

# Određivanje efektivne površine uljne tlačne vage

---

**Rudman, Viktorija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*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:235:918881>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-03**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Viktorija Rudman**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Student:

Viktorija Rudman

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Lovorki Grgec Bermanec na uloženom vremenu, pomoći i savjetima pri izradi ovog rada.

Viktorija Rudman



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Viktorija Rudman** Mat. br.: 0035210685

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Određivanje efektivne površine uljne tlačne vage**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Determination of the effective area of an oil pressure balance**

Opis zadatka:

Tlačne vage se u pravilu koriste kao laboratorijski etaloni kod ispitivanja različitih vrsta mjerila tlaka. Kod umjeravanja tlačnih vaga najzahtjevniji korak je precizno određivanje efektivne površine sklopa klip/cilindar,  $A_e$ . U ovom radu potrebno je razraditi metode umjeravanja uljnih tlačnih vaga i metode određivanja efektivne površine. Provesti jedno umjeravanje metodom usporedbe koristeći etalonske sustave u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Potrebno je izraditi:

- Pregled osnovnih vrsta tlačnih vaga
- Teorijski pregled metoda umjeravanja tlačnih vaga
- Opis eksperimentalnog određivanja efektivne površine u Laboratoriju za procesna mjerenja
- Proračun efektivnih tlakova
- Procjenu mjernih nesigurnosti
- Usporedbu dobivenih rezultata sa prethodnim umjeravanjima

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:  
**1. rok:** 18 veljače 2021.  
**2. rok (izvanredni):** 5. srpnja 2021.  
**3. rok:** 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 22.2. – 26.2.2021.  
**2. rok (izvanredni):** 9.7.2021.  
**3. rok:** 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

# Sadržaj

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA.....	II
POPIS OZNAKA .....	III
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD .....	1
1.1. Euramet.....	2
1.2. Tlak.....	2
2. OSNOVNI POJMOVI I DEFINICIJE.....	4
3. TLAČNE VAGE.....	6
3.1. Općenito.....	6
3.2. Načelo rada .....	7
3.3. Umjeravanje.....	9
3.3.1. Metoda A.....	11
3.3.2. Metoda B .....	11
3.3.3. Metoda usporedbe dvije tlačne vage .....	11
3.4. Efektivna površina .....	12
3.4.1. Korekcije sklopa klip/cilindar .....	13
3.5. Određivanje koeficijenta elastične deformacije.....	15
3.5.1. Eksperimentalno određivanje $\lambda$ .....	15
3.5.2. Teorijsko određivanje $\lambda$ .....	15
3.6. Mjerna nesigurnost .....	16
3.6.1. Procjena standardne mjerne nesigurnosti .....	17
4. MJERENJE U LABORATORIJU .....	21
4.1. Podaci o etalonu.....	23
4.2. Podaci o umjeravanoj vazi.....	24
4.3. Postupak mjerenja.....	25
5. REZULTATI.....	30
6. ZAKLJUČAK .....	34
LITERATURA.....	35

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Vrste tlakova .....	2
Slika 2.	Vrste i područja primjene tlačnih vaga .....	6
Slika 3.	Tlačna vaga .....	7
Slika 4.	Sklop klip cilindar - osnovne konfiguracije tlačne vage.....	9
Slika 5.	Normalna razdioba .....	18
Slika 6.	Pravokutna razdioba s pripadajućom standardnom devijacijom.....	20
Slika 7.	Oprema za mjerenje tlaka i temperature okoline .....	22
Slika 8.	Uređaj za mjerenje temperatura sklopa klip/cilindar .....	22
Slika 9.	Odzračivanje sustava.....	23
Slika 10.	Shema "cross - floating metode" .....	26
Slika 11.	Sklop ispitivane i etalonske vage .....	26
Slika 12.	Graf ovisnosti efektivne površine o efektivnom tlaku s pravcem povučenim koristeći metodu najmanjih kvadrata .....	32
Slika 13.	Rezultati mjerenja efektivne površine kroz godine s pripadajućim mjernim nesigurnostima .....	33

## POPIS TABLICA

Tablica 1.	Mjerne jedinice za tlak .....	2
Tablica 2.	Procijenjene mjerne nesigurnosti .....	19
Tablica 3.	Mjerenje brzine rotacije.....	23
Tablica 4.	Podaci o etalonu .....	23
Tablica 5.	Podaci o masama etalonske vage .....	24
Tablica 6.	Podaci o umjeravanoj vazi .....	24
Tablica 7.	Podaci o utezima umjeravane vage .....	25
Tablica 8.	Prvi ciklus mjerenja.....	27
Tablica 9.	Drugi ciklus mjerenja .....	27
Tablica 10.	Treći ciklus mjerenja .....	28
Tablica 11.	Rezultati proračuna efektivnog tlaka.....	30
Tablica 12.	Rezultati proračuna efektivne površine.....	31



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$p$	Pa	tlak
$F$	N	sila
$A$	$m^2$	površina
$T$	K	apsoluta termodinamička temperatura
$V$	$m^3$	volumen
$R$	J/kmolK	opća plinska konstanta
$n$	kmol	množina (količina) tvari
$A_e$	$m^2$	efektivna površina
$\lambda$	$Pa^{-1}$	koeficijent elastične deformacije
$A_0$	$m^2$	efektivna površina pri nultom tlaku
$t_r$	$^{\circ}C$	referentna temperatura
$\alpha_k$	$^{\circ}C^{-1}$	koeficijent temperaturnog rastezanja klipa
$\alpha_c$	$^{\circ}C^{-1}$	koeficijent temperaturnog rastezanja cilindra
$t$	$^{\circ}C$	stvarna temperatura klipa i cilindra
$r$	m	radijus klipa
$R$	m	radijus cilindra
$p_e$	bar	efektivni tlak u sustavu
$m_i$	kg	masa i-tog utega postavljenog na sklop
$\rho_a$	$kg/m^3$	gustoća okolišnog zraka
$\rho_{mi}$	$kg/m^3$	gustoća i-tog utega
$h$	m	visinska razlika u odnosu na referentni položaj
$v$	$m^3$	volumen na koji se odnosi korekcija zbog uzgonskog djelovanja fluida
$\rho_f$	$kg/m^3$	gustoća radnog fluida
$g$	$m/s^2$	lokalno gravitacijsko ubrzanje
$\theta$	$^{\circ}$	otklon klipa od vertikale
$\Gamma$	mN/m	površinska napetost
$c$	m	opseg klipa
$\nu_k$	-	Poissonov koeficijent klipa
$\nu_c$	-	Poissonov koeficijent cilindra
$E_k$	$N/m^2$	Youngov modul elastičnosti klipa
$E_c$	$N/m^2$	Youngov modul elastičnosti cilindra
$R_c$	m	vanjski promjer cilindra
$r_c$	m	unutarnji promjer cilindra
$U$	-	proširena mjerna nesigurnost
$k$	-	faktor proširenja
$u_c(y)$	-	sastavljena normalna nesigurnost
$\alpha$	$^{\circ}C^{-1}$	koeficijent temperaturnog rastezanja sklopa klip/cilindar
$p_{ok}$	bar	tlak okoliša
$t_{klip}$	$^{\circ}C^{-1}$	temperatura klipa
$\sigma$	-	standardno odstupanje

$\bar{x}$	-	aritmetička sredina
$\mu$	-	aritmetička sredina uzorka

## SAŽETAK

U radu je teorijski i eksperimentalno prikazan način određivanja efektivne površine uljne tlačne vage. Pritom je objašnjen proračun efektivnog tlaka te postupak umjeravanja tlačne vage s posebnim naglaskom na „cross – floating“ metodu. U uvodnom dijelu dana je teorijska osnova načela rada tlačnih vaga zajedno s pregledom postupaka umjeravanja. Objašnjeni su načini određivanja mjerne nesigurnosti te računanja koeficijenta elastične deformacije. Eksperimentalni dio odrađen je u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje uz pomoć stručnog osoblja. Mjerenje je provedeno prateći mjeriteljske standardne i norme dane od strane Eurameta. Svrha umjeravanja odrediti je efektivnu površinu umjeravane tlačne vage. U zaključku su dobiveni rezultati mjerenja efektivne površine uspoređeni s rezultatima iz prijašnjih godina te je iskustveno pretpostavljena mjerna nesigurnost. Dobivena je funkcijska veza između efektivne površine i efektivnog tlaka koja je potrebna za krajnji rezultat.

Ključne riječi: tlak, tlačna vaga, umjeravanje, efektivna površina

## SUMMARY

The methods connected with calibration of pressure balances and estimation of effective area were treated theoretically and experimentally in this thesis with emphasis on „cross – floating“ method. Theoretical basis of pressure balances and calibration methods were given in opening. Measuring equipment, calculation of effective pressure and analysis of the results are described in details. Final goal of the task was estimation of effective area. Calibration was carried out in The Laboratory for Measurement Processing (LPM) by laboratory technician. For the purpose of this final task, the main guidelines for the calibration procedures according to European standards were explained. The results are presented via tables and diagrams and commented on. Functional equation between effective area and effective pressure is estimated. Calibration proces was carried out well which can be seen below.

Key words: pressure, pressure balance, calibration, effective area

## 1. UVOD

Čovjek se koristi mjerenjem od samih početaka ljudske civilizacije. Već Egipćani su koristili stopu, palac i lakat za mjerenje dužine pri izgradnji piramida. Navedena mjerila uvijek su bila dostupna te se nisu mogla izgubiti. Sjetimo se industrijske revolucije u 18. stoljeću koja se temeljila na strojevima pokretanim tlakom pare. Danas se čovjek svakodnevno, svjesno i nesvjesno, susreće s mjerenjem. Koristi termometar za mjerenje tjelesne temperature, vagu za vaganje sastojaka u pripremi hrane te mjerenje tjelesne težine. Takvim mjerenjima nije dana velika važnost jer nemaju značajan utjecaj na naše troškove i zdravlje. S druge strane, troškovi mjerenja i vaganja u Europi iznose 6 % bruto nacionalnog proizvoda. Mjerna nesigurnost, učinkovitost, pouzdanost i preciznost mjerenja od velike su važnosti pri osiguranju kvalitete u tehnici i proizvodnji. Iz tog razloga ulažu se velika sredstva u industriji kako bi se unaprijedila razina točnosti mjerenja, povećala učinkovitost te osigurali kvalitetni mjerni instrumenti. Umjeravanje mjernih instrumenata temelj je pouzdanih mjerenja. Umjeravanje, baždarenje ili kalibriranje je, po definiciji, postupak namještanja ljestvice mjernog uređaja usporedbom s drugim mjernim instrumentom ili normom. U praksi je to usporedba s etalom visoke kvalitete. Metrologija ili mjeriteljstvo je znanstvena disciplina koja se bavi mjerenjem u teorijskim i praktičnim oblicima.

Metrologija općenito ima tri glavna zadatka:

1. definiranje međunarodno prihvaćenih mjernih jedinica
2. ostvarenje mjernih jedinica znanstvenim metodama
3. utvrđivanje lanca sljedivosti pri dokumentiranju točnosti mjerenja.

Metrologija se dijeli na tri grane:

- tehnička
- znanstvena
- zakonska.

Znanstvena metrologija bavi se čuvanjem, razvojem i organizacijom mjernih etalona.

Umjeravanjem se određuje mjerna nesigurnost. Mjerna nesigurnost je, prema definiciji, parametar pridružen rezultatu mjerenja koji označuje rasipanje vrijednosti što se smije razborito prepisati izmjerenoj vrijednosti. Rezultat mjerenja ili umjeravanja nije potpun bez procijenjene mjerne nesigurnosti. Glavni razlozi za umjeravanje su:

- osiguranje da očitavanja mjerila budu u skladu s drugim mjerilima
- određivanje točnosti mjerenja
- određivanje pouzdanosti mjerila.

Postupci umjeravanja definirani su od strane Euramet-a.

## 1.1. Euramet

Euramet (European Association of National Metrology Institutes) je europsko udruženje nacionalnih mjeriteljskih instituta osnovano 2007. godine u Berlinu. Svrha je postići veću produktivnost i koordinaciju međusobnom suradnjom i dijeljenjem mjeriteljskih aktivnosti i usluga. Kroz prijenos znanja i nacionalnu suradnju olakšava se razvoj mjeriteljskih infrastruktura diljem Europe. Ova agencija broji 38 zemlja članica u koje se ubraja i Hrvatska. Euramet surađuje s Međunarodnom organizacijom za zakonsko mjeriteljstvo i Međunarodnim uredom za vage i mjere. Suradnja se temelji na projektima kojima upravljaju tzv. skupine izvjestitelja s jednim članom iz svake zemlje. Istraživanje, međulaboratorijske usporedbe i proučavanje sljedivosti predstavljaju temelj za istovrijednost između nacionalnih mjeriteljskih ustanova.

## 1.2. Tlak

Tlak je fizikalna veličina koja se može u potpunosti opisati u terminima osnovnih SI jedinica mase, vremena i duljine. Određena je omjerom sile koja okomito djeluje na površinu  $A$  (1):

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Mjerna jedinica je njutn po metru kvadratnom ( $N/m^2$ ) ili Paskal (Pa). S obzirom da je Paskal jako mala jedinica, često se koristi mjerna jedinica tlaka bar ( $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ). Odnos između SI i često korištenih mjernih jedinica za tlak prikazan je u tablici [Tablica 1]:

**Tablica 1. Mjerne jedinice za tlak**

Naziv	Oznaka	Pa
inč stupca žive	inHg	3386,3887
inč stupca vode	inH <sub>2</sub> O	249,08891
hektopaskal	hPa	100
milibar	mbar	100
funta sile po kvadratnom palcu	psi	6894,7573

Tlak je rezultat djelovanja čestica fluida na stijenku posude. Ukoliko se u posudi ne nalazi niti jedna čestica fluida, tlak u njoj iznosi nula, tj. prevladava 100 % vakuum. S obzirom na referentnu vrijednost skale mjerenja tlaka, tj. s obzirom na veličinu s kojom uspoređujemo mjereni tlak, razlikujemo [Slika 1]:

- Atmosferski tlak

Atmosferski tlak ili tlak zraka je posljedica djelovanja težine Zemljinog omotača na površinu Zemlje. Na razini mora iznosi:  $p_0 = 101\,325 \text{ Pa} = 1 \text{ Atm}$ . Taj iznos još nazivamo jedna atmosfera.

- Vakuum (zrakoprazan prostor)

- Relativni tlak

Tlak mjeren u odnosu na neku referentnu vrijednost.

- Apsolutni tlak

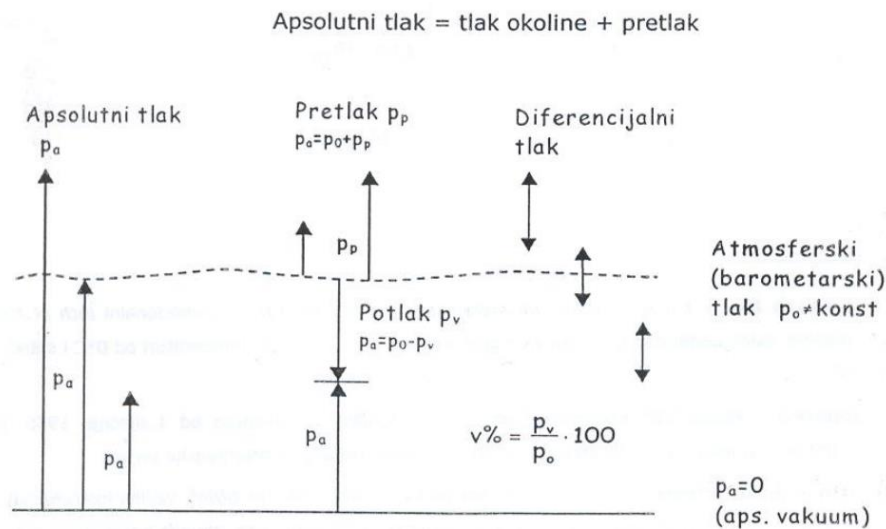
Tlak koji kao referentnu vrijednost na skali koristi apsolutnu nulu [Slika 1].

- Podtlak

Predstavlja razliku tlakova koja je manja od atmosferskog tlaka.

- Pretlak

Tlak koji kao referentnu vrijednost koristi tlak okoline. Predstavlja razliku tlakova koja je veća od atmosferskog tlaka.



**Slika 1. Vrste tlakova [6]**

U tehnici se pri određivanju tlaka često koristi hipoteza kontinuuma. Kontinuum predstavlja matematički model materije prema kojem svojstva materije ostaju jednaka pri smanjenju volumena u točki. Ovom hipotezom omogućuje se primjena integralnih i diferencijalnih računa u mehanici fluida. Čestica kontinuuma ima infinitezimalno malen volumen  $dV$  te svaka čestica zauzima točno jednu točku prostora. U jednoj točki prostora može se nalaziti samo jedna čestica kontinuuma. Prema ovoj teoriji definiran je izraz (2):

$$p = \frac{dF}{dA} \quad (2)$$

Gdje je  $dA$  diferencijal površine koji odgovara površini čestice za koju su svojstva jednaka kao u cijelom kontinuumu. Na navedenu površinu neprekidno udara velik broj molekula zbog čega je efekt tlaka vremenski jednak kao i u ostatku kontinuuma, tj. konstantan.

U termodinamici je tlak izražen preko jednadžbe stanja (3) do koje se eksperimentalno može doći pomoću Gay-Lussacova i Boyle-Mariotteova pokusa:

$$p = \frac{T}{V} \cdot R \cdot n \quad (3)$$

gdje je:

$T$	[K]	apsolutna termodinamička temperatura
$V$	[m <sup>3</sup> ]	volumen plina
$R$	[J/kmolK]	opća plinska konstanta, $R=8314$ J/kmolK
$n$	[kmol]	množina (količina) tvari

Metode mjerenja tlaka su:

- djelovanje poznate sile na poznatu površinu
- mjerenje pomoću visine stupca tekućine (živa, voda)
- mehanička deformacija (Bourdonova cijev)
- praćenje promjene fizikalnih svojstava (toplinska vodljivost, viskoznost, ionizacija).



## 2. OSNOVNI POJMOVI I DEFINICIJE

Definicije općih mjeriteljskih pojmova preuzete su iz *Međunarodnog rječnika osnovnih i općih naziva u metrologiji*<sup>1</sup> (VIM). Navedeni rječnik objavila je Međunarodna organizacija za normizaciju<sup>2</sup> (ISO).

(mjerljiva) veličina – svojstvo koje pojave, tijela ili tvari koje se može kvalitativno razlikovati i kvantitativno odrediti

Vrijednost (veličine) - veličina koja se općenito izražava umnoškom jedne mjerne jedinice kojim brojem

Istinita vrijednost (veličine) – vrijednost sukladna određenju dane posebne veličine

Mjerenje – skup postupaka kojima se određuje vrijednost kakve veličine

Mjerna metoda – smislen niz postupaka, opisanih prema rodu, koji se upotrebljavaju za provođenje mjerenja

Mjerni postupak – skup podataka, opisanih prema vrsti, koji se upotrebljavaju za provođenje pojedinih mjerenja u skladu s određenom metodom

Mjerena veličina (veličina koju treba mjeriti) – posebna veličina podvrgnuta mjerenju

Utjecajna veličina – veličine koja nije mjerena veličina, ali utječe na mjerni rezultat

Mjerni rezultat – vrijednost dobivena mjerenjem pripisana kojoj mjerenoj veličini

Mjerna točnost – usko slaganje između kojeg mjernog rezultata i istinite vrijednosti mjerene veličine

Mjerna nesigurnost – parametar pridružen rezultatu kojeg mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjerenoj veličini

Mjerna pogriješka – mjerni rezultat manje istinita vrijednost mjerene veličine

Razmjerna pogriješka – mjerna pogriješka podijeljena s istinitom vrijednošću mjerene veličine

Sustavna pogriješka – srednja vrijednost koja bi proizašla iz beskonačnog broja mjerenja iste mjerene veličine izvedenih u uvjetima ponovljivosti manje istinita vrijednost mjerene veličine

Ispravak – vrijednost algebarski pribrojena neispravljenom mjernom rezultatu radi uklanjanja sustavne pogriješke

Faktor ispravka – brojčani faktor kojim se množi mjerni rezultat da bi se uklonila sustavna pogriješka

Sljedeće definicije i pojmovi dolaze iz međunarodne norme ISO 3534-1.

Vjerojatnost – realan broj u rasponu od 0 do 1 pridružen kojem slučajnom događaju

---

<sup>1</sup> Eng. International vocabulary of metrology (VIM)

<sup>2</sup> Eng. The International Organization for Standardization

Razdioba vjerojatnosti – funkcija koja daje vjerojatnost da će slučajna varijabla poprimiti bilo koju danu vrijednost ili da pripada određenom skupu vrijednosti

Funkcija razdiobe – funkcija za svaku vrijednost  $x$  daje vjerojatnost da će slučajna varijabla  $X$  biti manja ili jednaka  $x$

Parametar – veličina koja služi za opis razdiobe vjerojatnosti koje slučajne varijable

Korelacija – odnos između dviju ili više varijabla u razdiobi dviju ili više slučajnih varijabla

Aritmetička sredina – zbroj vrijednosti podijeljen brojem tih vrijednosti

Procjenjivanje – postupak pridjeljivanja (iz opažanja u uzorku) brojčanih vrijednosti parametrima razdiobe izabrane kao statistički model populacije iz koje je uzet taj uzorak

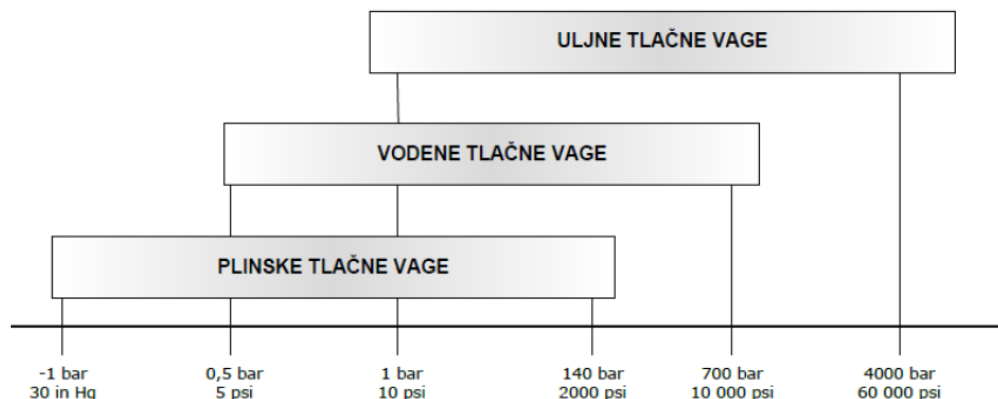
Procjenjivač – statistika koja se upotrebljava za procjenu kojeg populacijskog parametra

Procjena – vrijednost procjenjivača koja se dobiva kao rezultat procjenjivanja

### 3. TLAČNE VAGE

#### 3.1. Općenito

Tlačne vage kao etaloni predstavljaju jedno od najtočnijih mjerila tlaka. Prvi slični uređaji pojavili su se početkom 19. stoljeća te su radili na načelu djelovanja poznate sile na poznatu površinu. Postoje tri vrste tlačnih vaga: uljne, vodene te plinske [Slika 2].



**Slika 2. Vrste i područja primjene tlačnih vaga [6]**

- Plinske tlačne vage

Plinske tlačne vage koriste plin kao radni medij te mogu mjeriti u pretlačnom ili apsolutnom načinu rada. Kod pretlačnog načina rada, zrak je evakuiran te je vanjski tlak posljedica zaostalog zraka. U drugom slučaju je vanjski tlak jednak okolišnom tlaku. Radni fluid je čisti dušik bez udjela kisika ili filtrirani zrak. Zbog niže viskoznosti plina, klip je osjetljiviji na poremećaje u sustavu. U praksi je to vidljivo u obliku vertikalnog kolebanja klipa.

a) Rad u pretlačnom načinu

Moguć izvor pogreške u ovom načinu rada predstavljaju aerodinamičke sile koje djeluju na rotirajuće dijelove sustava. U svrhu smanjenja ove greške, utezi trebaju biti simetrično postavljeni na klip ili nosaču utega. Također, komponente opterećenja trebaju imati što finiju površinsku obradu. Utjecaj aerodinamičkih sila procjenjuje se mjerenjem efektivnog tlaka pri danom opterećenju uz različite brzine vrtnje klipa. Preporuča se rad pri nižim brzinama vrtnje klipa.

b) Rad u apsolutnom načinu

U ovom načinu rada, tlačna vaga postavlja se ispod zvona. Vakuumpumpa evakuira volumen zvona uspostavljajući i održavajući tlak oko 0,01 Pa. Na ukupnu mjernu nesigurnost određivanja tlaka utječe niži zaostali tlak. Iz tog razloga, mjerilo zaostalog tlaka potrebno je postaviti na zvono zbog razlike u očitavanju između unutrašnjosti zvona i okoline cijevi za

evakuaciju. Mjerenje temperature unutar zvona (u vakuumu) također se može razlikovati od kalibriranih vrijednosti. Pogodno je imati automatski sustav postavljanja utega na klip kako bi se izbjeglo ponovno uspostavljanje vakuuma nakon svake mjerne točke.

- Vodene tlačne vage

Radni medij je pročišćena voda ili čista voda male viskoznosti što omogućuje stabilnija mjerenja. Koriste se za rad u području nižih tlakova.

- Uljne tlačne vage

Pri odabiru radnog medija uljnih tlačnih vaga potrebno je paziti na dvije stvari. Visoka viskoznost ulja smanjuje istjecanje kroz procijep između cilindra i klipa vage, a niska viskoznost omogućuje brz odaziv te smanjuje deceleraciju klipa.

### 3.2. Načelo rada

Načelo rada tlačnih vaga temelji se na zakonu promjene hidrostatskog tlaka. Osnovni dio tlačne vage je sklop okomitog klipa koji je umetnut u cilindar [Slika 4]. Klip je izrađen na mikronske tolerancije (najfinije strojarске tolerancije), a cilindar je blisko prilagođen. Poprečni presjeci površina sklopa su poznati te zajedno određuju efektivnu površinu<sup>3</sup>. Pretpostavka je da su osi klipa i cilindra vertikalne, a površine su im ravne, glatke te savršeno cilindrične. Na klip poznate mase stavljaju se utezi poznate težine, a s druge strane se dovodi fluid. Utezi od nehrđajućeg čelika najčešće se dodaju na vrh klipa pomoću nosača ili oprezno rukom koja mora biti zaštićena. Najčešće korišteni fluid je ulje ili dušik. Vaga je u ravnoteži kada pritisak fluida poraste dovoljno da može podići klip s utegom. Rotacijom klipa potvrđujemo ravnotežu vage te eliminiramo utjecaj sile trenja. Neophodan fluid za podmazivanje istječe iz sustava kroz procjep između klipa i cilindra. Iz tog razloga potrebno je kontinuirano dodavati tlak u sustav i održati klip s utezima u plutajućem stanju. Očitani tlak predstavlja manometarski tlak s obzirom da tlak zraka također pritišće klip i utege.



Slika 3. Tlačna vaga

<sup>3</sup> Eng. Effective area,  $A_e$

Danas prevladavaju tri osnovne konfiguracije tlačnih vaga [Slika 3]:

- jednostavna konfiguracija ( $p_j = 0$ )
- uvučena konfiguracija ( $p_j = p$ )
- tlakom kontrolirani zazor ( $p_j \neq p$ ).

#### 1. Jednostavna konfiguracija ( $p_j = 0$ )

Mjereni tlak djeluje samo na bazu klipa. Raspodjela tlaka posljedica je djelovanja vanjskog tlaka  $p$  te uspostave ravnoteže tlačne vage. Uspostavom stabilnog tlaka u sklopu klip/cilindar postiže se i temperaturna ravnoteža između sklopa i fluida. Klip i cilindar izloženi su slobodnoj elastičnoj deformaciji koja ovisi o tlaku, elastičnim konstantama klipa i cilindra, fizikalnim svojstvima fluida te geometriji klipa i cilindra. Ovo je najrasprostranjeniji tip tlačnih vaga koji se najčešće koristi. Maksimalni mjereni tlak iznosi 500 MPa, a ograničen je velikom brzinom propadanja klipa pri većim opterećenjima. Navedeno je posljedica česte izmjene brtve kod mjerenja visokih tlakova i deformacije cilindra.

#### 2. Uvučena konfiguracija ( $p_j = p$ )

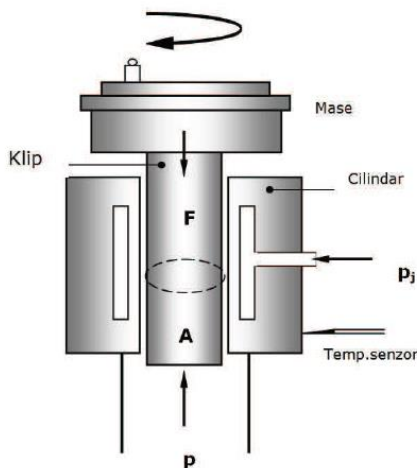
Mjereni tlak, kod ovog tipa tlačnih vaga, ne djeluje samo na bazu klipa/cilindra već i na točno definiran vanjski dio cilindra, tj. oplošje cilindra. Time se reduciraju deformacije cilindra uslijed djelovanja visokog tlaka jer dolazi do raspodjele tlaka u sklopu. Vrijednost deformacije ovisi o istim parametrima navedenim kod tlačne vage s jednostavnom konfiguracijom. Ove vage su konstruirane kako bi kompenzirale distorziju sklopa pri visokim tlakovima. Maksimalni tlak ovisi o radnom području jer su zazori između klipa i cilindra pri atmosferskom tlaku veliki i dolazi do propuštanja. Najviši radni tlak iznosi 700 MPa, a u prošlosti se koristio model koji je mjerio do 1,3 GPa. Danas je ovaj model zastario te se rijetko koristi.

#### 3. Tlakom kontrolirani zazor ( $p_j \neq p$ )

Promjenjivi tlak  $p_j$  je generiran, kontroliran i mjeren zasebnim sustavom. Djeluje na točno definiranu površinu cilindra te utječe na veličinu zazora između klipa i cilindra. Veličina zračnosti ovisi o geometriji sustava, početnoj zračnosti, tlakovima  $p$  i  $p_j$ , svojstvima fluida te elastičnim svojstvima sklopa. Ova konfiguracija koristi se za mjerenje tlakova između 500 MPa i 2 GPa. Predstavljaju jedine vage koje mogu sigurno mjeriti u rasponu iznad 1 GPa. U usporedbi s uvučenom konfiguracijom, ova konfiguracija operativna je i na srednjim tlakovima. Brzina propadanja klipa kontrolira se odabirom pravilnog tlaka  $p_j$  i održavanjem konstantnog zazora između klipa i cilindra. Time se, također, lako određuje vrijednost efektivne površine.

U literaturi se također mogu pronaći sljedeće vrste tlačnih vaga:

- mješovite konfiguracije
- tlačne vage sa sferičnim klipovima
- tlačne vage s izljubljenim klipovima
- tlačne vage s više sklopova klip/cilindar.



**Slika 4. Sklop klip cilindar - osnovne konfiguracije tlačne vage [6]**

Glavni zahtjevi za izradu idealnog sklopa klip/cilindar su:

- pažljivo odabran materijal koji dobro podnosi visoka tlačna naprezanja te ima mali koeficijent temperaturne ekspanzije (volfram s dodatkom nikla i kobalta, keramika, čelik)
- površine klipa i cilindra izrađene s mikronskom točnošću
- konstantan zazor između klipa i cilindra veličine do  $0,5 - 1 \mu\text{m}$
- sonda za mjerenje temperature te praćenje promjene efektivne površine s promjenom temperature
- postizanje i održavanje točnog tlaka za vrijeme cijelog mjerenja
- konstantna efektivna površina duž cilindra pri atmosferskom tlaku
- postizanje apsolutne nepropusnosti brtvljenjem što je od osobite važnosti na dnu cilindra
- konstrukcija sklopa klip/cilindar kako bi se izbjeglo nakupljanje tekućine u gornjem dijelu cilindra te time uzgonsko djelovanje na neke dijelove klipa

### 3.3. Umjeravanje

Umjeravanjem se određuje odstupanje rezultata umjeravanog instrumenta od etalona. Etaloni tlaka su tlačne vage i visoko kvalitetni tekućinski manometri čija je upotreba ograničena zbog tražene visine stupca tekućine. Svi uređaji za mjerenje tlaka prolaze kroz periodička umjeravanja u svrhu boljeg rada instrumenta. Nakon umjeravanja izdaje se certifikat ili Potvrda o umjeravanju u kojoj su vidljivi rezultati etalona, umjeravanog instrumenta te njihova razlika. Rezultat umjeravanja nije potpun bez procijenjene mjerne nesigurnosti. Nakon uspješno određenih odstupanja slijedi proces namještanja te, ponovnim umjeravanjem, utvrđivanje nove točnosti uređaja. Soba za umjeravanje prema Euromet-ovom priručniku za umjeravanje treba zadovoljiti sljedeće uvjete:

- temperatura prostorije između  $15$  i  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  stabilizirana unutar  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
- održavanje stabilne atmosfere kontrolom otvaranja vrata i gibanja po prostoriji

- postaviti tlačnu vagu daleko od strujanja zraka uzrokovanog ventilacijskim sustavom ili klimom
- umjeravani uređaj smjestiti što bliže etalonu sa što manjom visinskom razlikom
- tlačnu vagu smjestiti na horizontalan, čvrst stol koji može podnijeti opterećenje utega bez izvijanja
- klip mora biti postavljen okomito, uzimajući u obzir preporuke proizvođača
- cijevi trebaju biti kratke, čiste i nepropusne
- umjeravani uređaj potrebno je staviti u laboratorij barem 12 sati prije umjeravanja kako bi se izjednačila temperaturna razlika između prostorije i instrumenta
- radni medij ne smije sadržavati nečistoće
- pri ručnom postavljanju utega na klip potrebno je provjeriti utjecaj smjera rotacije klipa pri uspostavljanju ravnoteže
- pri rukovanju s utezima ili sklopom klip/cilindar koriste se čiste pamučne rukavice
- potrebno je provjeriti brzinu propadanja klipa te ju usporediti s podacima danim od strane proizvođača
- potrebno je utvrditi vrijeme zaustavljanja klipa s nazivne brzine rotacije te ga usporediti s podacima danima od strane proizvođača
- mjerna nesigurnost etalonskog mjerila mora biti manja od pretpostavljene mjerne nesigurnosti umjeravane vage
- u slučaju mjerenja apsolutnog tlaka, potrebno je 30 minuta prije umjeravanja uključiti vakuum pumpu čime se iz prostora eliminira vodena para
- pri mjerenju apsolutnog tlaka koristi se suhi dušik bez udjela kisika kao radni fluid

Postupak umjeravanja sklopa klip/cilindar sastoji se od:

1. umjeravanja masa utega i klipa
2. određivanje efektivne površine sklopa
3. određivanje koeficijenta elastične deformacije
4. određivanje ostalih karakteristika.

Prije početka umjeravanja potrebno je izvršiti vanjske provjere te probni rad uređaja kako bi se utvrdilo da je umjeravanje moguće provesti.

Vanjske provjere obuhvaćaju:

1. vizualnu provjeru uređaja
2. provjeru čistoće cijelog uređaja
3. vizualnu provjeru mogućnosti očitavanja rezultata
4. provjeru dostupnosti sve potrebne tehničke dokumentacije ili upotreba za korištenje.

Probni rad uređaja obuhvaća:

1. provjeru električne instalacije
2. provjeru nepropusnosti cijevi sustava
3. postavljanje elemenata sustava te dijelova uređaja u odgovarajuće položaje
4. nuliranje sustava (zaštita od dodira previsokog napona).

Bitna mjerenja moraju biti sljediva. Mjerna sljedivost je svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti kojim se on dovodi u vezu s referentnim etalonima neprekinutim lancem umjeravanja koje imaju utvrđene nesigurnosti.

Postoje tri metode umjeravanja tlačnih vaga prema EURAMET cg3: metoda A, metoda B te metoda usporedbe dvije tlačne vage („cross – floating“).

### **3.3.1. Metoda A**

Metoda A ili Metoda uspostavljenog tlaka koristi statistiku iz više ponovljenih mjerenja. Ovom metodom procjenjuje se tlak proizveden djelovanjem utega poznatih masa. Provode se barem tri mjerenja, svaka s poznatim masama utega dobivenim uz tlačnu vagu. Gravitacijsko ubrzanje uzeto je  $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ , a referentna temperatura  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nesigurnost se računa iz standardne devijacije koristeći Gaussovu ili normalnu razdiobu. Ova metoda se ne koristi kad je potrebna najmanja mjerna nesigurnost. Rezultati umjeravanja sadrže:

- mjernu nesigurnost
- razliku tlaka umjeravane tlačne vage i referentnog tlaka
- referentni tlak mjeren etalonskim mjerilom tlaka
- standardnu devijaciju referentnog tlaka
- tlak tlačne vage koja se kalibrira (tlak koji daje kombinacija utega).

### **3.3.2. Metoda B**

Metoda B ili Metoda efektivne površine određuje masu utega i klipa te efektivnu površinu pri temperaturi od  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Mjerenje efektivne površine izvodi se barem tri puta uz minimalno šest radnih točaka po mjerenju. Prva točka predstavlja minimalnu vrijednost raspona tlaka, a ostale točke raspoređene su duž mjernog raspona. Rezultati umjeravanja sadrže:

- efektivnu površinu
- mjernu nesigurnost efektivne površine
- koeficijent distorzije (ako je značajan).

### **3.3.3. Metoda usporedbe dvije tlačne vage**

Metoda usporedbe dvije tlačne vage („cross – floating“) postavlja etalon i umjeravani instrument na zajednički tlačni sustav. Obje vage dovode se u stanje ravnoteže namještanjem masa i dovođenjem klipa u plutajući položaj. Uravnoteženje se postiže korištenjem malih utega. Načelom usporedbe, omjer ukupnih opterećenja biti će jednak omjeru efektivnih površina. Temelj usporedbe je određivanje sila masa i klipa po kojima svaki sklop održava isti tlak. Ako se koristi metoda A, utezi se stavljaju na referentnu vagu. U slučaju korištenja metode B, utezi se stavljaju na vagu koja je osjetljivija na promjenu mase. Potrebno je ugraditi precizni manometar s mjernim područjem unutar umjeravanog raspona tlaka. Manometrom se prvo mjeri tlak na referentnom, a zatim na ispitivanom sklopu. Ovu metodu nije moguće potpuno automatizirati zbog čega je potrebna vještina i vrijeme. Računala se koriste samo za analizu rezultata nakon provedenih mjerenja.



U laboratoriju postoje dvije tehnike izvođenja metode usporedbe dvije tlačne vage. Razlika je u tehnikama kojima se identificira stanje ravnoteže:

a) tehnika propadanja<sup>4</sup>

Ova metoda ima najrašireniju primjenu. Etalon i umjeravana vaga opterećeni su masama određenim za traženi radni tlak. Ventil između sklopova je zatvoren te se mjeri propadanje svakog sklopa. Otvaranjem ventila, mase na sklopovima se reguliraju sve dok oba klipa ne krenu propadati u svom prirodnom omjeru. Tada oba klipa održavaju isti tlak u sustavu. Ovom metodom se ne mjeri propadanje, nego vertikalni pomak klipa ili utega.

b) tehnika mjerenja razlike tlaka<sup>5</sup>

Na kvalitetu usporedbe ove metode utječe osjetljivost diferencijalnog indikatora razlike tlaka. Svaka slučajna primjena prevelike razlike tlaka ima velike posljedice što ovu metodu čini vrlo osjetljivom. Ova metoda je nužna pri usporedbi dvije vage s različitim radnim medijem, npr. ulje i plin.

### 3.4. Efektivna površina

Pojam efektivne površine sklopa klip/cilindar uveden je da se otkloni nepoznata sila koja je posljedica viskoznog toka radnog medija između cilindra i klipa. Efektivna površina je, u režimu pretlak, uzgonski kompenzirana težina klipa i utega (masa) podijeljenih s pretlakom. Ne mora nužno odgovarati ni jednoj dimenzijskoj površini sklopa. Funkcija je dimenzija klipa i cilindra, a prema teoriji elastične deformacije linearno ovisi o tlaku (4):

$$A_e(p) = A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p) \quad (4)$$

$A_0$  je efektivna površina pri nultom tlaku, a  $\lambda$  je koeficijent elastične deformacije. Kod visokotlačnih sklopova ovisnost efektivne površine o tlaku postaje izvor nesigurnosti, dok kod niskotlačnih sklopova ta ovisnost nije izražena. U cilju smanjenja nesigurnosti, provode se brojna istraživanja u vodećim mjernim institutima kako bi se pronašla metoda za određivanje koeficijenta elastične deformacije. Ovaj parametar vrlo je bitan u radu na visokim tlakovima. Može se odrediti na različite načine koji su navedeni u poglavlju 3.5.

Primjenom teorije linearnog temperaturnog rastezanja izvedena je ovisnost efektivne površine tlačne vage o temperaturi (5):

$$A_{ef}(t) = A_0(t) \cdot [1 + (\alpha_k + \alpha_c) \cdot (t - t_r)] \quad (5)$$

gdje je:

$t_r$	[°C]	referentna temperatura
$A_0(t_r)$	[m <sup>2</sup> ]	površina sklopa mjerena pri referentnoj temperaturi
$\alpha_k$	[°C <sup>-1</sup> ]	koeficijent temperaturnog rastezanja klipa

<sup>4</sup> Eng. Rate-of-fall technique

<sup>5</sup> Eng. Pressure sensing method

$\alpha_c$	$[\text{°C}^{-1}]$	koeficijent temperaturnog rastezanja cilindra
$t$	$[\text{°C}]$	stvarna temperatura klipa i cilindra

Koeficijenti  $\alpha_c$  i  $\alpha_k$  definirani su izrazima (6), (7):

$$r(t) = r(t_r) \cdot [1 + \alpha_k \cdot (t - t_r)] \quad (6)$$

$$R(t) = R(t_r) \cdot [1 + \alpha_c \cdot (t - t_r)] \quad (7)$$

gdje je  $r(t)$  radijus klipa, a  $R(t)$  radijus cilindra. Uvrštavanjem (6) i (7) u jednadžbu (5) dobiva se (8):

$$A_{ef}(t) = A_0(t_r) \cdot \left[ 1 + (t - t_r) \cdot \frac{(2 \cdot \alpha_k \cdot r(t_r) + 2 \cdot \alpha_c \cdot R(t_r))}{r(t_r) + R(t_r)} \right] \quad (8)$$

Navedeni izrazi i jednadžbe odnose se na idealan sklop klip/cilindar. U takvom sklopu je površina idealnog kružnog poprečnog presjeka izložena konstantnom tlaku. U takvom idealnom sustavu bi tlak fluida djelovao samo na dno klipa. U realnom laboratorijskom sustavu javljaju se brojna odstupanja i korekcije klipa i cilindra od idealnog sustava. Razlozi su nesavršena geometrija sklopa, dinamička ravnoteža te rotacija klipa.

#### 3.4.1. Korekcije sklopa klip/cilindar

Korekcije koje se trebaju uzeti u obzir odnose se na silu, tlak okoline i površinu.

Korekcije sile obuhvaćaju:

- varijaciju gravitacijskog ubrzanja
- razliku u visini stupca fluida
- uzgonsko djelovanje zraka
- uzgonsko djelovanje radnog fluida
- površinsku napetost radnog fluida.

Korekcije tlaka odnose se na režim rada: apsolutni tlak ili pretlak. Kod korekcije površine potrebno je uzeti u obzir temperaturnu ovisnost površine, tj. rastezanje klipa i cilindra s promjenom temperature, utjecaj gravitacije sklopa i pojavu elastične deformacije zbog djelovanja tlaka.

Uzevši u obzir sve navedene korekcije, dobiven je izraz za izračun efektivnog tlaka uljne tlačne vage (9):

$$p_e = \frac{\left[ \sum_i \left[ m_i \cdot \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}} \right) \right] + (hA_0 - v) \cdot (\rho_f - \rho_a) \right] \cdot g \cdot \cos(\theta) + \Gamma \cdot c}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_e) \cdot [1 + (\alpha_c + \alpha_k) \cdot (t - 20)]} \quad (9)$$

gdje su:

$p_e$	[Pa]	efektivni tlak u sustavu
$m_i$	[kg]	masa i-tog utega postavljenog na sklop
$\rho_a$	[kg/m <sup>3</sup> ]	gustoća okolišnog zraka
$\rho_{mi}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	gustoća i-tog utega
$h$	[m]	visinska razlika u odnosu na referentni položaj
$A_0$	[m <sup>2</sup> ]	efektivna površina pri nultom tlaku
$v$	[m <sup>3</sup> ]	volumen na koji se odnosi korekcija zbog uzgorskog djelovanja fluida
$\rho_f$	[kg/m <sup>3</sup> ]	gustoća radnog fluida
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	lokalno gravitacijsko ubrzanje
$\theta$	[-]	kut otklona klipa od vertikale
$\Gamma$	[mN/m]	površinska napetost
$c$	[m]	opseg klipa
$t$	[°C]	temperatura sklopa za vrijeme umjeravanja

Korekcijom uzgorskog djelovanja zraka dobiva se težina masa izmjerenih u vakuumu. U obzir se uzima djelovanje okolišnog zraka na klip, nosač utega te dodane utege. U jednadžbi je ova korekcija definirana faktorom:

$$1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}$$

Korekcija radnog fluida izražena je umnoškom  $(hA_0 - v) \cdot (\rho_f - \rho_a)$  koji je moguće rastaviti na dva dijela:

$$a) hA_0 \cdot (\rho_f - \rho_a)$$

Ovaj faktor predstavlja korekciju zbog visinske razlike između referentnog položaja i položaja klipa u trenutku kad je vaga u ravnoteži. Kada se očitava mjereni tlak, također obuhvaća razlike težine stupca okolišnog zraka i radnog fluida.

$$b) -v \cdot (\rho_f - \rho_a)$$

Navedeni faktor uzima u obzir utjecaj uzgorske sile radnog fluida na dijelove klipa koji su uronjeni u fluid.

Umnožak  $g \cdot \cos(\theta)$  predstavlja normalnu komponentu sile kojom se djeluje na fluid. U realnosti je nemoguće dobiti savršeno vertikalnu silu te kut  $\theta$  predstavlja odstupanje od vertikale.

Korekcija površinske napetosti izražena je izrazom  $\Gamma \cdot c$ . Djeluje na klip na mjestu gdje on „izranja“ iz fluida u smjeru težine.

$(1 + \lambda \cdot p_e)$  predstavlja linearnu ovisnost efektivne površine o tlaku koji se mjeri.

$[1 + (\alpha_c + \alpha_k) \cdot (t - 20)]$  predstavlja korekciju ploštine radne površine koja se mijenja odmakom od referentne temperature.

### 3.5. Određivanje koeficijenta elastične deformacije

Ovaj parametar od velike je važnosti u radu na visokim tlakovima. Može se odrediti eksperimentalno ili teorijski primjenom teorije elastičnosti. Ovisi o dizajnu sklopa klip/cilindar i radnim parametrima.

#### 3.5.1. Eksperimentalno određivanje $\lambda$

Eksperimentalne metode koje se koriste za određivanje koeficijenta elastične deformacije efektivne površine tlačne vage su:

1. Metoda usporedbe dvije tlačne vage
2. Metoda sličnosti
3. Metoda protjecanja

Metoda sličnosti dvije tlačne vage koristi klipove i cilindre različitih i poznatih modula elastičnosti te jednakih nazivnih dimenzija. Postavljanjem vaga u ravnotežu, može se mjeriti relativna razlika u koeficijentu elastične deformacije između dvije vage. Kombinacijom tih relacija i uz poznate individualne module, određuje se  $\lambda$  iz izraza (10):

$$A_{ei} = A_{0i} \cdot (1 + \lambda_i \cdot p) \quad (10)$$

Jedan od sklopova klip/cilindar mora biti izrađen od „mekanijeg“ materijala koji je sklon oštećenju. Navedeno čini nedostatak ove tehnike.

Metoda protjecanja koristi dva ili više klipa izrađena od istog materijala, ali s neznatno različitim dimenzijama. Klipovi su korišteni s jednakim cilindrom. Kroz seriju mjerenja u kojima klip propada pri različitim opterećenjima mjeri se deformacija cilindra. Prije mjerenja potrebno je poznavati ovisnosti gustoće i viskoziteta radnog fluida o tlaku.

Nedostaci eksperimentalnih metoda nadoknađuju se razvojem računskih tehnika za predviđanje efekta deformacije.

#### 3.5.2. Teorijsko određivanje $\lambda$

Teorijske metode određivanja koeficijenta elastične deformacije temelje se na numeričkim ili analitičkim rješenjima sustava diferencijalnih jednadžbi. Najčešće korištena je metoda pojednostavljenog proračuna korištenjem Lamé-ove jednadžbe koja glasi (11):

$$\lambda = \frac{3 \cdot \nu_k - 1}{2 \cdot E_k} + \frac{1}{2 \cdot E_c} \cdot \left[ \frac{R_c^2 + r_c^2}{R_c^2 - r_c^2} + \nu_c \right] \quad (11)$$

gdje je:

$\nu_k$	[-]	Poissonov koeficijent klipa
$\nu_c$	[-]	Poissonov koeficijent cilindra
$E_k$	[N/m <sup>2</sup> ]	Youngov modul elastičnosti klipa
$E_c$	[N/m <sup>2</sup> ]	Youngov modul elastičnosti cilindra
$R_c$	[m]	vanjski promjer cilindra
$r_c$	[m]	unutarnji promjer cilindra

Ovaj izraz pretpostavlja linearnu raspodjelu tlaka u zazoru sklopa klip/cilindar.

### 3.6. Mjerna nesigurnost

Godine 1997. udružilo se sedam internacionalnih organizacija<sup>6</sup> i osnovalo Zajednički odbor za vodiče u metrologiji<sup>7</sup> (JCGM u nastavku). Objavili su dva vrlo bitna dokumenta: *Vodič za iskazivanje mjerne nesigurnosti*<sup>8</sup> (GUM u nastavku) i *Međunarodni rječnik osnovnih i općih naziva u metrologiji* (VIM u nastavku). Cilj je bilo ujednačenje shvaćanja pojmova mjerne nesigurnosti, pogrešaka i iskazivanja rezultata. Dogovor o mjernoj nesigurnosti nije se više zasnivao na „pravoj“ vrijednosti i pogrešci, koje su obje bile nepoznanice, već na izmjerenim vrijednostima i procijenjenoj sigurnosti. Oslonac za stručno nazivlje je VIM. GUM je danas prihvatila većina nacionalnih metroloških instituta te međunarodni standardi akreditacija laboratorija (npr. ISO/IEC 17025). GUM je vrlo obilan dokument te jedan od najznačajnijih dokumenata za jednoznačno tumačenje rezultata mjerenja i uspoređivanje mjernih rezultata provedenih u različitim laboratorijima.

JCGM se sastoji od dvije radne skupine:

#### 1. Radna skupina 1

Zadatak ove grupe promocija je upotrebe GUM-a te revizija i održavanje istog. Također pripremaju GUM za sve širu upotrebu. Izjavili su da nemaju namjeru mijenjati postojeće izdanje već će izdati dodatne priručnike.

<sup>6</sup> To su: International Bureau of Weights and Measures (BIMP), the International Electrotechnical Commission (IEC), the International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (IFCC), the International Organization for Standardization (ISO), the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) i International Organization of Legal Metrology (OIML). 2005. godine im se pridružuje the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC)

<sup>7</sup> Eng. Joint Committee of Guides in Metrology (JCGM)

<sup>8</sup> Eng. Guide to the Expression of Uncertainty of measurements (GUM)

## 2. Radna skupina 2

Zadatak ove skupine pregledavanje je i promocija šire upotrebe VIM-a. Članovi su stručnjaci te predstavnici (do dva) svake međunarodne organizacije koja je članica. Prije izdavanja novih izdanja VIM-a, tekst prolazi kroz ovjeru svih članica.

Rezultat mjerenja nije potpun ako mu nije pridružena mjerna nesigurnost. Prema (VIM)-u, definicija mjerne nesigurnosti glasi: *Mjerna nesigurnost je nenegativni parametar koji karakterizira rasipanje vrijednosti količine koje se pripisuju mjernim veličinama na temelju korištenih podataka.* Mjerna nesigurnost uključuje parametre koji proizlaze iz rezultata mjerenja poput korekcija i definicijske nesigurnosti. Parametar može biti, npr. standardno odstupanje koje se naziva standardna mjerna nesigurnost<sup>9</sup> ili polovica intervala pretpostavljene nesigurnosti.

### 3.6.1. Procjena standardne mjerne nesigurnosti

Procjena mjerne nesigurnosti za početak zahtijeva listu parametara koji utječu na mjerenje. Ti parametri mogu se podijeliti u dvije skupine: parametri vezani uz instrument te parametri vezani uz okolinu u kojoj sustav radi. Oni vezani uz instrument mogu biti: ponovljivost<sup>10</sup>, rezolucija itd. Nakon određivanja utjecajnih faktora, definiraju se matematičke relacije između njih i mjerenja tlaka. Za svaki utjecajni faktor izračunavaju se koeficijenti osjetljivosti i doprinos ukupnoj mjernoj nesigurnosti. Koeficijent osjetljivosti pokazuje koliko se promjeni rezultat mjerenja ako se utjecajni parametar promijeni za „jednu jedinicu“. Izračunava se parcijalnom derivacijom utjecajnog faktora po tlaku. Drugi način je pomoću računala inkrementiranjem svakog utjecajnog faktora i računajući pripadajuću promjenu vrijednosti tlaka. Zatim se standardna nesigurnost svakog faktora množi s pripadajućim faktorom osjetljivosti. Na taj način uzima se u obzir utjecaj svake nesigurnosti na mjerenje tlaka. Kombinacijom rezultata dobiva se kombinirana standardna mjerna nesigurnost. Proširena mjerna nesigurnost dobiva se množenjem s faktorom sigurnosti ( $k$ ). Ovaj faktor prikladan je traženom nivou pouzdanosti te najčešće iznosi 2 ili 3.

Mjerna nesigurnost mogla bi se odrediti statističkim procjenama na način da se svaka veličina koja utječe na nju mijenja. Ovakav postupak je skup i traži puno vremena zbog čega nije uobičajen. Danas se pretpostavlja matematički model ovisnosti mjerene veličine o utjecajnim parametrima i interval nesigurnosti. Prema JCGM-ovoj preporuci<sup>11</sup> nesigurnost mjernog rezultata sastoji se od nekoliko sastavnica koje se mogu razvrstati u dva razreda:

#### 1. A sastavnice koje se izračunavaju statističkim metodama

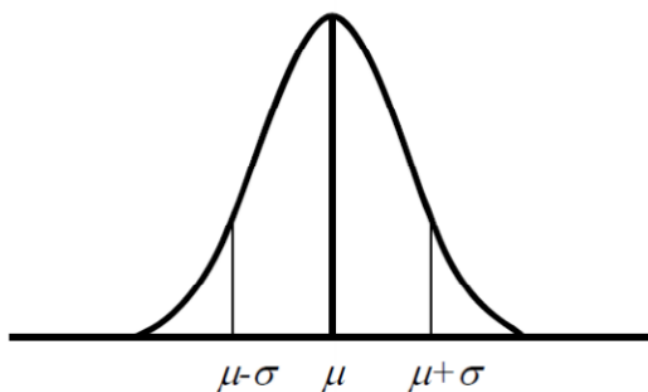
Vrijednost nesigurnosti procjenjuje se na temelju ponovljenih praktičnih mjerenja statističkim postupcima. Sastavnica razreda A opisuje se procjenama standardnog odstupanja ( $\sigma$ ) i brojem stupnja slobode. Aritmetičke sredine mjerenja ( $\bar{x}$ ) okupljaju se oko aritmetičke sredine osnovnog skupa ( $\mu$ ) prema zakonima (npr. Studentova razdioba ili normalna razdioba). Koristeći navedene zakone, izračunava se vjerojatnost da se slučajni parametar nalazi u

<sup>9</sup> Prema JCGM 100:2008

<sup>10</sup> Definicija prema JCGM 100:2008, B.2.15.: *Ponovljivost (mjernih rezultata) – usko slaganje između rezultata uzastopnih mjerenja iste mjerene veličine izvedenih u istim mjernim uvjetima*

<sup>11</sup> JCGM 100:2008, Preporuka INC-1 (1980)

određenom intervalu. Standardno odstupanje i aritmetička sredina uzorka predstavljaju slučajne varijable koje se razlikuju od uzorka do uzorka. Zadatak mjeritelja je na temelju ograničenog broja mjerenja, tj. na temelju aritmetičke sredine i standardnog odstupanja, odrediti mjerenu veličinu. Pretpostavlja se da su sve sustavne pogreške zanemarive i jednake nuli. Aritmetička sredina uzorka nije jednaka „pravoj“ vrijednosti mjerene veličine, ali ju najbolje aproksimira. Mjeritelji ne znaju je li se te koliko se te dvije veličine razlikuju. Moguće je procijeniti raspon vrijednosti u kojem se uz određenu pouzdanost očekuje vrijednost mjerene veličine. Taj raspon naziva se interval pouzdanosti<sup>12</sup>. Dobiveni podaci grupirani su oko srednje vrijednosti, a učestalost njihova ponavljanja smanjuje se udaljavanjem od te vrijednosti [Slika 5].



**Slika 5. Normalna razdioba [5]**

## 2. B sastavnice

Pri procjeni nesigurnosti ne koristi se statistika, već prethodno iskustvo iz vanjskih umjernica, proračuna, objavljenih izvora, proizvođačkih specifikacija te zdravog razuma. Sve komponente nesigurnosti moguće je odrediti eksperimentalno (metodom A), ali zbog ograničenog vremena i sredstava koristi se metoda B. Nesigurnost se u ovoj metodi procjenjuju na temelju jednog mjerenja. Procjena mjerne nesigurnosti može se temeljiti na:

- tehničkim specifikacijama mjerne opreme
- podacima o umjeravanju mjerila
- nesigurnosti korištenih podataka preuzetih iz priručnika i ostalih izvora
- podacima o obnovljivosti<sup>13</sup> i ponovljivosti
- podacima o sličnim ranije provedenim mjerenjima
- raznim drugim informacijama: zaokruživanje, histereza itd.

Kombinirana mjerna nesigurnost izvedena je iz svih značajnih standardnih nesigurnosti. Kombinirana standardna mjerna nesigurnost, uz procjenu svih mogućih nesigurnosti, mora biti manja od aritmetičkog zbroja doprinosa. Relativna standardna mjerna nesigurnost predstavlja omjer standardne mjerne nesigurnosti i apsolutne vrijednosti izmjerene veličine.

<sup>12</sup> Eng. Confidence interval

<sup>13</sup> Definicija prema JCGM 100:2008, B.2.15.: *Ponovljivost (mjernih rezultata) – usko slaganje između mjernih rezultata iste mjerene veličine izvedenih u primijenjenim mjernim uvjetima*

Proširena mjerna nesigurnost dobiva se množenjem faktora proširenja ( $k$ ) i sastavljene normalne nesigurnosti ( $u_c(y)$ ) (12):

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (12)$$

Razina pouzdanosti koja se želi postići izravno utječe na faktor proširenja. Tako faktor iznosa između 2 i 3 odgovara razini pouzdanosti od 95 % do 99 %. Razina pouzdanosti od 95 % znači da je vjerojatnost 19:20 da će „prava“ vrijednost mjerene veličine biti unutar određenog raspona. Iz tog razloga prvo je potrebno izračunati ukupnu standardnu nesigurnost i tek ju na kraju pomnožiti s faktorom  $k$ .

Oredimo procjenu mjerne nesigurnosti svakog člana jednadžbe (13):

$$p_e = \frac{\left[ \sum_i \left[ m_i \cdot \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}} \right) \right] + (hA_0 - v) \cdot (\rho_f - \rho_a) \right] \cdot g \cdot \cos(\theta) + \Gamma \cdot c}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_e) \cdot [1 + (\alpha_c + \alpha_k) \cdot (t - 20)]} \quad (13)$$

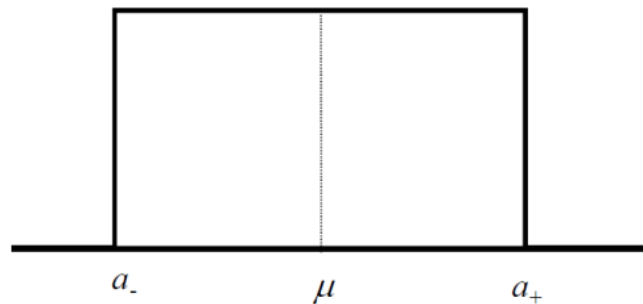
**Tablica 2. Procijenjene mjerne nesigurnosti**

Veličina	Mjerna nesigurnost	Napomena
$m_i$	reda veličine 0,1 ppm	<ul style="list-style-type: none"> <li>&lt; 1 ppm</li> <li>proširena mjerna nesigurnost</li> </ul>
$\rho_a$	$10^{-4} \text{ kg/m}^3$ ili manje	<ul style="list-style-type: none"> <li>relativna standardna mjerna nesigurnost</li> </ul>
$\rho_{mi}$	$< 5 \text{ kg/m}^3$	<ul style="list-style-type: none"> <li>proširena mjerna nesigurnost izmjerena u laboratoriju</li> <li>ovisi o materijalu, geometrijskim faktorima i obliku</li> </ul>
$h$	$< 1 \text{ mm}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>proširena mjerna nesigurnost</li> <li>može biti pozitivna i negativna</li> </ul>
$A_0$	reda veličine 10 ppm	<ul style="list-style-type: none"> <li>proširena mjerna nesigurnost pri referentnoj temperaturi i atmosferskom tlaku</li> </ul>
$\rho_f$	oko 1 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>proširena mjerna nesigurnost</li> </ul>
$g$	reda veličine 0,1 ppm ili manje	<ul style="list-style-type: none"> <li>procijenjena mjerna nesigurnost</li> <li>uzeti u obzir korekciju visine (do 0,3 ppm)</li> </ul>
$\Gamma$	reda veličine 1 mN/m	<ul style="list-style-type: none"> <li>bitno za mjerenje niskih tlakova</li> <li>manje bitno iznad tlakova od 100 MPa</li> </ul>
$c$	do 0,5 mm	
$\lambda$	oko 10 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>standardna mjerna nesigurnost</li> </ul>
$\alpha_c$	nekoliko %	<ul style="list-style-type: none"> <li>relativna standardna mjerna nesigurnost</li> </ul>
$\alpha_k$	nekoliko %	<ul style="list-style-type: none"> <li>relativna standardna mjerna nesigurnost</li> </ul>
$t$	0,1 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>proširena mjerna nesigurnost</li> </ul>



Pravokutna razdioba predstavlja najnepovoljniju razdiobu mjernog rezultata unutar sigurnih granica. U ovom slučaju poznate su samo maksimalne greške. Ako nema podataka o distribuciji mjerene vrijednosti unutar granica sigurnosti, pretpostavlja se jednaka vjerojatnost pojavljivanja izmjerene veličine unutar intervala  $\pm a$ . Očekivana vrijednost mjerene veličine nalazi se u sredini intervala (14), [Slika 6].

$$x_i = \frac{a_- + a_+}{2} \quad (14)$$



**Slika 6.** Pravokutna razdioba s pripadajućom standardnom devijacijom [5]

## 4. MJERENJE U LABORATORIJU

Laboratorij za procesna mjerenja (LPM) nasljednik je Laboratorija za toplinska mjerenja koji je osnovan 1960. godine u sklopu Visoke tehničke škole. Nalazi se na Fakultetu strojarstva i brodogradnje zauzimajući preko 400 m<sup>2</sup>. LPM ima više od 50 godina iskustva u znanstvenom, nastavnom i stručnom radu na području primjene i teorije mjerenja sljedećih toplinskih i procesnih veličina:

- temperatura
- tlak
- vlažnost
- protok
- brzina strujanja fluida
- masa
- toplinska energija
- toplinska svojstva tvari.

Laboratorij je ugovorno vezan s Državnim zavodom za mjeriteljstvo predstavljajući nacionalni umjerni laboratorij za temperaturu, tlak i vlažnost. Od 2002. godine akreditirani je umjerni laboratorij od strane njemačke umjerne službe - Deutscher Kalibrierdienst (DKD) prema normi ISO/IEC 17025. 2008. godine postao je nositelj državnog etalona vlažnosti Hrvatskog mjeriteljskog instituta (HMI-a).

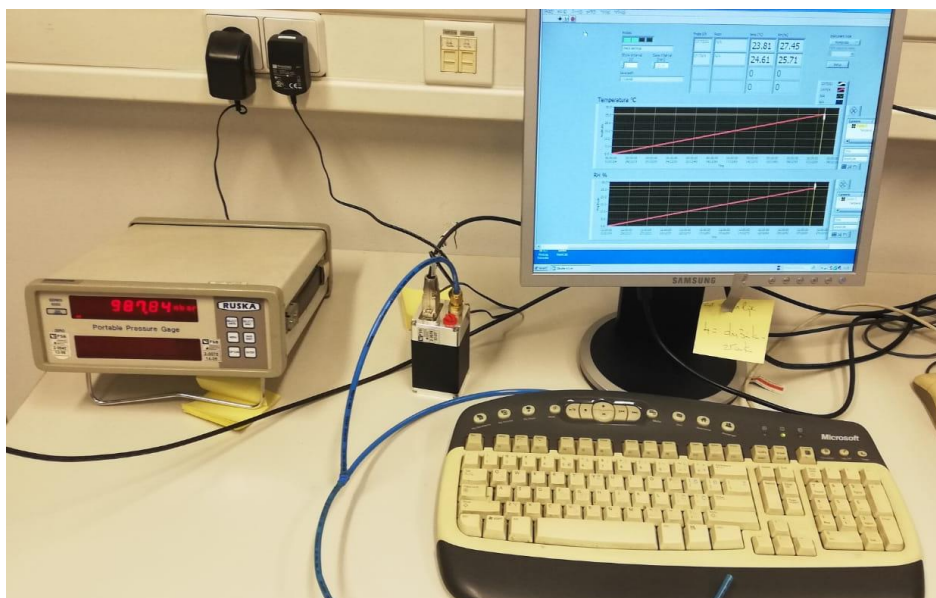
Djelatnost Laboratorija za procesna mjerenja uključuje:

1. predavanja i vježbe za kolegije preddiplomskog, diplomskog i postdiplomskog studija Fakulteta strojarstva i brodogradnje
2. razvojni, eksperimentalni i znanstveni rad kroz sudjelovanje u tehnološkim i znanstvenoistraživačkim projektima (Projekti Ministarstva znanosti, edukacije i sporta Republike Hrvatske; EU, EURAMET i EMPIR projekti).

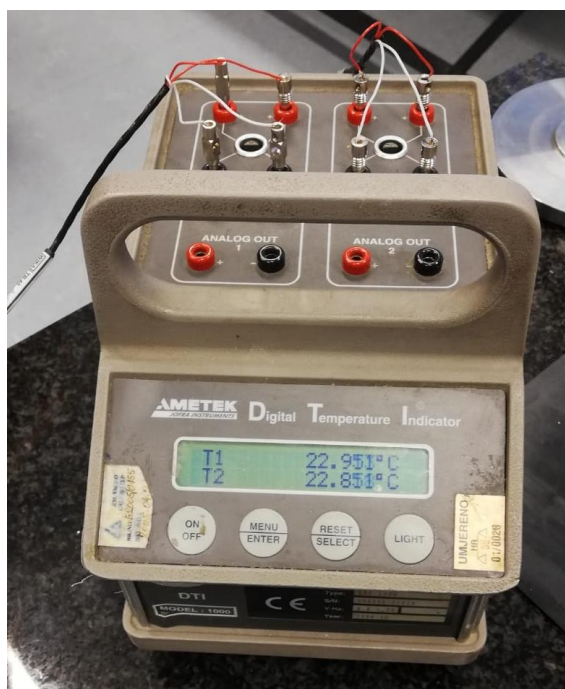
Laboratorij predstavlja Republiku Hrvatsku na nacionalnim međulaboratorijskim mjerenjima.

Etalonska vaga koja se koristi pri umjeravanju je Prufpumpe Typ T1300 proizvođača Wika Pressurement. Tlačni medij je bijelo ulje, a sklop radi u području 30 – 1400 bar. Ispitivana vaga, tj. vaga koja se umjerava, je Budenberg 600 vaga. Svrha umjeravanja određivanje je efektivne površine ispitivane vage. Efektivna površina etalonske vage je poznata kao i težina utega koji se stavljaju na sklop klip/cilindar.

Prije početka mjerenja osigurana je stabilnost stola na kojem se nalaze vage te je pomoću libele (*vaser* vage) provjerena vodoravnost vage. Ispod vage nalazi se gumena podloga kako ne bi došlo do pomicanja ili sklizanja. Utezi su očišćeni te se pri rukovanju koriste rukavice. Kontrolom otvaranja vrata osigurava se stabilna atmosfera. Mjeri se vlažnost zraka i temperatura okoline (prostorije) te temperatura sklopa klip/cilindar etalonske i umjeravane vage [Slika 7], [Slika 8]. Temperatura prostorije utječe na viskozitet ulja i tlak vage te time i na krajnji rezultat mjerenja efektivne površine ispitivane vage. Razlika u temperaturi od samo 1 °C utječe na grešku u iznosu od 25 ppm.

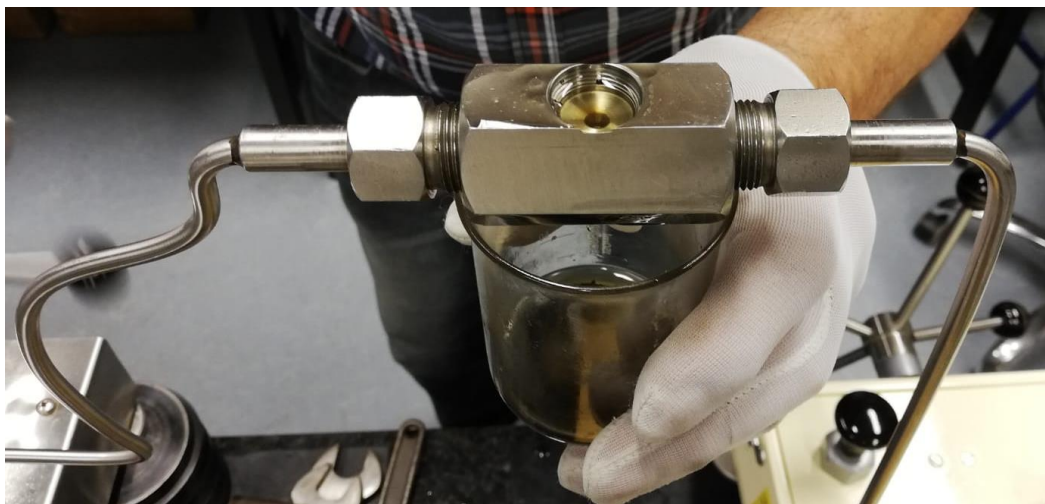


**Slika 7. Oprema za mjerenje tlaka i temperature okoline**



**Slika 8. Uređaj za mjerenje temperatura sklopa klip/cilindar**

Obje vage su prije mjerenja očišćene zbog čega je potrebno provesti postupak odzračivanja [Slika 9]. Zrak u sustavu ometa mjerenje te daje pogrešne rezultate. Na najvišu točku sustava stavljen je ventil s otvorom kroz koji se izbacuje zrak podizanjem tlaka u obje vage. Izlaz zraka vidljiv je u obliku mjehurića. Odzračivanje sustava prikazano je na sljedećoj slici [Slika 9]:



**Slika 9. Odzračivanje sustava**

Nakon odzračivanja mjeri se vrijeme rotacije cilindra umjeravane vage. Standardno vrijeme rotacije, tj. vrijeme zaustavljanja s nazivne brzine vrtnje, iznosi minimalno 3 minute. Nazivna brzina vrtnje iznosi  $60 \text{ min}^{-1}$  te je dana od strane proizvođača. Manje od navedenog znači da postoji prevelik otpor sklopa klip/cilindar. Provedena su dva mjerenja pri početnom tlaku (130 bar) koji iznosi 20 % maksimalnog tlaka vage [Tablica 3]. Rezultati su prikazani u sljedećoj tablici:

**Tablica 3. Mjerenje brzine rotacije**

Mjerenje	Brzina rotacije [ $\text{min}^{-1}$ ]	Vrijeme rotacije [min]	Vrijeme rotacije [s]
1.	60	7:12	432
2.	60	6:46	406

Mjerenje brzine rotacije umjeravane vage dalo je zadovoljavajuće rezultate.

#### 4.1. Podaci o etalonu

**Tablica 4. Podaci o etalonu**

Podaci o etalonu iz umjernice	Oznaka	Iznos	Mjerna jedinica
Efektivna površina	$A_0$	4,031450E-06	$\text{m}^2$
Koeficijent distorzije	$\lambda$	3,4E-07	$\text{bar}^{-1}$
Volumen za koji se radi korekcija	$v$	3,2E-07	$\text{m}^3$
Gustoća ulja (bijelo ulje)	$\rho_f$	914,0	$\text{kg}/\text{m}^3$

Površinska napetost ulja	$c$	0,0312	N/m
Ubrzanje sile teže za LPM	$g$	9,80622	m/s <sup>2</sup>
Opseg klipa	$\Gamma$	7,115828E-03	m
Koeficijent temp. ekspanzije	$\alpha$	1,66E-05	°C <sup>-1</sup>

**Tablica 5. Podaci o masama etalonske vage**

Oznaka na utegu	Masa utega [g]	Nominalni tlak $p_n$ [bar]	Gustoća utega [kg/m <sup>3</sup> ]
1	4112,7278	100,0	7900,0
2	4112,7278	100,0	7900,0
3	4112,5178	100,0	7900,0
4	4112,7828	100,0	7900,0
5	4112,6078	100,0	7900,0
6	4112,7578	100,0	7900,0
7	4112,7778	100,0	7900,0
8	4112,7028	100,0	7900,0
9	4112,6728	100,0	7900,0
10	4112,7378	100,0	7900,0
11	4112,7128	100,0	7900,0
12	4112,6828	100,0	7900,0
13	4112,7178	100,0	7900,0
14	2056,3739	50,0	7900,0
15	411,2708	10,0	7900,0
16	411,2778	10,0	7900,0
17	411,2748	10,0	7900,0
18	411,2788	10,0	7900,0
19	205,6325	5,0	7900,0
20	41,1288	1,0	7900,0
21	41,1272	1,0	7900,0
22	41,1283	1,0	7900,0
23	41,1270	1,0	7900,0
24	135,1629	3,30	7900,0

**4.2. Podaci o umjeravanoj vazi****Tablica 6. Podaci o umjeravanoj vazi**

Podaci iz umjernice	Oznaka	Iznos	Mjerna jedinica
Efektivna površina	$A_0$	8,06515E-06	m <sup>2</sup>
Koeficijent distorzije	$\lambda$	3,3E-07	bar <sup>-1</sup>

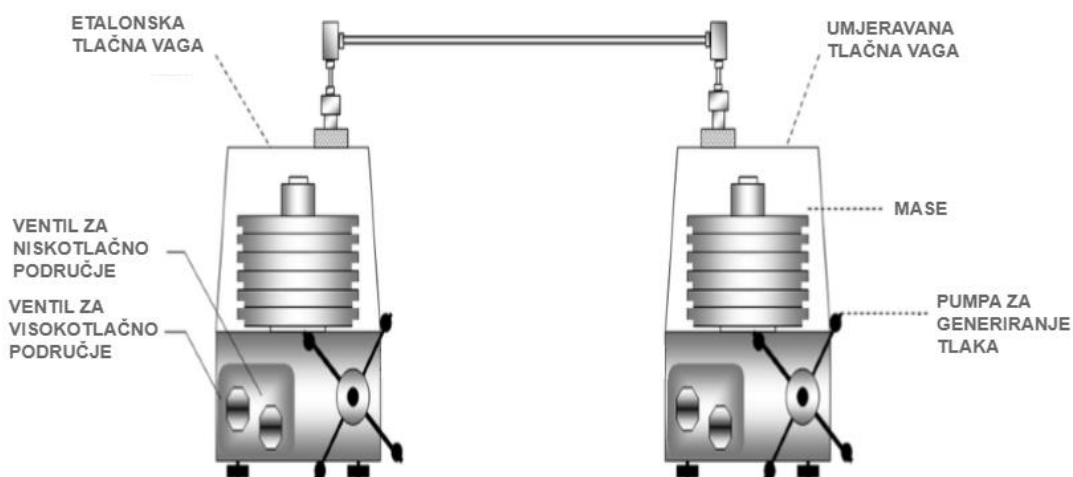
Volumen za koji se radi korekcija	$v$	0,0	$m^3$
Gustoća ulja (bijelo ulje)	$\rho_f$	855,0	$kg/m^3$
Površinska napetost ulja	$c$	0,03	N/m
Ubrzanje sile teže za LPM	$g$	9,806622	$m/s^2$
Opseg klipa	$\Gamma$	1,00647E-02	m
Koeficijent temp. ekspanzije	$\alpha$	2,2E-05	$^{\circ}C^{-1}$

**Tablica 7. Podaci o utezima umjeravane vage**

Oznaka na utegu	Masa utega [g]	Nominalni tlak $p_n$ [bar]	Gustoća utega [ $kg/m^3$ ]	Nesigurnost masa [mg]
1	8224,97	100	7800,0	131
2	8224,97	100	7800,0	131
3	8224,97	100	7800,0	131
4	8224,97	100	7800,0	131
5	7402,09	90	7800,0	118
6	4112,31	50	7800,0	65
7	1645,2	20	7800,0	25
8	1645,2	20	7800,0	25
9	822,11	10	7800,0	13,1
10	411,06	5	7800,0	6,5
11	255,36	2,5	7800,0	3,9

### 4.3. Postupak mjerenja

Ukoliko je pri umjeravanju tlačne vage etalon također tlačna vaga, radi se o „cross-floating“ metodi [Slika 10], [Slika 11]. Pojednostavljena shema navedene metode prikazana je na sljedećoj slici [Slika 10]:



**Slika 10. Shema "cross - floating metode"**

Sljedeća slika prikazuje sklop etalonske i umjeravane vage u Laboratoriju za procesna mjerenja [Slika 11]:



**Slika 11. Sklop ispitivane i etalonske vage**

Na etalonsku i umjeravanu vagu stavljaju se utezi poznatih težina ekvivalentni nominalnim tlakovima za svaku mjernu točku. Dodavanjem dodatnih utega na ispitivanu vagu postiže se ravnoteža. Osnovni uteg etalonske vage iznosi 30 bar, a ispitivane vage 10 bar. Stanje ravnoteže identificira se tehnikom propadanja. Ravnoteža je postignuta u slučaju kad sklopovi obje vage miruju ili istovremeno malo propadaju u svom prirodnom omjeru. Pomicanje ili mirovanje utega prati se preko ravnala koji su postavljeni uz sklop. Ovu metodu nije moguće automatizirati te je potrebno vrijeme i preciznost. U slučaju da sklop jedne vage propada, a druge se diže u zrak ili miruje, ravnoteža nije uspostavljena. Tokom procesa mjerenja nužna je rotacija utega obje vage kako bi se otklonio utjecaj sile trenja. Rotacija uvijek treba biti u istom

smjeru tijekom cijelog mjerenja. Umjeravanje tlačne vage provodi se kroz šest točaka na tlakovima: 60, 130, 230, 330, 430 te 530 bar. Za svaku točku mjeri se mjerna osjetljivost ispitivane vage te očitavaju temperatura i relativna vlažnost prostorije kao i temperatura sklopova obje vage.

Umjeravanje se sastoji od tri ciklusa (uzlazno, silazno, uzlazno) po šest radnih točaka [Tablica 8], [Tablica 9], [Tablica 10].

**Tablica 8. Prvi ciklus mjerenja**

No.	$P_e$ [bar]	$P_{ok}$ [bar]	$t_{ok}$ [°C]	$t_{klip}$ [°C]	Dodatak [g]	Utezi br.:	Osjetljivost [mg]	Vaga
1	60	988	24	23,9	23,8	15,16,17	400	E
				23,7	2,9	6		T
2	130	988	23,86	23,8	23,8	1	400	E
				23,5	6,5	1,7		T
3	230	988	23,59	23,5	23,8	1,2	500	E
				23,4	9,5	1,2,7		T
4	330	988	23,46	23,6	23,8	1,2,3	400	E
				23,3	16	1,2,3,7		T
5	430	988	23,36	23,4	23,8	1,2,3,4	500	E
				23,2	19,5	1,2,3,4,7		T
6	530	988	23,29	23,3	23,8	1,2,3,4,5	500	E
				23,0	21,5	1,2,3,4,5,7,9		T

**Tablica 9. Drugi ciklus mjerenja**

No.	$P_e$ [bar]	$P_{ok}$ [bar]	$t_{ok}$ [°C]	$t_{klip}$ [°C]	Dodatak [g]	Utezi br.:	Osjetljivost [mg]	Vaga
1	530	988	23,23	23,1	23,8	1,2,3,4,5	400	E
				22,9	21,5	1,2,3,4,5,7,9		T
2	430	988	23,16	23,1	23,8	1,2,3,4	400	E
				22,8	19,6	1,2,3,4,7		T
3	330	988	23,41	23,0	23,8	1,2,3	500	E
				23,0	13,5	1,2,3,7		T
4	230	988	23,54	23,0	23,8	1,2	400	E
				23,0	10,5	1,2,7		T
5	130	988	23,55	23,0	23,8	1	500	E
				23,0	7	1,7		T
6	60	988	23,41	22,9	23,8	15,16,17	500	E
				22,8	3	6		T



**Tablica 10. Treći ciklus mjerenja**

No.	$p_e$ [bar]	$p_{ok}$ [bar]	$t_{ok}$ [°C]	$t_{klip}$ [°C]	Dodatak [g]	Utezi br.:	Osjetljivost [mg]	Vaga
1	60	988	23,10	22,7	23,8	15,16,17	400	E
				22,5	3	6		T
2	130	988	23,47	22,9	23,8	1	400	E
				22,7	5,5	1,7		T
3	230	988	23,68	23,0	23,8	1,2	500	E
				22,8	9,5	1,2,7		T
4	330	988	23,71	23,0	23,8	1,2,3	400	E
				22,8	15	1,2,3,7		T
5	430	988	23,70	23,0	23,8	1,2,3,4	500	E
				22,8	28,5	1,2,3,4,7		T
6	530	988	23,75	23,1	23,8	1,2,3,4,5	500	E
				22,8	21,5	1,2,3,4,5,7,9		T

Oznaka E označava etalonsku vagu, a T testiranu vagu. Vlažnost zraka u laboratoriju iznosi 28 %. Podaci dobiveni mjerenjem u laboratoriju koriste se za proračun i krajnji izračun efektivne površine umjeravane tlačne vage.

Proračun se sastoji od dva dijela:

1. Izračun efektivnog tlaka etalonske vage pomoću formule (15):

$$p_e = \frac{\left[ \sum_i \left[ m_i \cdot \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}} \right) \right] + (hA_0 - v) \cdot (\rho_f - \rho_a) \right] \cdot g + \Gamma \cdot c}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_e) \cdot [1 + (\alpha_c + \alpha_k) \cdot (t - 20)]} \quad (15)$$

Račun se provodi za svaku mjernu točku. Svi podaci u ovoj jednadžbi odnose se na etalonsku tlačnu vagu [Tablica 4], [Tablica 5]. S rezultatima se ulazi u sljedeći korak proračuna.

2. Izračun efektivne površine ispitivane tlačne vage

Poznat efektivni tlak etalonske vage biti će jednak tlaku ispitivane vage. Efektivna površina za svaku radnu točku računa se prema izrazu (16):

$$A_e = \frac{\left\{ \sum_i \left[ m_i \cdot \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}} \right) \right] + (hA_0 - v) \cdot (\rho_f - \rho_a) \right\} \cdot g + \Gamma \cdot c}{p_e \cdot [1 + (\alpha_c + \alpha_k) \cdot (t - 20)]} \quad (16)$$

Svi podaci u navedenoj jednadžbi odnose se na ispitivanu tlačnu vagu [Tablica 6], [Tablica 7]. Dobiveni rezultati unose se u graf ovisnosti efektivne površine o efektivnom tlaku. Postoje tri slučaja:

1. efektivna površina neovisna je o tlaku
2. efektivna površina linearna je funkcija tlaka prema jednadžbi (17):

$$A_e = A_0 \cdot (1 + \lambda p_e) \quad (17)$$

U ovom slučaju kroz graf se provlači pravac korištenjem metode najmanjih kvadrata odstupanja. Odstupanja od pravca mogu se usporediti sa standardnim odstupanjima efektivne površine  $A_0$  pri svakom nominalnom referentnom tlaku.

3. efektivna površina nelinearno je zavisna o tlaku

Ovakva ovisnost aproksimira se polinomom drugog stupnja (18):

$$A_e = A_0 \cdot (1 + \lambda p_e + \lambda' \cdot p_e^2) \quad (18)$$

## 5. REZULTATI

Korištenjem jednadžbe za izračun efektivnog tlaka etalonske tlačne vage (15) dobiveni su rezultati [Tablica 11].

**Tablica 11. Rezultati proračuna efektivnog tlaka**

Nominalni tlak [bar]	Temperatura okoline [°C]	Temperatura klipa [°C]	Gustoća utega [kg/m <sup>3</sup> ]	Gustoća zraka [kg/m <sup>3</sup> ]	Opseg klipa [m]	Ukupna masa utega [kg]	Efektivni tlak [bar]
60	24	23,9	7900	1,2	0,007115828	2,4672679	60,0183
130	23,86	23,8	7900	1,2	0,007115828	5,3457367	130,0307
230	23,59	23,5	7900	1,2	0,007115828	9,4578422	230,0516
330	23,46	23,6	7900	1,2	0,007115828	13,56973	330,0621
430	23,36	23,4	7900	1,2	0,007115828	17,681888	430,0829
530	23,29	23,3	7900	1,2	0,007115828	21,793871	530,0993
530	23,23	23,1	7900	1,2	0,007115828	21,793871	530,1010
430	23,16	23,1	7900	1,2	0,007115828	17,681888	430,0851
330	23,41	23	7900	1,2	0,007115828	13,56973	330,0654
230	23,54	23	7900	1,2	0,007115828	9,4578422	230,0515
130	23,55	23	7900	1,2	0,007115828	5,3457367	130,0324
60	23,41	22,9	7900	1,2	0,007115828	2,4672679	60,0193
60	23,1	22,7	7900	1,2	0,007115828	2,4672679	60,0195
130	23,47	22,9	7900	1,2	0,007115828	5,3457367	130,0326
230	23,68	23	7900	1,2	0,007115828	9,4578422	230,0515
330	23,71	23	7900	1,2	0,007115828	13,56973	330,0654
430	23,7	23	7900	1,2	0,007115828	17,681888	430,0858
530	23,75	23,1	7900	1,2	0,007115828	21,793871	530,1010

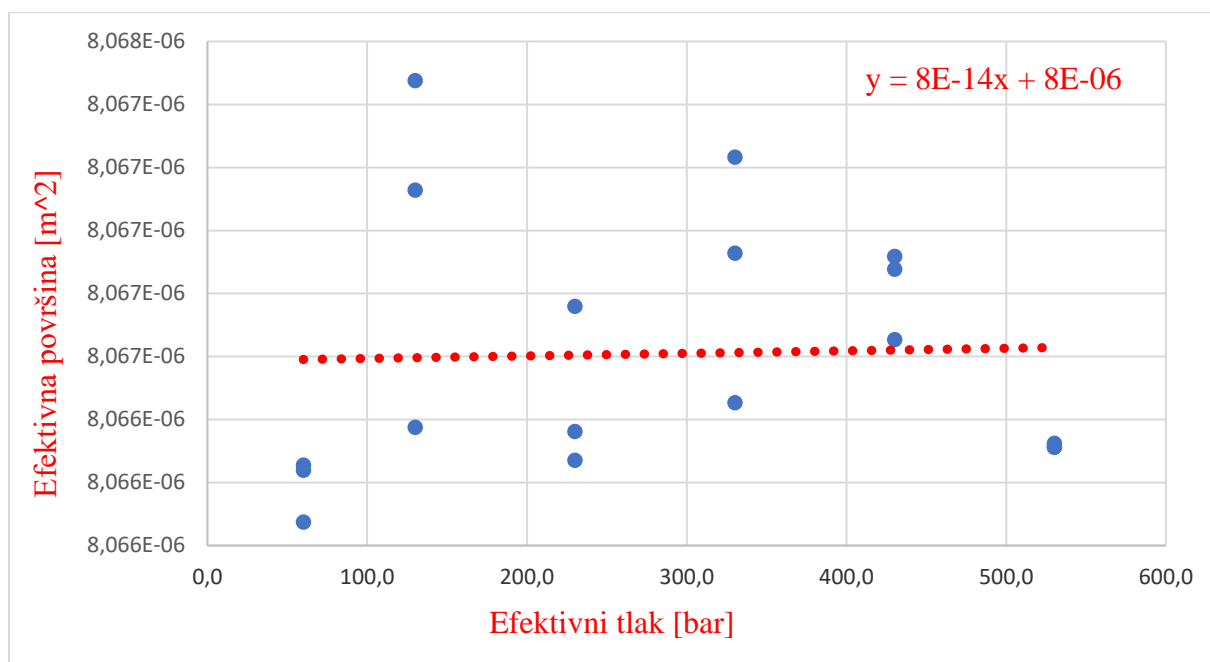
Uvrštavanjem dobivenih efektivnih tlakova u jednadžbu za izračun efektivne površine ispitivane vage (16) dobiveni su sljedeći rezultati [Tablica 12]:

**Tablica 12. Rezultati proračuna efektivne površine**

Nominalni tlak [bar]	Temperatura okoline [°C]	Temperatura klipa [°C]	Gustoća utega [kg/m <sup>3</sup> ]	Gustoća zraka [kg/m <sup>3</sup> ]	Ukupna masa utega [kg]	Efektivni tlak [bar]	Efektivna površina [m <sup>2</sup> ]
60	24	23,9	7800	1,2	4,11231188	60,0183	8,066074E-06
130	23,86	23,8	7800	1,2	9,87017614	130,0307	8,067129 E-06
230	23,59	23,5	7800	1,2	18,0951486	230,0516	8,066271 E-06
330	23,46	23,6	7800	1,2	26,320121	330,0621	8,067233 E-06
430	23,36	23,4	7800	1,2	34,5450934	430,0829	8,066878 E-06
530	23,29	23,3	7800	1,2	42,7692976	530,0993	8,066325 E-06
530	23,23	23,1	7800	1,2	42,7692976	530,1010	8,066313 E-06
430	23,16	23,1	7800	1,2	34,5450934	430,0851	8,066918 E-06
330	23,41	23	7800	1,2	26,320121	330,0654	8,066454 E-06
230	23,54	23	7800	1,2	18,0951486	230,0515	8,066760 E-06
130	23,55	23	7800	1,2	9,87017614	130,0324	8,067476 E-06
60	23,41	22,9	7800	1,2	4,11231188	60,0193	8,066239 E-06
60	23,1	22,7	7800	1,2	4,11231188	60,0195	8,066256 E-06
130	23,47	22,9	7800	1,2	9,87017614	130,0326	8,066375 E-06
230	23,68	23	7800	1,2	18,0951486	230,0515	8,066363 E-06
330	23,71	23	7800	1,2	26,320121	330,0654	8,066928 E-06
430	23,7	23	7800	1,2	34,5450934	430,0858	8,066654 E-06
530	23,75	23,1	7800	1,2	42,7692976	530,1010	8,066313 E-06

Pri uspostavljanju ravnoteže i umjeravanju na najvišem tlaku od 530 bar dolazilo je do značajnog propadanja oba klipa zbog propuštanja sustava. Iz navedenog razloga u je prvoj tablici vidljivo da su dodane mase za najviši tlak identične [Tablica 11]. Ravnoteža je vrlo teško uspostavljena u prvom ciklusu te su podaci samo prepisani za drugi i treći ciklus. Razlike u efektivnim tlakovima za cikluse pojavljuju se zbog razlike u temperaturama prostorije i sklopa klip/cilindar. Unatoč navedenom, dobiveni su bliski rezultati efektivnog i nominalnog tlaka što samo pokazuje preciznost ove metode.

Izračunate efektivne površine unesene su u graf u ovisnosti o efektivnom tlaku za svaku mjerenu točku [Slika 12]. Metodom najmanjih kvadrata odstupanja povučen je pravac koji na sjecištu s osi ordinat, pri tlaku od 0 bar, daje krajnju vrijednost efektivne površine.

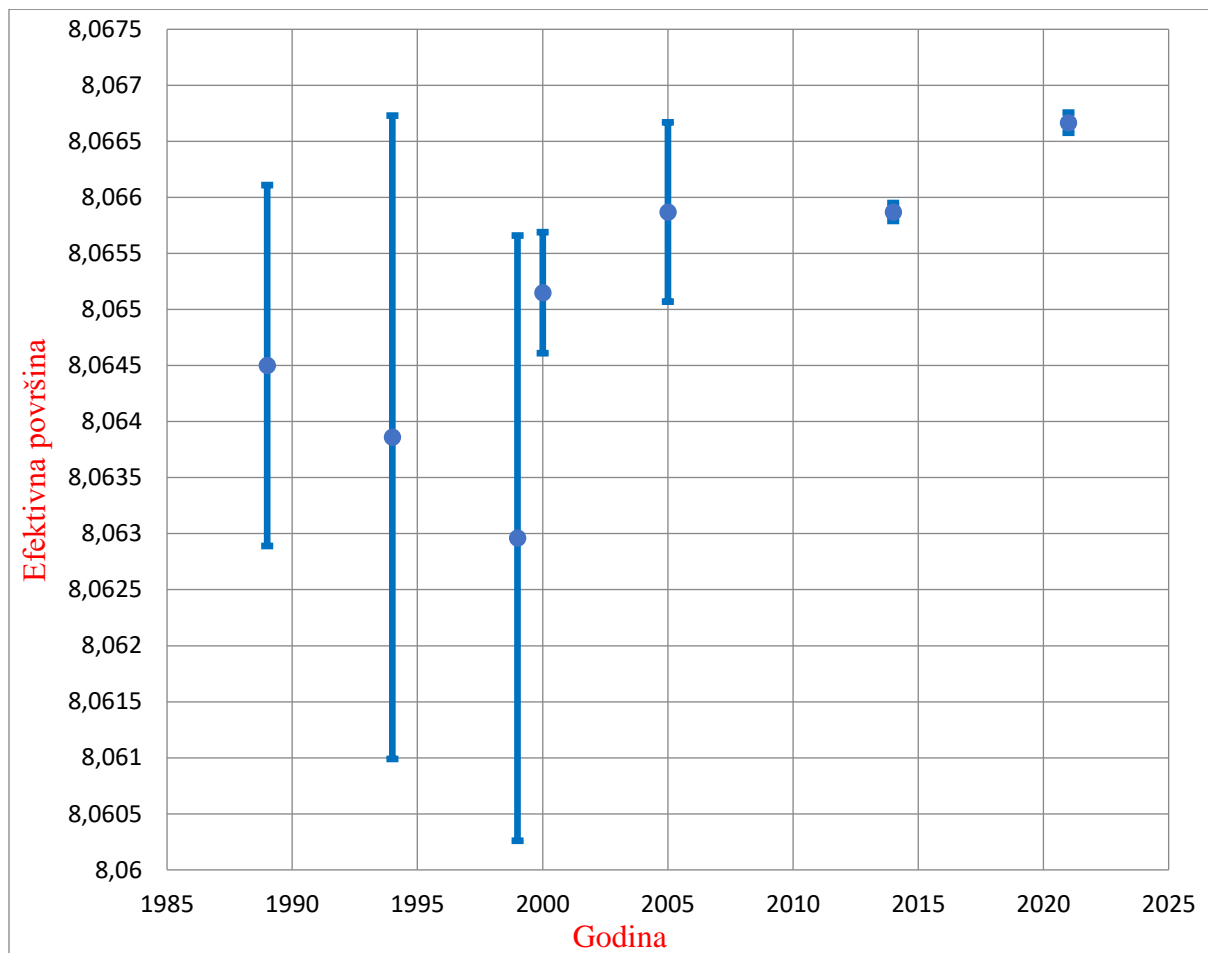


**Slika 12. Graf ovisnosti efektivne površine o efektivnom tlaku s pravcem povučenim koristeći metodu najmanjih kvadrata**

Iz jednadžbe pravca vidljive na grafu otkrivena je linearna veza između efektivne površine i efektivnog tlaka prema jednadžbi (17), [Slika 12]:

$$A_e = A_0 \cdot (1 + \lambda p_e) \quad (17)$$

Dobivena efektivna površina iznosi 0,0000080666658 m<sup>2</sup>. Sve tlačne vage prolaze kroz periodička umjeravanja u svrhu boljeg rada instrumenta. Ovo mjerenje redovito se provodi otprilike svakih 5 godina [Slika 13]. Očekivana efektivna površina je oko 50 ppm veća od rezultata dobivenih 2005 i 2014. Rezultat umjeravanja nije potpun bez procijenjene mjerne nesigurnosti. Mjerna nesigurnost odabrana je iskustveno te iznosi 90 ppm. Sljedeća slika pokazuje rezultate mjerenja efektivne površine kroz godine s pripadajućim mjernim nesigurnostima [Slika 13].



**Slika 13.** Rezultati mjerenja efektivne površine kroz godine s pripadajućim mjernim nesigurnostima

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan način određivanja efektivne površine uljne tlačne vage kao i postupak umjeravanja. Uz teorijski pregled vrsta tlačnih vaga i metoda umjeravanja, opisan je i proračun potreban za računanje efektivnih tlakova. Poseban naglasak stavljen je na „cross – floating“ metodu koja je opisana u teorijskom dijelu rada i korištena za proračunski dio. Eksperimentalni dio obavljen je u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Umjeravanje uljne tlačne vage odrađeno je uz pomoć stručnog osoblja laboratorija u tri radna ciklusa koristeći metodu propadanja. Mjerenje je obavljeno poštujući mjeriteljske propise i norme dane od strane Eurameta. Svrha umjeravanja bilo je odrediti efektivnu površinu umjeravane vage uz poznatu površinu i ostale parametre etalonske vage. Koristeći rezultate mjerenja, koji su prikazani u petom poglavlju, dobivena je funkcijska veza između efektivnog tlaka i efektivne površine. Metodom najmanjih kvadrata odstupanja povučen je pravac iz kojeg je dobivena krajnja efektivna površina ispitivane tlačne vage. Usporedbom s očekivanim rezultatima, u odnosu na prošlogodišnja mjerenja, dobiven je zadovoljavajući rezultat. Ovu metodu nije moguće potpuno automatizirati zbog čega je potrebna vještina, strpljenje i vrijeme. Računala se koriste samo za analizu rezultata nakon provedenih mjerenja u laboratoriju.

## LITERATURA

- [1] B. Runje: *Predavanja iz kolegija Mjeriteljstvo*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [2] Struna, <http://struna.ihj.hr/naziv/umjeravanje/20443/>, stranica posjećena 26.12.2020.
- [3] Metrologija ukratko, 2. izdanje, [https://dzm.gov.hr/UserDocsImages/Zakonsko%20mjeriteljstvo/Publikacije/Metrologija\\_ukratko.pdf](https://dzm.gov.hr/UserDocsImages/Zakonsko%20mjeriteljstvo/Publikacije/Metrologija_ukratko.pdf), stranica posjećena 26.12.2020.
- [4] Euramet, <https://www.euramet.org/about-euramet/>, stranica posjećena 26.12.2020.
- [5] Lovorka Grgec Bermanec, *Mjerne nesigurnosti rezultata umjeravanja etalona tlaka*, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2002.
- [6] D. Zvizdić, L. Grgec Bermanec: *Predavanja iz kolegija Mjerenja u energetici*, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [7] Z. Virag, M. Šavar: *Mehanika fluida I*, predavanja, FSB
- [8] A. Galović: *Termodinamika I*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2018.
- [9] JCGM 100:2008, *Vrednovanje mjernih podataka – Upute za iskazivanje mjerne nesigurnosti*, Državni zavod za mjeriteljstvo, Zagreb, 2009.
- [10] *Međunarodni rječnik osnovnih i općih naziva u metrologiji*, Državni zavod za mjeriteljstvo, Zagreb, 2008.
- [11] OIML, *Pressure Balances*, International Recommendation, Organisation Internationale de Métrologie Légale, 1994.
- [12] *Calibration of pressure balances*, Euramet – cg 3, Version 1, 2011, Germany
- [13] JCGM 200:2012, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, 3rd edition
- [14] Measurement uncertainty, [https://en.wikipedia.org/wiki/Measurement\\_uncertainty](https://en.wikipedia.org/wiki/Measurement_uncertainty), stranica posjećena 26.12.2020.