tablica 10. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodenih otopina PAG temperature 20°C namijenjene verifikaciji matematičkog modela	32
Tablica 11. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodnih otopina PAG temperature 30°C namijenjene postavljanju matematičkog modela	33
Tablica 12. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodenih otopina PAG temperature 30°C namijenjene verifikaciji matematičkog modela	34

Tablica 13. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodnih otopina PAG temperature 40°C namijenjene postavljanju matematičkog modela	35
Tablica 14. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodenih otopina PAG temperature 40°C namijenjene verifikaciji matematičkog modela	36
Tablica 15. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodnih otopina PAG temperature 50°C namijenjene postavljanju matematičkog modela	37
Tablica 16. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodenih otopina PAG temperature 50°C namijenjene verifikaciji matematičkog modela	38
Tablica 17. Rezultati regresijske analize ovisnosti tehnoloških svojstava vodenih otopina polimera PAG temperature 20°C o koncentraciji polimera	43
Tablica 18. Rezultati regresijske analize ovisnosti tehnoloških svojstava vodenih otopina polimera PAG temperature 30°C o koncentraciji polimera	45
Tablica 19. Rezultati regresijske analize ovisnosti tehnoloških svojstava vodenih otopina polimera PAG temperature 40°C o koncentraciji polimera	46
Tablica 20. Rezultati regresijske analize ovisnosti tehnoloških svojstava vodenih otopina polimera PAG temperature 50°C o koncentraciji polimera	46
Tablica 21. Usporedba tehnoloških svojstava i njihovo međusobno relativno odstupanje za vodenu otopinu polimera PAG temperature 20°C.....	48
Tablica 22. Usporedba tehnoloških svojstava i njihovo međusobno relativno odstupanje za vodenu otopinu polimera PAG temperature 30°C.....	52
Tablica 23. Usporedba tehnoloških svojstava i njihovo međusobno relativno odstupanje za vodenu otopinu polimera PAG temperature 40°C.....	57
Tablica 24. Usporedba tehnoloških svojstava i njihovo međusobno relativno odstupanje za vodenu otopinu polimera PAG temperature 50°C.....	61
Tablica 25. Koeficijenti polinoma koji opisuje intenzitet gašenja kao funkciju koncentracije polimera PAG i temperature sredstva za gašenje.....	66

Tablica 26. Koeficijenti polinoma koji opisuje maksimalnu brzinu gašenja kao funkciju koncentracije polimera PAG i temperature sredstva za gašenje	68
Tablica 27. Koeficijenti polinoma koji opisuje temperaturu pojave maksimalne brzine gašenja kao funkciju koncentracije polimera PAG i temperature sredstva za gašenje	70
Tablica 28. Koeficijenti polinoma koji opisuje brzinu gašenja na 700°C kao funkciju koncentracije polimera PAG i temperature sredstva za gašenje	72
Tablica 29. Koeficijenti polinoma koji opisuje vrijeme gašenja od 800 na 500°C kao funkciju koncentracije polimera PAG i temperature sredstva za gašenje	74
Tablica 30. Eksperimentalne i modelom dobivene vrijednosti tehnoloških svojstava na koncentracijama polimera PAG od 15 i 25% korištenih u cilju verifikacije dobivenih matematičkih modela	76
Tablica 31. Usporedba tehnoloških svojstava koja daje neuronska mreža s eksperimentalno određenima, te njihovo međusobno dostupanje za 1C3, 4B3 i 7C3	84
Tablica 32. Tehnološka svojstva nekih laboratorijski neispitanih vodenih otopina polimera PAG.....	85
Tablica 33. Usporedba tehnoloških svojstava koja daju neuronska mreža i regresijski model s eksperimentalno određenima, za 1C3, 4B3 i 7C3	87

PRILOG

Tablica I.	Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 20°C određena primjenom matematičkog modela (slika 9) namijenjena daljnjoj razradi modela za predviđanje svojstava kod proizvoljno zadane koncentracije polimera.....	92
Tablica II.	Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 20°C određena primjenom matematičkog modela (slika 9) namijenjena ispitivanju i verifikaciji predloženog modela za predviđanje tehnoloških svojstava otopina PAG	93
Tablica III.	Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 30°C određena primjenom matematičkog modela (slika 9) namijenjena daljnjoj razradi modela za predviđanje svojstava kod proizvoljno zadane koncentracije polimera.....	94
Tablica IV.	Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 30°C određena primjenom matematičkog modela (slika 9) namijenjena ispitivanju i verifikaciji predloženog modela za predviđanje tehnoloških svojstava otopina PAG	95
Tablica V.	Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 40°C određena primjenom matematičkog modela (slika 9) namijenjena daljnjoj razradi modela za predviđanje svojstava kod proizvoljno zadane koncentracije polimera.....	96
Tablica VI.	Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 40°C određena primjenom matematičkog modela (slika 9) namijenjena ispitivanju i verifikaciji predloženog modela za predviđanje tehnoloških svojstava otopina PAG	97
Tablica VII.	Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 50°C određena primjenom matematičkog modela (slika 9) namijenjena daljnjoj razradi modela za predviđanje svojstava kod proizvoljno zadane koncentracije polimera.....	98
Tablica VIII.	Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 50°C određena primjenom matematičkog modela (slika 9) namijenjena ispitivanju i verifikaciji predloženog modela za predviđanje tehnoloških svojstava otopina PAG	99

III. POPIS OZNAKA I KRATICA

Oznaka	Opis	Jedinica
ϑ	Temperatura,	$^{\circ}\text{C}$
t	Vrijeme,	s
v_{hl}	Brzina hlađenja,	$^{\circ}\text{C/s}$
$v_{sred, 700-300}$	Brzina gašenja na temperaturi od 700 do 300 $^{\circ}\text{C}$,	$^{\circ}\text{C/s}$
Δt_{sred}	Vrijeme gašenja od na temperature 700 do 300 $^{\circ}\text{C}$,	s
V/A	Omjer volumena i površine mjerne sonde,	m
λ	Toplinska vodljivost mjerne sonde,	W/mK
c	Specifični toplinski kapacitet mjerne sonde,	J/kgK
$\vartheta_{peć}$	Temperatura peći,	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta \vartheta_{peći}$	Najveća razlika temperature u unutrašnjosti peći,	$^{\circ}\text{C}$
t_{gr}	Vrijeme grijanja mjerne sonde do temperature austenitizacije,	s
$\vartheta_{sredstva}$	Temperatura sredstva za gašenje,	$^{\circ}\text{C}$
v_{gib}	Brzina gibanja sredstva za gašenje,	m/s
H	Intenzitet gašenja	
v_{max}	Maksimalna brzina gašenja,	$^{\circ}\text{C/s}$
ϑ_{max}	Temperatura pojavljivanja maksimalne brzine gašenja,	$^{\circ}\text{C}$
v_{700}	Brzina gašenja na temperaturi 700 $^{\circ}\text{C}$,	$^{\circ}\text{C/s}$
$t_{8/5}$	Vrijeme hlađenja na temperaturi od 800 do 500 $^{\circ}\text{C}$,	s
$v_{p/m}$	Brzina gašenja u točki prijelaza iz parne faze u mjehurasto vrenje,	$^{\circ}\text{C/s}$
$\vartheta_{p/m}$	Temperatura u točki prijelaza iz parne faze u mjehurasto vrenje,	$^{\circ}\text{C}$
$v_{m/k}$	Brzina gašenja u točki prijelaza iz mjehurastog vrenja u konvekciju,	$^{\circ}\text{C/s}$
$\vartheta_{m/k}$	Temperatura u točki prijelaza iz mjehurastog vrenja u konvekciju,	$^{\circ}\text{C}$
v_{sr_p}	Srednja brzina gašenja tijekom faze parnog omotača,	$^{\circ}\text{C/s}$
v_{sr_m}	Srednja brzina gašenja tijekom faze mjehurastog vrenja,	$^{\circ}\text{C/s}$
v_{sr_k}	Srednja brzina gašenja tijekom faze konvekcije,	$^{\circ}\text{C/s}$
w	Koncentracija polimera PAG u vodi,	%
Y_i	Izlaz regresijskog modela	

X_i	Ulaz u regresijski model
β_i	Koeficijenti regresijskog modela
e	Vrijednost slučajnog člana
$\hat{Y}_i$	Očekivani izlaz regresijskog modela
$\hat{\beta}_1$	Očekivani koeficijenti regresijskog modela
$\hat{\sigma}_e$	Standardna greška regresije
$\hat{V}_i$	Koeficijent varijacije regresije
R^2	Koeficijent determinacije
A^2	Koeficijent alijenacije
$\hat{X}_i$	Zavisna varijabla
$\hat{\alpha}_1$	Koeficijenti regresijskog pravca
$\bar{X}$	x koordinata presjecišta regresijskih pravaca
$\bar{Y}$	y koordinata presjecišta regresijskih pravaca

Kratika	Opis
ISO	International Organization for Standardization
AFNOR	The Association Francaise de Normalisation
JIS	Japanese Industrial Standards
GB	Guóbiāo (kineska nacionalna norma)
ASTM	American Society for Testing and Materials
TTT	Time-Temperature-Transformation
PAG	polialkilel glikol (<i>Polyalkylene Glycol</i>)
CCT	Continuous Cooling Transformation
ST	Zbroj kvadrata ukupnih odstupanja
SP	Zbroj kvadrata protumačenih odstupanja
SR	Zbroj kvadrata neprotumačenih odstupanja

SAŽETAK

U toplinskoj obradi metala, a posebno u postupku kaljenja čelika, za postizanje željene mikrostrukture i svojstava nužan je izbor optimalnog sredstva za gašenje. Ovaj izbor provodi se traženjem sredstva za gašenje koje svojim tehnološkim svojstvima i krivuljom hlađenja zadovoljava kriterije definirane na temelju dijagrama faznih pretvorbi čelika pri kontinuiranom hlađenju. U radu je postavljen matematički model za analizu podataka s eksperimentalno snimljene krivulje hlađenja kapljevityh sredstava za gašenja. Snimanje krivulja gašenja provedeno je prema normi ISO 9950. Model omogućuje određivanje tehnoloških svojstava sredstava za gašenje s Leidenfrost-ovim fenomenom: vode, ulja za kaljenje i vodenih otopina polimera PAG. Postavljeni matematički model predviđa tehnološka svojstva za vodene otopine polimera PAG u rasponu koncentracija do 30% PAG-a na proizvoljno izabranim temperaturama sredstva za gašenje. Predloženi i eksperimentalno verificirani matematički model može se koristiti u pripremi postupaka toplinske obrade, u računalnim simulacijama postupka kaljenja čelika, te u tehnološkoj kontroli sredstava za gašenje u industriji. Postavljena je i neuronska mreža koja aproksimira čitav raspon krivulja gašenja u vodenim otopinama polimera PAG.

Ključne riječi: gašenje, ISO 9950, analiza krivulja hlađenja, Leidenfrost-ov fenomen, vodene otopine polialkilen glikola (PAG), neuronska mreža

TEORIJSKI DIO

1. UVOD

Toplinska je obrada je postupak u tijeku kojeg se obradak namjerno podvrgava temperaturno-vremenskim ciklusima ugrijavanja i hlađenja sa svrhom postizanja željene mikrostrukture i svojstava [1, 2]. Iz ove definicije slijedi da će glavni parametri postupaka toplinske obrade biti temperatura i vrijeme (trajanje postupka), te izvedeni parametar brzina grijanja, odnosno hlađenja obratka. Ispitivanja provedena u ovom radu usmjerit će se na fazu hlađenja i problem ispitivanja karakteristika i tehnoloških svojstava sredstava za hlađenje u postupcima kaljenja čelika. U postupcima kaljenja, faza hlađenja uobičajeno se naziva "gašenje", a mediji za njenu provedbu "sredstvima za gašenje". Uobičajena sredstva za gašenje u postupku kaljenja čelika jesu: voda, ulje za kaljenje, vodene otopine polimera, solne kupke, zrak i inertni tehnički plinovi [1-6].

Faza gašenja austenitiziranog čelika omogućuje postizanje željenih mehaničkih i triboloških svojstava čelika, ali istodobno uzrokuje i pojavu najvećih zaostalih naprezanja u obratku uz moguću pojavu pukotina. Stoga je izbor odgovarajućeg sredstva za gašenje i metode gašenja značajan korak u pripremi postupka kaljenja čelika koji zahtijeva usporedbu nekoliko tehnoloških svojstava sredstava određenih na temelju snimanja krivulje hlađenja.

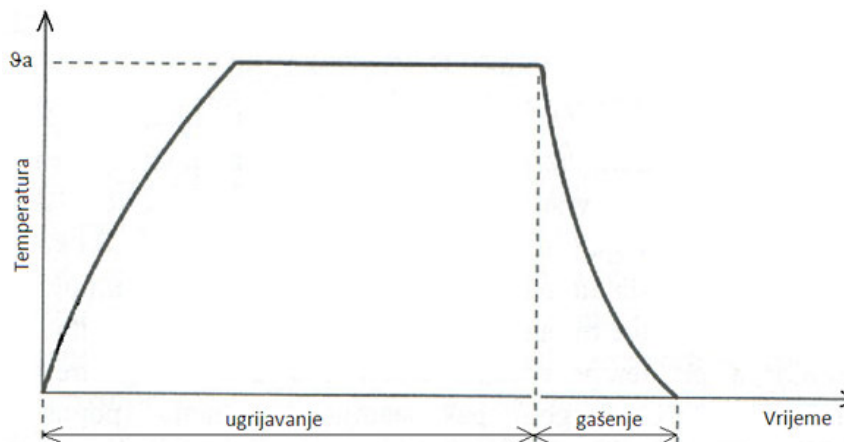
Snimanje temperaturno-vremenskih krivulja hlađenja sredstava za gašenje obuhvaćeno je normama: ISO 9950, AFNOR NFT 60778, JIS K 2242, ZB E 45003-88 i ASTM D6200 [6-10]. One propisuju oblik mjerne sonde, uvjete snimanja i određivanje osnovnih tehnoloških svojstava sredstva za gašenje. Međutim iz snimljene krivulje hlađenja konkretnog sredstva mogu se odrediti i dodatna tehnološka svojstva primjenljiva u matematičkim modelima za predviđanje mikrostrukture i mehaničkih svojstava kaljenih obradaka.

Određivanje osnovnih i dodatnih tehnoloških svojstava sredstava za gašenje na temelju snimljene krivulje hlađenja zahtijeva postavljanje odgovarajućeg matematičkog modela s primjenom numeričke i regresijske analize nelinearnih temperaturno-vremenskih krivulja, koji će se opisati i eksperimentalno provjeriti u radu.

2. OPIS PROBLEMA

2.1 Kaljenje čelika i krivulje gašenja

Kaljenje je toplinska obrada u kojoj se čelik ugrijava na temperaturu austenitizacije ($9a$), drži na toj temperaturi i potom hladi brzinom većom od kritične, s ciljem postizanja martenzitne strukture. Temeljna svrha kaljenja čelika je postizanje maksimalno moguće tvrdoće ovisno o udjelu ugljika u čeliku, te postizanje što jednoličnijeg prokaljenja tj. što jednoličnije tvrdoće po poprečnom presjeku obradka. Parametri kaljenja, kao i svake toplinske obrade, su temperatura i vrijeme, a postupak kaljenja sastoji se od faze ugrijavanja i faze gašenja. Na slici 1 prikazan je opći dijagram kaljenja čelika, s glavnim fazama i parametrima postupka. Postupak kaljenja sastoji se od ugrijavanja na temperaturu austenitizacije i progrijavanja, držanja pri toj temperaturi (u svrhu otapanja ugljika i legirajućih elemenata u austenitu) te gašenja (u svrhu postizanja martenzitne mikrostrukture). [1]

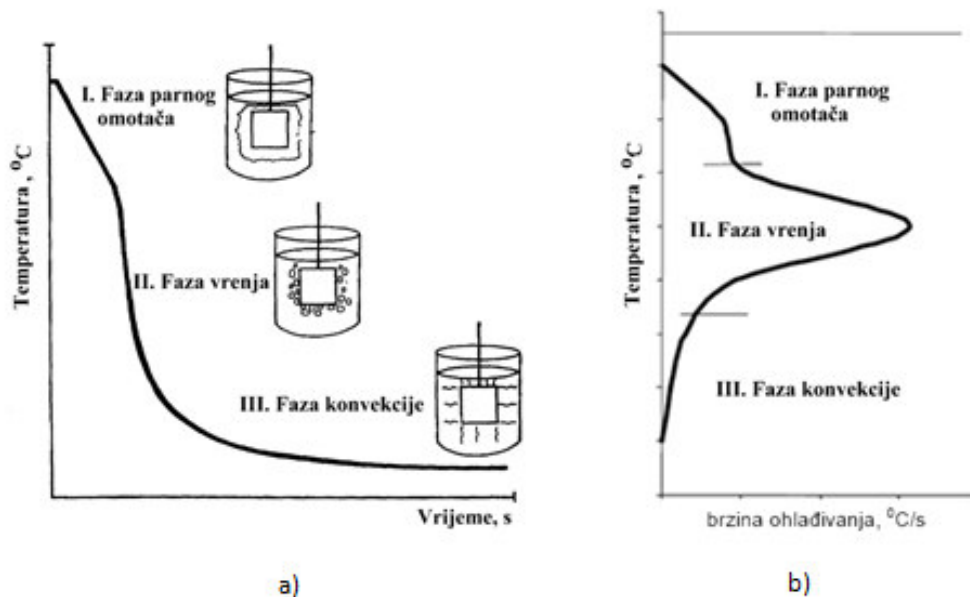


Slika 1: Opći dijagram kaljenja čelika

Faza gašenja austenitiziranog čelika kritična je za postizanje traženih mehaničkih i triboloških svojstava u kaljenom stanju, ali istodobno u ovoj fazi nastaju i najveća zaostala naprezanja i najveća je opasnost od pojave pukotina. Zato je izbor odgovarajućeg sredstva za gašenje kritičan dio pripreme postupka otvrdnjavanja, posebno u postupku kaljenja. Pri izboru sredstva za gašenje treba izabrati "najblaže" sredstvo za gašenje koje će još uvijek dati potpuno martenzitnu mikrostrukturu.

Gašenje obradaka s visokih temperatura austenitizacije (kod većine čelika iznad 700 °C) u vodi, ulju ili vodenim otopinama polimera, pokazuje pojavu tri karakteristične faze, nazvanu "Leidenfrost-ov fenomen" (slika 2) [3-7, 12-16]:

- I. Faza parnog omotača (engl. vapor blanket),
 - nastaje na početku gašenja kad se oko obratka stvara parni omotač koji sprječava odvođenje topline;
- II. Faza mjehurastog vrenja (engl. nucleate boiling),
 - nastaje nakon raskidanja parnog omotača uz postizanje najvećih gustoća odvedenog toplinskog toka i najvećih brzina hlađenja;
- III. Faza hlađenja konvekcijom (engl. convective cooling),
 - nastaje pri završetku gašenja kad se vrijednost temperature obratka spusti do temperature vrelišta sredstva za gašenje



Slika 2. Pojava Leidenfrost-ovog fenomena i njegove faze u kapljevitim sredstvima za gašenje:

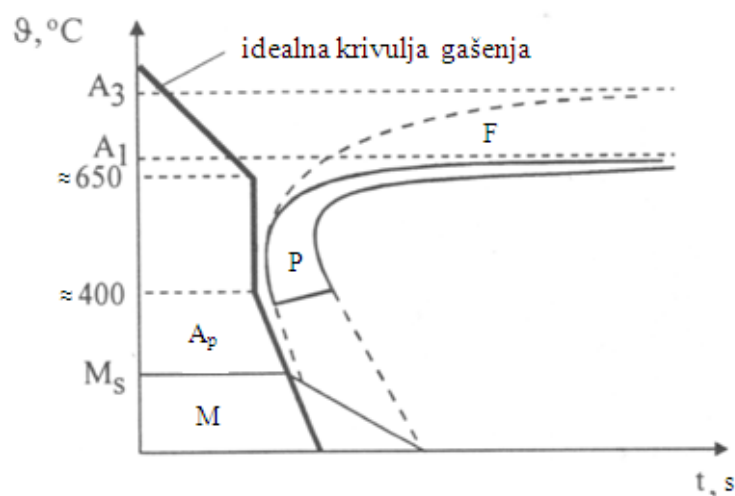
- a) Promjena temperature na površini obratka tijekom gašenja;
- b) Promjena brzine gašenja ovisne o temperaturi površine obratka.

Tijekom faze parnog omotača površinska je temperatura obratka tek nešto ispod temperature austenitizacije, pa dolazi do isparavanja sredstva za gašenje i formiranja stabilnog omotača oko obratka (slika 2). Ovaj omotač djeluje kao toplinski izolator pa je brzina hlađenja za trajanja ove faze relativno mala. Trajanje faze parnog omotača najviše ovisi o sastavu sredstva za gašenje i obliku obratka. Temperatura iznad koje dolazi do pojave stabilnog parnog omotača naziva se Leidenfrost-ova temperatura ($\vartheta_{p/m}$).

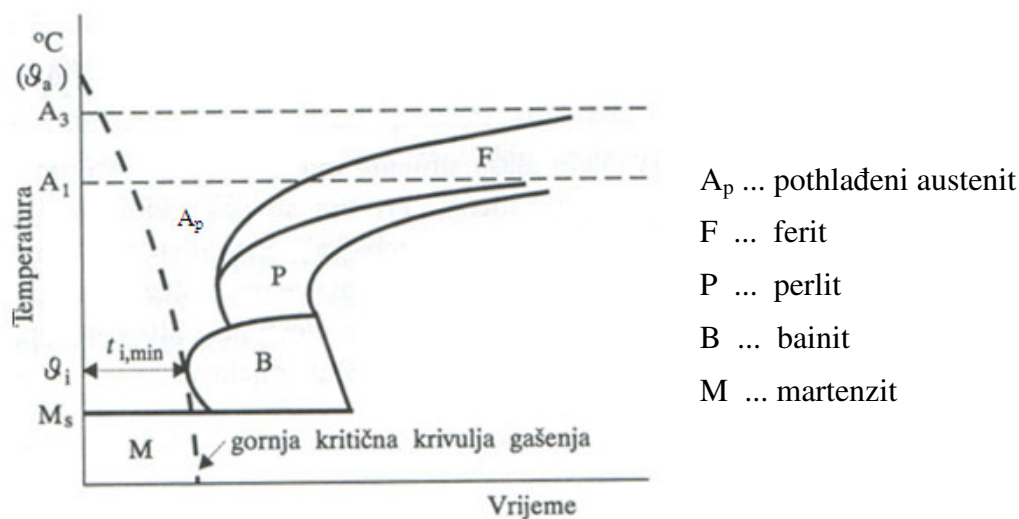
Kada se površinska temperatura snizi ispod Leidenfrost-ove temperature dolazi do probijanja parnog omotača i proces gašenja ulazi u fazu mjehurastog vrenja. Pri kontaktu sredstva za gašenje s površinom dolazi do njegovog trenutnog isparivanja. Ono u obliku mjehurića napušta površinu obratka što uzrokuje snažnu konvekciju kojom se postiže velika gustoća toplinskog toka i velika brzina hlađenja. Brzina hlađenja dostiže svoj maksimum, a kako temperatura obratka pada tako i mjehurasto vrenje postaje sve slabije te na kraju iščezava.

Kad nastupi direktni kontakt kapljevito sredstva za gašenje i površine obratka prijenos topline je moguć jedino mehanizmom konvekcije. Gustoća toplinskog toka s obratka u sredstvo za gašenje u ovoj fazi je mala, a određena je vrstom konvekcije (prijelaz topline slobodnom ili prisilnom konvekcijom) i viskoznošću sredstva za gašenje.

Glavni cilj faze gašenja u postupku kaljenja čelika je postizanje željene martenzitne mikrostrukture, visoke tvrdoće i čvrstoće s minimalnim zaostalim naprezanjima i deformacijama. Stoga se gašenje nastoji što više približiti idealnoj krivulji gašenja shematski prikazanoj na slici 3, odnosno treba primijeniti sredstvo za gašenje čija je srednja brzina hlađenja veća ili jednaka gornjoj kritičnoj brzini gašenja određenoj prema slici 4 te jednadžbama (1) i (2).



Slika 3. "Idealna" krivulja gašenja u TTT-dijagramu za kontinuirano kaljenje čelika s manje od 0,8 %C ("F" ... ferit, "P" ... perlit, "M" ... martenzit, "A_p" austenit) [3,12]



Slika 4. Shematski prikaz određivanja gornje kritične brzine gašenja (na primjeru kaljenja čelika s manje od 0,8%C) [1]

$$v_{kg} \approx \frac{\vartheta_a - \vartheta_i}{t_{i,min}} \quad (1)$$

$$v_{hl} > v_{kg} \quad (2)$$

v_{kg} – gornja kritična brzina gašenja, K/s, °C/s

ϑ_a – temperatura austenitizacije, °C

$t_{i,min}$ – minimalno trajanje inkubacije pothlađenog austenita, s

ϑ_i – temperatura na kojoj je trajanje inkubacije pothlađenog austenita najkraće, °C

Kaljenje čelika prema zahtjevu izraženom jednadžbom (2) uz hlađenje prema idealnoj krivulji prikazanoj na slici 2, za različite čelike nije moguće postići samo s jednim sredstvom za gašenje, već je nužan izbor optimalnog sredstva i metode gašenja za konkretni čelik, na temelju njegovog dijagrama faznih pretvorbi pri kontinuiranom hlađenju (tzv. kontinuirani TTT dijagram).

U tablicama 1 i 2 usporedene su mjerne sonde i metode snimanja krivulja hlađenja kapljeviti sredstava za gašenje prema važećim svjetskim normama. Navedene su glavne metode ispitivanja: materijal i dimenzije mjerne sonde, referentno ulje za kaljenje, dimenzije posude za hlađenje, volumen i temperatura referentnog ulja te temperatura austenitizacije sonde.

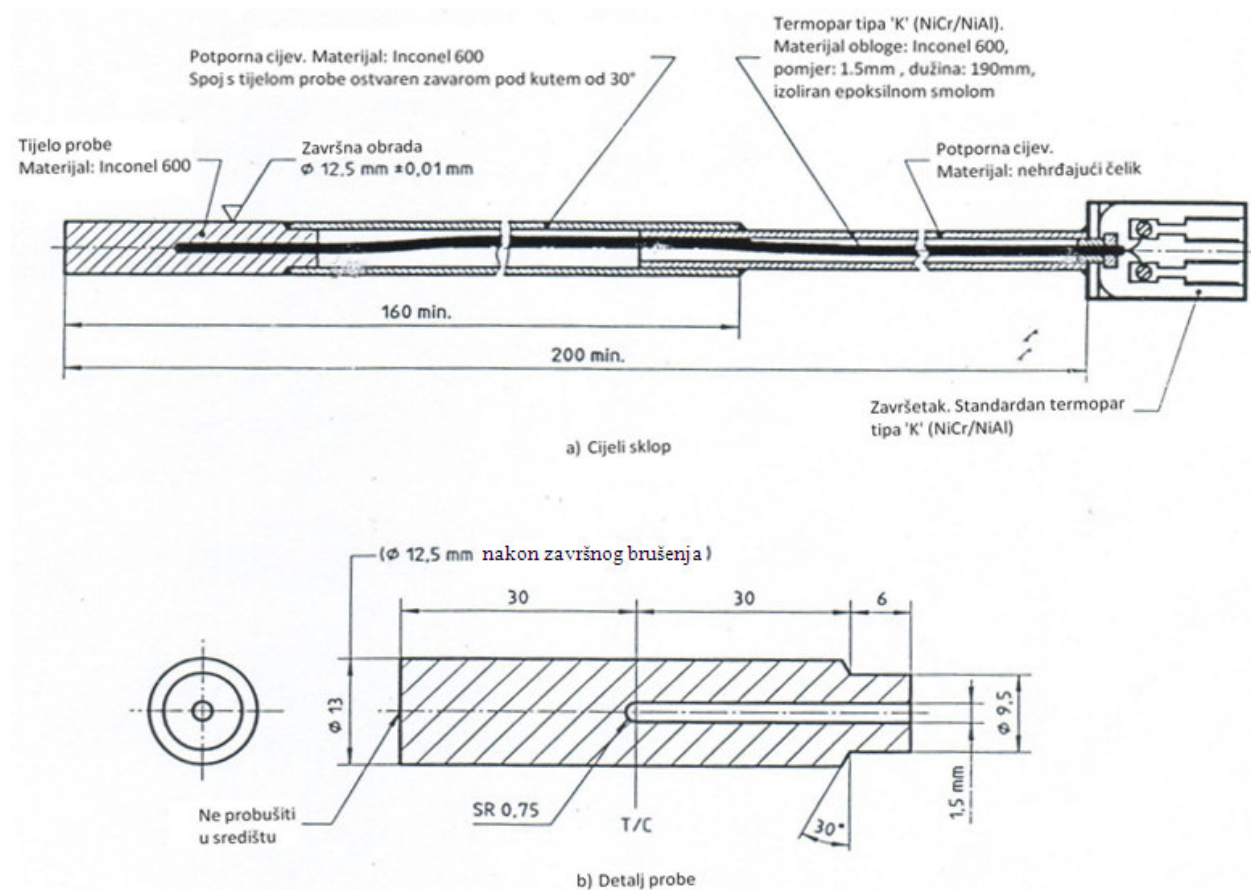
Tablica 1. Oprema i radni parametri za snimanje krivulja hlađenja prema važećim svjetskim normama [7-10]

Karakteristike metode ispitivanja	ISO 9950 (međunarodna norma)	AFNOR (francuska norma)	JIS (japanska norma)	GB (kineska norma)	ASTM (američka norma)
Materijal sonde	Inconel 600	Srebro (99,999% čisto)	Srebro (99,99% čisto)	Srebro (99,96% čisto)	Inconel 600
Dimenzije sonde	12,5 x 60 mm	16 x 48 mm	10 x 30 mm	10 x 30 mm	12,5 x 60 mm
Referentno ulje za kaljenje	Pogledati tablicu 2	Pogledati tablicu 2	Dioctyl phthalate	Dioctyl phthalate	Pogledati tablicu 2
Posuda za hlađenje	Ø 115 ± 5 mm	Ø 99 x 138 mm	Volumen 300 ml (s grijačem)	Volumen 300 ml (s grijačem)	Ø 115 ± 5 mm
Volumen ulja	2000 ml	800 ml	250 ml	250 ml	2000 ml
Temperatura ulja	40°C ± 2°C	50°C ± 2°C	80°C, 120°C, 160°C	80°C ± 2°C	40°C ± 2°C
Temperatura ugrijavanja sonde	850°C ± 5°C	800°C ± 5°C	810°C ± 5°C	810°C ± 5°C	850°C ± 5°C

Tablica 2. Svojstva referentnog ulja za kaljenje za kalibraciju mjerne sonde i metode snimanja krivulja hlađenja [7-10]

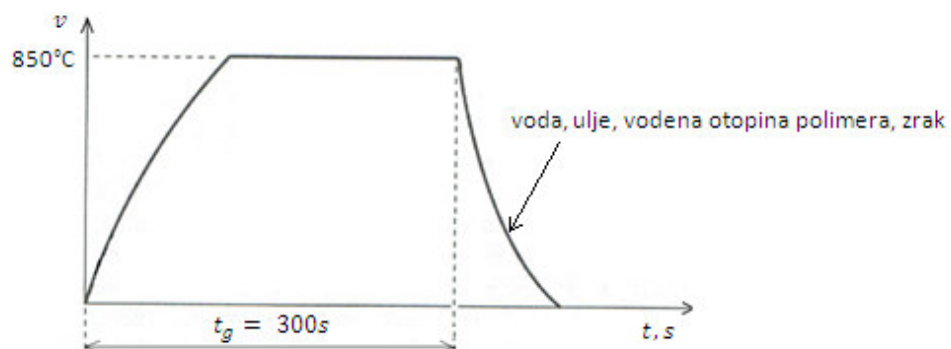
Fizikalna svojstva referentnog ulja za kaljenje	
Kinematička viskoznost na 40°C, cSt*	19,0 -23,0
Kinematička viskoznost na 100°C, cSt*	3,9 – 4,4
Indeks kinematičke viskoznosti	95 – 105
Gustoća na 15°C, kg/l	0,855 – 0,870
Točka zapaljenja, °C	190 – 210
*1cSt = 10 ⁻⁶ m ² /s	

Normom ISO 9950 korištenom u radu, propisana je konstrukcija i izrada mjerne sonde od legure Inconel 600, dužine 60 mm i promjera 12,5mm (slika 5). Sonda je prvenstveno namijenjena snimanju krivulja hlađenja u mirnim sredstvima za gašenje.

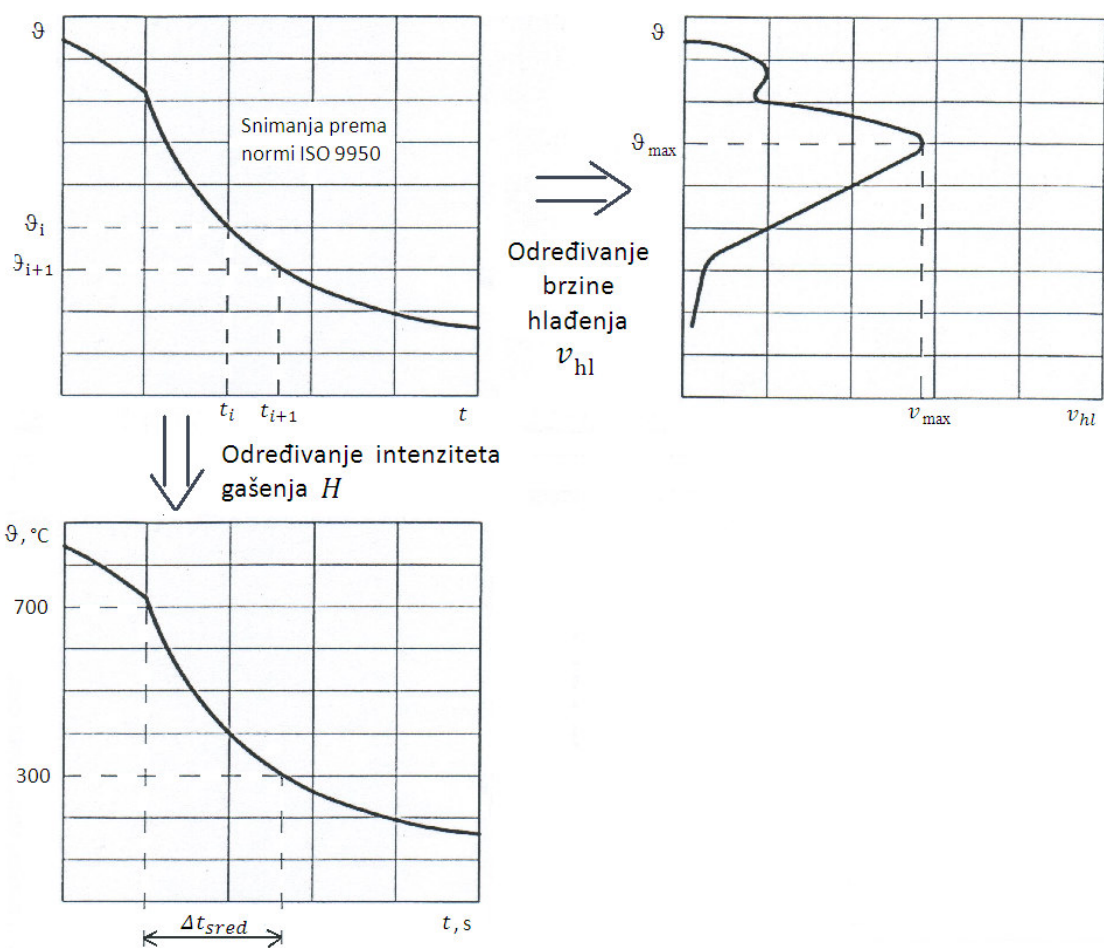


Slika 5. Izvedba mjerne sonde za snimanje krivulja gašenja prema normi ISO 9950 [8]

Normom ISO 9950 je opisano snimanje krivulja hlađenja (slika 6) koje se sastoji od grijanja sonde na temperaturu od 850°C / 5min i njenog hlađenja u posudi s dvije litre mirujućeg sredstva za gašenje. Promjena temperature u središtu sonde mjeri se tijekom hlađenja s određenom frekvencijom uzorkovanja. Iz snimljene krivulje hlađenja može odmah ili naknadno izračunati temperaturno ovisna brzina gašenja (slika 7) prema jednadžbi (3).



Slika 6. Dijagram postupka snimanja krivulje gašenja prema normi ISO 9950



Slika 7. Shematski prikaza određivanja brzine i intenziteta gašenja iz snimljene krivulje hlađenja [17]

Iz krivulje hlađenja snimljene prema normi ISO 9950, prema jednadžbi (3) konstruira se dijagram ovisnosti brzine hlađenja o temperaturi sonde.

$$v_{hl} = \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{t_{i+1} - t_i}$$

(3)

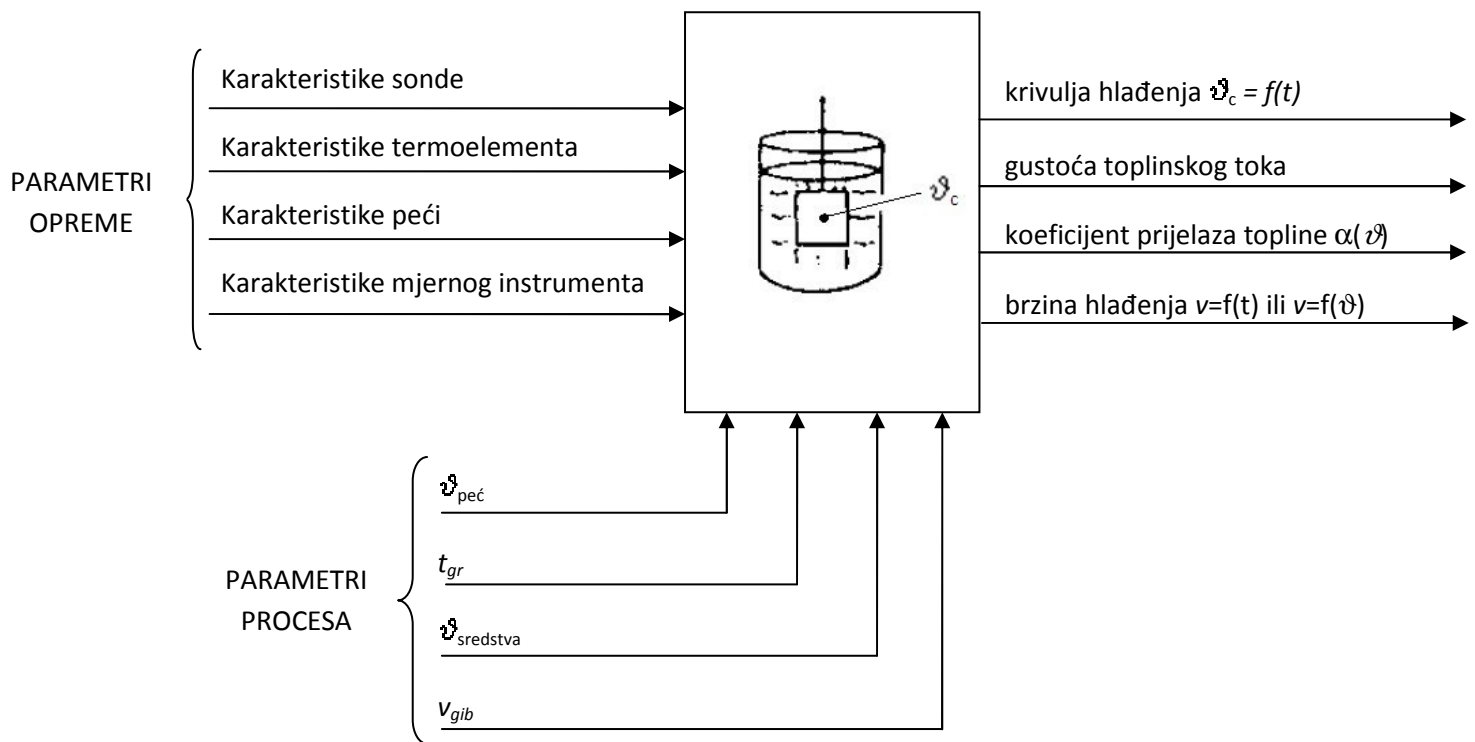
Iz dijagrama promjene brzine hlađenja ovisne o temperaturi sonde, direktno se određuje maksimalna brzina gašenja $v_{\max}$ i njoj pripadna temperatura $\vartheta_{\max}$. Iz snimljene krivulje hlađenja moguće je prema slici 7 odrediti vrijeme hlađenja mjerne sonde od temperature 700 do 300 °C, odnosno srednju brzinu hlađenja prema jednadžbi (4)

$$v_{sred, 700-300} = \frac{700 - 300}{\Delta t_{sred}} \quad (4)$$

Vrijeme hlađenja sonde od 700 do 300 °C ispitivanog sredstva uspoređuje se s vremenom hlađenja iste sonde u istom temperaturnom intervalu hlađene u mirnoj vodi temperature 18°C. Omjer srednjih brzina hlađenja ispitivanog sredstva i mirne vode predstavlja dodatno tehnološko svojstvo, tzv. intenzitet gašenja (H), određen prema jednadžbi (5)

$$H = \frac{v_{sred, 700-300}}{v_{vode_{18^{\circ}\text{C}}}} = \frac{\Delta t_{vode_{18^{\circ}\text{C}}}}{\Delta t_{sred, 700-300}} \quad (5)$$

Mjerni sustav za snimanje krivulja gašenja prema normi ISO 9950 s ulaznim i izlaznim veličinama shematski je prikazan na slici 8. Iz slike 8 i propisanih uvjeta ispitivanja je moguće razlučiti utjecajne čimbenike na snimljenu krivulju, porijeklom od mjerne sonde i mjernog instrumenta, termoelementa ugrađenog u sondu, peći za grijanje i korištenih radnih parametara procesa grijanja i hlađenja. Kao rezultat snimanja može se osim krivulja promjene temperature i brzine hlađenja sonde odrediti promjena gustoće toplinskog toka odvedenog iz sonde, kao i promjena koeficijenta prijelaza topline ovisnog o temperaturi sonde. U tablici 3 su prikazani parametri opreme utjecajni na snimljenu krivulju gašenja: karakteristike mjerne sonde, termoelementa, peći i mjernog instrumenta.



Oznaka	Opis	Jedinica
V/A	Omjer volumena i površine mjerne sonde,	m
λ	Toplinska vodljivost mjerne sonde,	W/mK
c	Specifični toplinski kapacitet mjerne sonde,	J/kgK
$\vartheta_{peć}$	Temperatura peći,	°C
$\Delta\vartheta_{peći}$	Najveća razlika temperature u unutrašnjosti peći,	°C
t_{gr}	Vrijeme grijanja mjerne sonde do temperature austenitizacije,	s
$\vartheta_{sredstva}$	Temperatura sredstva za gašenje,	°C
v_{gib}	Brzina gibanja sredstva za gašenje,	m/s
α	Koeficijent prijelaza topline,	W/m ² K

Slika 8. Formalni opis problema snimanja krivulje gašenja s prikazom utjecajnih faktora na snimljenu krivulju [17]

Tablica 3. Parametri opreme koji utječu na snimljenu krivulju gašenja [17]

Karakteristike sonde	oblik sonde, V/A, toplinska svojstva (λ , c , ρ), smještaj termoelementa, hrapavost površine
Karakteristike termoelementa:	tip, kašnjenje, točnost mjerenja, preciznost mjerenja temperature
Karakteristike peći	razlika temperature po unutrašnjosti peći ($\Delta T_{\text{peći}}$)
Karakteristike mjernog instrumenta	točnost, preciznost mjerenja el. napona termoelementa, pogreška A/D pretvorbe mjernog signala, frekvencija uzorkovanja

2.2. Koncept matematičkog modela za analizu i predviđanje krivulja gašenja

Provedba snimanja krivulja hlađenja sredstava za gašenje detaljno je i precizno opisana u normama spomenutim u uvodu rada, posebno u normi ISO 9950, koja će se i primijeniti za snimanje niza krivulja hlađenja mjerne sonde (dimenzija $\varnothing 12,5 \times 60\text{mm}$) sredstvima za gašenje u čistoj vodi i vodenim otopinama polimera, koji pokazuju različite tipične oblike krivulja hlađenja. Norma ISO 9950 propisuje i određivanje osnovnih tehnoloških svojstava sredstava za gašenje na temelju snimljene krivulje hlađenja, poput krivulje promjene brzine hlađenja sredstva ovisne o temperaturi površine sonde, najveće brzine gašenja i brzine gašenja na temperaturi od $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7-10]. Međutim, iz snimljenih krivulja hlađenja konkretnog sredstva za gašenje mogu se odrediti i njegova dodatna tehnološka svojstva, poput brzine i vremena hlađenja u karakterističnim temperaturnim intervalima, temperature na kojima nastupaju promjene mehanizma prijenosa topline i dr. Pri tome treba, primjenom numeričke i regresijske analize, definirati zadovoljavajuće točan, stabilan i upotrebljiv matematički model koji je moguće koristiti za različite oblike krivulja hlađenja, karakteristične za pojedina sredstva za gašenje. U tom cilju postavljena je slijedeća hipoteza rada:

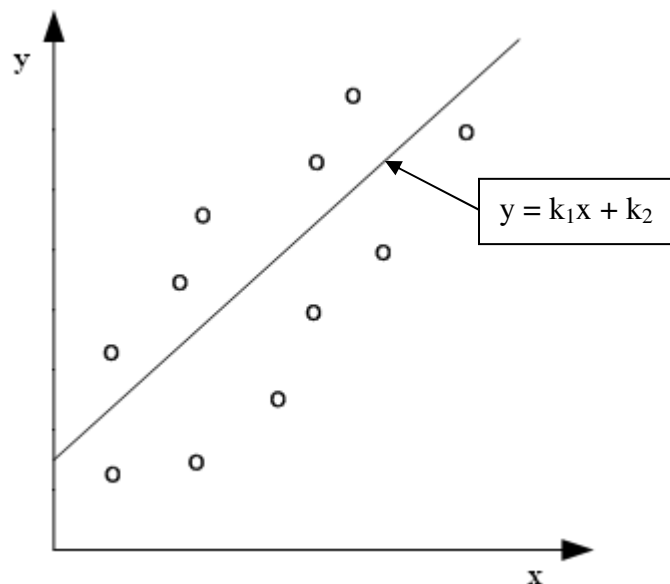
Za sredstva za gašenje s izrazito nelinearnim tijekom temperaturno-vremenskih krivulja hlađenja i pojavom nekoliko mehanizama prijenosa topline s mjerne sonde na sredstvo (isparivanje, mjehurasto vrenje i konvekcija) moguće je postaviti jedinstveni matematički model za određivanje i predviđanje tehnoloških svojstava sredstva na temelju reprezentantnog skupa snimljenih krivulja hlađenja.

Postavljeni matematički model i rezultati dobiveni snimanjem i analizom krivulja hlađenja mogu poslužiti kao podloga za izradu baze podataka o tehnološkim svojstvima sredstava za gašenje, izbor optimalnog sredstva za gašenje pri kaljenju konkretnog obratka, termodinamičke proračune ovisnosti koeficijenta prijelaza topline o temperaturi površine sonde, tehnološku kontrolu stanja sredstva za gašenje u industrijskoj primjeni, te u računalnim simulacijama za predviđanje mikrostrukture i mehaničkih svojstava kaljenih obradaka [4-6, 11].

2.3 Primjena regresijske analize u određivanju parametara gašenja

Zadaća regresijske analize je, ako se utvrdi postojanje veze između ili više numeričkih varijabli, utvrditi analitički izraz te veze, odnosno vezu prikazati u obliku jednadžbe ili modela. Za to se najčešće koriste jednostavni i to linearni regresijski modeli. Iako postoje i drugi nelinearni tj. krivolinijski. Temelj ove analize je unaprijed pretpostaviti uzročno posljedičnu vezu, tako da jedna varijabla ovisi o drugoj tj. ako promatramo dvije varijable jedna je zavisna, a druga nezavisna. Dakle, nezavisna varijabla "uvjetuje" promjenu zavisne.

U statistici, **linearna regresija** se odnosi na svaki pristup modeliranju relacija između jedne ili više varijabli označene sa Y , te jedne ili više varijabli označene sa X , na način da takav model linearno ovisi o nepoznatim parametrima estimiranih iz podataka. Najčešće se linearna regresija odnosi na model u kojem je uvjetna srednja vrijednost od Y , uz danu vrijednost X , afina funkcija od X . Afina funkcija dobila je ime po tzv. afnim transformacijama, preslikavanjima koja čuvaju kolinearnost (npr. translacija, rotacija, osna simetrija...), a s kojima je i povezana. Ta se preslikavanja mogu nazvati "srodnima, bliskima" jer pravce preslikavaju u pravce, a konačne točke u konačne točke. Linearna regresija je bila prvi tip regresijske analize koja je detaljno proučavana i koja se ekstenzivno koristila u praktičnim primjenama. Razlog za ovo je taj što se modeli koji linearno ovise o svojim nepoznatim parametrima lakše modeliraju nego modeli sa nelinearnom ovisnošću o parametrima. Također, statistička svojstva rezultirajućih estimatora se lakše određuju. [18, 19]. Općeniti primjer linearne regresije prikazan je na slici 9.



Slika 9: Linearna regresija

Opći prikaz matematičkog modela linearne i nelinearne regresijske analize opisan je prema literaturi [18, 20]. Jednostavni linearni regresijski model ima oblik :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_i + e_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

Ako pretpostavimo da je očekivana vrijednost slučajnog člana (e) jednaka nuli dobit ćemo ocijenjen model s očekivanim vrijednostima, koji pokazuje kako varijabla Y linearno zavisi o varijabli X :

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot X_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

pri čemu je:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (8)$$

Riješiti ovaj model znači izračunati ocijene iz parametara uzoraka $\hat{\beta}_0$ i $\hat{\beta}_1$

Ove parametre ocjenjujemo koristeći "metodu najmanjih kvadrata", jer je naš cilj da zbroj kvadrata odstupanja stvarnih vrijednosti (Y_i) od očekivanih vrijednosti ($\hat{Y}_i$), mjereno okomito, bude najmanji. Odnosno tražimo minimum funkcije:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \text{Min} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (9)$$

- Ova metoda daje "najbolje linearne nepristrane ocjene parametara"

Uzimajući u obzir pretpostavke koje moraju zadovoljiti "najbolji linearni nepristrani ocjenjivači" moguće je ocijeniti parametre na sljedeći način:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - n \cdot \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2} \quad (10)$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \cdot \bar{x} \quad (11)$$

$\hat{\beta}_0$ je konstantni član koji pokazuje kolika je očekivana vrijednost zavisne varijable kada nezavisna varijabla poprimi vrijednost nula.

$\hat{\beta}_1$ je koeficijent regresije koji pokazuje za koliko će se promijeniti očekivana vrijednost zavisne varijable ako se nezavisna poveća za jednu jedinicu.

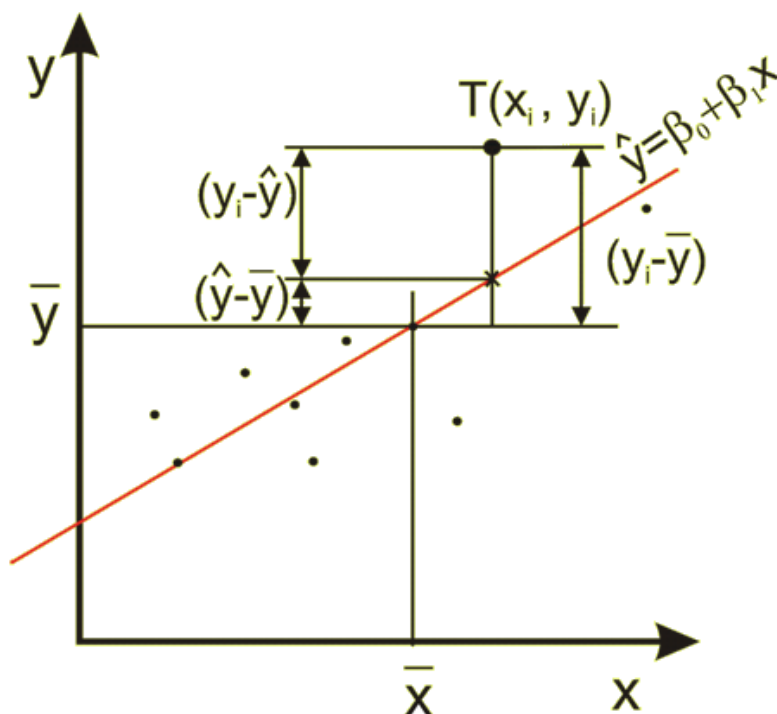
Nakon što riješimo model bitno je ocijeniti reprezentativnost tog modela izračunom apsolutnih ili relativnih mjera reprezentativnosti. U apsolutnu mjeru reprezentativnosti spada standardna greška regresije koja se računa prema sljedećem izrazu:

$$\hat{\sigma}_f = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n-(k+1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-(k+1)}} \quad (12)$$

Standardna greška regresije pokazuje prosječno odstupanje stvarnih od regresijskih vrijednosti zavisne varijable. Isto se odstupanje može izraziti relativno, odnosno u postotku od aritmetičke sredine varijable Y . Mjera koja pokazuje udio standardne greške regresije u aritmetičkoj sredini zavisne varijable naziva se koeficijent varijacije regresije i računa prema sljedećem izrazu:

$$\hat{V}_{\hat{f}} = \frac{\hat{\sigma}_{\hat{f}}}{\bar{y}} 100 = \% \quad (13)$$

Slika 10 prikazuje analizu varijance varijable Y za jedno opažanje.



Slika 10: Analiza varijance varijable Y za jedno opažanje [18]

Drugim riječima ukupno odstupanje varijable Y od njezinog prosjeka možemo podijeliti na dva dijela:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (14)$$

$$\begin{array}{ccccc} \text{ZBROJ KVADRATA} & & \text{ZBROJ KVADRATA} & & \text{ZBROJ KVADRATA} \\ \text{UKUPNIH ODSUPANJA} & = & \text{PROTUMAČENIH ODSUPANJA} & + & \text{NEPROTUMAČENIH ODSUPANJA} \\ \text{ST} & = & \text{SP} & + & \text{SR} \end{array}$$

Ovo je jednadžba varijance i predstavlja temelj statističke analize reprezentativnosti regresijskog modela. Osim koeficijenta varijacije regresije u relativne mjere reprezentativnosti regresije spada i koeficijent determinacije:

$$R^2 = \frac{SP}{ST} = 1 - \frac{SR}{ST} = 1 - A^2 \quad (15)$$

pri čemu je A^2 koeficijent alijenacije.

Najčešće se R^2 izražava u postotku i pokazuje koliko je posto ukupnih odstupanja varijable Y od njezinog prosjeka protumačeno modelom.

$$0 \leq R^2 \leq 1 \quad r = \pm \sqrt{R^2} \quad (16)$$

Regresijska analiza nužno ne implicira uzročnost, odnosno ne znači da su neovisne varijable uzrok, a ovisna varijabla posljedica. Stoga je analogno, moguće izračunati regresijski pravac kada je X zavisna, a Y nezavisna varijabla:

$$\hat{X}_i = \hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1 \cdot Y_i \quad (17)$$

Regresijski pravci $\hat{Y}$ i $\hat{X}$ sijeku se u točki $T(\bar{X}; \bar{Y})$.

U **nelinearnoj regresiji** se upotrebljavaju eksponencijalni regresijski modeli i regresijski polinomi [20]. U ovom su radu primijenjeni regresijski polinomi drugog i trećeg stupnja.

Regresijski polinom drugog stupnja je model koji je linearan u parametrima, a nelinearan u varijablama:

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot x_i + \hat{\beta}_2 \cdot x_i^2 \quad (18)$$

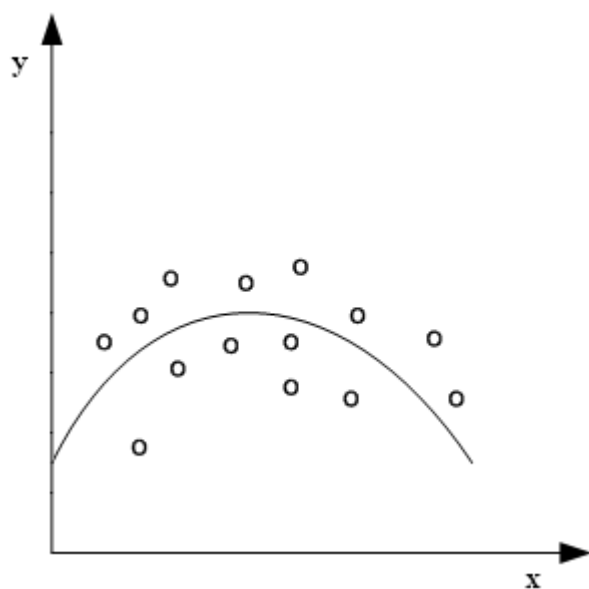
Ocijene parametara se dobiju standardnom metodom najmanjih kvadrata, pri čemu nije potrebna transformacija, jer je model već linearan u parametrima.

Sve prethodno navedeno vrijedi za sve regresijske polinome bez obzira na stupanj polinoma.

Opći zapis regresijskog polinoma naveden je jednačbom (19):

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X + \hat{\beta}_2 X^2 + \dots + \hat{\beta}_k X^k \quad (19)$$

Općeniti primjer nelinearne regresije prikazan je na slici 11.



Slika 11: Nelinearna regresija

2.4 Primjena neuronske mreže u određivanju parametara gašenja

Neuronska mreža

Neuronske mreže (umjetne neuronske mreže) su računalni modeli za obradu informacija koji funkcioniraju na način sličan biološkim neuronskim mrežama. Sastavljene se od velikog broja međusobno povezanih elemenata (neurona) koji skladno rade u svrhu što boljeg rješavanja konkretnog problema. Imaju, poput ljudi, sposobnost učenja na primjerima, skupovima podataka i na taj način vrlo brzo izlaze na kraj s problemima koji se teško rješavaju tradicionalnim pristupom. Svaka je mreža konfigurirana za određenu primjenu kao što su interpolacija krivulja, prepoznavanje uzoraka, razvrstavanje podataka, ... Iako su neuronske mreže nastale po uzoru na biološke, ova se dva modela međusobno razlikuju u nekim karakteristikama.

Biološka neuronska mreža je vrlo složena i sastoji se od tijela, aksona i mnoštva dendrita koji okružuju tijelo neurona. Akson je tanka cjevčica koja s jedne strane sadrži tijelo neurona, a s druge se strane dijeli na niz grana. Na krajevima tih grana nalaze se zadebljanja koja dodiruju dendrite, a ponekad i tijelo drugog neurona. Sinapsa je razmak između završetka aksona prethodnog neurona i dendrita ili tijela sljedećeg neurona. Dendriti su produžeci staničnog tijela, vrlo su tanki u odnosu na veličinu tijela stanice i funkcija im je prikupljanje informacija.

Umjetne neuronske mreže dizajnirane su tako da oponašaju osnovne funkcije bioloških neuronskih mreža. Tijelo biološkog neurona zamjenjuje se sumatorom, ulogu dendrita preuzimaju ulazi (ulazne varijable) u sumator, izlaz (izlazna varijabla) sumatora je akson umjetnog neurona, a uloga praga osjetljivosti bioloških neurona preslikava se iz tzv. aktivacijske funkcije. Veza umjetnog neurona s okolinom ostvaruje se pomoću funkcijske sinaptičke veze biološkog neurona. Težinski faktori mogu biti pozitivan ili negativan broj, a imaju istu funkciju kao i sinapse kod biološkog neurona: povezuju izlaze (izlazne varijable) iz okoline neurona tj. izlaze drugih neurona (aksone) s ulazima sumatora (dendriti). Intenzitet te veze ovisi o iznosu (modulu), a vrsta veze o predznaku težinskog faktora.

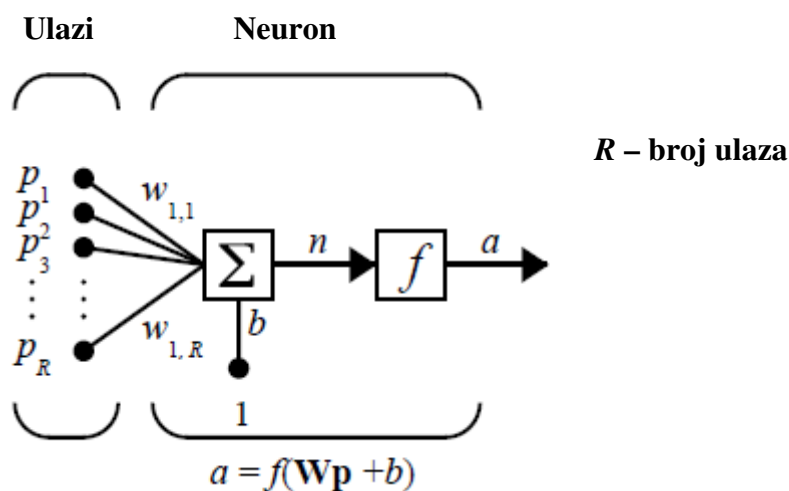
Aktivacijske funkcije dijele se na linearne i nelinearne. Kod linearne aktivacijske funkcije se izlaz sumatora množi s nekim faktorom (pojačanjem) i tako se dobiva izlaz neurona. Nelinearne aktivacijske funkcije mogu poprimiti različite oblike, a najrasprostranjenije su

funkcije praga osjetljivosti, sigmoidne, hiperbolične i harmoničke funkcije. Nelinearne aktivacijske funkcije prevode izlaz sumatora na izlaz neurona preko nelinearnog pojačanja.

Dakle, umjetni neuron funkcionira slično kao biološki neuron. Izlazi iz drugih neurona u okruženja promatranog neurona, koji se upućuju promatranom neuronu množe se težinskim faktorima i dovode do sumatora. U sumatoru se dobiveni produkti sumiraju, a njihova suma se odvodi na ulaz aktivacijske funkcije, koja će na svom ulazu dati izlaz neurona. [21]

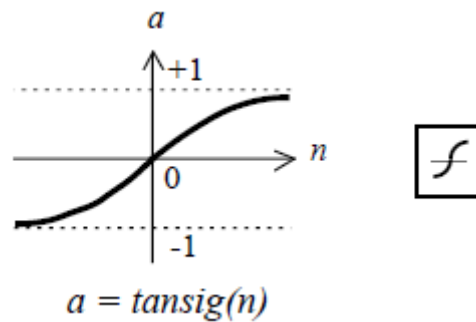
Struktura neuronske mreže

Korištena je unapredna neuronska mreža s jednim skrivenim slojem *sigmoid* neurona i izlaznim slojem *linearnih* neurona. Objašnjenje korištene strukture mreže napravljeno je prema literaturi [22]. Slikom 12 prikazan je elementarni neuron s R ulaza. Svaki je ulaz pomnožen s odgovarajućim težinskim faktorom w . Suma bias-a i svih ulaza pomnoženih s težinskim faktorima tvori ulaz u prijenosnu funkciju f .



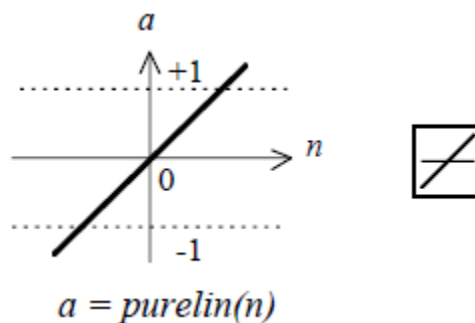
Slika 12: Model umjetnog neurona [22]

U skrivenom je sloju korištena *tan-sigmoid* prijenosna funkcija koja generira izlaze a od -1 do 1 kako se ulaz u prijenosnu funkciju n kreće iz negativne prema pozitivnoj beskonačnosti (slika 13)



Slika 13: 'Tan-sigmoid' prijenosna funkcija [22]

Kod problema aproksimacije funkcija u izlaznom se sloju koriste linearni neuroni. Linearna prijenosna funkcija prikazana je slikom 14.



Slika 14: Linearna prijenosna funkcija [22]

Algoritam učenja mreže

Teško je znati koji će algoritam treniranja mreže biti najbrži za određeni problem. To ovisi o mnoštvu faktora među kojima su i složenost problema, količina podataka za učenje mreže, broj težinskih faktora i bias-a, ciljana konačna pogreška mreže, o tome koristi li se mreža u svrhu prepoznavanja uzoraka ili u svrhu aproksimacije funkcija (regresije).

Proces učenja mreže zorno se može prikazati na najjednostavnijem optimizacijskom algoritmu – metodi najstrmijeg pada gradijenta. Ovaj algoritam ažurira težinske faktore i bias-e u smjeru u kojem funkcija cilja najbrže opada, s negativnim smjerom gradijenta. Jedna iteracija ovog algoritma može se zapisati kao:

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k g_k \quad (20)$$

gdje je $\mathbf{x}_k$ vektor trenutnih težinskih faktora i bias-a, $\mathbf{g}_k$ trenutni gradijent, a a_k trend učenja. Jednadžba se iterira dok mreža ne konvergira. [22]. Tablicom 4 prikazani su algoritmi učenja dostupni u *Neural Network Toolbox-u* programskog paketa *Matlab*.

Tablica 4: Algoritmi učenja dostupni u *Neural Network Toolbox-u* [22]

Algoritam učenja
Levenberg-Marquardt
Bayesian Regularization
BFGS Quasi-Newton
Resilient Backpropagation
Scaled Conjugate Gradient
Conjugate Gradient with Powell/Beale Restarts
Fletcher-Powell Conjugate Gradient
Polak-Ribière Conjugate Gradient
One Step Secant
Variable Learning Rate Gradient Descent
Gradient Descent with Momentum
Gradient Descent

Levenberg-Marquardt-ov algoritam učenja

Levenberg-Marquardt-ov algoritam učenja predstavlja općenito najbrži algoritam učenja mreže [22], a u ovom je radu korišten sa srednjim kvadratom greške kao funkcijom cilja. Ovaj je algoritam je postavljen za postizanje veće brzine učenja mreže bez računanja Hessian-ove matrice. Hessian-ova matrica je kvadratna matrica sa redcima i stupcima jednakim broju težinskih faktora u neuronskoj mreži. Svaki element ove matrice zapravo je matrica koja predstavlja drugu derivaciju pogreške mreže po danoj kombinaciji težinskih faktora i bias-a. Matematička formulacija Levenberg-Marquardt-ovog algoritma učenja opisana je prema literaturi [23-25].

$$\mathbf{H}(e) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 e}{\partial w_1^2} & \frac{\partial^2 e}{\partial w_1 \partial w_2} & \cdots & \frac{\partial^2 e}{\partial w_1 \partial w_n} \\ \frac{\partial^2 e}{\partial w_2 \partial w_1} & \frac{\partial^2 e}{\partial w_2^2} & \cdots & \frac{\partial^2 e}{\partial w_2 \partial w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 e}{\partial w_n \partial w_1} & \frac{\partial^2 e}{\partial w_n \partial w_2} & \cdots & \frac{\partial^2 e}{\partial w_n^2} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Kada funkcija cilja ima oblik sume kvadrata, što je karakteristično za učenje unaprednih mreža, Hessian-ova se matrica može aproksimirati izrazom:

$$\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{J}^T \mathbf{J} \quad (22)$$

a gradijent se može izračunati prema izrazu:

$$\mathbf{g} = \mathbf{J}^T \mathbf{e} \quad (23)$$

gdje je $\mathbf{J}$ Jacobian-ova matrica u kojoj svaki element matrice matrica koja predstavlja prvu derivaciju pogreške mreže u odnosu na težinske faktore i bias-e, a $\mathbf{e}$ vektor pogrešaka mreže. Svi elementi Jacobian-ove matrice su matrice.

$$\mathbf{J}(e) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e}{\partial w_1^2} & \frac{\partial e}{\partial w_1 \partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e}{\partial w_1 \partial w_n} \\ \frac{\partial e}{\partial w_2 \partial w_1} & \frac{\partial e}{\partial w_2^2} & \cdots & \frac{\partial e}{\partial w_2 \partial w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e}{\partial w_n \partial w_1} & \frac{\partial e}{\partial w_n \partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e}{\partial w_n^2} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Jakobijan-ova matrica se može izračunati pomoću standardne metode povratnog prostiranja pogreške, tehnike koja je mnogo manje kompleksna od računanja Hessian-ove matrice.

Levenberg-Marquardt-ov algoritam učenja koristi aproksimaciju Hessian-ove matrice:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - [\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{e} \quad (25)$$

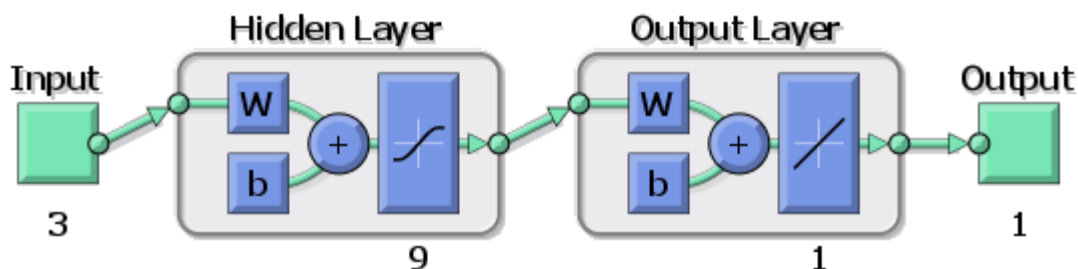
Kad je skalar μ jednak nuli to je zapravo kvazi-Newton metoda tj. Newton-ova metoda s aproksimiranom Hessian-ovom matricom. Newton-ova metoda pretpostavlja da se funkcija može lokalno, u području oko optimuma, aproksimirati polinomom drugog reda, npr. parabolom. Ona pretpostavlja da je moguće koristiti prvu i drugu derivaciju (gradijent i Hessian) za traženje stacionarne točke tj. točke u kojoj je prva derivacija jednaka nuli.

Kad je μ različit od nule, izraz se svodi na metodu najstrmijeg pada s malim koeficijentom brzine učenja. Newton-ova je metoda brža i preciznija u području oko minimalne pogreške, tako da je cilj prebaciti se ka Newton-ovoj metodi što je brže moguće. Na taj je način parametar μ smanjen nakon svakog uspješnog koraka smanjivanja funkcije cilja i povećan samo kad bi privremeni korak povećao funkciju cilja. Na taj je način funkcija cilja uvijek reducirana sa svakom iteracijom algoritma.

Struktura neuronske mreže za analizu krivulja hlađenja

Prethodno opisana unapredna neuronska mreža i Levenberg-Marquardt-ov algoritam učenja izabrani su za rješavanje problema analize i predviđanja krivulja hlađenja na temelju uvida u rješavanje sličnih problema s pojavom histereza u referencama [26-28]. Za analizu podataka s krivulja hlađenja nužno je provesti normiranje ulaza i izlaza u neuronsku mrežu. Vremenska baza, koncentracija polimera PAG i temperatura sredstva za gašenje normirani su u rasponu od 0 do 1 i predstavljaju ulaze u mrežu. U skrivenom je sloju korišteno devet neurona, a u izlaznom sloju samo jedan. Izlaz iz mreže je temperatura mjerne sonde također normirana u rasponu od 0 do 1 (slika 15).

Sve krivulje hlađenja koje su konstruirane iz podataka dobivenih praktičnim mjerenjem, a korištene su za učenje i testiranje mreže, upotrijebljene su do temperature od oko 55°C kako bi mreža duž cijelog temperaturnog raspona krivulja baratala s približno jednakom količinom podataka za učenje. Set podataka korišten za učenje mreže prikazan je u tablici 5.



Slika 15: Shematski prikaz neuronske mreže za analizu krivulja hlađenja

Općenito, mreža je kvalitetnija što je veći set podataka za učenje, a brža što je taj set manji i što je broj neurona u skrivenom sloju manji. Naš cilj konfiguriranja mreže je dobiti što pouzdaniju mrežu sa što kraćim vremenom učenja i što manjim potrebnim ulaznim setom podataka kako bi smanjili vrijeme i troškove praktičnog laboratorijskog ispitivanja.

Tablica 5: Set podataka korišten za učenje mreže

Naziv sredstva					
Voda	Oznaka ispitivanja	1A1	1B1	1C2	1D2
	Stvarna temperatura	22°C	33°C	44°C	51°C
Vod. otop. PAG 5%	Oznaka ispitivanja	2A1	2B3	2C1	2D2
	Stvarna temperatura	20°C	31°C	38°C	50°C
Vod. otop. PAG 10%	Oznaka ispitivanja	3A1	3B1	3C3	3D1
	Stvarna temperatura	20°C	30°C	39°C	49°C
Vod. otop. PAG 15%	Oznaka ispitivanja	4A3	4B1	4C3	4D2
	Stvarna temperatura	22°C	28°C	39°C	49°C
Vod. otop. PAG 20%	Oznaka ispitivanja	5A3	5B1	5C1	5D1
	Stvarna temperatura	23°C	28°C	40°C	48°C
Vod. otop. PAG 25%	Oznaka ispitivanja	6A1	6B1	6C1	6D1
	Stvarna temperatura	20°C	30°C	41°C	48°C
Vod. otop. PAG 30%	Oznaka ispitivanja	7A1	7B1	7C1	7D1
	Stvarna temperatura	20°C	30°C	39°C	48°C

EKSPERIMENTALNI DIO

3. PLAN I PROVEDBA POKUSA

U cilju dobivanja karakterističnih oblika krivulja hlađenja, po iznosima brzine hlađenja i pojavi Leidefrostovih faza, tipičnih za vodu, ulje, emulzije vode i ulja te vodene otopine polimera, za sredstvo za gašenje u radu su korištene vodene otopine polimera polialkilen glikola (PAG) u koncentracijama od 5 do 30%, te čista voda kao referentno sredstvo za gašenje prema navodima u referencama [29-32]. Tablicama 6 i 7 prikazan je plan ispitivanja hlađenja primjenom mirne vode i vodenih otopina polimera PAG temperatura 20 do 50°C. Ispitivanja iz tablice 4 namijenjena su razvoju matematičkog modela za određivanje tehnoloških svojstava nekoliko sredstava za gašenje i predviđanje svojstava novih sredstava. Ispitivanja navedena u tablici 5 namijenjena su za verifikaciju svojstava predviđenih matematičkim modelom. Za svaku koncentraciju vodene otopine polimera PAG provedena su po tri ispitivanja s približno jednakim temperaturama sredstva.

Tablica 6. Plan ispitivanja krivulja hlađenja čiste mirne vode i vodenih otopina polimera PAG namijenjen razvoju matematičkog modela

Oznaka ispitivanja	Naziv sredstva	Radni parametri			
		Oznaka radnih parametara			
		A	B	C	D
1._.1 (.2) (.3)	Voda	20°C	30°C	40°C	50°C
	Stvarna temperatura	22, 22, 22	33, 31, 32	42, 44, 40	50, 51, 51
2._.1 (.2) (.3)	Vod. otop. PAG 5%	20°C	30°C	40°C	50°C
	Stvarna temperatura	20, 23, 20	29, 30, 31	38, 40, 38	50, 50, 50
3._.1 (.2) (.3)	Vod. otop. PAG 10%	20°C	30°C	40°C	50°C
	Stvarna temperatura	20, 20, 23	30, 31, 28	41, 38, 39	49, 50, 50
5._.1 (.2) (.3)	Vod. otop. PAG 20%	20°C	30°C	40°C	50°C
	Stvarna temperatura	20, 22, 23	28, 31, 32	40, 41, 42	48, 48, 49
7._.1 (.2) (.3)	Vod. otop. PAG 30%	20°C	30°C	40°C	50°C
	Stvarna temperatura	20, 22, 22	30, 32, 31	39, 41, 42	48, 49, 49

Tablica 7. Plan ispitivanja krivulja hlađenja čiste mirne vode i vodenih otopina polimera PAG namijenjen verifikaciji matematičkog modela

Oznaka ispitivanja	Naziv sredstva	Radni parametri			
		Oznaka radnih parametara			
		A	B	C	D
4._.1 (.2) (.3)	Vod. otop. PAG 15%	20°C	30°C	40°C	50°C
	Stvarna temperatura	21, 23, 22	28, 31, 32	39, 40, 39	49, 49, 50
6._.1 (.2) (.3)	Vod. otop. PAG 25%	20°C	30°C	40°C	50°C
	Stvarna temperatura	20, 20, 22	30, 29, 32	41, 39, 40	48, 49, 50

Vodena otopina polimera PAG predstavlja suvremeno industrijsko sredstvo za gašenje koje pokriva široki raspon krivulja hlađenja. Promjenom koncentracije mogu se postići svi oblici krivulja karakteristični za pojavu Leidenfrost-og fenomena. Niske koncentracije polimera PAG-a u vodi, do iznosa oko 5%, poboljšavaju kvašenje površine obratka. Time ove nisko koncentrirane otopine PAG osiguravaju jednolično gašenje bez pojave mjesta sa smanjenom tvrdoćom, koja su često povezana s gašenjem u vodi. Otopine s koncentracijom polimera između 10 do 20% PAG-a u vodi postižu brzine gašenja usporedive s onima za ulje za intenzivno gašenje, pa su zato pogodne za primjene kod slabo prokaljivih čelika od kojih se traže najviši iznosi mehaničkih svojstava. Otopine s koncentracijom između 20 do 30% PAG-a u vodi daju brzine hlađenja pogodne za široki spektar dobro prokaljivih čelika i površinski kaljenih čelika.

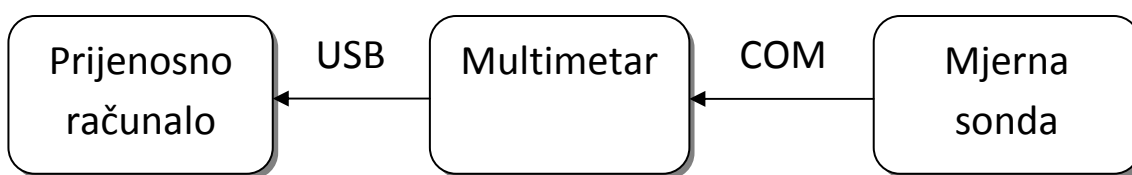
Kako bi se osigurala što veća točnost ponavljanja mjerenja bilo je potrebno osigurati niz uvjeta. Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za toplinsku obradu u ujednačenim okolišnim uvjetima: mirnom zraku temperature od 19 do 22°C. Za zagrijavanje mjerne sonde korištena je električna komorna peć s automatskom regulacijom temperature (slika 16). Temperatura peći održavana je na 865°C, da bi se mjerna sonda jednolično ugrijala na temperaturu 840°C za 5 minuta.



a)



b)



c)

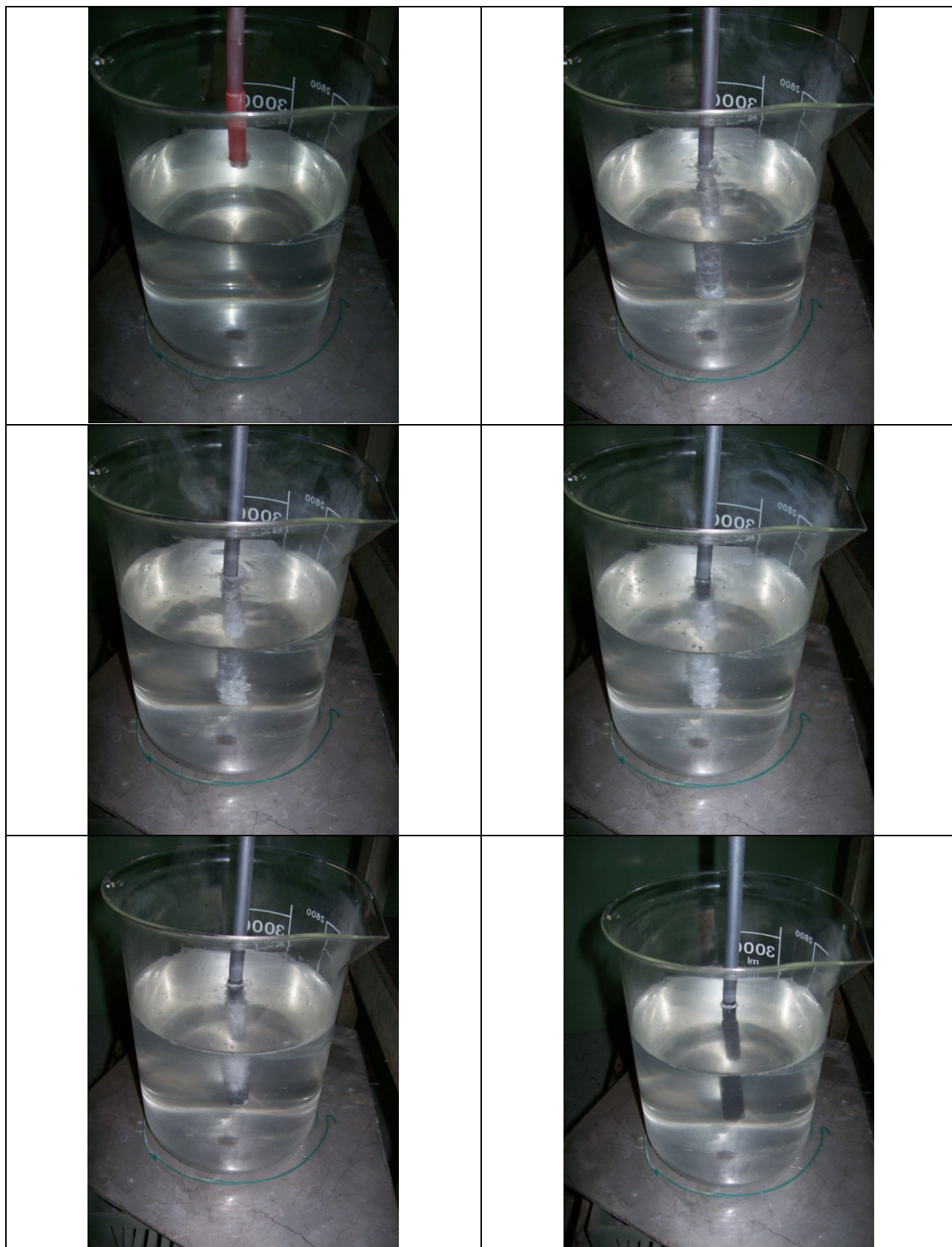
Slika 16. Ugrijavanje mjerne sonde u električnoj komornoj peći:

- a) Mjerna oprema za snimanje krivulje hlađenja;
- b) Naprava za uranjanje mjerne sonde u ispitivano sredstvo za gašenje;
- c) Blok dijagram spajanja mjerne opreme.

Za provedbu pokusa gašenja prethodno je izrađena naprava kako bi mjerna sonda uvijek bila uranjana na istu dubinu u središte posude s dvije litre mirnog sredstva za gašenje (slika 16). Na slikama u tablici 6 prikazan je tijek jednog od pokusa gašenja u mirnoj 10% vodenoj otopini PAG. Na slikama se vidi početak uranjanja sonde i pojava Leidenfrost-ovih faza.

Tijekom svih pokusa gašenja mjerna sonda je bila spojena na multimetar proizvođača "UNI-T" preko kojeg su se preko USB priključka na prijenosno računalo prenosili trenutni podaci o temperaturi sonde u obliku napona. Upotrebom softvera "UT71C/D/E Interface Program Ver: 1.10" provedeno je uzorkovanje, pretvorba napona u temperaturu te spremanje izmjerenih podataka u datoteke programa "Microsoft Office Excel 2007". U istom su programu obradom dobivenih podataka konstruirani dijagrami temperatura – vrijeme i iz njih izračunati i konstruirani dijagrami temperatura – brzina gašenja. Analiza izmjerenih ovisnosti temperature i izračunatih brzina hlađenja ovisnih o vremenu gašenja provedena je korištenjem programskog paketa "Matlab".

Tablica 8. Tijek gašenja mjerne sonde Ø12,5x60 mm u 10%-tnoj vodenoj otopini PAG [17]

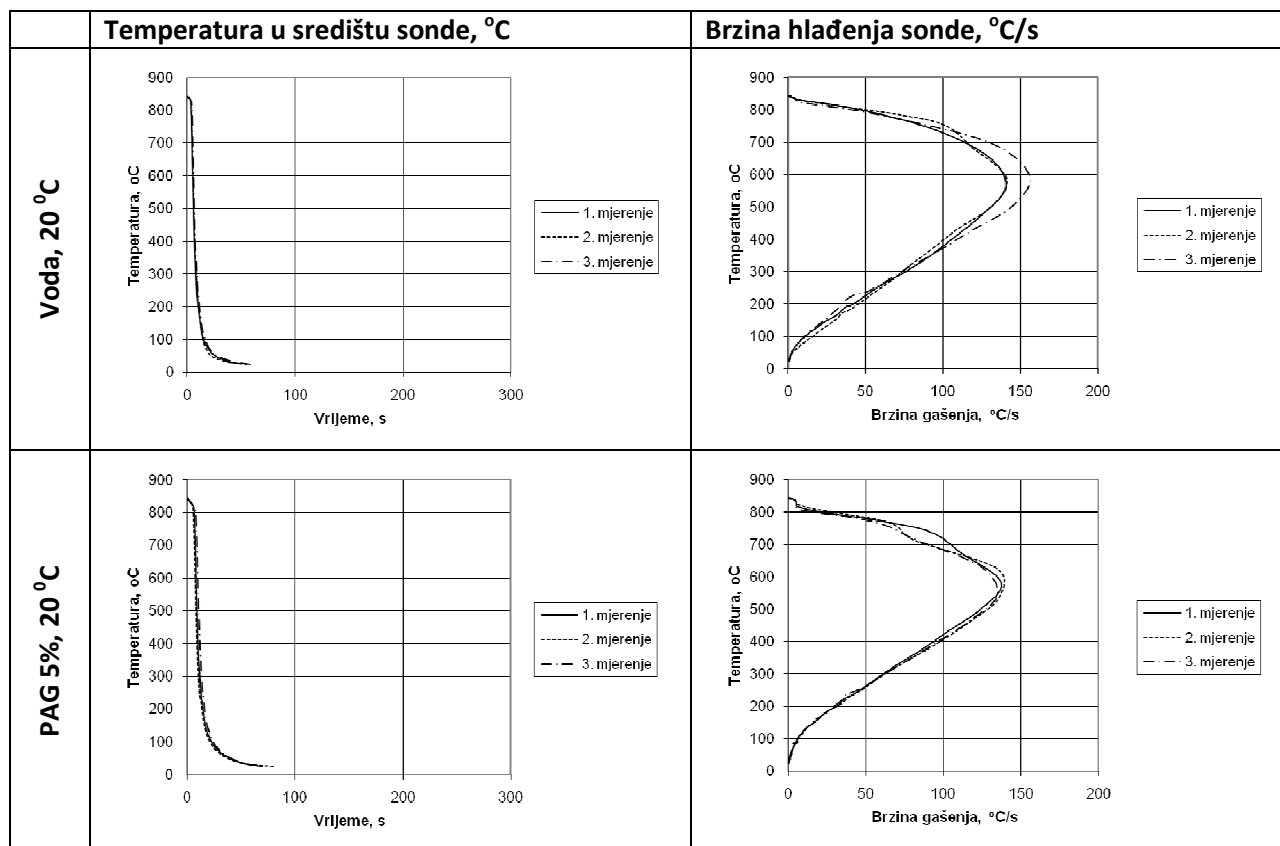


4. REZULTATI ISPITIVANJA I ANALIZA REZULTATA

Nakon provedbe pokusa gašenja prema planu pokusa navedenom tablicama 6 i 7, u računalnom programu "Microsoft Office Excel 2007" konstruirani su dijagrami temperatura – vrijeme. Na temelju njih konstruirani su dijagrami ovisnosti brzine gašenja o temperaturi sonde prikazani u tablicama 7 i 8.

U tablicama 9, 11, 13 i 15 su rezultati snimanja krivulja hlađenja korišteni za postavljanje i razvoj matematičkog modela za određivanje tehnoloških svojstava sredstava za gašenje, a u tablicama 10, 12, 14 i 16 su krivulje hlađenja za njegovu verifikaciju.

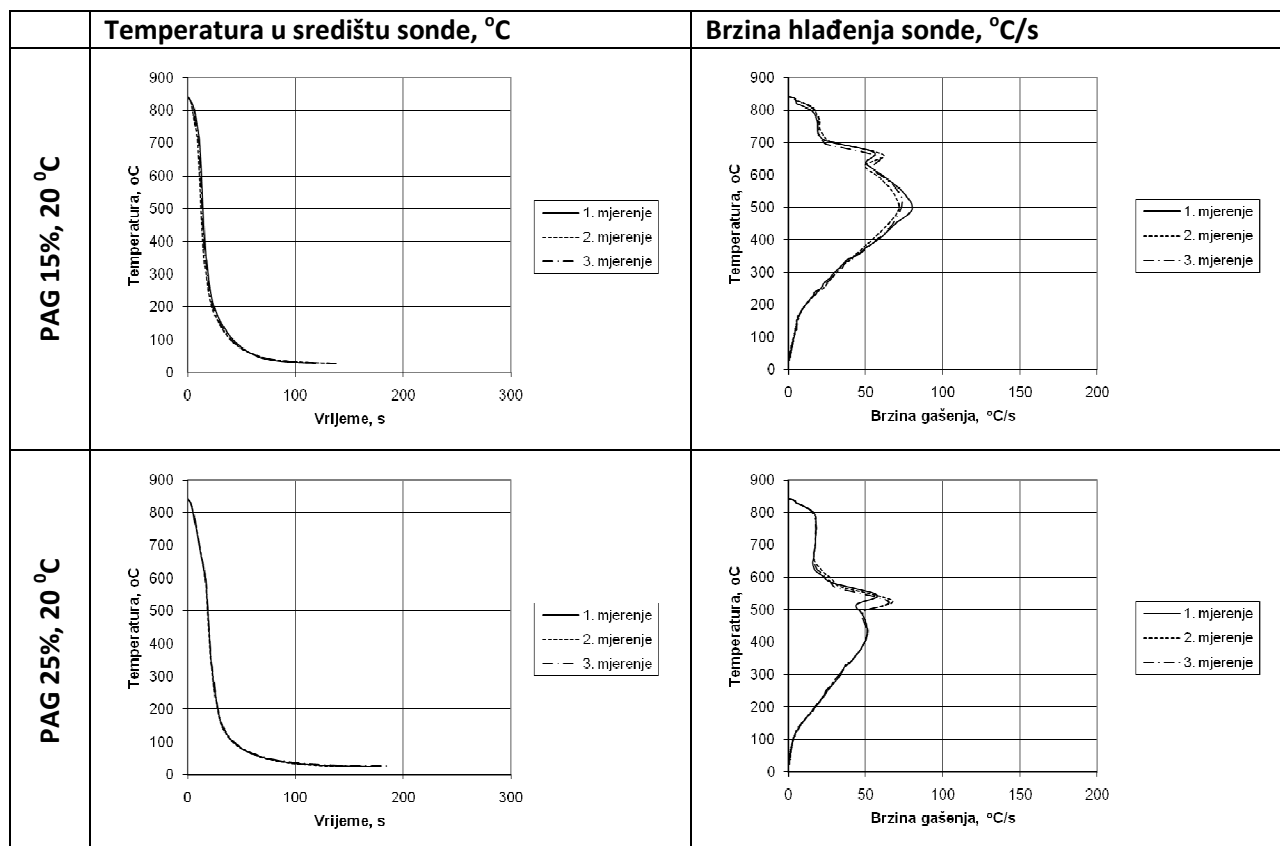
Tablica 9. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodnih otopina PAG temperature 20°C namijenjene postavljanju matematičkog modela



Tablica 9. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodenih otopina PAG temperature 20°C
namijenjene postavljanju matematičkog modela (NASTAVAK tablice 9)

	Temperatura u središtu sonde, °C	Brzina hlađenja sonde, °C/s
PAG 10%, 20 °C		
PAG 20%, 20 °C		
PAG 30%, 20 °C		

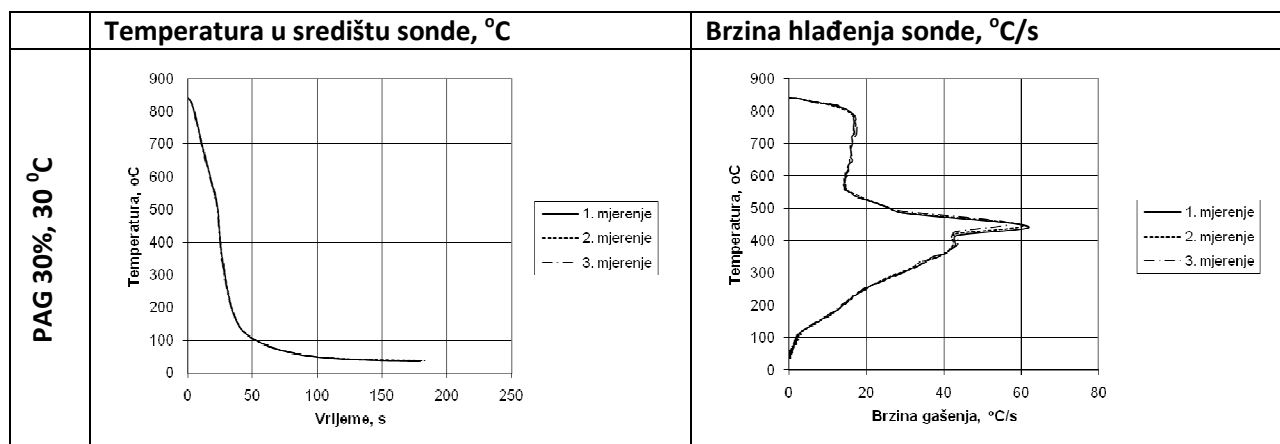
Tablica 10. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodenih otopina PAG temperature 20°C
namijenjene verifikaciji matematičkog modela



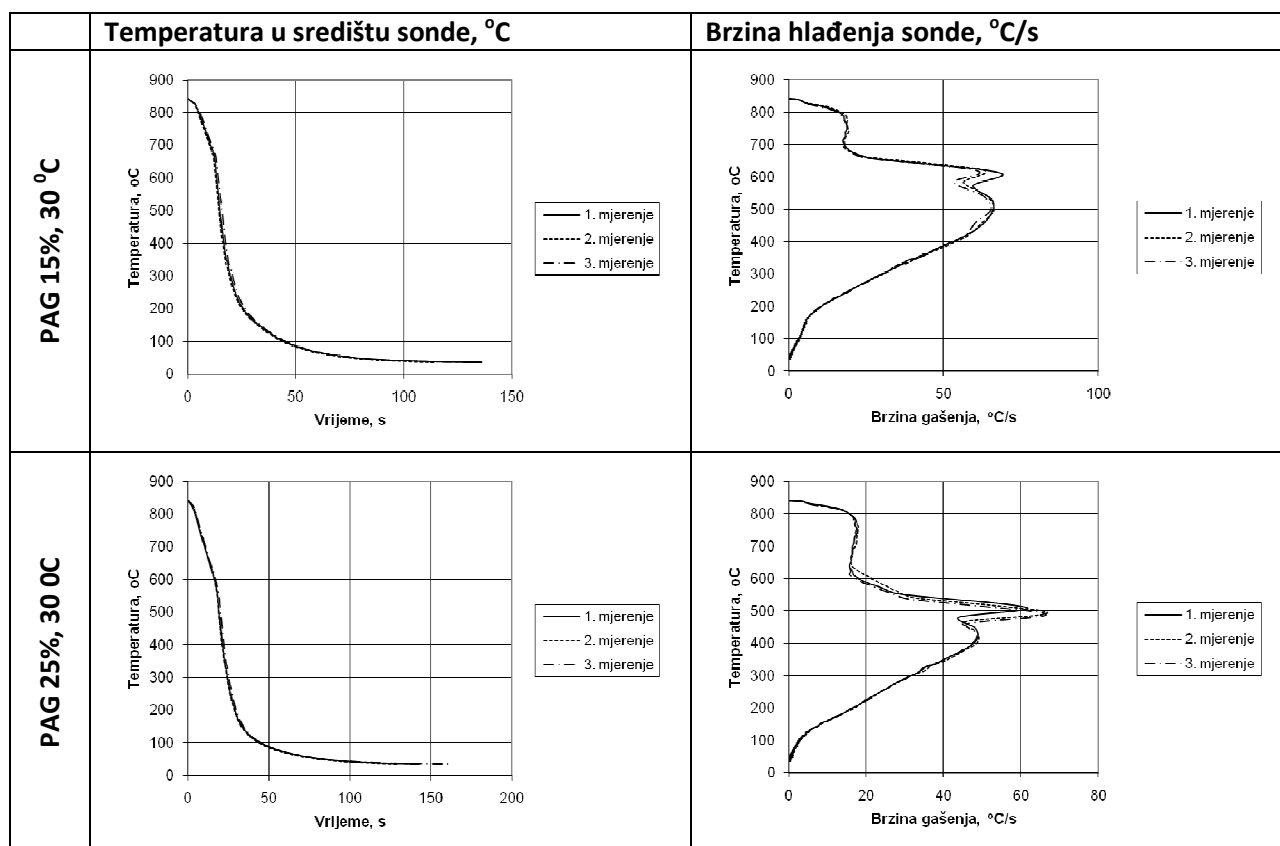
Tablica 11. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodnih otopina PAG temperature 30°C
namijenjene postavljanju matematičkog modela

	Temperatura u središtu sonde, °C	Brzina hlađenja sonde, °C/s
Voda, 30 °C		
PAG 5%, 30 °C		
PAG 10%, 30 °C		
PAG 20%, 30 °C		

Tablica 11. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodnih otopina PAG temperature 30°C namijenjene postavljanju matematičkog modela (NASTAVAK tablice 11)



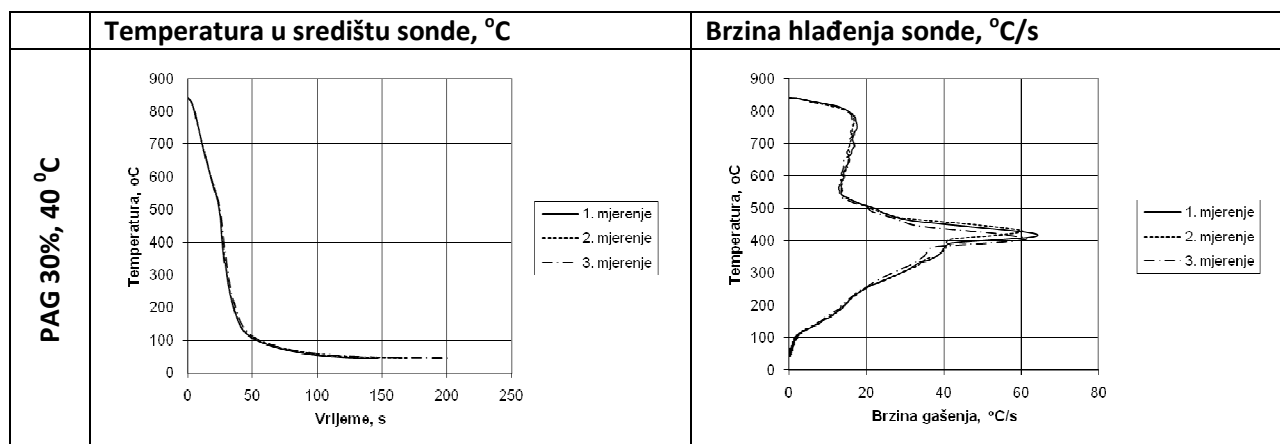
Tablica 12. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodenih otopina PAG temperature 30°C namijenjene verifikaciji matematičkog modela



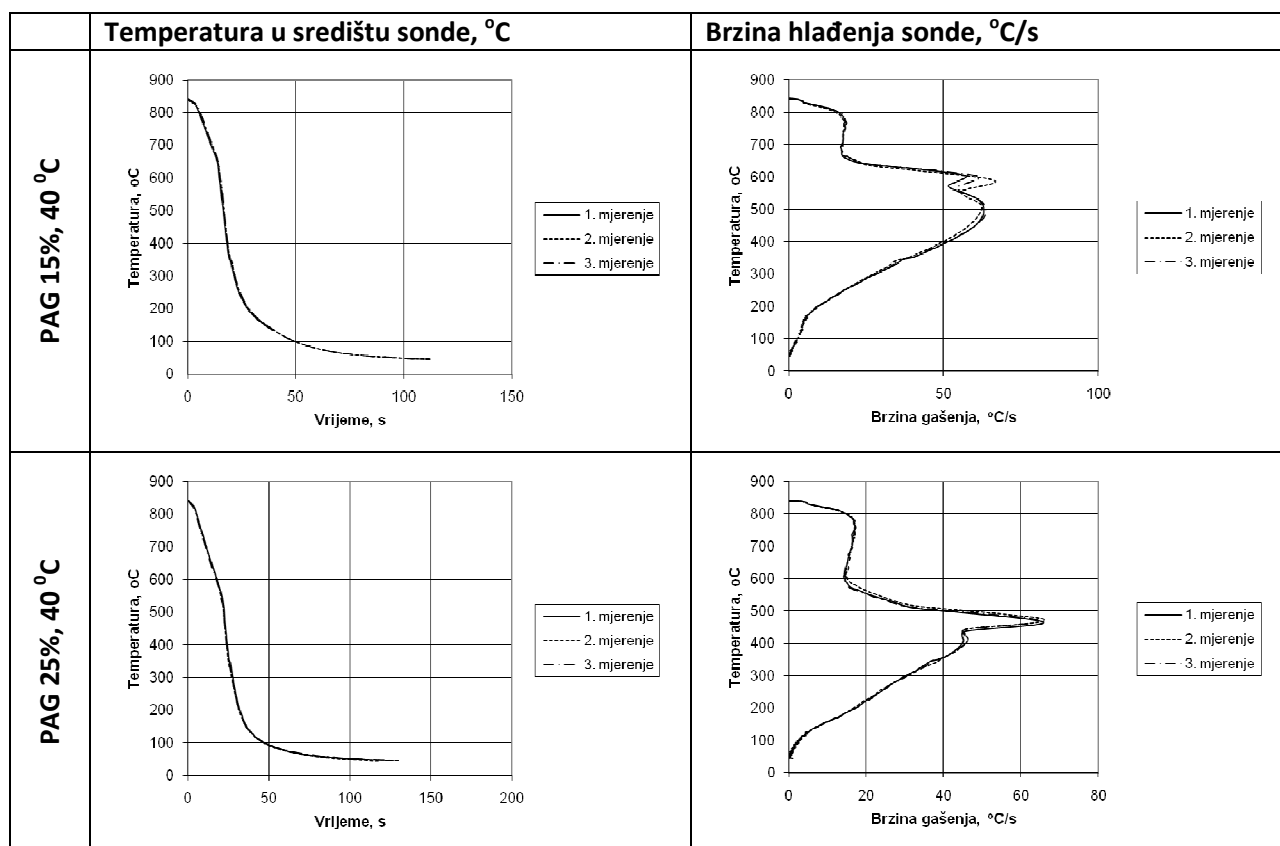
Tablica 13. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodnih otopina PAG temperature 40°C
namijenjene postavljanju matematičkog modela

	Temperatura u središtu sonde, °C	Brzina hlađenja sonde, °C/s
Voda, 40 °C		
PAG 5%, 40 °C		
PAG 10%, 40 °C		
PAG 20%, 40 °C		

Tablica 13. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodnih otopina PAG temperature 40°C namijenjene postavljanju matematičkog modela (NASTAVAK tablice 13)



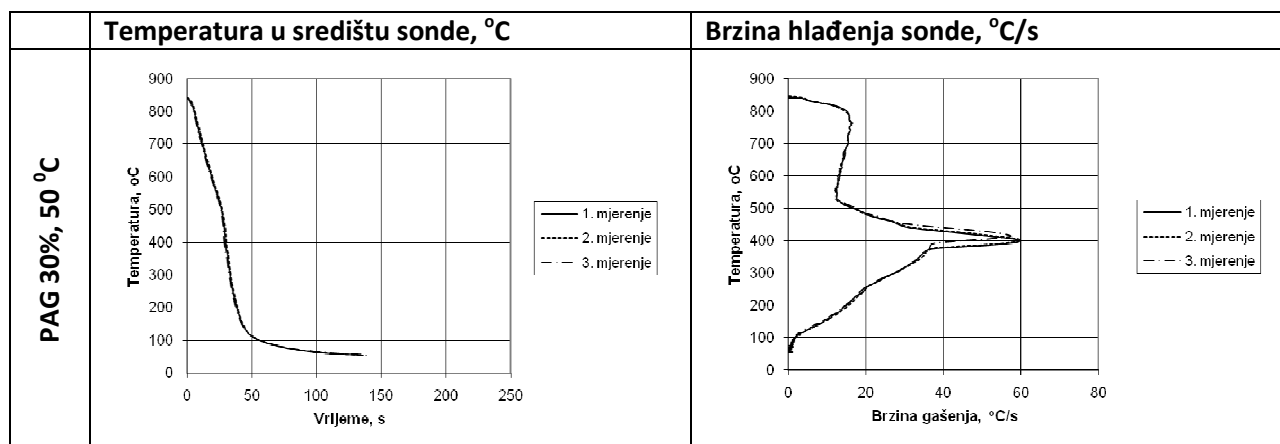
Tablica 14. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodenih otopina PAG temperature 40°C namijenjene verifikaciji matematičkog modela



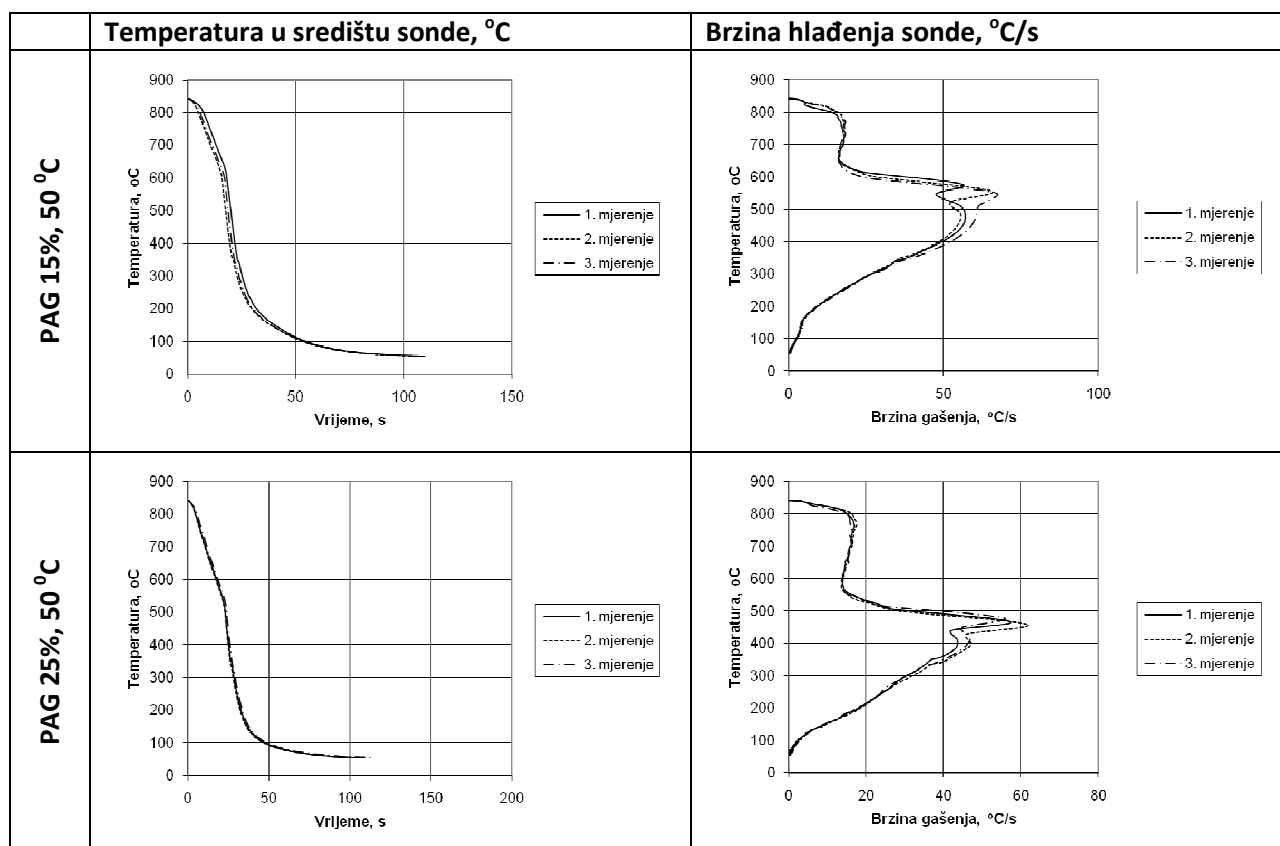
Tablica 15. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodnih otopina PAG temperature 50°C
namijenjene postavljanju matematičkog modela

	Temperatura u središtu sonde, °C	Brzina hlađenja sonde, °C/s
Voda, 50 °C		
PAG 5%, 50 °C		
PAG 10%, 50 °C		
PAG 20%, 50 °C		

Tablica 15. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodnih otopina PAG temperature 50°C namijenjene postavljanju matematičkog modela (NASTAVAK tablice 15)



Tablica 16. Snimljene krivulje hlađenja čiste vode i vodenih otopina PAG temperature 50°C namijenjene verifikaciji matematičkog modela

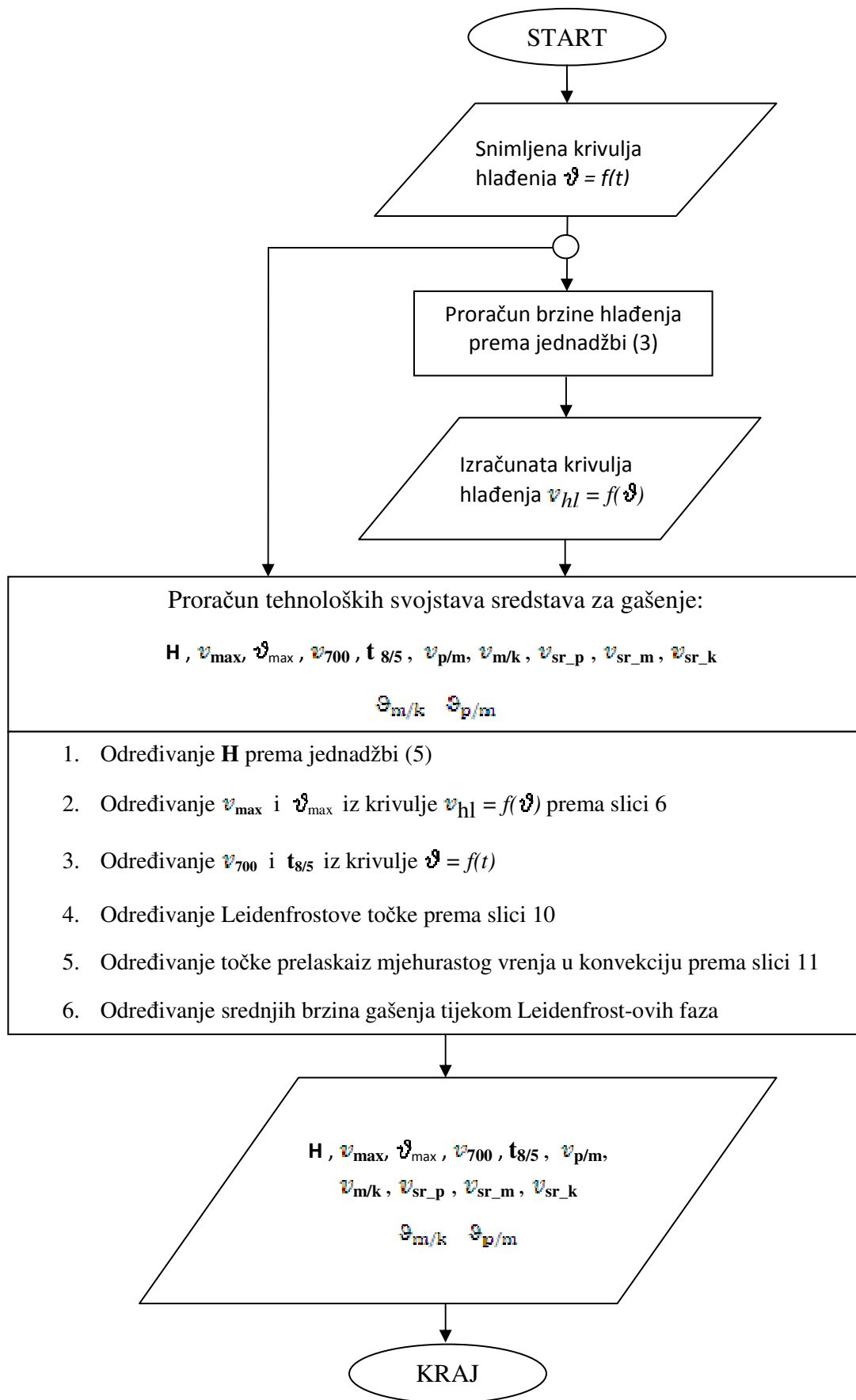


Na krivulje hlađenja prikazane u tablicama 9, 11, 13 i 15 primijenjen je matematički model za određivanje tehnoloških svojstava prikazan slikom 17. Predloženim modelom određuju se:

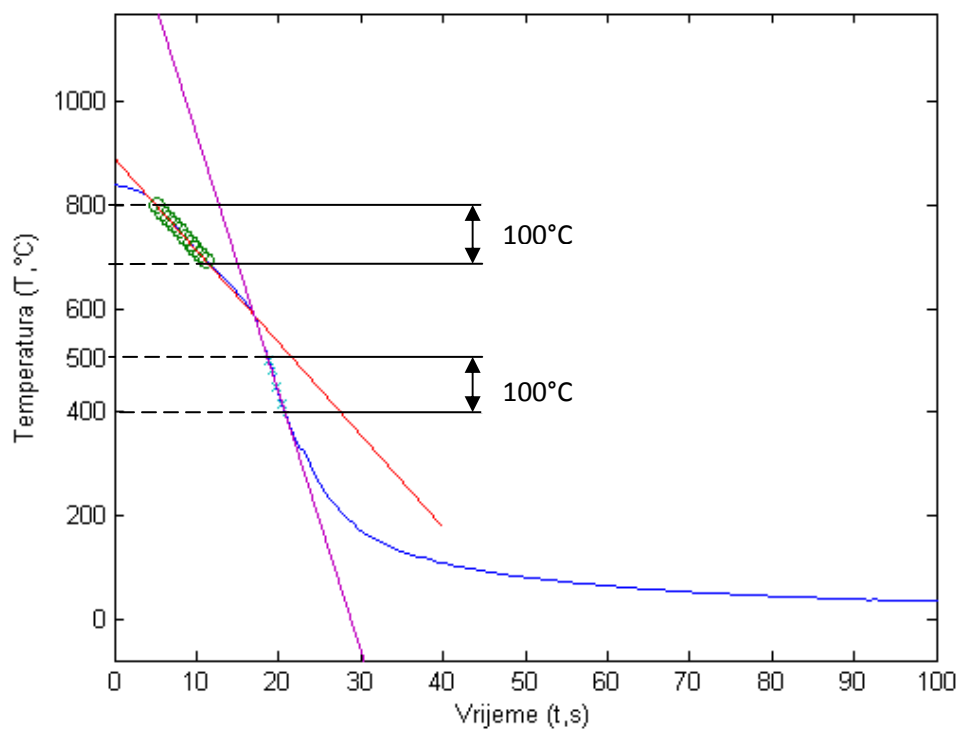
- intenzitet gašenja (H) prema jednadžbi (5),
- maksimalne brzine gašenja i pripadna temperature prema slici 6,
- brzina gašenja na temperaturi od 700°C ,
- vrijeme potrebno za hlađenje od temperature 800 do 500°C ,
- Leidenfrost-ova točka prijelaza iz faze parnog omotača u fazu mjehurastog vrenja,
- točka prijelaza iz faze mjehurastog vrenja u fazu konvekcije,
- srednje brzine hlađenja pojedinih Leidenfrost-ovih faza.

Pri analizi krivulja hlađenja posebno se problematičnim pokazalo određivanje točaka prijelaza između pojedinih Leidenfrost-ovih faza. Na slici 18 prikazano je određivanje Leidenfrost-ove točka prijelaza sredstva za gašenje iz faze parnog omotača u fazu mjehurastog vrenja. Ova točka je određena presjecištem dvaju regresijskih pravaca u dijagramu "temperatura – vrijeme". Jednadžbe pravaca određene su linearnom regresijskom analizom krivulje hlađenja u rasponu od 100°C . Pri tome je regresijski pravac karakterističan za fazu parnog omotača određen na temelju promjene temperature sonde u intervalu od temperature 800 do 700°C . Regresijski pravac karakterističan za fazu mjehurastog vrenja određen je na temelju promjene temperature sonde u intervalu od 500 do 400°C . Leidenfrost-ova temperatura prijelaza iz faze parnog omotača u fazu mjehurastog vrenja određena je kao presjecište navedenih pravaca.

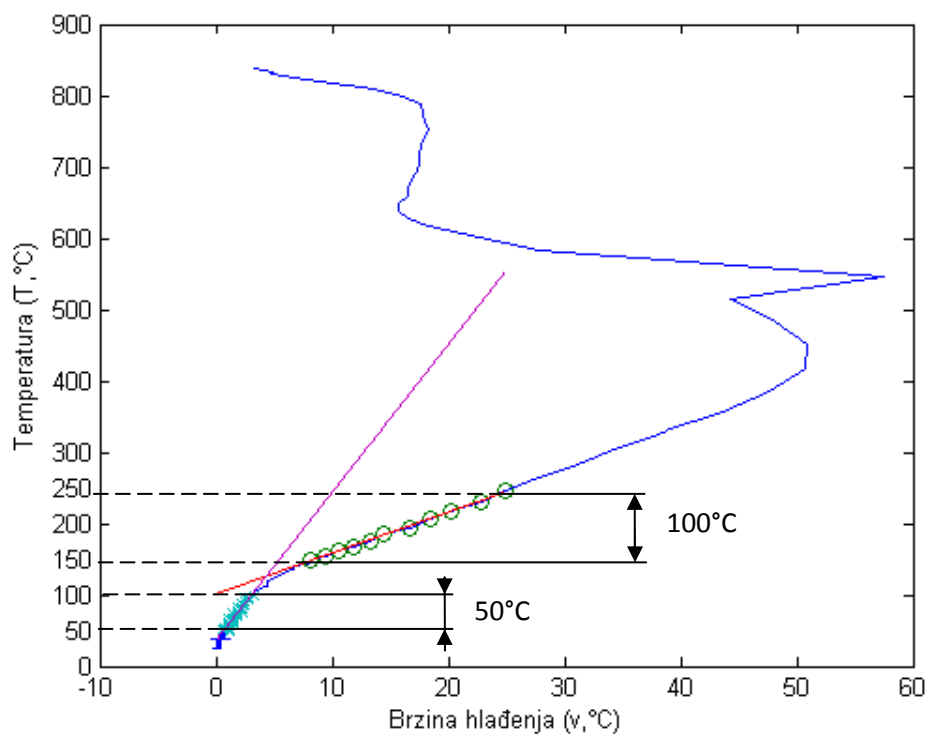
Na slici 19 prikazano je određivanje točke prijelaza sredstva za gašenje iz faze mjehurastog vrenja u fazu konvekcije. Ova točka određena je presjecištem dvaju regresijskih pravaca u dijagramu "temperatura – brzina hlađenja". Jednadžba regresijskog pravca karakterističnog za fazu mjehurastog vrenja određena je linearnom regresijskom analizom krivulje promjene brzine gašenja u rasponu od 100°C , na temelju promjene temperature sonde u intervalu temperatura od 250 do 150°C . Jednadžba regresijskog pravca karakterističnog za fazu konvekcije određena je linearnom regresijskom analizom krivulje promjene brzine gašenja u temperaturnom rasponu od 50°C , na temelju promjene temperature sonde u intervalu od 100 do 50°C . Točka prijelaza sredstva za gašenje iz faze mjehurastog vrenja u fazu konvekcije određena je kao presjecište navedenih pravaca.



Slika 17. Algoritam matematičkog modela za analizu krivulja hlađenja i određivanje tehnoloških svojstava sredstava za gašenje



Slika 18. Određivanje Leidenfrost-ove točke - linearnom regresijom na primjeru krivulje hlađenja 25%-tne otopine PAG-a u vodi temperature 20°C



Slika 19. Određivanje prijelaza iz faze mjehurastog vrenja u fazu konvekcije linearnom regresijom na primjeru krivulje hlađenja 25%-tne otopine PAG-a u vodi na temperaturi 20°C

Potpuni rezultati analize krivulja hlađenja i ispitana tehnološka svojstva sredstava za gašenje prikazani su tablicama I do VIII u prilogu rada. Prema planu ispitivanja rezultati analize grupirani su u dvije skupine: tehnološka svojstva namijenjena razvoju modela i tehnološka svojstva određena za njegovu verifikaciju. Tablice sadrže podatke o intenzitetu gašenja, maksimalnoj brzini gašenja i temperaturi na kojoj se ona pojavljuje, brzini gašenja na 700°C, vremenu hlađenja od 800 do 500°C, brzine i temperature prijelaza Leidenfrost-ovih faza kao i njihove srednje brzine gašenja za sva tri ispitivanja.

5. DISKUSIJA I PRIMJENA REZULTATA

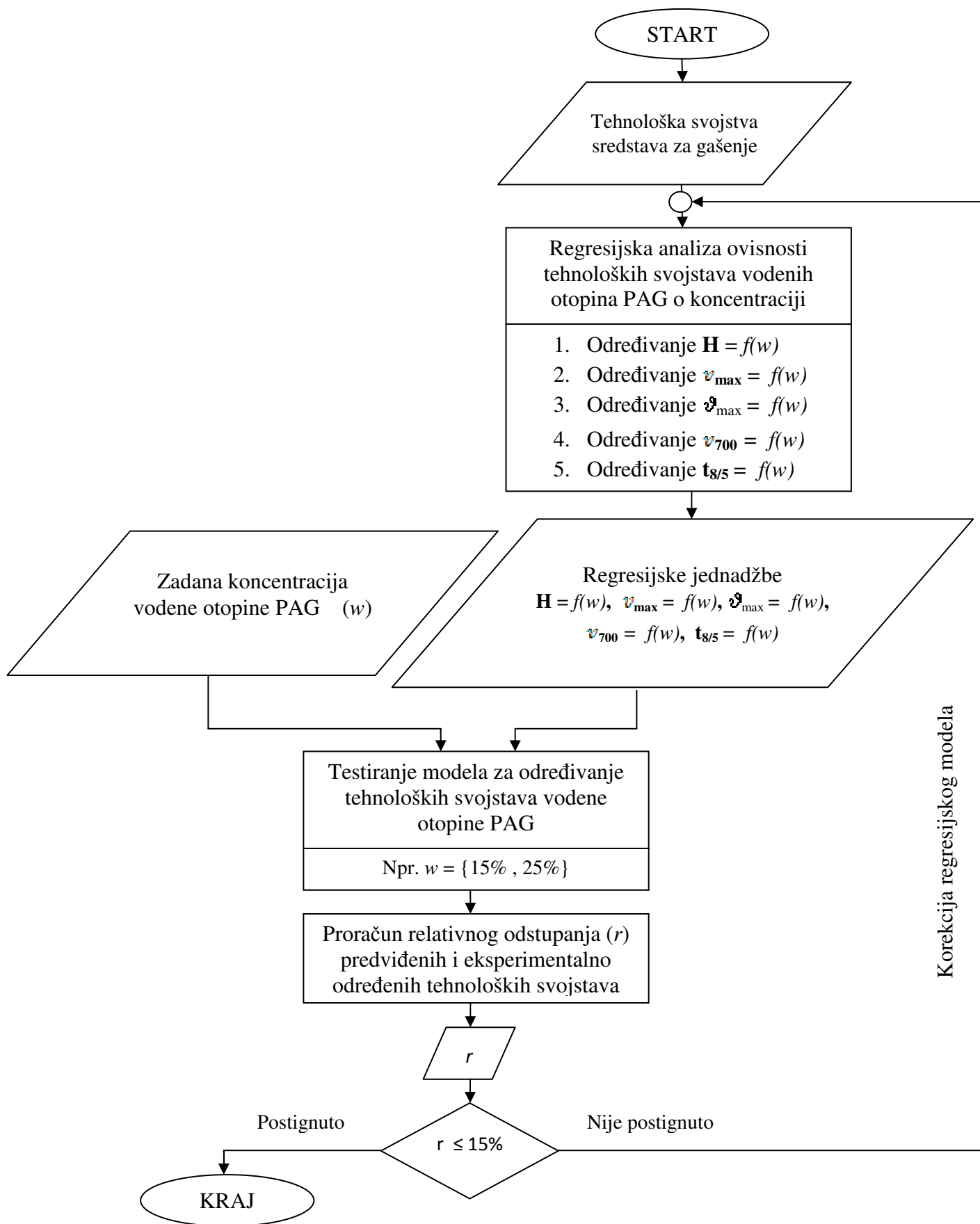
5.1 Osnovni matematički model za predviđanje tehnoloških svojstava

Na slici 20 prikazan je algoritam matematičkog modela za predviđanje tehnoloških svojstava vodenih otopina polimera PAG na temelju zadane koncentracije polimera. Ovaj dio matematičkog modela služi za primjenu u računalnim simulacijama postupka kaljenja i industrijsku primjenu u tehnološkoj kontroli stanja i svojstava vodenih otopina PAG u kalionicama.

Primjenom linearne i nelinearne regresijske analize određena je ovisnost tehnoloških svojstava vodenih otopina PAG o koncentraciji polimera u vodi (tablice 17-20). Intenzitet gašenja, maksimalna brzina gašenja i vrijeme hlađenja od temperature 800 do 500°C aproksimirani su polinomom trećeg stupnja, dok su ostali parametri aproksimirani polinomima prvog stupnja. Poseban je slučaj brzina gašenja na temperaturi 700°C jer je njezina ovisnost o koncentraciji PAG-a aproksimirana dvama pravcima; do 20%PAG i od 20% do 30 %PAG-a u vodi.

Tablica 17. Rezultati regresijske analize ovisnosti tehnoloških svojstava vodenih otopina polimera PAG temperature 20°C o koncentraciji polimera

Parametar	Regresijska jednadžba
Intenzitet gašenja	$H = 0,087z^3 + 0,0082z^2 - 0,47z + 0,6$ (26)
Maksimalna brzina gašenja	$v_{\max} = 13z^3 + 6,1z^2 - 58z + 94$ (27)
Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja	$t_{\max} = -46z + 540$ (28)
Vrijeme hlađenja od temperature 800 do 500°C	$t_{8/5} = -1,2z^3 + 2,7z^2 + 7,3z + 5,8$ (29)
Parametar koncentracije polimera	$z = (w - 13) / 12$ (30)
Brzina gašenja na temperaturi 700°C	$v_{700} = \begin{cases} -\frac{43}{8,5}(w - 8,8) + 75 & w \leq 20 \\ 16,44 & w > 20 \end{cases}$ (31)



Slika 20. Algoritam matematičkog modela za predviđanje tehnoloških svojstava vodenih otopina polimera PAG na temelju zadane koncentracije polimera otopljenog u vodi

Tablica 18. Rezultati regresijske analize ovisnosti tehnoloških svojstava vodenih otopina polimera PAG temperature 30°C o koncentraciji polimera

Tehnološko svojstvo	Funkcija
Intenzitet gašenja	$H = 0,065z^3 + 0,075z^2 - 0,48z + 0,55$ $z = (w - 13) / 12 \quad (32)$
Maksimalna brzina gašenja	$v_{\max} = \begin{cases} 16z^3 + 2,1z^2 - 61z + 110 & w \leq 20 \\ z = (w - 8,8) / 8,5 \\ -0,58w + 76,97 & w > 20 \end{cases} \quad (33)$
Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja	$v_{\max} = \begin{cases} -22z^3 + 28z^2 + 29z + 520 & w \leq 20 \\ z = (w - 8,8) / 8,5 \\ -10,87w + 774,8 & w > 20 \end{cases} \quad (34)$
Brzina gašenja na 700°C	$v_{700} = \begin{cases} 3,6z^2 - 43z + 69 & w \leq 20 \\ z = (w - 8,8) / 8,5 \\ -0,19w + 22,14 & w > 20 \end{cases} \quad (35)$
Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C	$t_{8/5} = \begin{cases} 0,029w^2 - 0,091w + 2,4 & w \leq 20 \\ 0,58w + 0,64 & w > 20 \end{cases} \quad (36)$

Tablica 19. Rezultati regresijske analize ovisnosti tehnoloških svojstava vodenih otopina polimera PAG temperature 40°C o koncentraciji polimera

Tehnološko svojstvo	Funkcija
Intenzitet gašenja	$H = 0,05z^3 + 0,095z^2 - 0,45z + 0,49$ $z = (w - 13) / 12$ (37)
Maksimalna brzina gašenja	$v_{\max} = \begin{cases} 19z^3 + 6,4z^2 - 62z + 93 & w \leq 20 \\ z = (w - 8,8) / 8,5 & \\ -0,4w + 74 & w > 20 \end{cases}$ (38)
Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja	$v_{\max} = \begin{cases} -62z^3 + 53z^2 + 63z + 500 & w \leq 20 \\ z = (w - 8,8) / 8,5 & \\ -11,1w + 751,37 & w > 20 \end{cases}$ (39)
Brzina gašenja na 700°C	$v_{700} = \begin{cases} 4,8z^2 - 36z + 57 & w \leq 20 \\ z = (w - 8,8) / 8,5 & \\ -0,16w + 20,88 & w > 20 \end{cases}$ (40)
Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C	$t_{8/5} = -1,3z^3 + 1,5z^2 + 8,4z + 8,3$ $z = (w - 13) / 12$ (41)

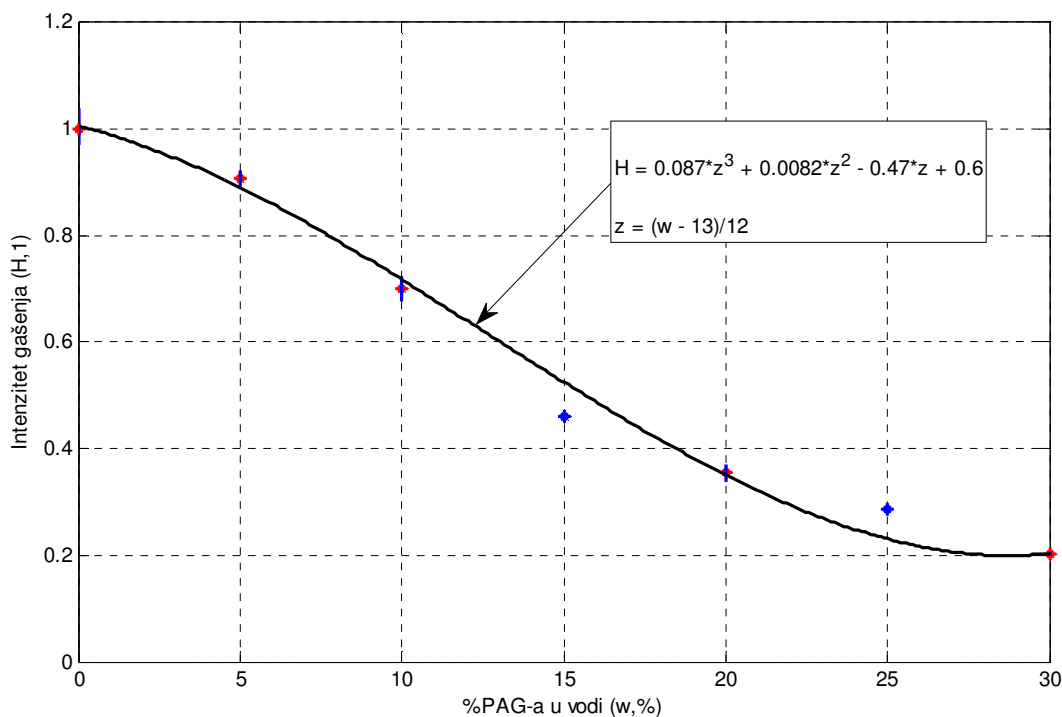
Tablica 20. Rezultati regresijske analize ovisnosti tehnoloških svojstava vodenih otopina polimera PAG temperature 50°C o koncentraciji polimera

Tehnološko svojstvo	Funkcija
Intenzitet gašenja	$H = 0,12z^2 - 0,33z + 0,39$ (42)
Maksimalna brzina gašenja	$v_{\max} = 14z^2 - 27z + 69$ (43)
Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja	$v_{\max} = -35z^3 - 40z^2 + 39z + 530$ (44)
Brzina gašenja na 700°C	$V_{700} = -11z^3 - 22z^2 - 9,1z + 17$ (45)
Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C	$t_{8/5} = 6,8z + 11$ (46)
Parametar koncentracije polimera	$z = (w - 13) / 12$ (47)

Primjenom matematičkog modela prikazanog algoritmom na slici 20 provjerene su regresijske jednadžbe (26) do (47) na primjeru 15%-tne i 25%-tne vodene otopine polimera PAG temperatura 20 do 50°C. Rezultati predviđeni odgovarajućim regresijskim modelima uspoređeni su s eksperimentalno određenim tehnološkim svojstvima. Iznosi relativnog odstupanja izračunati prema jednadžbi (48) iz modelom predviđenih i eksperimentalno određenih tehnoloških svojstava prikazani su u tablicama 21 do 24.

$$r' = \left| \frac{\text{predviđena tehnološka svojstva} - \text{eksperimentalno određena tehnološka svojstva}}{\text{eksperimentalno određena tehnološka svojstva}} \right| \cdot 100 \quad (48)$$

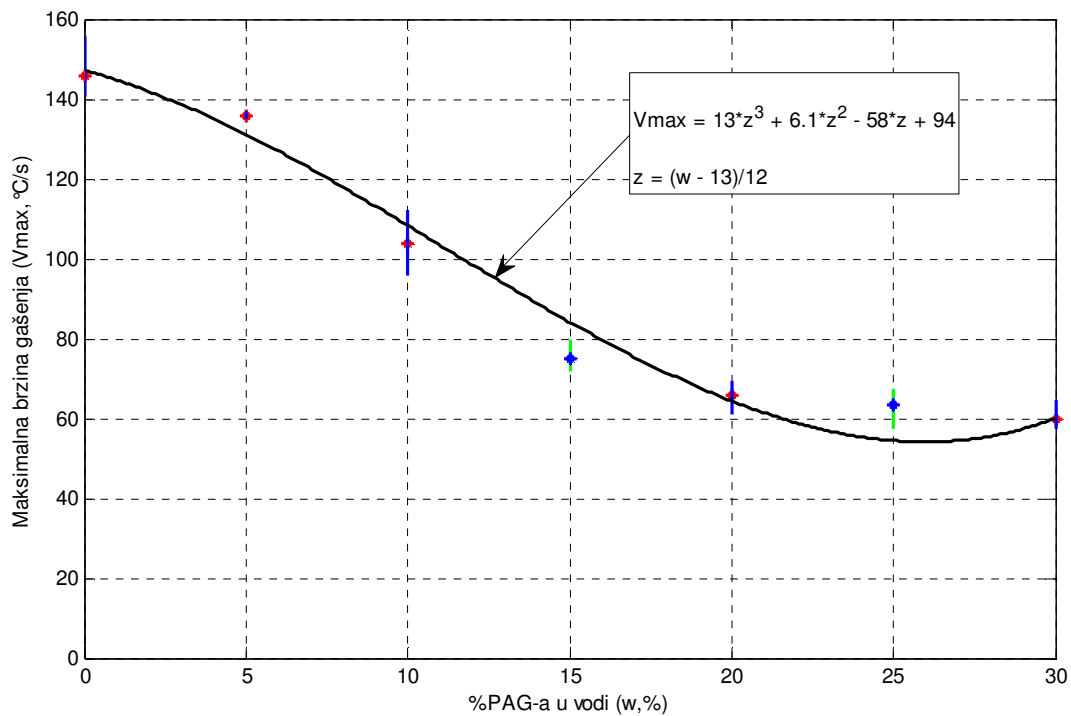
Na slikama 21 do 40 grafički su prikazane ovisnosti pojedinih tehnoloških svojstava o koncentraciji polimera PAG u vodi na temperaturama 20 do 50°C i odgovarajuće regresijske jednadžbe. Crvene točke predstavljaju srednje vrijednosti tehnoloških svojstava dobivenih iz podataka za razradu modela i nalaze se na plavim okomitim linijama koje pokazuju područja rasipanja dobivenih svojstava. Plave točke predstavljaju srednje vrijednosti tehnoloških svojstava dobivenih iz podataka za verifikaciju modela i nalaze se na zelenim okomitim linijama koje pokazuju područja rasipanja dobivenih tehnoloških svojstava.



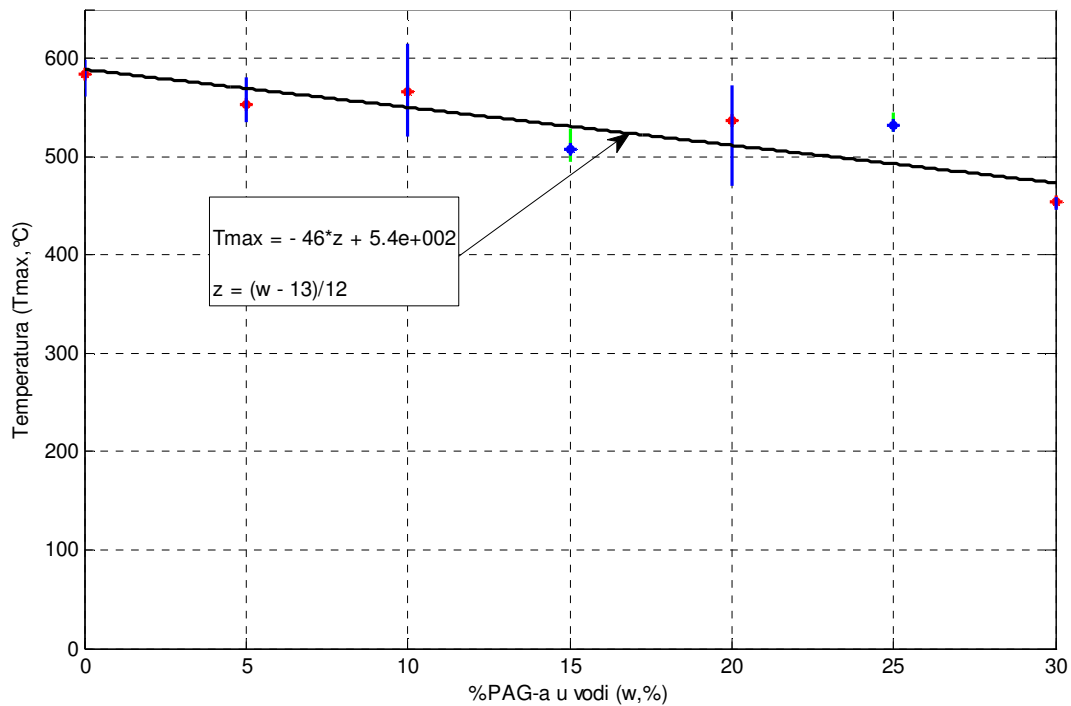
Slika 21. Ovisnost intenziteta gašenja (H) o koncentraciji polimera PAG u vodi

Tablica 21. Usporedba tehnoloških svojstava i njihovo međusobno relativno odstupanje za vodenu otopinu polimera PAG temperature 20°C

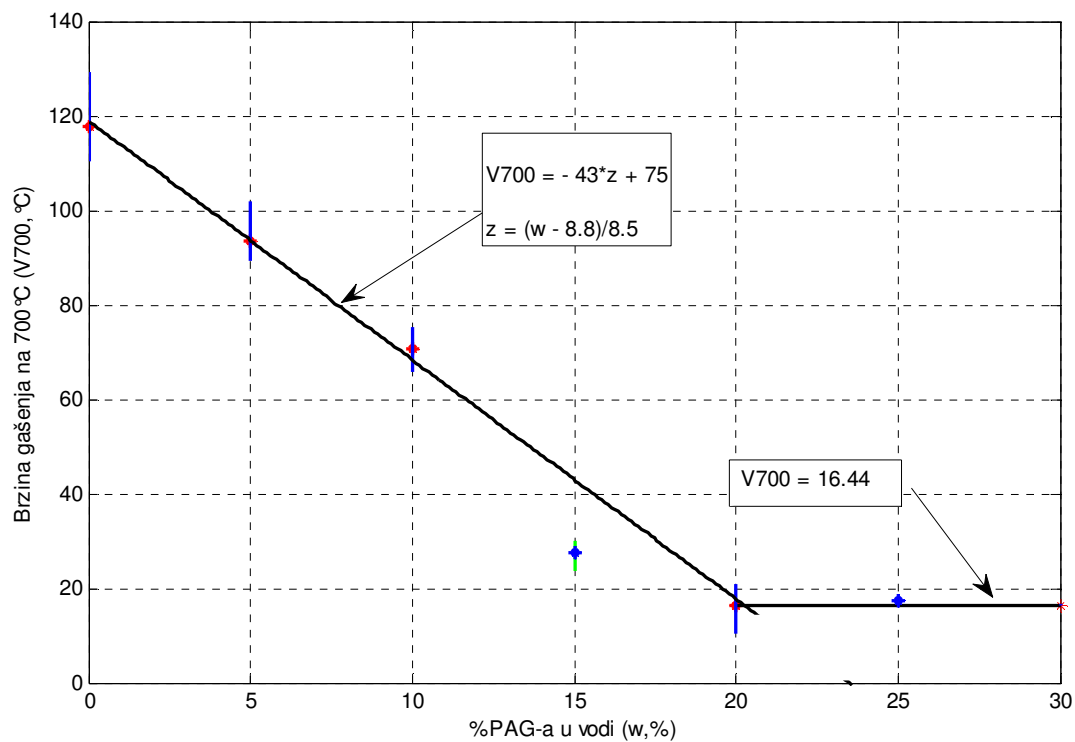
Naziv sredstva za gašenje	Tehnološka svojstva	Predviđanje regresijskog modela	Eksperimentalno određena vrijednost tehnoloških svojstava	Relativno odstupanje (%)
Vod. Otop. PAG 15%, 20°C	Intenzitet gašenja	0,5223	0,4611	13,27
	Maksimalna brzina gašenja, °C/s	85,56	75,10	13,93
	Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja, °C	532,33	507,43	4,91
	Brzina gašenja na 700°C, °C	43,64	27,69	57,60
	Vrijeme hlađenja s 800 na 500°C, s	7,09	8,03	13,26
Vod. Otop. PAG 25%, 20°C	Intenzitet gašenja	0,2252	0,2850	26,55
	Maksimalna brzina gašenja, °C/s	55,1	63,33	14,94
	Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja, °C	494	532,57	7,81
	Brzina gašenja na 700°C, °C	16,44	17,40	5,84
	Vrijeme hlađenja s 800 na 500°C, s	14,9	13,31	11,95



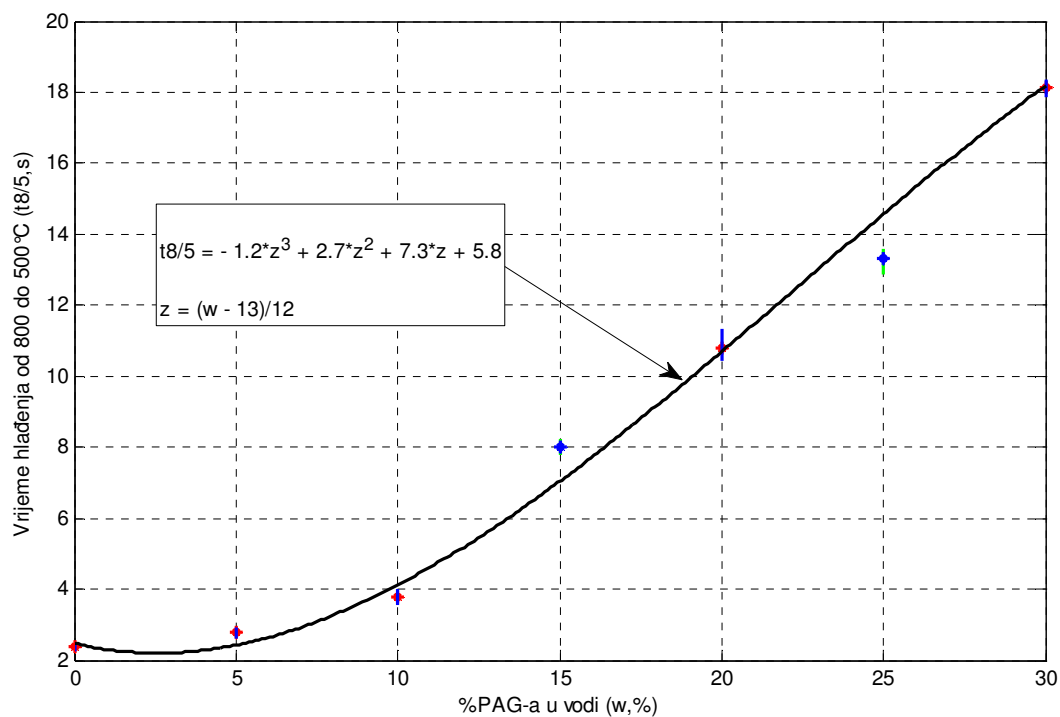
Slika 22. Ovisnost maksimalne brzine gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi



Slika 23. Ovisnost temperature na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi



Slika 24. Ovisnost brzine gašenja na temperaturi 700°C o koncentraciji polimera PAG u vodi



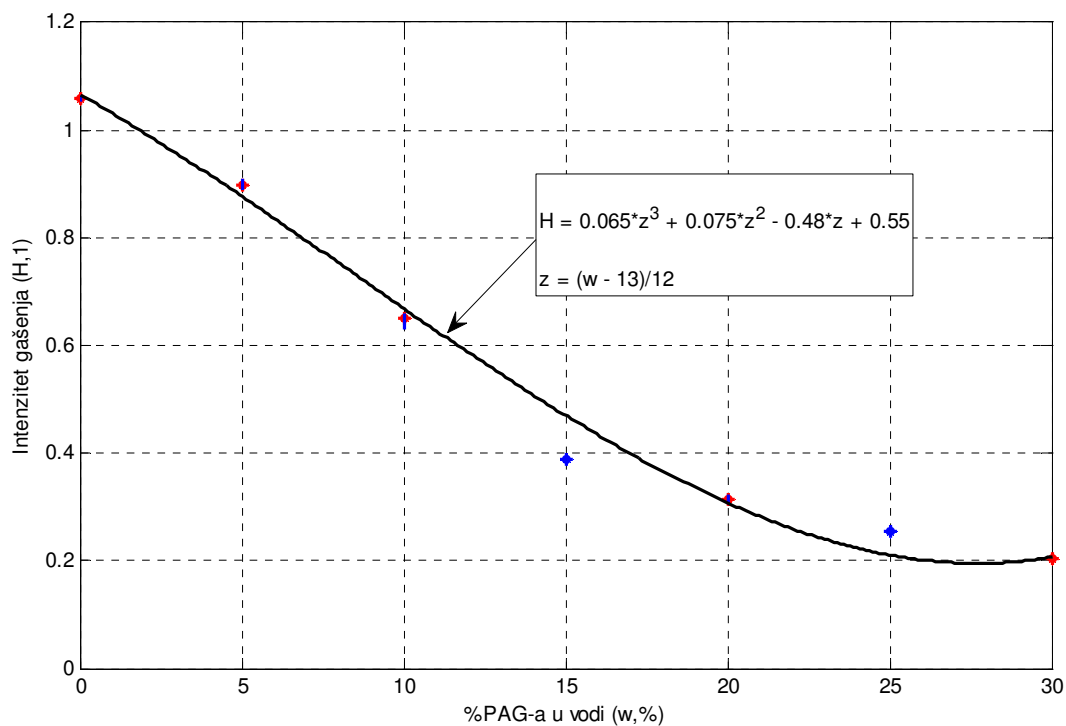
Slika 25. Ovisnost vremena hlađenja od temperature 800 do 500°C o koncentraciji polimera PAG u vodi

Iz slika 21 do 25 i tablice 21 proizlaze slijedeći zaključci:

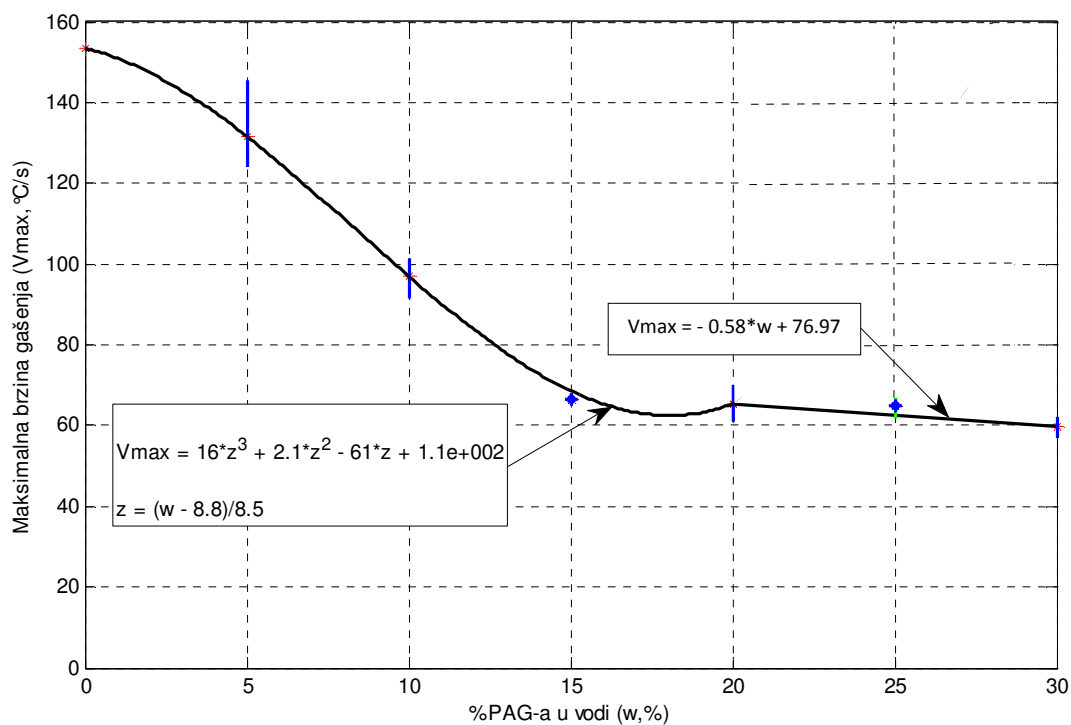
- Intenzitet gašenja u ovisnosti o koncentraciji polimera PAG aproksimiran je polinomom trećeg stupnja. Njegovo relativno odstupanje za 15%-tnu koncentraciju polimera PAG iznosi 13,27% , a za 25%-tnu koncentraciju 26,55%.
- Relativno odstupanje maksimalne brzine gašenja u slučaju 15%-tne koncentracije polimera PAG iznosi 13,93% , dok je ono za 25%-tnu koncentraciju 14,94%. Ovisnost maksimalne brzine gašenja o koncentraciji polimera PAG aproksimirana je polinomom trećeg stupnja, dok je ovisnost temperature na kojoj se ona pojavljuje o koncentraciji polimera PAG aproksimirana regresijskim pravcem. Njeno relativno odstupanje u slučaju 15%-tne koncentracije polimera PAG iznosi 4,91% , dok je ono za 25%-tnu koncentraciju 7,81%.
- Brzina gašenja na temperaturi 700°C aproksimirana je s dva pravca; pravcem negativnog trenda i konstantom čije se presjecište nalazi na 20%-tnoj vodenoj otopini polimera PAG. Relativno odstupanje brzine gašenja na temperaturi 700°C za slučaj 15%-tne koncentracije polimera PAG iznosi 57,60%, dok za 25%-tnu koncentraciju iznosi 5,84%.
- Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C aproksimirano je polinomom trećeg stupnja, a njegovo relativno odstupanje za 15%-tnu koncentraciju polimera PAG iznosi 13,26% , a za 25%-tnu koncentraciju iznosi 11,95%.

Tablica 22. Usporedba tehnoloških svojstava i njihovo međusobno relativno odstupanje za vodenu otopinu polimera PAG temperature 30°C

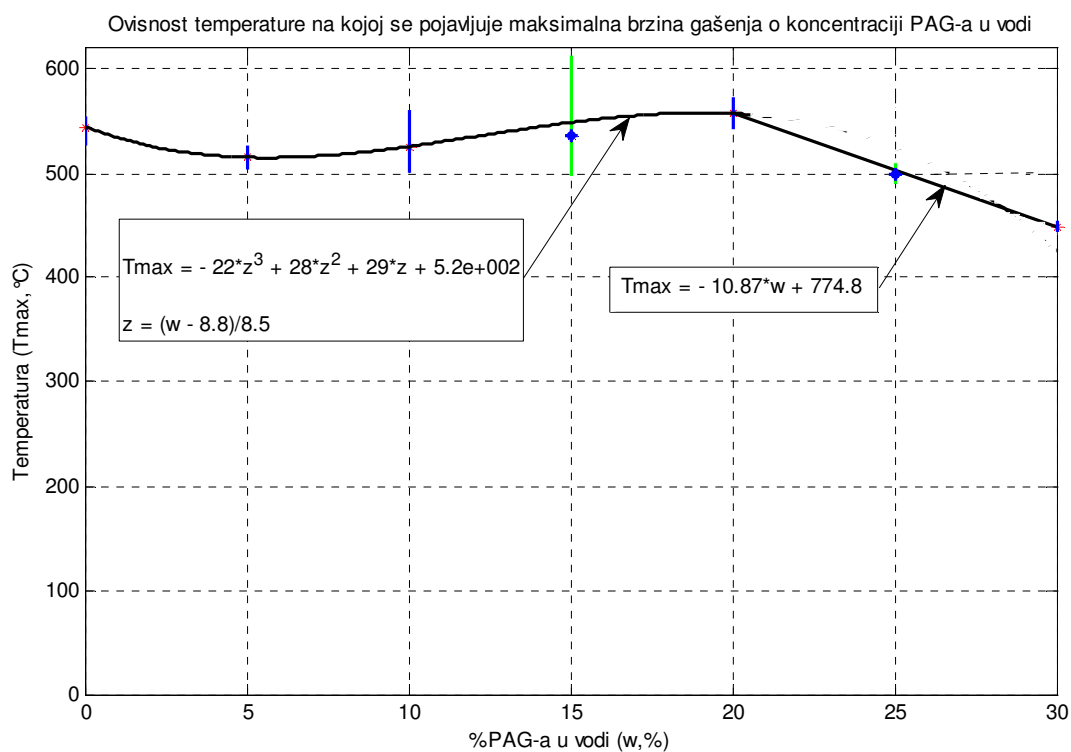
Naziv sredstva za gašenje	Tehnološka svojstva	Predviđanje regresijskog modela	Eksperimentalno određena vrijednost tehnoloških svojstava	Relativno odstupanje (%)
Vod, otop, PAG 15%, 30°C	Intenzitet gašenja	0,4724	0,3895	21,28
	Maksimalna brzina gašenja, °C/s	73,83	66,61	10,84
	Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja, °C	547,51	536,50	2,05
	Brzina gašenja na 700°C, °C	39,55	18,01	119,6
	Vrijeme hlađenja s 800 na 500°C, s	7,56	9,90	30,95
Vod, otop, PAG 25%, 30°C	Intenzitet gašenja	0,2100	0,2557	21,76
	Maksimalna brzina gašenja, °C/s	62,47	64,95	3,97
	Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja, °C	503,05	498,77	0,86
	Brzina gašenja na 700°C, °C	17,39	16,96	2,54
	Vrijeme hlađenja s 800 na 500°C, s	15,14	14,71	2,92



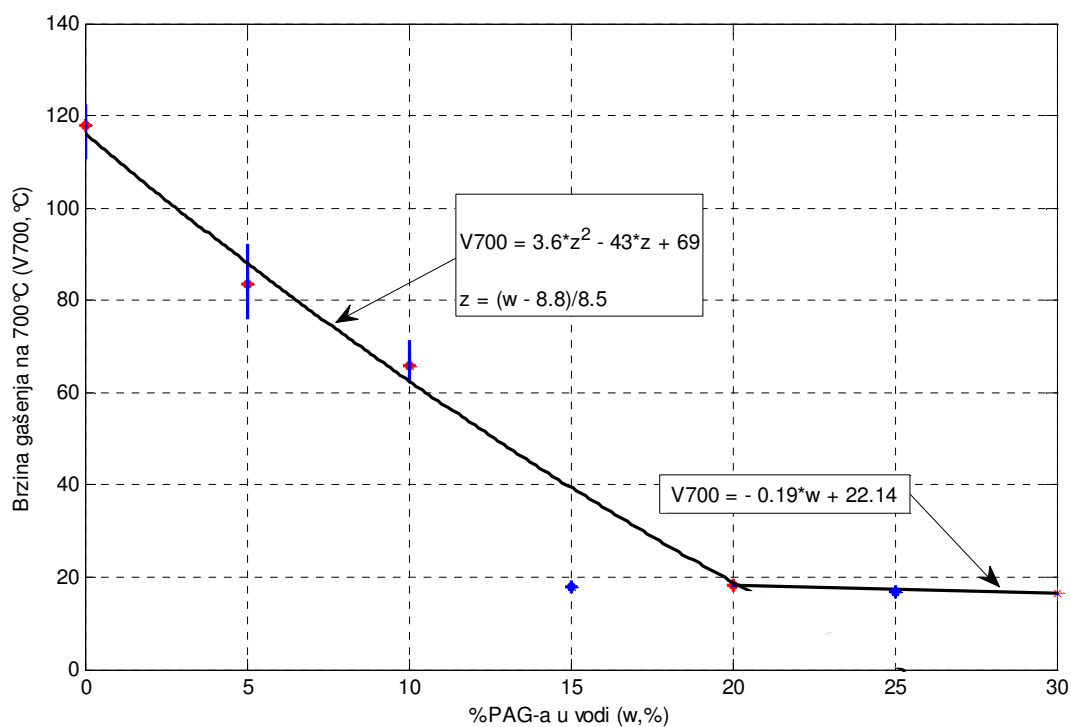
Slika 26. Ovisnost intenziteta gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 30°C



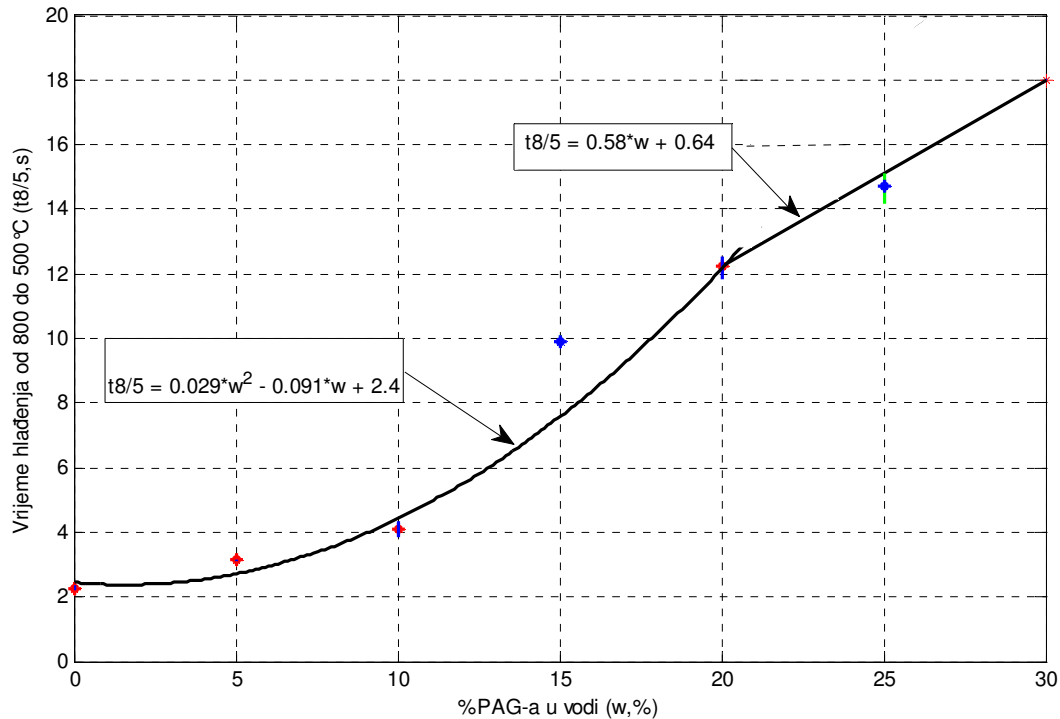
Slika 27. Ovisnost maksimalne brzine gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 30°C



Slika 28. Ovisnost temperature na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 30°C



Slika 29. Ovisnost brzine gašenja na 700°C o koncentraciji polimera PAG u vodi na 30°C



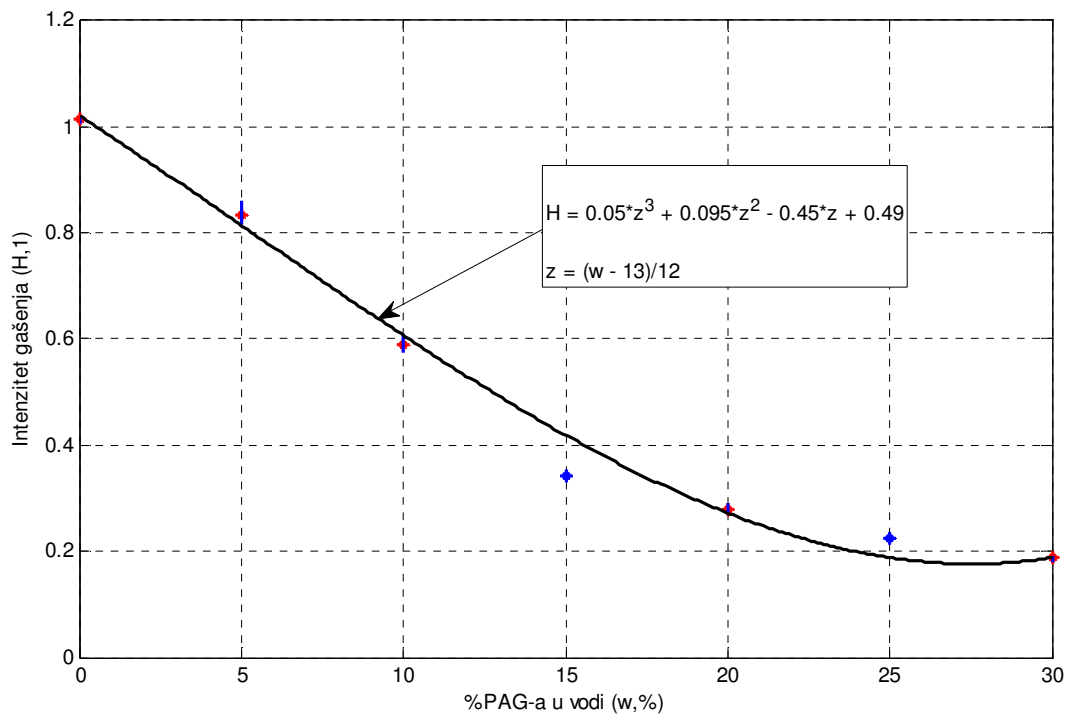
Slika 30. Ovisnost vremena hlađenja od 800 do 500°C o koncentraciji polimera PAG u vodi na 30°C

Iz slika 26 do 30 i tablice 22 proizlaze slijedeći zaključci:

- Intenzitet gašenja u ovisnosti o koncentraciji polimera PAG aproksimiran je polinomom trećeg stupnja. Njegovo relativno odstupanje za 15%-tnu i 25%-tnu vodenu otopinu polimera PAG iznosi oko 22%.
- Relativno odstupanje maksimalne brzine gašenja u slučaju 15%-tne koncentracije polimera PAG iznosi 10,84% , dok je ono za 25%-tnu koncentraciju 3,97%. Ovisnost maksimalne brzine gašenja o koncentraciji polimera PAG do koncentracije od 20% aproksimirana je polinomom trećeg stupnja, a za koncentracije iznad 20% pravcem. Isti je princip proveden i za aproksimaciju ovisnosti temperature na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja o koncentraciji polimera PAG. Njeno relativno odstupanje u slučaju 15%-tne koncentracije polimera PAG iznosi 2,05% , dok je ono za 25%-tnu koncentraciju 0,86%.
- Brzina gašenja na temperaturi 700°C aproksimirana je parabolom i pravcem. Relativno odstupanje brzine gašenja na temperaturi 700°C za slučaj 15%-tne

koncentracije polimera PAG iznosi 119,6%, dok za 25%-tnu koncentraciju iznosi 2,54%.

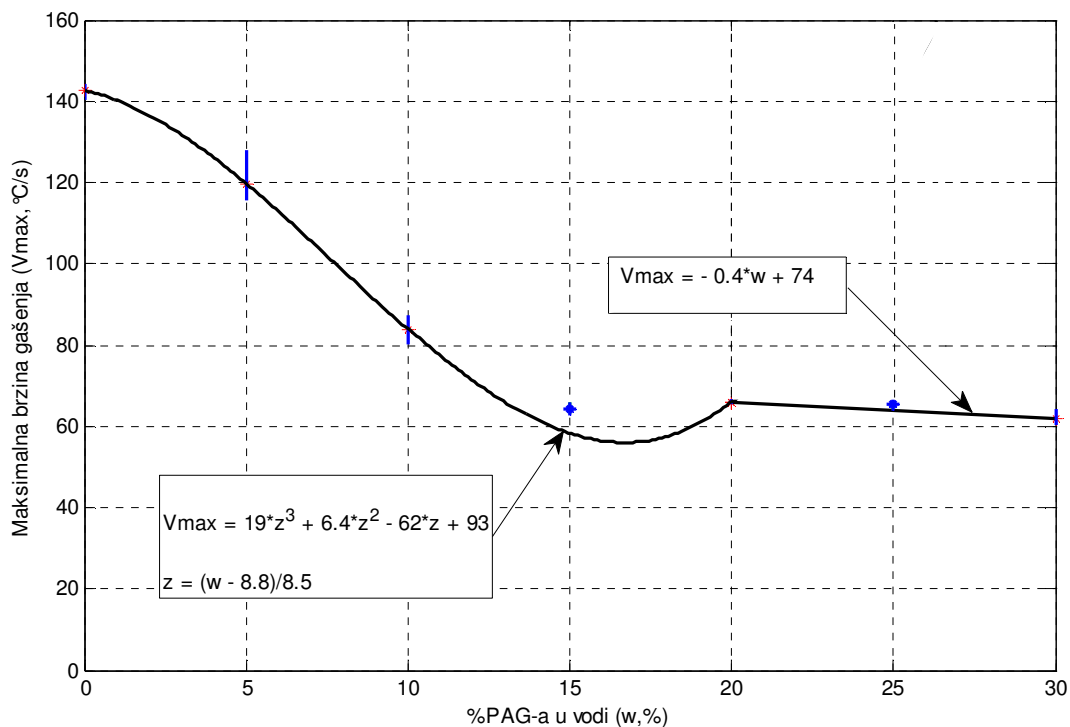
- Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C također je aproksimirano polinomom drugog stupnja za koncentracije polimera PAG do 20%, a za one iznad aproksimirano je pravcem. Relativno odstupanje za 15%-tnu koncentraciju polimera PAG iznosi 30,95% , a za 25%-tnu koncentraciju iznosi 2,92%.



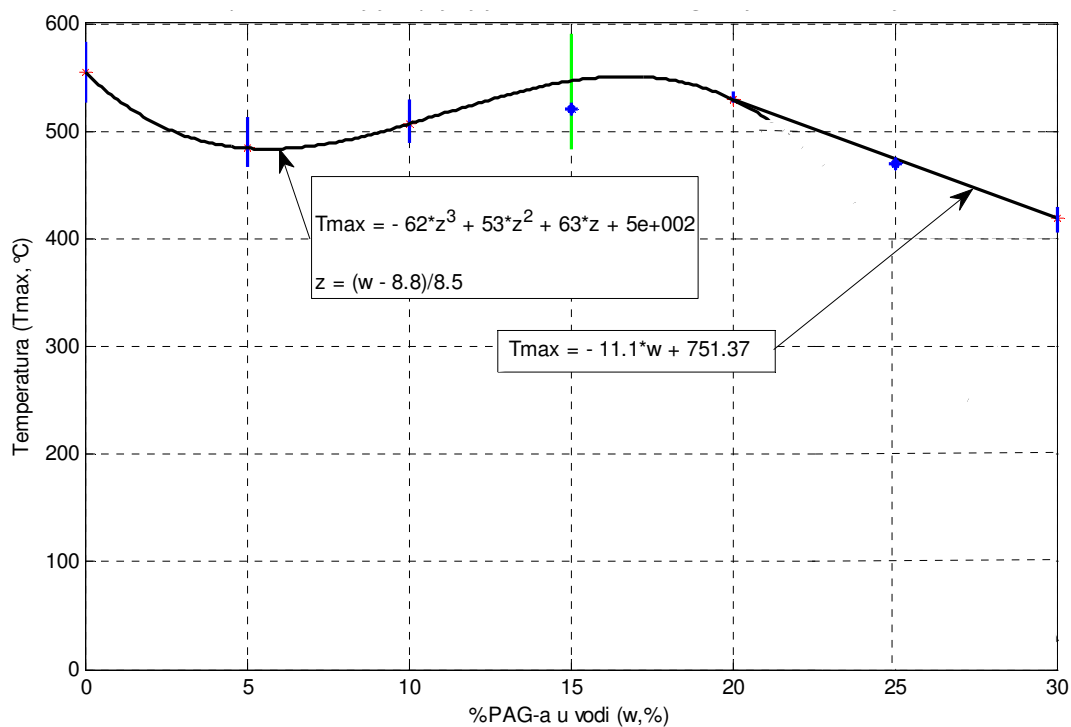
Slika 31. Ovisnost intenziteta gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 40°C

Tablica 23. Usporedba tehnoloških svojstava i njihovo međusobno relativno odstupanje za vodenu otopinu polimera PAG temperature 40°C

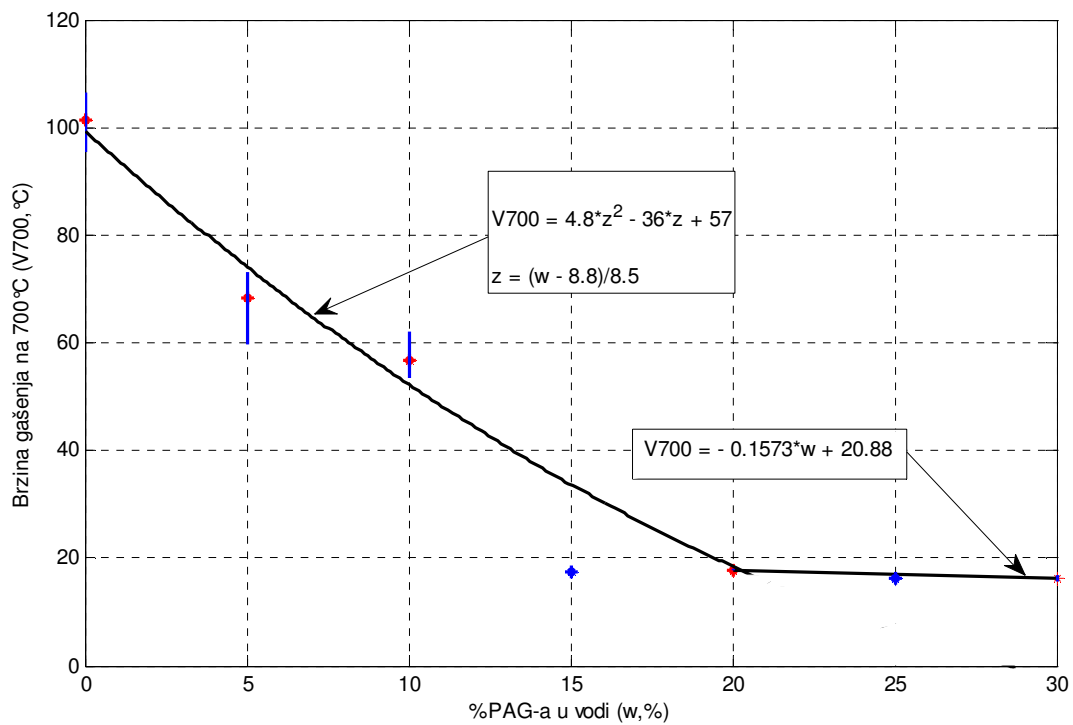
Naziv sredstva za gašenje	Tehnološka svojstva	Predviđanje regresijskog modela	Eksperimentalno određena vrijednost tehnoloških svojstava	Relativno odstupanje (%)
Vod, otop, PAG 15%, 40°C	Intenzitet gašenja	0,4179	0,3432	21,77
	Maksimalna brzina gašenja, °C/s	58,56	64,14	9,53
	Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja, °C	550,09	520,83	5,62
	Brzina gašenja na 700°C, °C	33,29	17,49	90,34
	Vrijeme hlađenja s 800 na 500°C, s	9,74	11,10	13,96
Vod, otop, PAG 25%, 40°C	Intenzitet gašenja	0,1850	0,2239	21,03
	Maksimalna brzina gašenja, °C/s	64,00	65,35	2,11
	Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja, °C	473,87	470,03	0,82
	Brzina gašenja na 700°C, °C	16,95	16,37	3,54
	Vrijeme hlađenja s 800 na 500°C, s	16,90	16,89	0,06



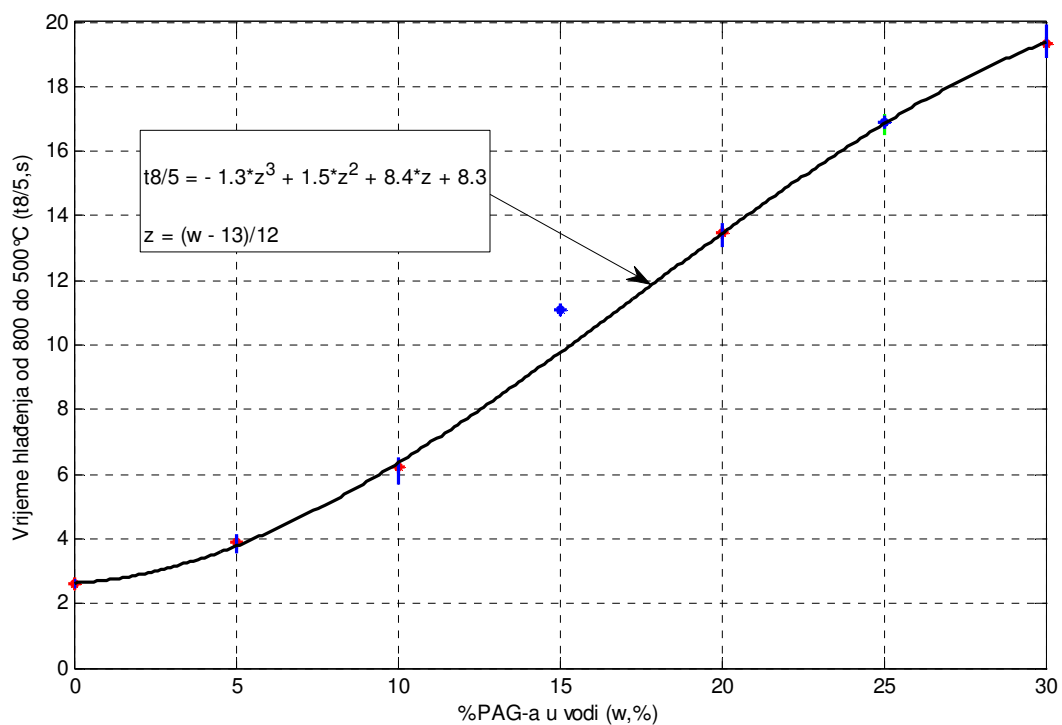
Slika 32. Ovisnost maksimalne brzine gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 40°C



Slika 33. Ovisnost temperature na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 40°C



Slika 34. Ovisnost brzine gašenja na 700°C o koncentraciji polimera PAG u vodi na 40°C



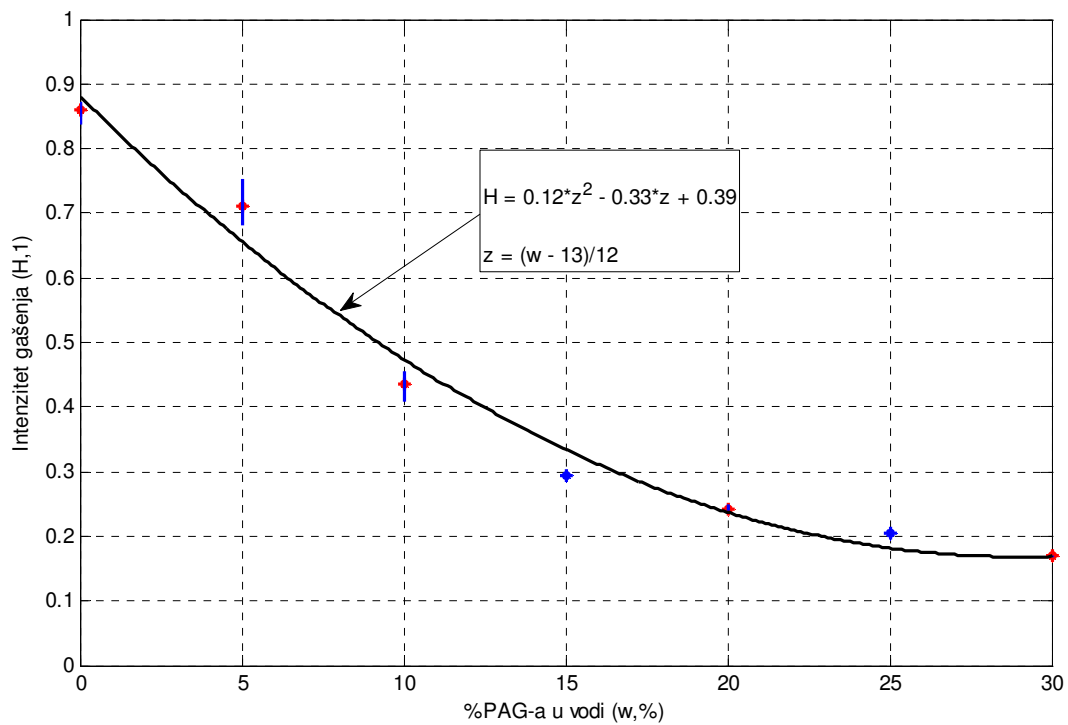
Slika 35. Ovisnost vremena hlađenja od 800 do 500°C o koncentraciji polimera PAG u vodi na 40°C

Iz slika 31 do 35 i tablice 23 proizlaze slijedeći zaključci:

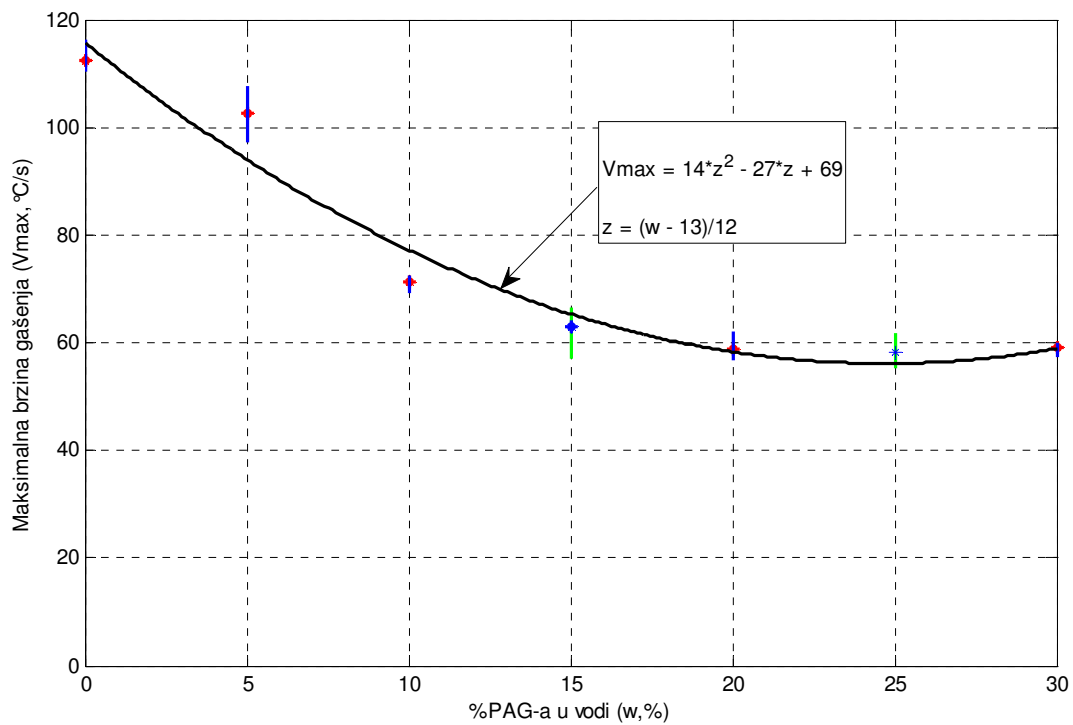
- Intenzitet gašenja u ovisnosti o koncentraciji polimera PAG aproksimiran je polinomom trećeg stupnja. Njegovo relativno odstupanje za 15%-tnu koncentraciju polimera PAG iznosi 21,77%, a za 25%-tnu otopinu 21,03%.
- Relativno odstupanje maksimalne brzine gašenja u slučaju 15%-tne koncentracije polimera PAG iznosi 9,53% , dok je ono za 25%-tnu koncentraciju 2,11%. Ovisnost maksimalne brzine gašenja o koncentraciji polimera PAG do koncentracije od 20% aproksimirana je polinomom trećeg stupnja, a za koncentracije iznad 20% pravcem. Isti je princip proveden i za aproksimaciju ovisnosti temperature na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja o koncentraciji polimera PAG. Njeno relativno odstupanje u slučaju 15%-tne koncentracije polimera PAG iznosi 5,62% , dok je ono za 25%-tnu koncentraciju 0,82%.
- Brzina gašenja na temperaturi 700°C aproksimirana je parabolom i pravcem. Relativno odstupanje brzine gašenja na temperaturi 700°C za slučaj 15%-tne koncentracije polimera PAG iznosi 90,34%, dok za 25%-tnu koncentraciju iznosi 3,54%.
- Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C također je aproksimirano polinomom drugog stupnja za koncentracije polimera PAG do 20%, a za one iznad aproksimirano je pravcem. Relativno odstupanje za 15%-tnu koncentraciju polimera PAG iznosi 13,96% , a za 25%-tnu koncentraciju iznosi 0,06%.

Tablica 24. Usporedba tehnoloških svojstava i njihovo međusobno relativno odstupanje za vodenu otopinu polimera PAG temperature 50°C

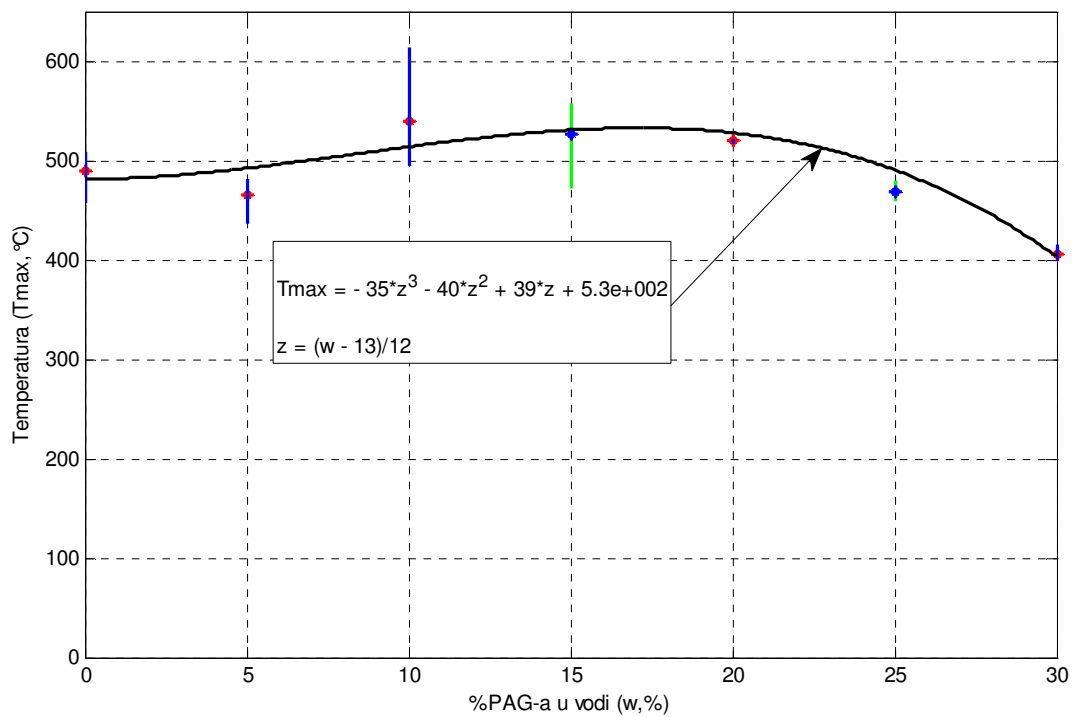
Naziv sredstva za gašenje	Tehnološka svojstva	Predviđanje regresijskog modela	Eksperimentalno određena vrijednost tehnoloških svojstava	Relativno odstupanje (%)
Vod, otop, PAG 15%, 50°C	Intenzitet gašenja	0,3383	0,2941	15,03
	Maksimalna brzina gašenja, °C/s	64,88	62,98	3,02
	Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja, °C	535,23	527,17	1,53
	Brzina gašenja na 700°C, °C	16,04	17,31	7,92
	Vrijeme hlađenja s 800 na 500°C, s	12,13	12,78	5,36
Vod, otop, PAG 25%, 50°C	Intenzitet gašenja	0,1800	0,2059	14,39
	Maksimalna brzina gašenja, °C/s	56,00	58,08	3,71
	Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja, °C	494,00	468,53	5,44
	Brzina gašenja na 700°C, °C	18,90	16,07	17,61
	Vrijeme hlađenja s 800 na 500°C, s	17,80	18,38	3,26



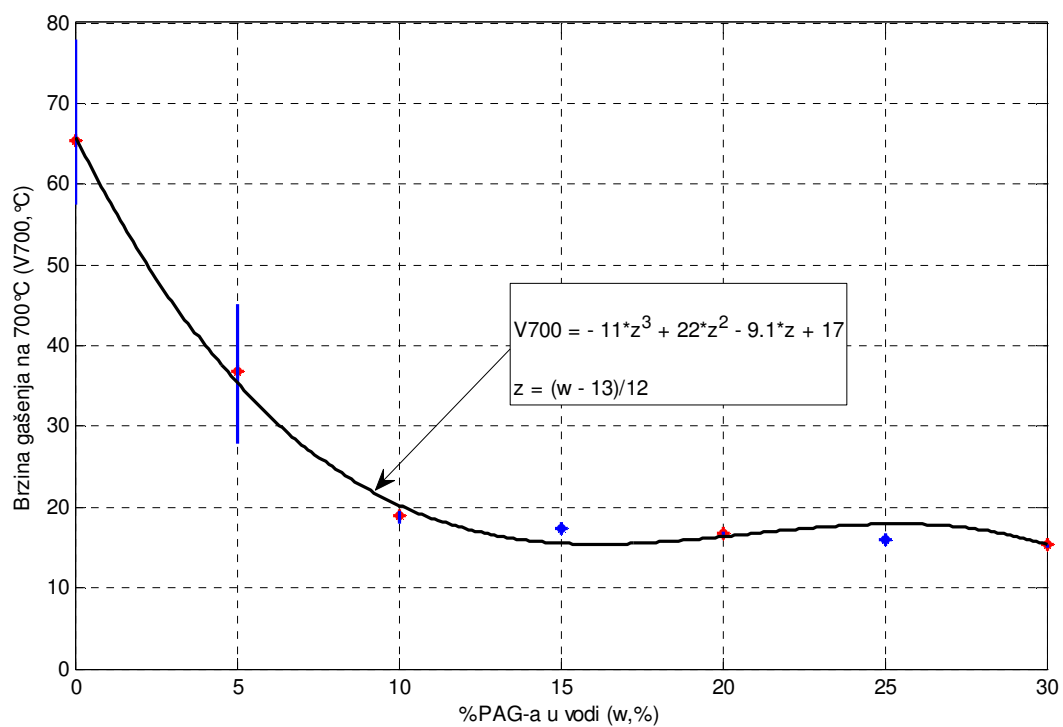
Slika 36. Ovisnost intenziteta gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 50°C



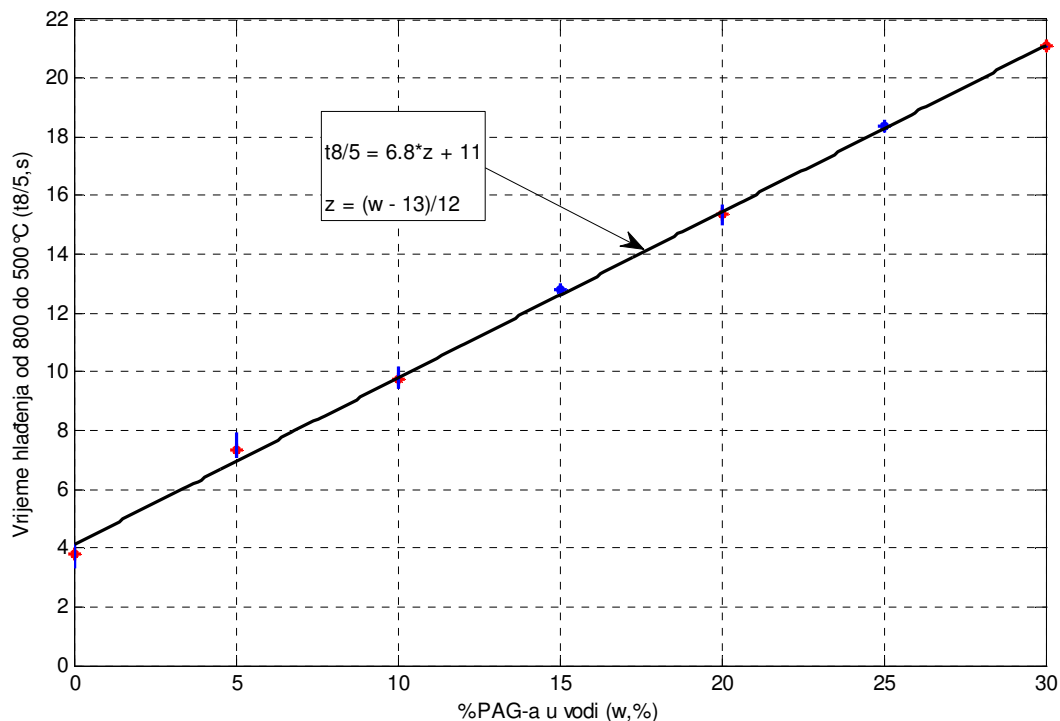
Slika 37. Ovisnost maksimalne brzine gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 50°C



Slika 38. Ovisnost temperature na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja o koncentraciji polimera PAG u vodi na 50°C



Slika 39. Ovisnost brzine gašenja na 700°C o koncentraciji polimera PAG u vodi na 50°C



Slika 40. Ovisnost vremena hlađenja od 800 do 500°C o koncentraciji polimera PAG u vodi na 50°C

Iz slika 36 do 40 i tablice 24 proizlaze slijedeći zaključci:

- Intenzitet gašenja u ovisnosti o koncentraciji polimera PAG aproksimiran je polinomom trećeg stupnja. Njegovo relativno odstupanje za 15%-tnu koncentraciju polimera PAG iznosi 15,03%, a za 25%-tnu otopinu 14,39%.
- Relativno odstupanje maksimalne brzine gašenja u slučaju 15%-tne koncentracije polimera PAG iznosi 3,02% , dok je ono za 25%-tnu koncentraciju 3,71%. Ovisnost maksimalne brzine gašenja o koncentraciji polimera PAG do koncentracije od 20% aproksimirana je polinomom trećeg stupnja, a za koncentracije iznad 20% pravcem. Isti je princip proveden i za aproksimaciju ovisnosti temperature na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja o koncentraciji polimera PAG. Njeno relativno odstupanje u slučaju 15%-tne koncentracije polimera PAG iznosi 1,53% , dok je ono za 25%-tnu koncentraciju 5,44%.
- Brzina gašenja na temperaturi 700°C aproksimirana je parabolom i pravcem. Relativno odstupanje brzine gašenja na temperaturi 700°C za slučaj 15%-tne

koncentracije polimera PAG iznosi 7,92%, dok za 25%-tnu koncentraciju iznosi 17,61%.

- Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C također je aproksimirano polinomom drugog stupnja za koncentracije polimera PAG do 20%, a za one iznad aproksimirano je pravcem. Relativno odstupanje za 15%-tnu koncentraciju polimera PAG iznosi 5,36% , a za 25%-tnu koncentraciju iznosi 3,26%.

5.2 Matematički modela za predviđanje parametara gašenja ovisnih o koncentraciji i temperaturi vodene otopine polimera

Intenzitet gašenja kao funkcija koncentracije polimera PAG i temperature sredstva za gašenje prikazan je izrazom:

$$\mathbf{H} = f(\%PAG, \vartheta) \quad (49)$$


x
 y

gdje su parametrima funkcije pridružene opće varijable x i y koje se koriste u daljnjem raspisivanju polinoma.

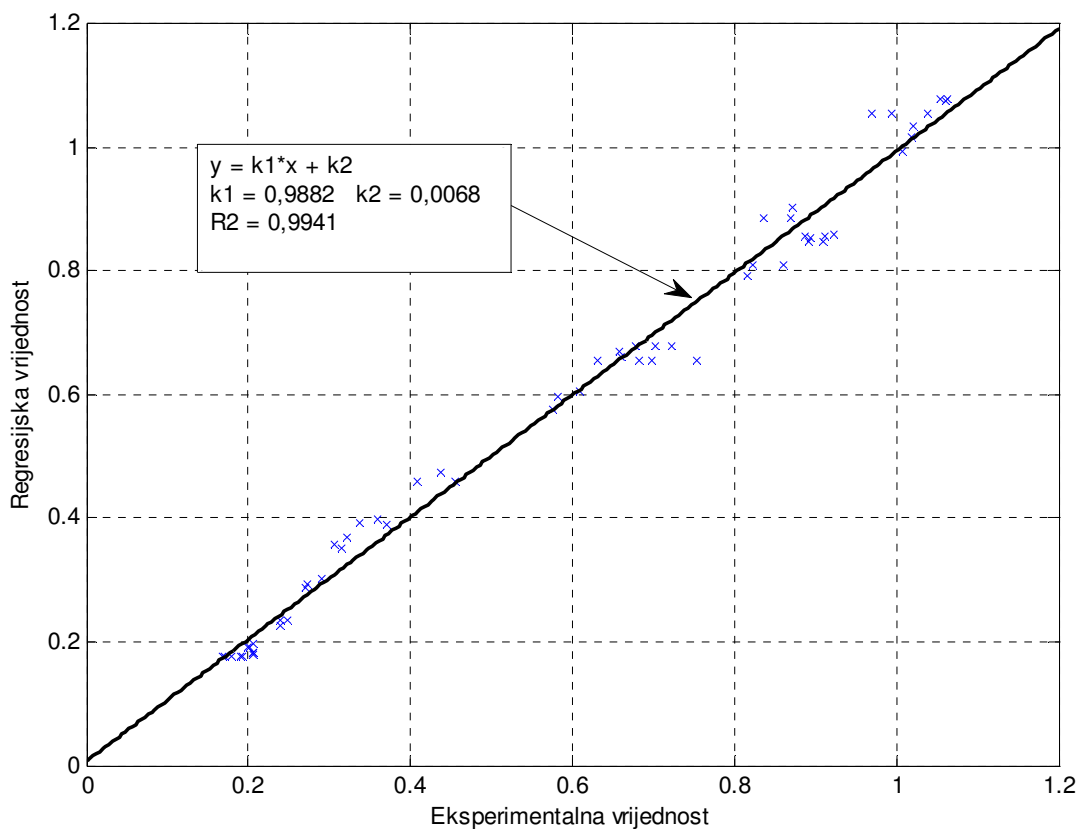
Jednadžbom (50) prikazana je ovisnost intenziteta gašenja o koncentraciji polimera PAG i temperaturi sredstva za gašenje u obliku polinoma čiji su koeficijenti dani u tablici 25.

$$\mathbf{H} = a_1 x + a_2 y + a_3 x y + a_4 x^2 y + a_5 x y^2 + a_6 x^2 + a_7 y^2 + a_8 \quad (50)$$

Tablica 25: Koeficijenti polinoma koji opisuje intenzitet gašenja kao funkciju koncentracije polimera PAG i temperature sredstva za gašenje

Naziv koeficijenta	Vrijednost
a_1	$-1.467240602120877 \cdot 10^{-2}$
a_2	$2.574182389966032 \cdot 10^{-2}$
a_3	$-1.579258486507376 \cdot 10^{-3}$
a_4	$2.051309427977564 \cdot 10^{-5}$
a_5	$1.562297015369952 \cdot 10^{-5}$
a_6	$-1.406903464289104 \cdot 10^{-5}$
a_7	$-4.323622855589746 \cdot 10^{-4}$
a_8	$6.976217692107226 \cdot 10^{-1}$

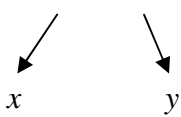
Slikom 41 prikazan je regresijski pravac provučen kroz točke konstruirane iz eksperimentalno dobivenih podataka za intenzitet gašenja i podataka za intenzitet gašenja dobivenih matematičkim modelom. Za provučeni je pravac dana i njegova jednadžba te pripadni koeficijent determinacije R^2 .



Slika 41: Intenzitet gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava

Koeficijent determinacije na slici 41 iznosi 0,9941 što ovaj matematički model čini gotovo idealnim jer je njegova pouzdanost gotovo 100%. Model se smatra pouzdanim ako je koeficijent determinacije veći od 0,85.

Maksimalna brzina gašenja kao funkcija koncentracije polimera PAG i temperature sredstva za gašenje prikazana je izrazom:

$$v_{\max} = f(\%PAG, \vartheta) \quad (51)$$


gdje su parametrima funkcije pridružene opće varijable x i y koje se koriste u daljnjem raspisivanju polinoma.

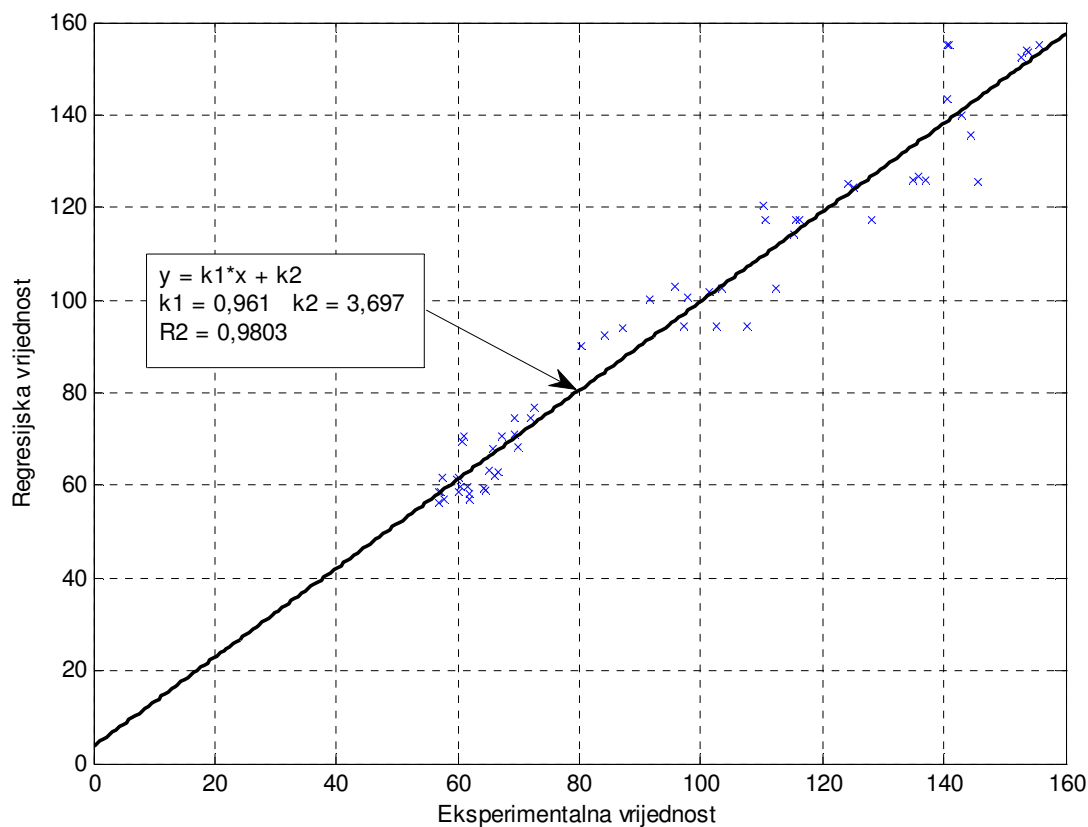
Jednadžbom (52) prikazana je ovisnost maksimalne brzine gašenja o koncentraciji polimera PAG i temperaturi sredstva za gašenje u obliku polinoma čiji su koeficijenti dani u tablici 26.

$$v_{\max} = a_1 x + a_2 y + a_3 x y + a_4 x^2 y + a_5 x y^2 + a_6 x^2 + a_7 y^2 + a_8 \quad (52)$$

Tablica 26: Koeficijenti polinoma koji opisuje maksimalnu brzinu gašenja kao funkciju koncentracije polimera PAG i temperature sredstva za gašenje

Naziv koeficijenta	Vrijednost
a_1	-4.052910905433396
a_2	3.020451134818440
a_3	$-1.489898351407352 \cdot 10^{-1}$
a_4	$1.079015243187184 \cdot 10^{-3}$
a_5	$2.252233341015732 \cdot 10^{-3}$
a_6	$7.710508930226147 \cdot 10^{-2}$
a_7	$-5.926227121272584 \cdot 10^{-2}$
a_8	$1.174403856724251 \cdot 10^{-2}$

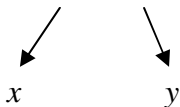
Slikom 42 prikazan je regresijski pravac provučen kroz točke konstruirane iz eksperimentalno dobivenih podataka za maksimalnu brzinu gašenja i podataka za maksimalnu brzinu gašenja dobivenih matematičkim modelom. Za provučeni je pravac dana i njegova jednadžba te pripadni koeficijent determinacije R^2 .



Slika 42: Maksimalna brzina gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava

Koeficijent determinacije na slici 42 iznosi 0,9803 što je odlično i model čini vrlo pouzdanim.

Temperatura na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja kao funkcija koncentracije polimera PAG i temperature sredstva za gašenje prikazana je izrazom:

$$\vartheta_{\max} = f(\%PAG, \vartheta) \quad (53)$$


gdje su parametrima funkcije pridružene opće varijable x i y koje se koriste u daljnjem raspisivanju polinoma.

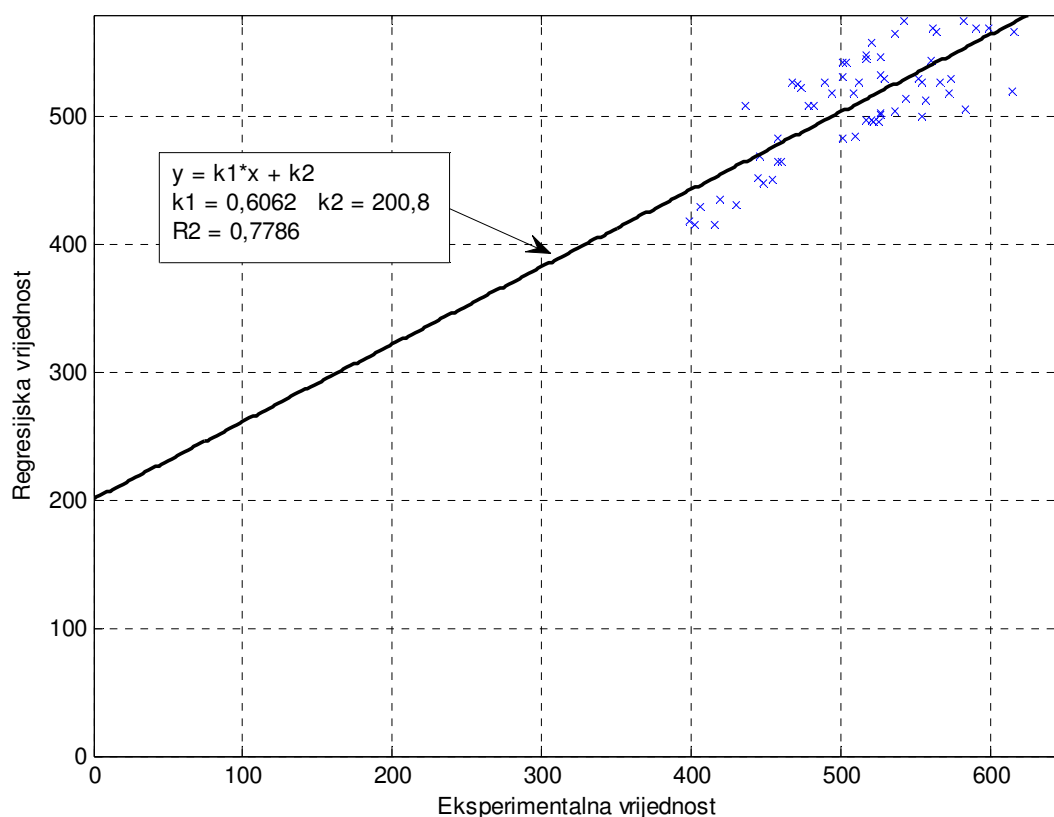
Jednadžbom (54) prikazana je ovisnost temperature na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja o koncentraciji polimera PAG i temperaturi sredstva za gašenje u obliku polinoma čiji su koeficijenti dani u tablici 27.

$$\vartheta_{\max} = a_1 x + a_2 y + a_3 x y + a_4 x^2 y + a_5 x y^2 + a_6 x^2 + a_7 y^2 + a_8 \quad (54)$$

Tablica 27: Koeficijenti polinoma koji opisuje temperaturu na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja kao funkciju koncentracije polimera PAG i temperature sredstva za gašenje

Naziv koeficijenta	Vrijednost
a_1	-6.045516909803554
a_2	-6.557840329374283
a_3	$3.418813632153734 \cdot 10^{-1}$
a_4	$-5.559638952079660 \cdot 10^{-3}$
a_5	$-1.896566096137224 \cdot 10^{-3}$
a_6	$-1.085199199979887 \cdot 10^{-2}$
a_7	$4.926243079474309 \cdot 10^{-2}$
a_8	$6.892145334216285 \cdot 10^2$

Slikom 43 prikazan je regresijski pravac provučen kroz točke konstruirane iz eksperimentalno dobivenih podataka za temperaturu na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja i podataka za temperaturu na kojoj se pojavljuje maksimalna brzina gašenja dobivenih matematičkim modelom. Za provučeni je pravac dana i njegova jednadžba te pripadni koeficijent determinacije R^2 .



Slika 43: Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava

Koeficijent determinacije na slici 43 iznosi 0,7786 što ovaj matematički model svrstava u kategoriju nepouzdanih jer se, kao što je već rečeno, model smatra pouzdanim ako je koeficijent determinacije veći od 0,85. Nameće se zaključak kako u model nisu uključeni svi potrebni parametri koji utječu na promatrano tehnološko svojstvo.

Brzina gašenja na 700°C kao funkcija koncentracije polimera PAG i temperature sredstva za gašenje prikazana je izrazom:

$$v_{700} = f(\%PAG, \vartheta) \quad (55)$$

gdje su parametrima funkcije pridružene opće varijable x i y koje se koriste u daljnjem raspisivanju polinoma.

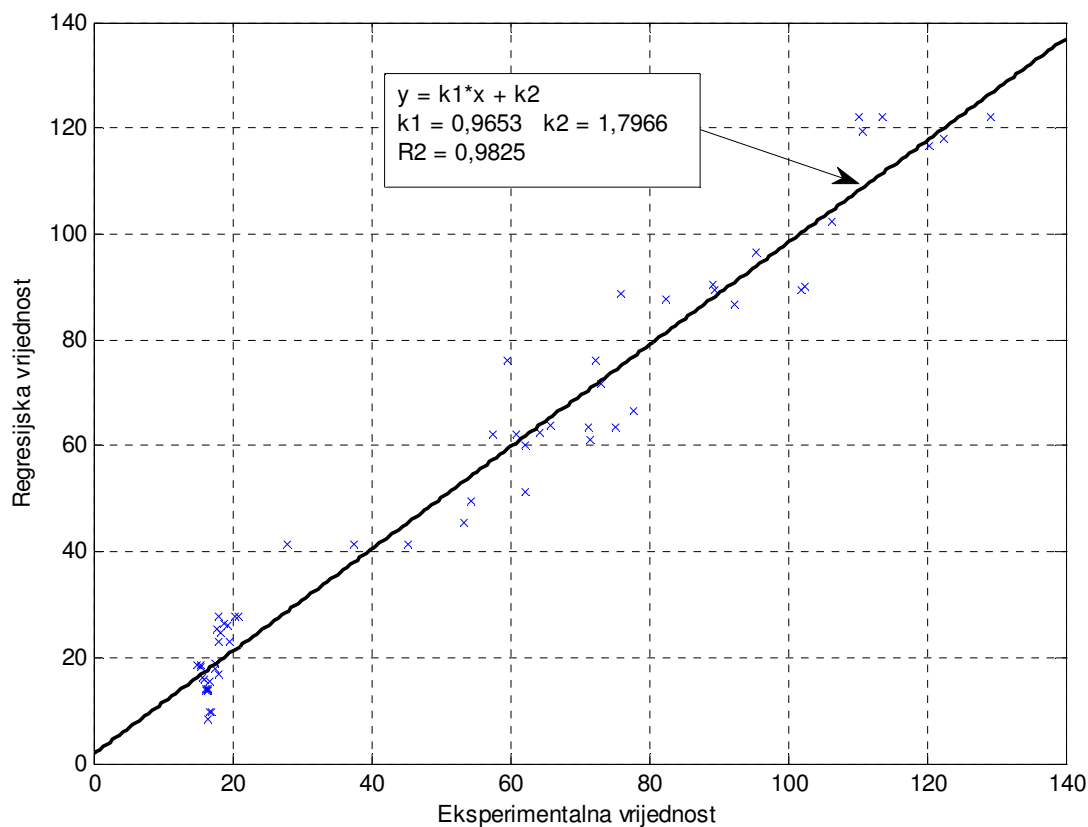
Jednadžbom (56) prikazana je ovisnost brzine gašenja na temperaturi 700°C o koncentraciji polimera PAG i temperaturi sredstva za gašenje u obliku polinoma čiji su koeficijenti dani u tablici 28.

$$v_{700} = a_1 x + a_2 y + a_3 x y + a_4 x^2 y + a_5 x y^2 + a_6 x^2 + a_7 y^2 + a_8 \quad (56)$$

Tablica 28: Koeficijenti polinoma koji opisuje brzinu gašenja na 700°C kao funkciju koncentracije polimera PAG i temperature sredstva za gašenje

Naziv koeficijenta	Vrijednost
a_1	-4.405260365109149
a_2	4.265811286851617
a_3	$-1.838705432762969 \cdot 10^{-1}$
a_4	$1.013105720509928 \cdot 10^{-3}$
a_5	$3.132033300323576 \cdot 10^{-3}$
a_6	$8.834755257164340 \cdot 10^{-2}$
a_7	$-8.678160215624095 \cdot 10^{-2}$
a_8	$7.041493376135040 \cdot 10$

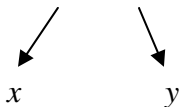
Slikom 44 prikazan je regresijski pravac provučen kroz točke konstruirane iz eksperimentalno dobivenih podataka za brzinu gašenja na 700°C i podataka za brzinu gašenja na 700°C dobivenih matematičkim modelom. Za provučeni je pravac dana i njegova jednadžba te pripadni koeficijent determinacije R^2 .



Slika 44: Brzina gašenja na 700°C – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava

Koeficijent determinacije na slici 44 iznosi 0,9825 što je odlično i model čini vrlo pouzdanim.

Vrijeme hlađenja na temperaturi od 800 na 500°C kao funkcija koncentracije polimera PAG i temperature sredstva za gašenje prikazano je izrazom:

$$t_{8/5} = f(\%PAG, \vartheta) \quad (57)$$


gdje su parametrima funkcije pridružene opće varijable x i y koje se koriste u daljnjem raspisivanju polinoma.

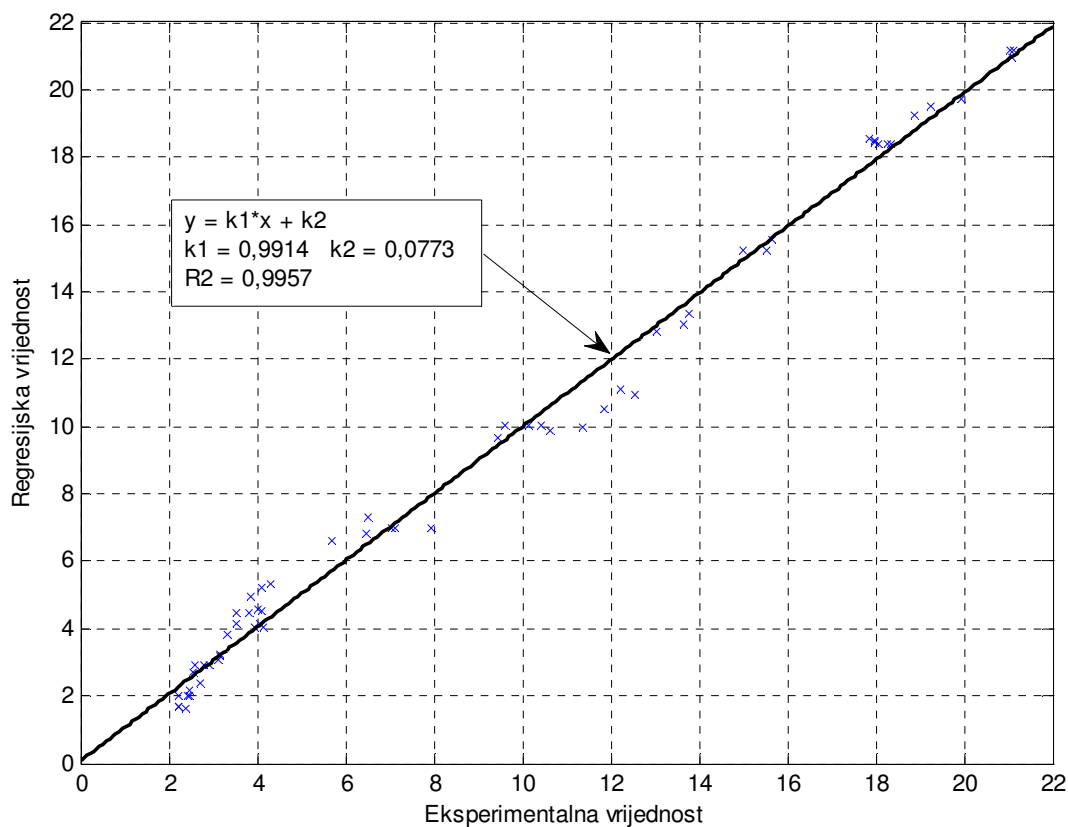
Jednadžbom (58) prikazana je ovisnost vremena gašenja s 800 na 500°C o koncentraciji polimera PAG i temperaturi sredstva za gašenje u obliku polinoma čiji su koeficijenti dani u tablici 29.

$$t_{8/5} = a_1 x + a_2 y + a_3 x y + a_4 x^2 y + a_5 x y^2 + a_6 x^2 + a_7 y^2 + a_8 \quad (58)$$

Tablica 29: Koeficijenti polinoma koji opisuje vrijeme gašenja od 800 na 500°C kao funkciju koncentracije polimera PAG i temperature sredstva za gašenje

Naziv koeficijenta	Vrijednost
a_1	$-3.305032640271595 \cdot 10^{-1}$
a_2	$-3.391385167409617 \cdot 10^{-1}$
a_3	$1.953205264550230 \cdot 10^{-2}$
a_4	$-5.949180417258085 \cdot 10^{-4}$
a_5	$-2.518694345365852 \cdot 10^{-6}$
a_6	$2.802265888200208 \cdot 10^{-2}$
a_7	$5.592080210870148 \cdot 10^{-3}$
a_8	6.787100984797047

Slikom 45 prikazan je regresijski pravac provučen kroz točke konstruirane iz eksperimentalno dobivenih podataka za vrijeme gašenja s 800 na 500°C i podataka za vrijeme gašenja s 800 na 500°C dobivenih matematičkim modelom. Za provučeni je pravac dana i njegova jednadžba te pripadni koeficijent determinacije R^2 .



Slika 45: Vrijeme gašenja od 800 na 500°C – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava

Koeficijent determinacije na slici 45 iznosi 0,9957 što je najbolji rezultat i ovaj matematički model čini gotovo idealnim jer je njegova pouzdanost gotovo 100%.

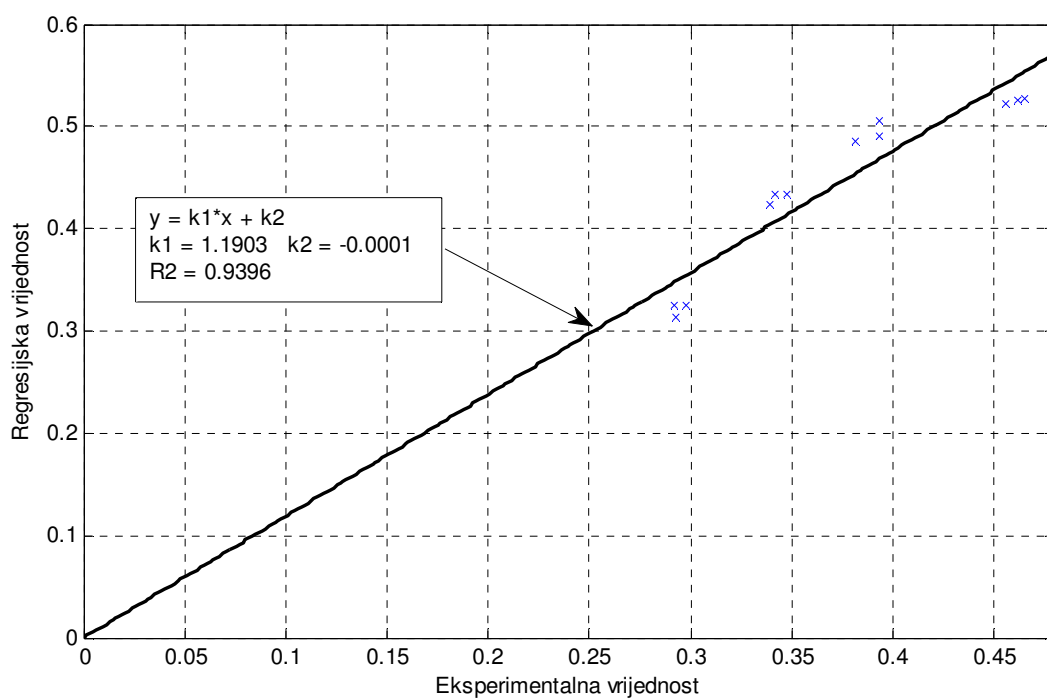
Verifikacija regresijskog modela

Tablica 30: Eksperimentalne i modelom dobivene vrijednosti tehnoloških svojstava na koncentracijama polimera PAG od 15 i 25% korištenih u cilju verifikacije dobivenih matematičkih modela

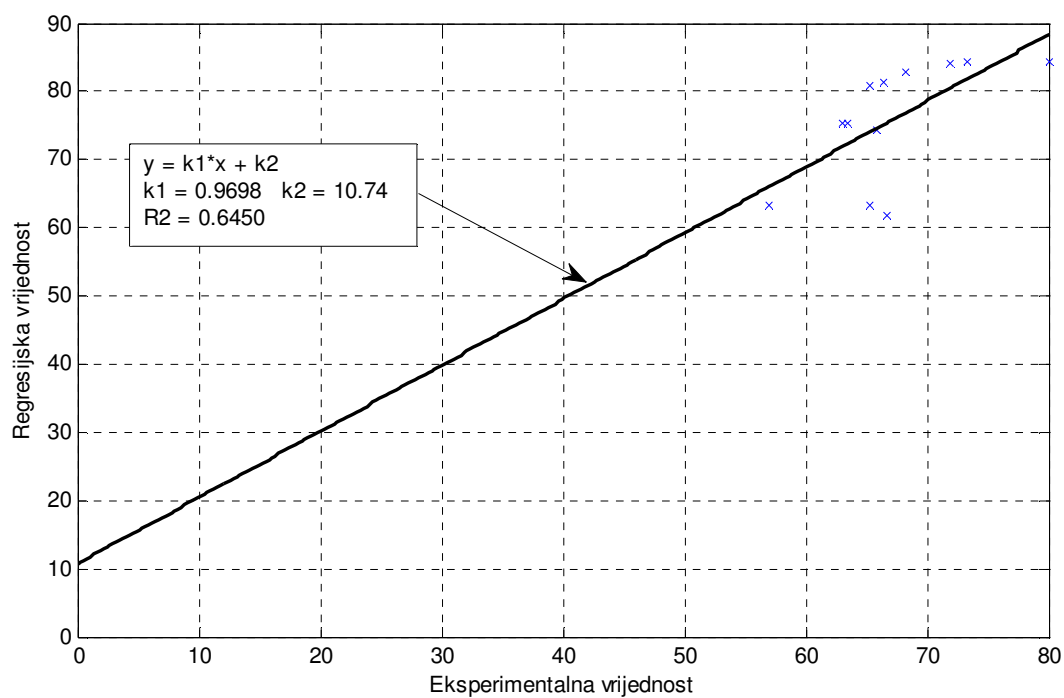
Redni br. mjerjenja	H	model	$v_{\max}$	model	$G_{\max}$	model	v_{700}	model	$t_{8/5}$	model
4A1 (21°C)	0,4654	0.5271	80,00	84.3553	494,80	548.9777	29,41	43.1117	8,08	6.8038
4A2 (23°C)	0,4563	0.5230	71,97	84.1699	497,70	545.4483	29,84	43.0806	7,77	6.9325
4A3 (22°C)	0,4617	0.5252	73,33	84.2880	529,70	547.1922	23,82	43.1359	8,24	6.8626
4B1 (28°C)	0,3938	0.5058	68,18	82.8147	612,50	537.3531	17,97	41.6098	9,86	7.4488
4B2 (31°C)	0,3931	0.4908	66,36	81.3901	497,30	532.9956	17,99	39.7721	9,76	7.8919
4B3 (32°C)	0,3815	0.4850	65,30	80.8133	499,70	531.6263	18,06	39.0004	10,08	8.0618
4C1 (39°C)	0,3422	0.4333	63,03	75.3491	489,10	523.2071	17,31	31.3691	11,15	9.5622
4C2 (40°C)	0,3394	0.4243	65,91	74.3646	590,20	522.1708	17,58	29.9605	11,17	9.8210
4C3 (39°C)	0,3481	0.4333	63,48	75.3491	483,20	523.2071	17,58	31.3691	10,97	9.5622
4D1 (49°C)	0,2977	0.3257	56,97	63.2116	472,20	514.7180	17,60	13.7012	12,71	12.6498
4D2 (49°C)	0,2918	0.3257	65,30	63.2116	557,30	514.7180	17,59	13.7012	12,70	12.6498
4D3 (50°C)	0,2927	0.3127	66,67	61.7175	552,00	514.0980	16,73	11.4966	12,94	13.0197
6A1 (20°C)	0,2778	0.2869	57,58	62.5275	544,90	502.3218	17,46	18.1531	13,61	13.7971
6A2 (20°C)	0,2939	0.2869	67,42	62.5275	527,50	502.3218	17,58	18.1531	12,87	13.7971
6A3 (22°C)	0,2834	0.2816	65,00	62.2194	525,30	499.5059	17,17	18.0452	13,44	13.8162

Tablica 30: Eksperimentalne i modelom dobivene vrijednosti tehnoloških svojstava na koncentracijama polimera PAG od 15 i 25% korištenih u cilju verifikacije dobivenih matematičkih modela (NASTAVAK tablice 30)

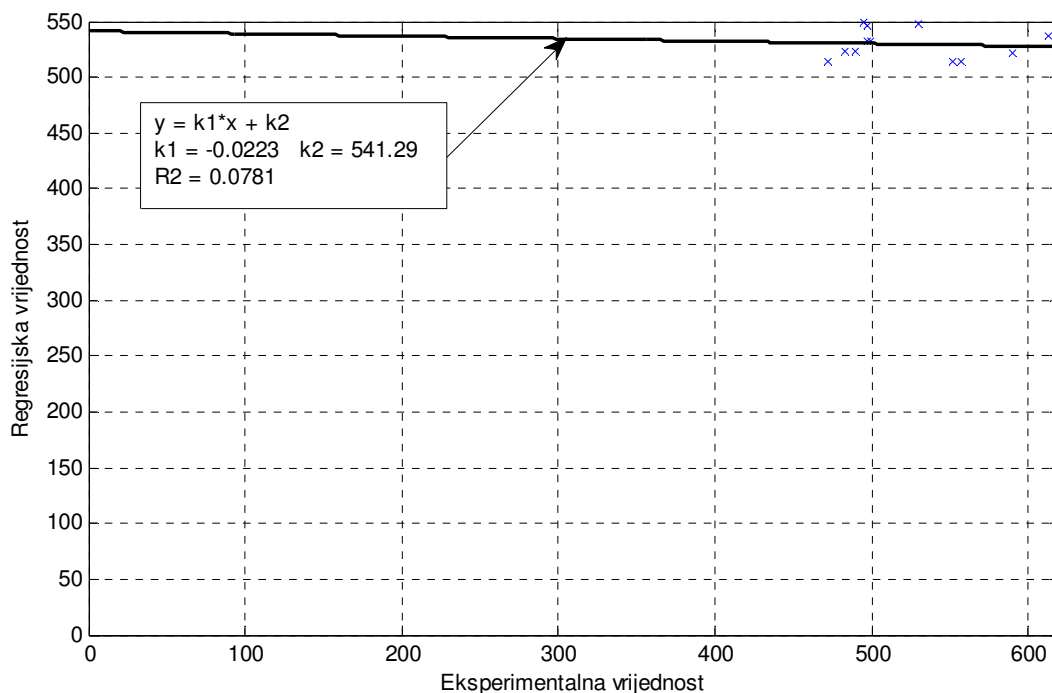
6B1 (30°C)	0,2539	0.2568	61,67	60.7502	509,80	488.3901	16,60	16.9351	14,83	14.3351
6B2 (29°C)	0,2643	0.2602	66,82	60.9545	495,80	489.7667	17,25	17.1332	14,19	14.2315
6B3 (32°C)	0,2490	0.2498	66,36	60.3238	490,70	485.6482	17,02	16.4880	15,10	14.5753
6C1 (41°C)	0,2210	0.2141	65,61	58.1122	465,60	473.4923	16,41	13.6363	17,14	16.2040
6C2 (39°C)	0,2293	0.2226	66,06	58.6451	473,30	476.1677	16,43	14.3887	16,50	15.7647
6C3 (40°C)	0,2215	0.2184	64,39	58.3816	471,20	474.8281	16,28	14.0210	17,04	15.9788
6D1 (48°C)	0,2045	0.1816	57,27	56.0610	467,70	464.2447	15,95	10.4684	18,36	18.0900
6D2 (49°C)	0,2058	0.1767	61,67	55.7443	458,50	462.9384	16,49	9.9480	18,41	18.4037
6D3 (50°C)	0,2074	0.1716	55,30	55.4217	479,40	461.6358	15,76	9.4107	18,36	18.7284



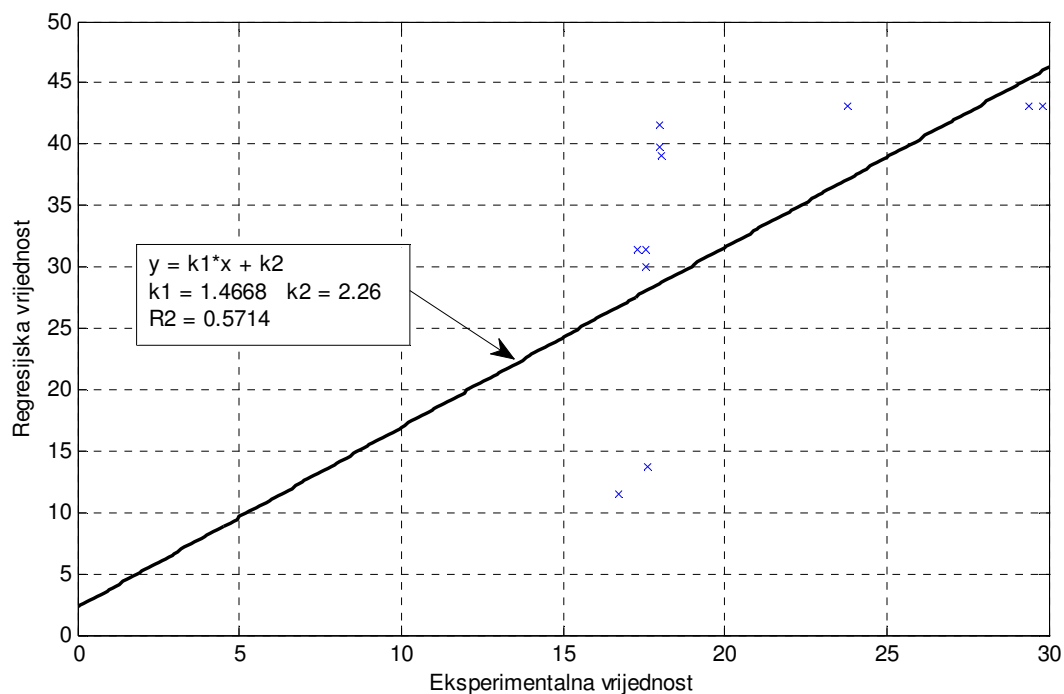
Slika 46: Intenzitet gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 15%-tnoj koncentraciji polimera PAG



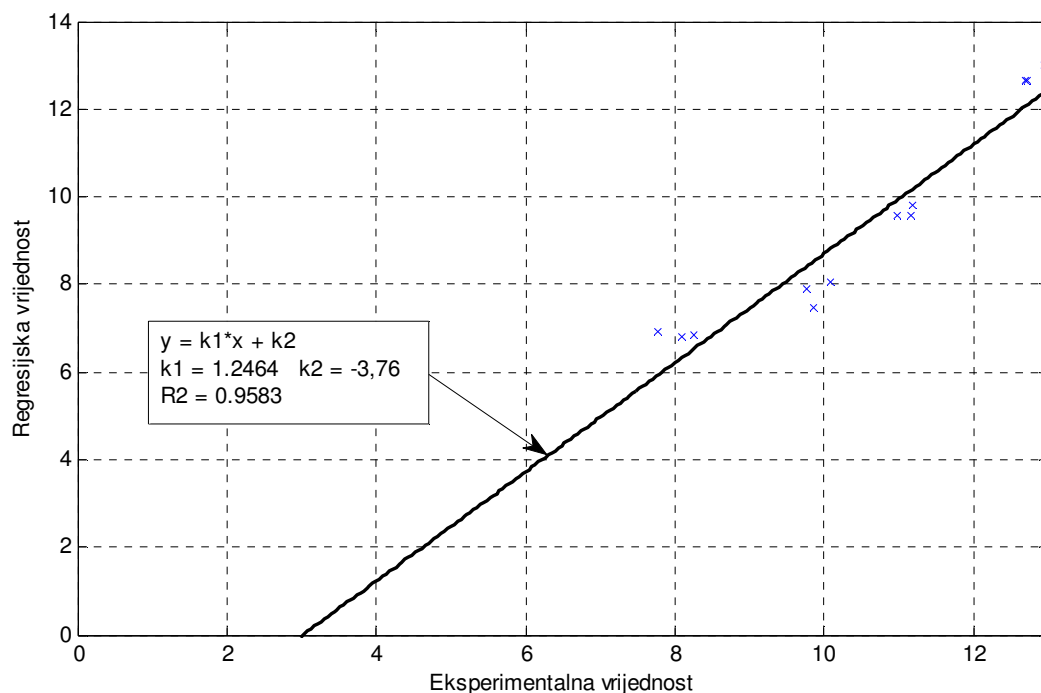
Slika 47: Maksimalna brzina gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 15%-tnoj koncentraciji polimera PAG



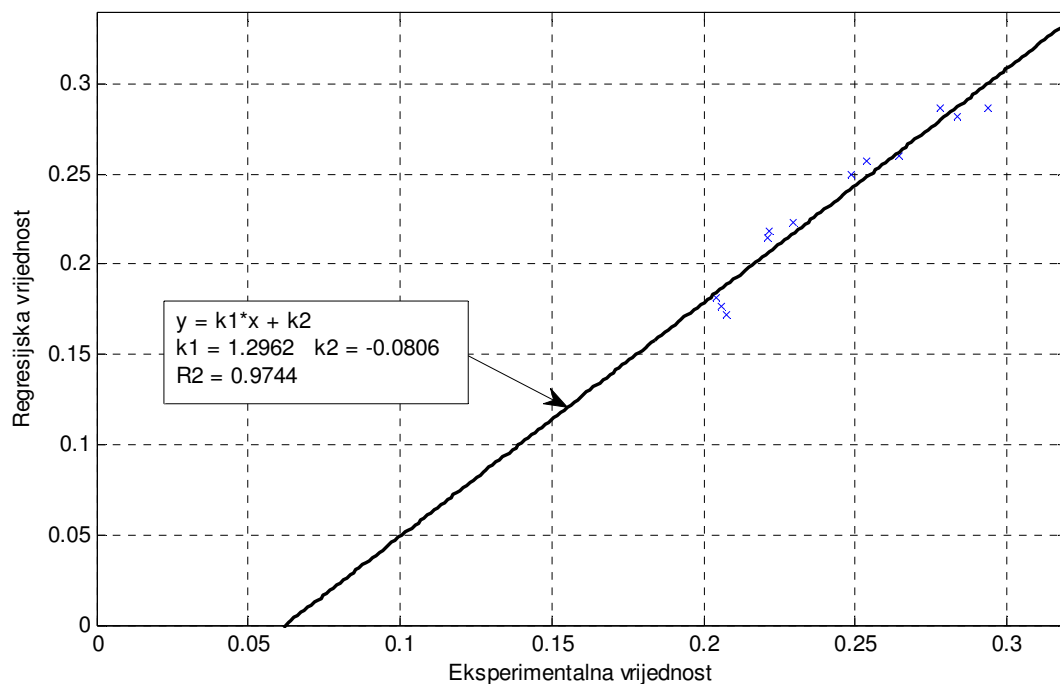
Slika 48: Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 15%-tnoj koncentraciji polimera PAG



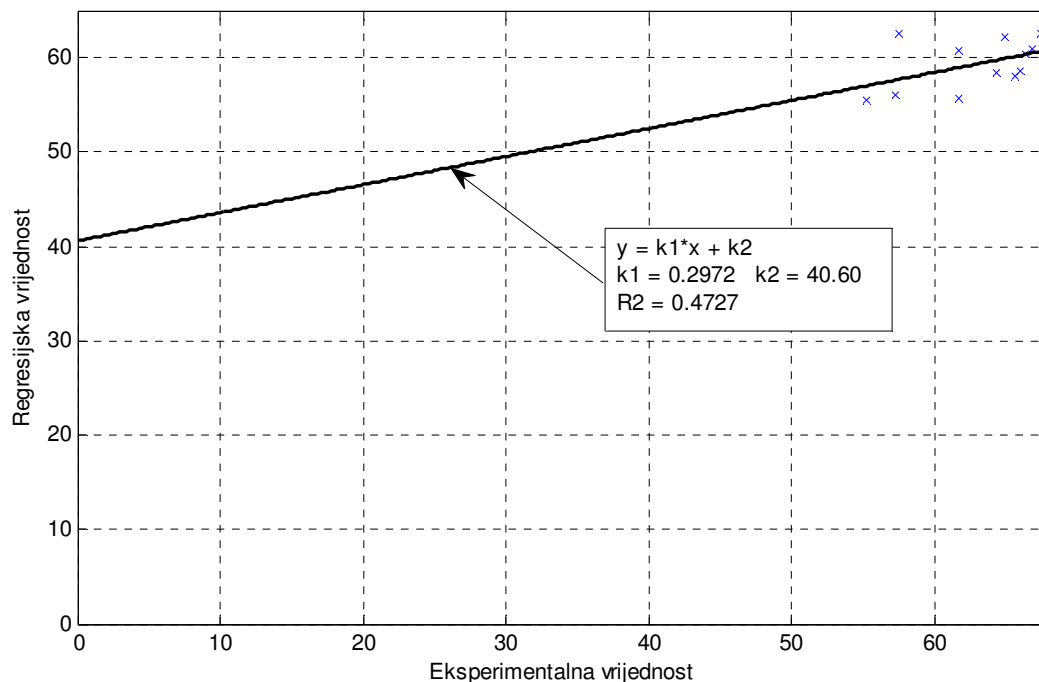
Slika 49: Brzina gašenja na 700°C – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 15%-tnoj koncentraciji polimera PAG



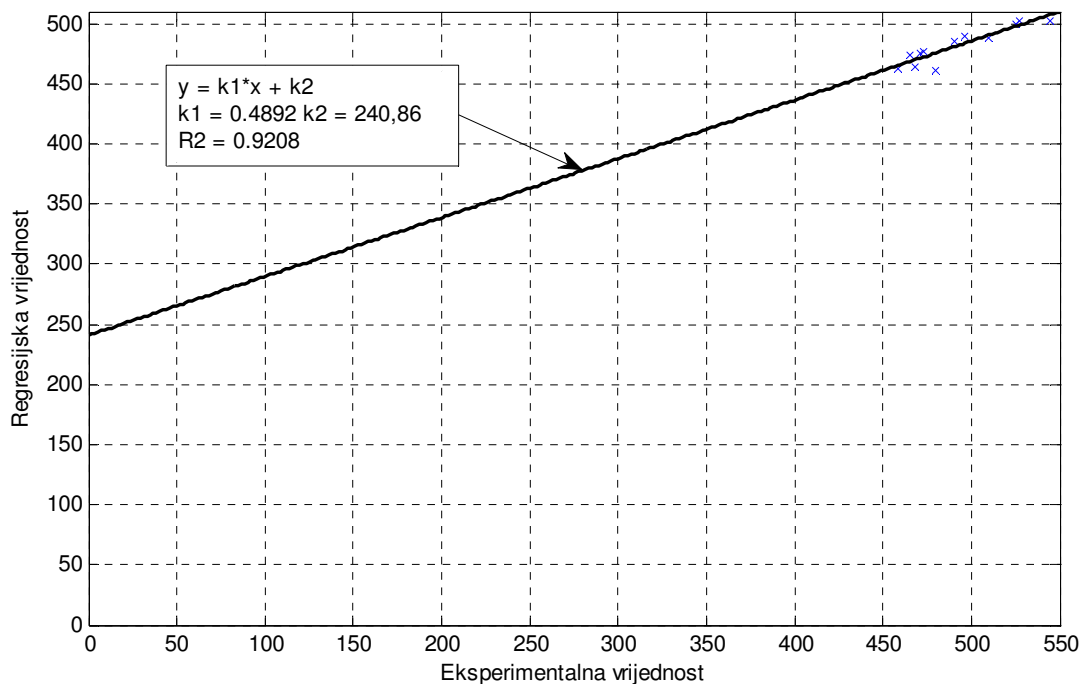
Slika 50: Vrijeme gašenja od 800 na 500°C – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 15%-tnoj koncentraciji polimera PAG



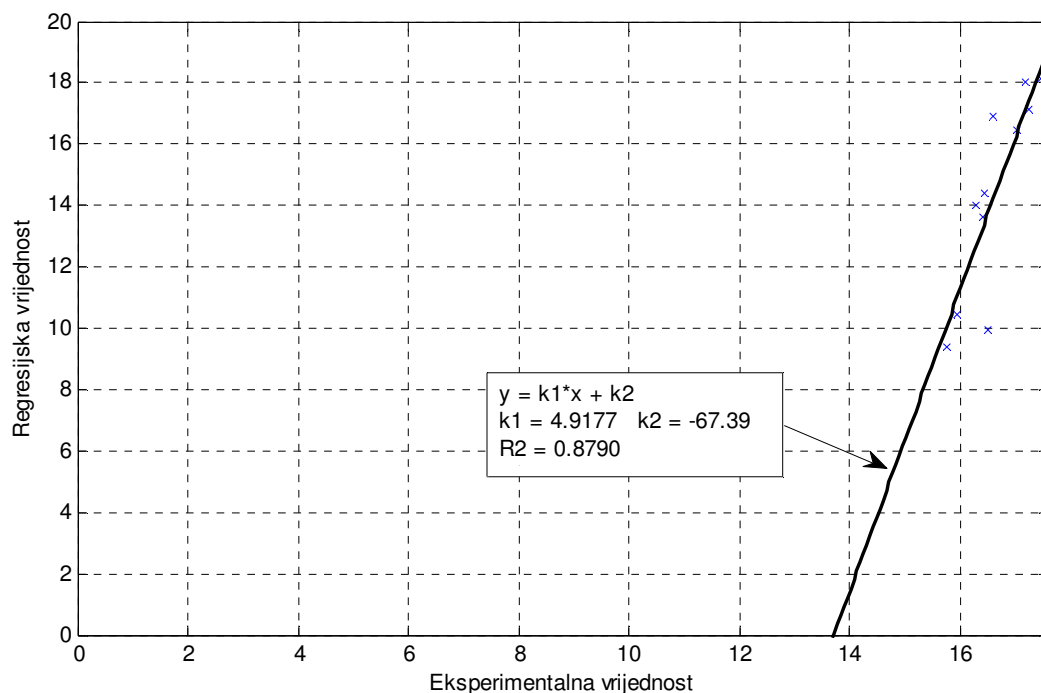
Slika 51: Intenzitet gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 25%-tnoj koncentraciji polimera PAG



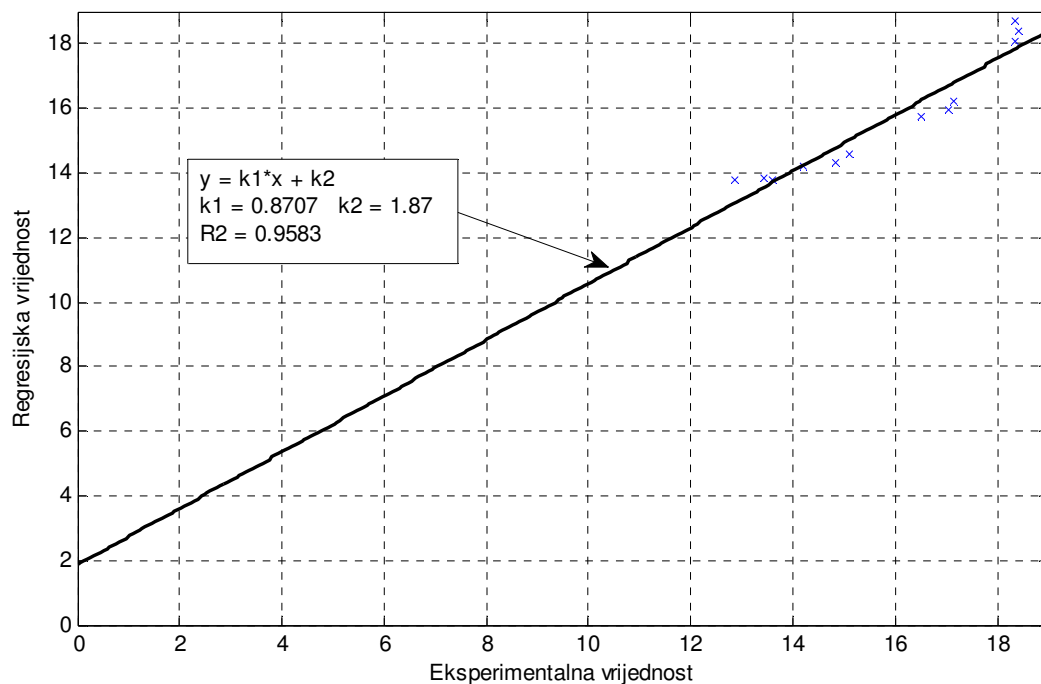
Slika 52: Maksimalna brzina gašenja – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 25%-tnoj koncentraciji polimera PAG



Slika 53: Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja– usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 25%-tnoj koncentraciji polimera PAG



Slika 54: Brzina gašenja na 700°C – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 25%-tnoj koncentraciji polimera PAG



Slika 55: Vrijeme gašenja od 800 na 500°C – usporedba eksperimentalnih i modelom dobivenih vrijednosti tehnoloških svojstava u 25%-tnoj koncentraciji polimera PAG

Na slikama 50 do 59 grafički su prikazane ovisnosti vrijednosti tehnoloških svojstava dobivenih eksperimentalno i onih dobivenih matematičkim modelom (tablica 30). Kroz točke s prethodno opisanim koordinatama su provučeni regresijski pravci za koje su dane i jednadžbe te koeficijenti determinacije. Može se zaključiti da su modeli prikazani slikama 46, 50, 51, 53, 54 i 55 pouzdani jer nadmašuju kriterij koeficijenta determinacije od najmanje 0,85. Modeli prikazani slikama 50, 51 i 55 su izuzetno pouzdani jer njihov koeficijent determinacije premašuje 0,95. Modeli na slikama 47, 49 i 52 možemo svrstati u istu grupu, gdje je model na slici 52 pouzdan nešto manje od 50% dok je pouzdanost ostala dva 57 i 64,5%. Možemo donijeti zaključak kako modeli nisu dovoljno dobri i da bi u obzir trebalo uzeti i dodatne parametre koji utječu na promatrana tehnološka svojstva. Najlošiji model prikazan je slikom 48. Koeficijent determinacije u tom je slučaju iznosio svega 0,0781 iz čega bi se moglo zaključiti da temperatura pojave maksimalne brzine gašenja u 15%-tnoj koncentraciji polimera PAG nije pogodna za regresijsku analizu.

5.3 Rezultati analize i predviđanja parametara gašenja neuronskom mrežom

Nakon brojnih testiranja najboljom se, kako je već prethodno i rečeno, pokazala neuronska mreža s devet neurona u skrivenom sloju. Mreža ne polučuje jednako dobre rezultate pri svim koncentracijama vodenih otopina polimera PAG već se pokazalo da najbolje radi u rasponu od 12,5 do 20%PAG. Na tim su koncentracijama u pravilu svi tehnološki parametri dosta dobro pogođeni, no ponekad se desi da odskače tehnološki parametar brzine gašenja na 700°C. Na višim koncentracijama polimera, do 30%PAG, taj parametar u pravilu nije moguće pogoditi, dok su ostali parametri dosta dobro pogođeni. Mreža najlošije radi na niskim koncentracijama polimera PAG. Rezultati su to lošiji što je koncentracija polimera niža. Najgori se rezultat postiže pri čistoj vodi gdje svi tehnološki parametri koje daje mreža dosta odstupaju od realnih.

Sve ovo gore rečeno potkrepljeno je podacima u tablici 31 gdje su rezultati mreže uspoređeni s rezultatima ispitivanja koja nisu korištena za učenje mreže. Odabrana su ispitivanja pod oznakama 1C3, 4B3 i 7C3. Radi se o koncentracijama polimera 0, 15 i 30%PAG na temperaturama 40, 32 i 42°C. Razlog odabira baš tih ispitivanja za testiranje mreže je taj da su temperature sredstava za gašenje kod tih ispitivanja najdalje onima na kojima je mreža učena, a koncentracije polimera pokrivaju donju i gornju granicu raspona koncentracije te sredinu.

Tablica 31: Usporedba tehnoloških svojstava koja daje mreža s eksperimentalno određenima i njihovo međusobno relativno odstupanje za 1C3, 4B3 i 7C3

Naziv sredstva za gašenje i oznaka ispitivanja	Tehnološka svojstva	Predviđanje neuronske mreže	Eksperimentalno određena vrijednost tehnoloških svojstava	Relativno odstupanje (%)
Voda, 40°C [1C3]	Intenzitet gašenja	0,7895	1,0201	29,21
	Maksimalna brzina gašenja, °C/s	103,89	140,45	35,19
	Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja, °C	506,24	582,70	15,10
	Brzina gašenja na 700°C, °C	56,70	106,35	87,57
	Vrijeme hlađenja s 800 na 500°C, s	4,72	2,48	90,32
Vod. otop. PAG 15%, 32°C [4B3]	Intenzitet gašenja	0,3746	0,3815	1,84
	Maksimalna brzina gašenja, °C/s	67,73	65,30	3,72
	Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja, °C	463,02	499,70	7,92
	Brzina gašenja na 700°C, °C	25,56	18,06	41,53
	Vrijeme hlađenja s 800 na 500°C, s	9,23	10,08	9,21
Vod. otop. PAG 30%, 42°C [7C3]	Intenzitet gašenja	0,1791	0,1799	0,45
	Maksimalna brzina gašenja, °C/s	60,35	61,52	1,94
	Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja, °C	440,10	406,20	8,35
	Brzina gašenja na 700°C, °C	25,10	15,76	59,26
	Vrijeme hlađenja s 800 na 500°C, s	18,69	19,93	6,35

Primjenom neuronske mreže moguće je odrediti tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG koncentracije polimera u rasponu od 0 do 30%PAG na temperaturi sredstva za gašenje od 20 do 50°C. Primjer određivanja tehnoloških svojstava vodenih otopina polimera PAG za koncentracije i temperature kod kojih nisu provedena laboratorijska ispitivanja prikazan je u tablici 39. Pošto je učinkovitost mreže ilustrirana na koncentracijama polimera 0, 15 i 30%PAG, za ovaj su primjer uzete među-koncentracije 7,5 i 22,5%PAG pri proizvoljno odabranim temperaturama sredstva za gašenje (tablica 32).

Tablica 32: Tehnološka svojstva nekih laboratorijski neispitanih vodenih otopina polimera PAG

Tehnološko svojstvo	7,5%PAG 22°C	22,5%PAG 35°C
Intenzitet gašenja	0,7136	0,2447
Maksimalna brzina gašenja	96,50	61,40
Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja	473,54	449,89
Brzina gašenja na temperaturi 700°C	56,21	25,54
Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C	4,82	14,67

Usporedbom vrijednosti dobivenih za slučaj 7,5%PAG pri temperaturi 22°C s vrijednostima dobivenim ispitivanjima 2A i 3A dolazimo do zaključka da se intenzitet gašenja nalazi unutar granica, maksimalna brzina gašenja na donjoj granici, temperatura pojave maksimalne brzine gašenja i brzina gašenja na temperaturi 700°C su preniske, a vrijeme hlađenja od 800 do 500°C nešto iznad gornje granice.

Usporedbom vrijednosti dobivenih za slučaj 22,5%PAG pri temperaturi 35°C s vrijednostima dobivenim ispitivanjima 5B, 6B, 5C i 6C dolazimo do zaključka da se intenzitet gašenja i vrijeme hlađenja od 800 do 500°C nalaze unutar granica, maksimalna brzina gašenja na donjoj granici, temperatura pojave maksimalne brzine gašenja nešto ispod donje granice, a brzina gašenja na temperaturi 700°C prilično iznad gornje granice.

5.4 Usporedba vrijednosti tehnoloških svojstava predviđenih regresijskim modelom, neuronskom mrežom i ispitanih pokusom

Međusobna usporedba vrijednosti tehnoloških svojstava koje daju regresijski model i neuronska mreža te eksperimentalno određenih vrijednosti provedena je za ispitivanja pod oznakama 1C3, 4B3 i 7C3. Radi se o koncentracijama polimera 0, 15 i 30%PAG na temperaturama 40, 32 i 42°C. Rezultati su prikazani u tablici 41.

Iz tablice 33 je vidljivo da u slučaju predviđanja intenziteta gašenja i maksimalne brzine gašenja regresijski je model dao bolji rezultat za gašenje u čistoj vodi, dok je neuronska mreža dala bolji rezultat u slučaju vodene otopine polimera na koncentracijama 15 i 30%PAG. U predviđanju temperature pojave maksimalne brzine gašenja regresijski model i neuronska mreža za gašenje u vodi daju približno jednake rezultate. Za slučaj gašenja u 15%-tnoj vodenoj otopini polimera PAG regresijski model daje nešto više vrijednosti od stvarnih koje su po apsolutnoj vrijednosti približno jednake podbačaju vrijednosti izračunatih neuronskom mrežom. U slučaju gašenja u 30%-tnoj vodenoj otopini polimera PAG predviđanje regresijskog modela je točnije. Kod predviđanja brzine gašenja na 700°C i vremena hlađenja s 800 na 500°C kod čiste vode i koncentracije polimera 30%PAG boljim se pokazao regresijski model, dok je kod 15%-tne koncentracije PAG bolji rezultat dala neuronska mreža.

Tablica 33: Usporedba tehnoloških svojstava koja daju regresijski model i neuronska mreža s eksperimentalno određenima, za 1C3, 4B3 i 7C3

Naziv sredstva za gašenje i oznaka ispitivanja	Tehnološka svojstva	Predviđanje regresijskog modela	Predviđanje neuronske mreže	Eksperimentalno određena vrijednost tehnoloških svojstava
Voda, 40°C [1C3]	Intenzitet gašenja	1,0355	0,7895	1,0201
	Maksimalna brzina gašenja, °C/s	143,44	103,89	140,45
	Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja, °C	505,72	506,24	582,70
	Brzina gašenja na 700°C, °C	102,20	56,70	106,35
	Vrijeme hlađenja s 800 na 500°C, s	2,17	4,72	2,48
Vod. otop. PAG 15%, 32°C [4B3]	Intenzitet gašenja	0,4850	0,3746	0,3815
	Maksimalna brzina gašenja, °C/s	80,81	67,73	65,30
	Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja, °C	531,63	463,02	499,70
	Brzina gašenja na 700°C, °C	39,00	25,56	18,06
	Vrijeme hlađenja s 800 na 500°C, s	8,06	9,23	10,08
Vod. otop. PAG 30%, 42°C [7C3]	Intenzitet gašenja	0,1756	0,1791	0,1799
	Maksimalna brzina gašenja, °C/s	59,82	60,35	61,52
	Temperatura pojave maksimalne brzine gašenja, °C	429,80	440,10	406,20
	Brzina gašenja na 700°C, °C	16,22	25,10	15,76
	Vrijeme hlađenja s 800 na 500°C, s	19,70	18,69	19,93

6. ZAKLJUČAK

Iz pregleda normiranih metoda za snimanje krivulja hlađenja sredstava za gašenje s Leidenfrost-ovim fenomenom izabrana je metoda prema normi ISO 9950. U analizi metoda snimanja krivulja za gašenje i postupaka obrade i prikaza podataka sa snimljenih krivulja "temperatura-vrijeme" uočena je mogućnost postavljanja matematičkog modela za određivanje normom propisanih, ali i dodatnih tehnoloških svojstava sredstava za gašenje.

Za sredstva za gašenje s pojavom Leidenfrost-ovog fenomena tipičan je izrazito nelinearan tijek temperaturno-vremenskih krivulja hlađenja koji otežava analizu i usporedbu ovih krivulja. Stoga je na temelju reprezentantnog uzorka snimljenih krivulja hlađenja predložen i postavljen matematički model sastavljen od dva dijela: općeg dijela za određivanje tehnoloških svojstava sredstva s Leidenfrost-ovim fenomenom i specijaliziranog dijela namijenjenog za predviđanje i usporedbu tehnoloških svojstava vodenih otopina PAG. Uz to, postavljena i neuronska mreža koja na temelju 28 snimljenih krivulja gašenja aproksimira čitav raspon krivulja gašenja u vodenim otopinama polimera PAG.

Opći dio razrađenog matematičkog modela je moguće primijeniti za analizu snimljenih krivulja gašenja vode, ulja za kaljenje, emulzija ulja i vode te vodenih otopina polimera PAG. Specijalizirani dio razrađenog matematičkog modela je moguće primijeniti za predviđanje tehnoloških svojstava vodenih otopina polimera u ovisnosti o koncentraciji polimera i temperaturi sredstva za gašenje. Primjenom eksperimentalno potvrđenih regresijskih jednadžbi za proizvoljno zadanu koncentraciju otopine polimera PAG i temperature sredstva za gašenje moguća je daljnja primjena ovih jednadžbi u optimalizaciji parametara gašenja u pripremi postupka toplinske obrade čelika, ako i u računalnim simulacijama postupka kaljenja. Neuronska mreža na izlazu daje predviđenu krivulju gašenja iz koje se primjenom općeg matematičkog modela mogu odrediti tehnološka svojstva vodene otopine polimera PAG.

U daljenjem istraživanju i rješavanju problema analize i predviđanja krivulja gašenja preporučuje se primjena evolucijskih algoritama koji bi trebali polučiti jednoličniji uspjeh duž cijelog temperaturnog raspona krivulja hlađenja. Radi se o skupu stohastičkih metoda koje efikasno pretražuju problemski prostor, a kod kojih se križanjem kvalitetnijih rješenja i upotrebom mutacija početni skup nasumično odabranih rješenja kroz određeni broj iteracija evoluiraju te algoritam pronalazi sve bolja i bolja rješenja. Budući da se ne pretraži čitav problemski prostor, optimalno rješenje nije garantirano. Međutim, pronađena rješenja su u većini slučajeva optimalna ili vrlo blizu optimalnih. [33]

7. LITERATURA

- [1] Stupnišek, M., Cajner F., *Osnove toplinske obrade metala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2001.
- [2] Mulc, A., Taboršak, D. Budin, I. (ur): Inženjerski priručnik IP4, Sv. 1, Materijali, Školska knjiga, Zagreb, 1998.
- [3] Krumes, D.: Toplinska obrada, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Slavonski Brod, 2000.
- [4] Liščić, B. Tensi, H.M., Luty, W. (ed): Theory and Technology of Quenching, Springer -Verlag, Berlin, 1992
- [5] Bardes, B. B (ed.): *ASM Handbook - Heat Treatment of Metals*. Part 4. 9th edition, Metals Park, OH, USA: ASM International, 1994
- [6] Totten, G.E., *Steel heat treatment: Metallurgy and technologies*, 2nd edition, Taylor & Francis Group, New York, U.S.A., 2006
- [7] Totten, G.E., Webster, G.M., *Cooling Curve Analysis – International and National Standard Development: A Status Report*, in Proceeding of the 2nd International Conference on Quenching and the Control of Distortion, Cleveland, Ohio, November 1996, p.585-593
- [8] International standard, *Industrial quenching oils – Determination of cooling characteristics – Nickel-alloy probe test method*, ISO 9950: 1995(E), Switzerland, 1995
- [9] Totten, G.E., Webster, G.M., Liscic, B., *Standards for Cooling Curve Analysis of Quenchants*, Heat treatment of metals, April, 1997, p.92-94
- [10] Narazaki, M., Kogawara, M., Shirayori, A., Fuchizawa, S., *Laboratory Test of Cooling Power of Polymer Quenchants*, in Proc. 2nd International Conference on Quenching and the Control of Distortion, Cleveland, Ohio, November 1996, p.101-110
- [11] Jonczyk, S., Babul, T., Nakonieczny, A., Grzyb, J., Ciski, A., *Computer Hardness Prediction of Steel after Hardening, with a Portable Quench Tester*, in Proc. 4th WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment, Elounda, Greece, August 2006, p.175-179
- [12] Landek, D., Cajner, F., Toplinska obrada i površinska zaštita, podloge za vježbe, *Ispitivanje sredstava za gašenje*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [13] MacKenzie, D.S., Totten, G.E., Webster, G.M., *Quenching Fundamentals: Heat Transfer*, in Proceeding of the 2nd international conference on Quenching and Control of Distortion, Cleveland, Ohio, U.S.A., November p.329-340
- [14] Kobasko, N.I., *Fundamentals about Characteristic Temperature and Convection Stage Start Temperature in Professor Imao Tamura's Investigations*, in Proceeding of the 2nd international conference on Quenching and Control of Distortion, Cleveland, Ohio, U.S.A., November 1996, p.1-10

- [15] Tensi, H.M., Stich, A., Totten, G.E., *Fundamentals of Quenching*, Metal Heat Treating, March/April 1995, p.20-28
- [16] Apama, S., Verde, S., Takahashi, M., Rondeau, D.K., Quenching-Understanding, Controlling and Optimizing the Process, in Proceeding of the 2nd international conference on Quenching and Control of Distortion, Beijing,, May 2003, p.20-23
- [17] Kocijan, G., završni rad, *Metode i sredstva za gašenje u toplinskoj obradi metala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2011.
- [18] http://www.efst.hr/nastava/130/REGRESIJSKA_ANALIZA.pdf , 16.11.2011.
- [19] <http://www.matematika2.com/pojam.php?subaction=showfull&id=1295528012&archive=&startfrom=&ucat=1&> , 16.11.2011.
- [20] http://www.efst.hr/nastava/130/NELINEARNA_REGRESIJSKA_ANALIZA.pdf , 16.11.2011.
- [21] Mačkić, K., diplomski rad, *Primjena neuronskih mreža u fizici i informatici*, Prirodoslovno-matematički fakultet Zagreb, Zagreb, 2009.
- [22] Beale, M.H., Hagan, M.T., Demuth, H.B., *Matlab Neural Network Toolbox 7 User's Guide*, MathWorks, Natick, Massachusetts, USA
- [23] <http://www.mathworks.com/help/toolbox/nnet/ref/trainlm.html> , 16.11.2011.
- [24] http://en.wikipedia.org/wiki/Jacobian_matrix_and_determinant , 16.11.2011.
- [25] <http://www.heatonresearch.com/wiki/Levenberg-Marquardt-Algorithm> , 16.11.2011.
- [26] Kuczmann, M., *Neural network model for scalar and vector hysteresis*, Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL. 54, NO. 1-2, 2003, p.13-21
- [27] Pracny, V., Meywerk, M., Lion, A., *Hybrid neural network model for history-dependent automotive shock absorbers*, Vehicle System Dynamics, Taylor&Francis, Vol. 45, 1, January 2007, p.1-14
- [28] Kuczmann, M., *Neural network based vector hysteresis model and the nondestructive testing method*, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 2004
- [29] Hilder, N.A., *The Behaviour of Polymer Quenchants*, Heat Treatment of Metals, February 1987, 1987.2 p.31-46
- [30] Hilder, N.A., *Polymer Quenchants – a Review*, Heat Treatment of Metals Report, January 1986, 1986.1 p.15-26
- [31] ... , *UCON Quenchants: User's Manual*, DOW, From no. 118-01567-605AMS, 2011
- [32] Webster, G.M., Totten, G.E., Kang, S.H., Han, S.W., *Successful Use of Polymer Quenchants with Crack-Sensitive Steels*, in Proceeding of the 2nd International Conference on Quenching and Control of Distortion, ASM International, Materials Park, Ohio, U.S.A., 1996, p.509-515
- [33] <http://www.zemris.fer.hr/~golub/ga/studenti/projekt2007/> , 16.11.2011.

8. PRILOG

Tablica I. Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 20°C određena primjenom matematičkog modela (slika 17) namijenjena daljnjoj razradi modela za predviđanje svojstava proizvoljno zadane koncentracije polimera

Naziv sredstva za gašenje	Redni broj mjerenja (stvarna temperatura sredstva za gašenje)	Intenzitet gašenja	Maksimalna brzina gašenja i temperatura pri kojoj se pojavljuje		Brzina gašenja na 700°C	Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C	Brzina i temp, prijelaza iz faze parnog omotača u mjehurasto vrenje		Brzina i temp, prijelaza iz mjehurastog vrenja u konvekciju		Srednje brzine gašenja faze parnog omotača, mjehurastog vrenja i konvekcije		
		H	$v_{\max}$	$\theta_{\max}$	v_{700}	$t_{8/5}$	$v_{p/m}$	$\theta_{p/m}$	$v_{m/k}$	$\theta_{m/k}$	v_{sr_p}	v_{sr_m}	v_{sr_k}
Voda, 20°C	1A1 (22°C)	0,9936	140,46	561,40	110,34	2,45	-	-	20,34	165,28	-	57,95	3,53
	1A2 (22°C)	0,9701	140,76	590,90	113,68	2,41	-	-	38,09	186,49	-	62,70	4,48
	1A3 (22°C)	1,0387	155,76	598,70	129,18	2,24	-	-	22,93	180,05	-	53,82	3,88
Vod, otop, PAG 5%, 20°C	2A1 (20°C)	0,8916	137,12	581,70	102,07	2,61	-	-	11,98	171,95	-	42,34	2,46
	2A2 (23°C)	0,9232	135,76	535,70	89,17	2,79	-	-	12,84	167,36	-	44,68	2,26
	2A3 (20°C)	0,9089	134,85	541,80	89,40	2,91	-	-	14,50	173,50	-	37,96	2,36
Vod, otop, PAG 10%, 20°C	3A1 (20°C)	0,7021	103,33	564,30	71,39	3,82	-	-	6,98	136,18	-	32,42	1,72
	3A2 (20°C)	0,7233	112,27	615,80	75,30	3,55	-	-	6,97	135,50	-	34,56	1,69
	3A3 (23°C)	0,6777	95,76	520,70	65,94	4,02	-	-	6,83	135,63	-	32,57	1,62
Vod, otop, PAG 20%, 20°C	5A1 (20°C)	0,3601	69,40	573,20	20,87	10,62	23,67	654,56	6,26	157,21	15,27	25,31	1,89
	5A2 (22°C)	0,3368	67,12	566,20	20,49	11,35	22,00	637,03	6,86	176,56	13,89	26,34	2,13
	5A3 (23°C)	0,3706	61,06	470,50	18,03	10,43	21,92	670,32	6,86	177,45	13,98	26,89	2,11
Vod, otop, PAG 30%, 20°C	7A1 (20°C)	0,2063	64,55	446,00	16,52	17,87	31,08	487,63	3,06	109,93	16,19	16,40	1,14
	7A2 (22°C)	0,2008	57,27	459,70	16,22	18,25	41,33	480,21	2,56	99,19	16,05	14,37	0,97
	7A3 (22°C)	0,2003	57,27	457,30	16,49	18,34	40,77	478,75	2,37	96,77	15,73	13,76	0,92

Tablica II. Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 20°C određena primjenom matematičkog modela (slika 17) namijenjena ispitivanju i verifikaciji predloženog modela za predviđanje tehnoloških svojstava otopina PAG

Naziv sredstva za gašenje	Redni broj mjerenja (stvarna temperatura sredstva za gašenje)	Intenzitet gašenja	Maksimalna brzina gašenja i temperatura pri kojoj se pojavljuje		Brzina gašenja na 700°C	Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C	Brzina i temp, prijelaza iz faze parnog omotača u mjehurasto vrenje		Brzina i temp, prijelaza iz mjehurastog vrenja u konvekciju		Srednje brzine gašenja faze parnog omotača, mjehurastog vrenja i konvekcije		
		H	v_{max}	g_{max}	v_{700}	$t_{8/5}$	$v_{p/m}$	$g_{p/m}$	$v_{m/k}$	$g_{m/k}$	v_{sr_p}	v_{sr_m}	v_{sr_k}
Vod, otop, PAG 15%, 20°C	4A1 (21°C)	0,4654	80,00	494,80	29,41	8,08	23,3184	707,5097	6,76	164,99	11,97	29,29	2,02
	4A2 (23°C)	0,4563	71,97	497,70	29,84	7,77	26,9823	703,8314	7,05	166,44	14,88	30,13	2,00
	4A3 (22°C)	0,4617	73,33	529,70	23,82	8,24	21,0249	714,1224	7,72	170,93	13,07	30,28	2,05
Vod, otop, PAG 25%, 20°C	6A1 (20°C)	0,2778	57,58	544,90	17,46	13,61	26,15	589,06	4,35	125,91	15,00	24,08	1,40
	6A2 (20°C)	0,2939	67,42	527,50	17,58	12,87	24,82	606,94	4,05	119,91	14,96	23,39	1,33
	6A3 (22°C)	0,2834	65,00	525,30	17,17	13,44	24,49	598,57	4,16	123,49	14,70	23,60	1,36

Tablica III. Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 30°C određena primjenom matematičkog modela (slika 17) namijenjena daljnjoj razradi modela za predviđanje svojstava proizvoljno zadane koncentracije polimera

Naziv sredstva za gašenje	Redni broj mjerenja (stvarna temperatura sredstva za gašenje)	Intenzitet gašenja	Maksimalna brzina gašenja i temperatura pri kojoj se pojavljuje		Brzina gašenja na 700°C	Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C	Brzina i temp, prijelaza iz faze parnog omotača u mjehurasto vrenje		Brzina i temp, prijelaza iz mjehurastog vrenja u konvekciju		Srednje brzine gašenja faze parnog omotača, mjehurastog vrenja i konvekcije		
		H	v_{max}	θ_{max}	v_{700}	$t_{8/5}$	$v_{p/m}$	$\theta_{p/m}$	$v_{m/k}$	$\theta_{m/k}$	v_{sr_p}	v_{sr_m}	v_{sr_k}
Voda, 30°C	1B1 (33°C)	1,0609	152,58	554,60	120,33	2,24	-	-	27,89	177,92	-	54,24	3,62
	1B2 (31°C)	1,0536	153,64	526,80	110,66	2,38	-	-	25,22	182,42	-	57,09	2,29
	1B3 (32°C)	1,0638	153,94	552,00	122,34	2,22	-	-	24,48	176,00	-	53,79	2,35
Vod, otop, PAG 5%, 30°C	2B1 (29°C)	0,9106	145,61	526,80	76,00	3,12	-	-	14,54	174,81	-	42,32	3,71
	2B2 (30°C)	0,8877	124,24	598,90 516,90	82,56	3,15	-	-	11,50	172,98	-	48,23	2,35
	2B3 (31°C)	0,8931	125,00	503,10	92,21	3,16	-	-	15,20	169,53	-	44,58	2,20
Vod, otop, PAG 10%, 30°C	3B1 (30°C)	0,6601	97,88	560,40	71,47	4,10	-	-	6,12	130,59	-	30,90	1,48
	3B2 (31°C)	0,6312	91,67	500,60	62,15	4,32	-	-	8,78	140,64	-	32,30	1,61
	3B3 (28°C)	0,6589	101,52	516,90	64,35	3,86	-	-	6,40	131,79	-	31,78	1,49
Vod, otop, PAG 20%, 30°C	5B1 (28°C)	0,3220	60,76	572,80	18,85	11,86	22,077	627,55	6,77	179,66	14,38	25,46	2,07
	5B2 (31°C)	0,3061	70,00	542,80	17,91	12,55	22,41	615,06	7,04	181,38	14,11	25,86	2,10
	5B3 (32°C)	0,3140	65,61	556,80	18,24	12,24	24,62	611,08	7,16	182,90	15,19	26,41	2,13
Vod, otop, PAG 30%, 30°C	7B1 (30°C)	0,2056	61,97	444,40	16,52	18,05	27,82	493,21	2,39	101,71	14,99	13,89	0,90
	7B2 (32°C)	0,2055	60,15	447,70	16,48	17,98	27,48	494,21	2,90	107,50	14,90	15,16	0,96
	7B3 (31°C)	0,2052	56,97	454,30	16,29	17,99	33,79	485,06	2,30	99,81	16,28	13,21	0,88

Tablica IV. Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 30°C određena primjenom matematičkog modela (slika 17) namijenjena ispitivanju i verifikaciji predloženog modela za predviđanje tehnoloških svojstava otopina PAG

Naziv sredstva za gašenje	Redni broj mjerenja (stvarna temperatura sredstva za gašenje)	Intenzitet gašenja	Maksimalna brzina gašenja i temperatura pri kojoj se pojavljuje		Brzina gašenja na 700°C	Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C	Brzina i temp, prijelaza iz faze parnog omotača u mjehurasto vrenje		Brzina i temp, prijelaza iz mjehurastog vrenja u konvekciju		Srednje brzine gašenja faze parnog omotača, mjehurastog vrenja i konvekcije		
		H	v_{max}	g_{max}	v_{700}	$t_{8/5}$	$v_{p/m}$	$g_{p/m}$	$v_{m/k}$	$g_{m/k}$	v_{sr_p}	v_{sr_m}	v_{sr_k}
Vod, otop, PAG 15%, 30°C	4B1 (28°C)	0,3938	68,18	612,50	17,97	9,86	19,79	682,35	7,17	171,89	13,94	28,19	1,96
	4B2 (31°C)	0,3931	66,36	497,30	17,99	9,76	20,54	676,13	7,41	173,17	15,02	29,48	2,07
	4B3 (32°C)	0,3815	65,30	499,70	18,06	10,08	20,42	673,65	7,29	171,28	13,82	28,45	1,98
Vod, otop, PAG 25%, 30°C	6B1 (30°C)	0,2539	61,67	509,80	16,60	14,83	24,30	569,38	3,71	120,58	15,68	21,31	1,22
	6B2 (29°C)	0,2643	66,82	495,80	17,25	14,19	24,35	581,01	3,81	118,78	15,20	21,38	1,19
	6B3 (32°C)	0,2490	66,36	490,70	17,02	15,10	24,75	561,55	3,90	122,58	14,91	21,43	1,22

Tablica V. Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 40°C određena primjenom matematičkog modela (slika 17) namijenjena daljnjoj razradi modela za predviđanje svojstava proizvoljno zadane koncentracije polimera

Naziv sredstva za gašenje	Redni broj mjerenja (stvarna temperatura sredstva za gašenje)	Intenzitet gašenja	Maksimalna brzina gašenja i temperatura pri kojoj se pojavljuje		Brzina gašenja na 700°C	Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C	Brzina i temp, prijelaza iz faze parnog omotača u mjehurasto vrenje		Brzina i temp, prijelaza iz mjehurastog vrenja u konvekciju		Srednje brzine gašenja faze parnog omotača, mjehurastog vrenja i konvekcije		
		H	v_{max}	θ_{max}	v_{700}	$t_{8/5}$	$v_{p/m}$	$\theta_{p/m}$	$v_{m/k}$	$\theta_{m/k}$	v_{sr_p}	v_{sr_m}	v_{sr_k}
Voda, 40°C	1C1 (42°C)	1,0181	143,03	553,90	95,58	2,73	-	-	15,21	159,43	-	49,52	3,12
	1C2 (44°C)	1,0066	144,39	525,60	102,38	2,56	-	-	14,73	170,64	-	49,11	3,26
	1C3 (40°C)	1,0201	140,45	582,70	106,35	2,48	-	-	16,47	166,58	-	49,20	3,22
Vod, otop, PAG 5%, 40°C	2C1 (38°C)	0,8224	115,76	512,30	59,63	4,05	52,60	754,23	9,48	161,43	12,96	56,51	1,85
	2C2 (40°C)	0,8166	115,45	473,30	73,20	4,12	68,67	732,07	9,29	161,62	14,79	58,07	1,97
	2C3 (38°C)	0,8606	128,03	467,00	72,26	3,53	-	-	11,80	163,46	-	44,81	3,25
Vod, otop, PAG 10%, 40°C	3C1 (41°C)	0,5751	80,30	489,50	53,32	6,51	39,16	717,55	5,44	128,34	15,28	34,90	1,30
	3C2 (38°C)	0,6098	87,27	501,10	62,13	5,69	18,48	780,71	6,13	133,75	9,44	36,47	1,42
	3C3 (39°C)	0,5833	84,24	529,00	54,38	6,47	45,42	721,63	7,19	137,20	13,27	38,56	1,50
Vod, otop, PAG 20%, 40°C	5C1 (40°C)	0,2898	65,30	536,00	17,58	13,04	23,11	604,33	6,43	182,48	14,65	23,52	1,9
	5C2 (41°C)	0,2736	66,67	526,30	17,58	13,64	25,00	584,72	16,69	275,56	15,17	37,84	3,30
	5C3 (42°C)	0,2710	66,06	525,80	18,03	13,77	24,26	583,40	6,63	185,46	15,20	23,55	2,01
Vod, otop, PAG 30%, 40°C	7C1 (39°C)	0,1916	64,24	418,90	16,85	18,89	35,62	456,68	1,05	73,70	16,01	8,16	0,43
	7C2 (41°C)	0,1898	60,30	430,00	15,86	19,23	33,56	464,27	1,10	76,97	15,56	8,63	0,45
	7C3 (42°C)	0,1799	61,52	406,20	15,76	19,93	31,80	450,58	1,44	86,80	14,57	9,99	0,55

Tablica VI. Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 40°C određena primjenom matematičkog modela (slika 17) namijenjena ispitivanju i verifikaciji predloženog modela za predviđanje tehnoloških svojstava otopina PAG

Naziv sredstva za gašenje	Redni broj mjerenja (stvarna temperatura sredstva za gašenje)	Intenzitet gašenja	Maksimalna brzina gašenja i temperatura pri kojoj se pojavljuje		Brzina gašenja na 700°C	Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C	Brzina i temp, prijelaza iz faze parnog omotača u mjehurasto vrenje		Brzina i temp, prijelaza iz mjehurastog vrenja u konvekciju		Srednje brzine gašenja faze parnog omotača, mjehurastog vrenja i konvekcije		
		H	v_{max}	θ_{max}	v_{700}	$t_{8/5}$	$v_{p/m}$	$\theta_{p/m}$	$v_{m/k}$	$\theta_{m/k}$	v_{sr_p}	v_{sr_m}	v_{sr_k}
Vod, otop, PAG 15%, 40°C	4C1 (39°C)	0,3422	63,03	489,10	17,31	11,15	20,01	652,47	*	*	14,29	*	*
	4C2 (40°C)	0,3394	65,91	590,20	17,58	11,17	18,87	661,49	6,63	172,74	13,62	25,90	1,88
	4C3 (39°C)	0,3481	63,48	483,20	17,58	10,97	19,59	659,43	7,08	176,81	13,30	26,87	1,95
Vod, otop, PAG 25%, 40°C	6C1 (41°C)	0,2210	65,61	465,60	16,41	17,14	26,58	529,41	3,35	113,16	14,79	19,21	0,99
	6C2 (39°C)	0,2293	66,06	473,30	16,43	16,50	25,13	540,43	3,23	112,38	14,34	19,21	1,00
	6C3 (40°C)	0,2215	64,39	471,20	16,28	17,04	27,30	525,29	3,00	111,17	14,97	18,89	0,96

* -nije moguće odrediti tehnološko svojstvo radi nepotpunih podataka dobivenih iz pokusa – zadnja izmjerena temperatura je **135,2°C**

Tablica VII. Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 50°C određena primjenom matematičkog modela (slika 17) namijenjena daljnjoj razradi modela za predviđanje svojstava proizvoljno zadane koncentracije polimera

Naziv sredstva za gašenje	Redni broj mjerenja (stvarna temperatura sredstva za gašenje)	Intenzitet gašenja	Maksimalna brzina gašenja i temperatura pri kojoj se pojavljuje		Brzina gašenja na 700°C	Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C	Brzina i temp, prijelaza iz faze parnog omotača u mjehurasto vrenje		Brzina i temp, prijelaza iz mjehurastog vrenja u konvekciju		Srednje brzine gašenja faze parnog omotača, mjehurastog vrenja i konvekcije		
		H	v_{max}	θ_{max}	v_{700}	$t_{8/5}$	$v_{p/m}$	$\theta_{p/m}$	$v_{m/k}$	$\theta_{m/k}$	v_{sr_p}	v_{sr_m}	v_{sr_k}
Voda, 50°C	1D1 (50°C)	0,8719	110,30	509,40	77,84	3,33	67,39	757,94	***	***	19,94	***	***
	1D2 (51°C)	0,8704	116,21	500,90	61,00	3,94	64,29	721,77	***	***	18,14	***	***
	1D3 (51°C)	0,8366	110,45	457,80	57,41	4,16	70,23	669,70	16,67	175,72	21,01	63,12	1,99
Vod, otop, PAG 5%, 50°C	2D1 (50°C)	0,6819	97,12	478,70	45,20	7,12	41,29	704,21	5,52	115,68	14,55	40,18	1,07
	2D2 (50°C)	0,7531	107,73	481,80	37,49	7,06	42,92	694,16	10,39	176,98	15,06	32,81	3,21
	2D3 (50°C)	0,6981	102,58	435,90	27,90	7,92	39,15	687,60	25,24	195,15	13,02	59,35	2,45
Vod, otop, PAG 10%, 50°C	3D1 (49°C)	0,4383	72,58	614,40	19,43	9,44	20,60	693,00	***	***	12,70	***	***
	3D2 (50°C)	0,4086	69,24	508,40	17,96	10,16	19,63	677,06	***	***	13,17	***	***
	3D3 (50°C)	0,4559	72,12	494,40	19,55	9,62	20,78	685,29	4,82	127,47	12,58	29,79	1,21
Vod, otop, PAG 20%, 50°C	5D1 (48°C)	0,2484	61,97	516,60	16,99	14,98	24,97	562,63	***	***	14,48	***	***
	5D2 (48°C)	0,2399	57,88	520,50	16,88	15,53	24,47	560,25	***	***	13,82	***	***
	5D3 (49°C)	0,2392	56,82	521,70	16,52	15,67	29,02	554,00	***	***	15,57	***	***
Vod, otop, PAG 30%, 50°C	7D1 (48°C)	0,1685	59,67	399,10	15,45	21,10	40,20	426,66	***	***	14,92	***	***
	7D2 (49°C)	0,1691	60,00	401,70	15,41	21,11	37,38	433,49	***	***	14,58	***	***
	7D3 (49°C)	0,1701	57,42	415,20	15,05	21,04	42,19	435,48	***	***	14,98	***	***

Tablica VIII. Tehnološka svojstva vodenih otopina polimera PAG temperature 50°C određena primjenom matematičkog modela (slika 17) namijenjena ispitivanju i verifikaciji predloženog modela za predviđanje tehnoloških svojstava otopina PAG

Naziv sredstva za gašenje	Redni broj mjerenja (stvarna temperatura sredstva za gašenje)	Intenzitet gašenja	Maksimalna brzina gašenja i temperatura pri kojoj se pojavljuje		Brzina gašenja na 700°C	Vrijeme hlađenja od 800 do 500°C	Brzina i temp, prijelaza iz faze parnog omotača u mjehurasto vrenje		Brzina i temp, prijelaza iz mjehurastog vrenja u konvekciju		Srednje brzine gašenja faze parnog omotača, mjehurastog vrenja i konvekcije		
		H	v_{max}	g_{max}	v_{700}	$t_{8/5}$	$v_{p/m}$	$g_{p/m}$	$v_{m/k}$	$g_{m/k}$	v_{sr_p}	v_{sr_m}	v_{sr_k}
Vod, otop, PAG 15%, 50°C	4D1 (49°C)	0,2977	56,97	472,20	17,60	12,71	20,53	626,45	***	***	12,78	***	***
	4D2 (49°C)	0,2918	65,30	557,30	17,59	12,70	22,15	617,61	***	***	15,18	***	***
	4D3 (50°C)	0,2927	66,67	552,00	16,73	12,94	22,28	607,44	***	***	14,33	***	***
Vod, otop, PAG 25%, 50°C	6D1 (48°C)	0,2045	57,27	467,70	15,95	18,36	29,65	502,69	***	***	15,70	***	***
	6D2 (49°C)	0,2058	61,67	458,50	16,49	18,41	39,44	486,15	***	***	16,07	***	***
	6D3 (50°C)	0,2074	55,30	479,40	15,76	18,36	28,34	511,08	***	***	14,82	***	***

*** - nije moguće odrediti točku prijelaza iz mjehurastog vrenja u konvekciju