

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ivan Stanković
DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2014.

ODREĐIVANJE TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI MATERIJALA
METODOM VRUĆEG DISKA

Sadržaj:

POPIS OZNAKA I NJIHOVIH MJERNIH JEDINICA	7
Popis slika:	8
Popis tablica:	16
Sažetak	17
Summary	18
Zahvala	19
1. Uvod	20
2. Opis znanstvenih pojmova, veličina i zakona vezanih uz znanost o toplini	21
2.1. Termodinamika	21
2.1.1. Povijesni pregled termodinamike	21
2.1.2. Opća definicija termodinamike	23
2.2. Toplina	25
2.3. Toplinski sustav	25
2.4. Toplinsko stanje	25
2.5. Temperatura	26
2.6. Toplinski kapacitet	27
2.7. Specifični toplinski kapacitet	27
2.8. Toplinski tok	28
2.9. Gustoća toplinskog toka	28
2.10. Otpor prolasku topline	29
2.11. Toplinska difuzivnost	29
2.12. Efuzivnost	30
3. Principi prijenosa topline	31
3.1. Prijenos topline	31
3.2. Načini prijenosa topline	32

3.2.1. Prijenos topline vođenjem (kondukcija)	33
3.2.2. Prijenos topline strujanjem (konvekcija)	33
3.2.3. Prijenos topline zračenjem (radijacija)	33
3.3. Toplinska provodljivost	34
3.3.1. Općenito o toplinskoj provodljivosti	34
3.3.2. Koeficijent toplinske provodljivosti	35
4. Metoda vrućeg diska	38
4.1. Ispitivanje toplinskih svojstava materijala prema normama	39
4.1.1. HRN EN 1946-2	39
4.1.2. HRN EN 1946-4	40
4.2. „Mathis TCi“ uređaj	41
4.2.1. Upute za rad na uređaju	42
4.2.2. Korištenje računalnog programa „Mathis TCi“ uređaja	48
4.2.3. Princip rada uređaja	55
4.2.4. Faktori koji utječu na ispitivanje toplinske provodljivosti	59
4.2.4.1. Temperatura	59
4.2.4.2. Vlaga	59
4.2.4.3. Gustoća	59
4.2.4.4. Kontaktno sredstvo	60
4.2.5. Utjecaj metode na različite grupe materijala	60
4.2.5.1. Tekućine	61
4.2.5.2. Prahovi	65
4.2.5.3. Pjene i gelovi	68
4.2.5.4. Keramike	73
4.2.5.5. Metali	75

4.2.5.6. Kompoziti	77
5. Ispitivanje toplinske provodljivosti materijala metodom vrućeg diska pomoću „Mathis TCi“ uređaja	81
5.1. Analiza rezultata dobivenih ispitivanjem	86
5.1.1. Sivi lijev „13“ (glycol) – glatka strana	86
5.1.2. Sivi lijev „13“ (glycol) – hrapava strana	89
5.1.3. Sivi lijev „1A“ (glycol) – glatka strana	92
5.1.4. Sivi lijev „1A“ (glycol) – hrapava strana	95
5.1.5. Sivi lijev „9D“ (glycol) – glatka strana	98
5.1.6. Sivi lijev „9D“ (glycol) – hrapava strana	101
5.1.7. Sivi lijev „13“ (voda) – glatka strana	104
5.1.8. Sivi lijev „13“ (voda) – hrapava strana	107
5.1.9. Sivi lijev „1A“ (voda) – glatka strana	110
5.1.10. Sivi lijev „1A“ (voda) – hrapava strana	113
5.1.11. Sivi lijev „9D“ (voda) – glatka strana	116
5.1.12. Sivi lijev „9D“ (voda) – hrapava strana	119
5.1.13. Mort/Ovčja vuna „3%-ME 2“ (glycol/suho stanje uzorka)	122
5.1.14. Mort/Ovčja vuna „5%-ME 2“ (glycol/suho stanje uzorka)	125
5.1.15. Mort/Ovčja vuna „10%-ME 2“ (glycol/suho stanje uzorka)	128
5.1.16. Mort/Ovčja vuna „10%-ME 2“ (glycol/vlažno stanje uzorka)	131
5.1.17. Mort/Ovčja vuna „10%-ME 2“ (glycol/vlažno stanje uzorka)	134
5.1.18. Mort/Ovčja vuna „10%-ME 2“ (glycol/vlažno stanje uzorka)	137
5.2. Usporedba rezultata	140
5.2.1. Usporedba rezultata ispitivanja na uzorcima sivog lijeva u odnosu na ispitanu stranu uzorka (glatka/hrapava)	140

5.2.2. Usporedba rezultata ispitivanja na uzorcima sivog lijeva u odnosu na korišteno kontaktno sredstvo (glycol/voda)	144
5.2.3. Usporedba rezultata ispitivanja suhog i vlažnog stanja na uzorcima mort/ovčja vuna	149
5.2.4. Usporedba rezultata ispitivanja dobivenih metodom vrućeg diska i metodom vruće ploče na uzorcima mort/ovčja vuna u suhom stanju	152
6. Zaključak	153
Literatura:	155

POPIS OZNAKA I NJIHOVIH MJERNIH JEDINICA

OZNAKA	JEDINICA	FIZIKALNA VELIČINA
A	[m ²]	ploština
l	[m]	debljina
d	[m]	duljina
m	[kg, g]	masa
O	[L]	obujam
V	[m ³]	volumen
ρ	[kg/m ³]	gustoća
τ	[s]	vrijeme
E	[J, Ws]	energija
t	[°C]	temperatura
T	[K]	termodinamička temperatura
ΔT	[K]	termodinamička promjena temperature
R	[Ω]	električni otpor
U	[V]	električni napon
I	[A]	jakost električne struje
Q	[J]	količina topline
Φ	[W]	toplinski tok
q	[W/m ²]	gustoća toplinskog toka
c_t	[J/K]	toplinski kapacitet
c	[J/kgK]	specifični toplinski kapacitet
λ	[W/mK]	koeficijent toplinske provodljivosti
α	[1/K]	koeficijent linearnog toplinskog izduženja
e	[W ^{1/2} /m ² K]	efuzivnost
r ²	-	koeficijent korelacije regresijskog pravca

Popis slika:

Slika 1. Jouleov pokus

Slika 2. Jednodimenzionalan prikaz provođenja topline

Slika 3. Podjela prema fizikalnim načinima izmjene topline

Slika 4. Načini prijenosa topline

Slika 5. Konduktivni transfer topline kroz ravnu ploču

Slika 6. Vođenje topline kroz ravnu ploču od homogenog materijala

Slika 7. Princip rada metode „vrućeg diska“

Slika 8. Komponente uređaja

Slika 9. Kompletni pribor za ispitivanje

Slika 10. Osnovni dijelovi senzora

Slika 11. Označavanje uzorka

Slika 12. Stavljanje kontaktnog sredstva na senzor

Slika 13. Stavljanje uzorka na senzor

Slika 14. Povezivanje kontrolne jedinice i računala kablovima za napajanje

Slika 15. Povezivanje kontrolne jedinice i senzora sa kablovima za napajanje

Slika 16. Uključivanje kontrolne jedinice

Slika 17. Uključivanje računala

Slika 18. Novi projekt

Slika 19. Grupa materijala

Slika 20. Karakteristike materijala

Slika 21. Vrsta ispitivanja

Slika 22. Odabir projekta

Slika 23. Odabir vrste ispitivanja

Slika 24. Počinje ispitivanje

Slika 25. Prozor programa prilikom ispitivanja

Slika 26. Tijek rada „Mathis TCi“ uređaja

Slika 27. Linearni odnos temperature senzora i otpora senzora

Slika 28. Odnos napona i vremena

Slika 29. Kalibracijske krivulje u obliku pravca prikazane na dijagramu koji je opisan preko odnosa efuzivnosti i $1/m$

Slika 30. Gustoća vode u ovisnosti o temperaturi

Slika 31. Opis ispitivanja toplinske provodljivosti tekućina pomoću vatrostalne posude

- Slika 32.** Opis ispitivanja toplinske provodljivosti tekućina pomoću plastične vrećice
- Slika 33.** Opis ispitivanja toplinske provodljivosti tekućina pomoću metalnog prstena
- Slika 34.** Odmjeravanje tekućine
- Slika 35.** Nalijeganje tekućine
- Slika 36.** Zatvaranje
- Slika 37.** Dodatni dijelovi potrebni za ispitivanje tekućina
- Slika 38.** Smjesa praha u posudi
- Slika 39.** Opis ispitivanja toplinske provodljivosti prahova pomoću metalne razmaknice
- Slika 40.** Opis ispitivanja toplinske provodljivosti prahova pomoću metalnog prstena
- Slika 41.** Uzimanje uzoraka
- Slika 42.** Stavljanje uzorka u posudu s vagom
- Slika 43.** Postavljanje uzorka na senzor
- Slika 44.** Postavljanje poklopca na uzorak
- Slika 45.** Pjenasti oblici raznih granulacija
- Slika 46.** Gel materijal (aerogel)
- Slika 47.** Opis ispitivanja toplinske provodljivosti pjena i gelova direktnim postavljanjem uzorka na senzor
- Slika 48.** Postavljanje uzorka na senzor
- Slika 49.** Opis ispitivanja toplinske provodljivosti pjena i gelova naknadnim učvršćivanjem uzorka pomoću metalnih stezaljki
- Slika 50.** Učvršćivanje uzorka pomoću stezaljki
- Slika 51.** Opis ispitivanja toplinske provodljivosti pjena i gelova pomoću utega
- Slika 52.** Učvršćivanje uzorka pomoću utega
- Slika 53.** Keramika
- Slika 54.** Opis ispitivanja toplinske provodljivosti keramika direktnim načinom postavljanja uzorka na senzor
- Slika 55.** Kontaktno sredstvo i uzorci
- Slika 56.** Postavljanje utega na uzorak
- Slika 57.** Metalni uzorak prikazan s dvije okomite strane
- Slika 58.** Opis ispitivanja toplinske provodljivosti metala direktnim načinom postavljanja uzorka na senzor
- Slika 59.** Kompozitni materijal
- Slika 60.** Opis ispitivanja toplinske provodljivosti kompozita direktnim načinom postavljanja uzorka na senzor

- Slika 61.** Postavljanje metalnog utega na kompozitni uzorak
- Slika 62.** Ispitivanje kompozitnog materijala u sva tri smjera
- Slika 63.** Vrste struktura grafita
- Slika 64.** Pogled na uzorke sivog lijeva
- Slika 65.** Mješavina morta i ovčje vune u svježem stanju
- Slika 66.** Pogled na uzorke mort/ovčja vuna
- Slika 67.** Grafički prikaz efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 68.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 69.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 70.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 71.** Grafički prikaz efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 72.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 73.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 74.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 75.** Grafički prikaz efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 76.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 77.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 78.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 79.** Grafički prikaz efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 80.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja

- Slika 81.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 82.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 83.** Grafički prikaz efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 84.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 85.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 86.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 87.** Grafički prikaz efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 88.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 89.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 90.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 91.** Grafički prikaz efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 92.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 93.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 94.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 95.** Grafički prikaz efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 96.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 97.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom

- Slika 98.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 99.** Grafički prikaz efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 100.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 101.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s vodom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 102.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s vodom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 103.** Grafički prikaz efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 104.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 105.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s vodom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 106.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s vodom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 107.** Grafički prikaz efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 108.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 109.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 110.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 111.** Grafički prikaz efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 112.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 113.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 114.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktnim sredstvom

- Slika 115.** Grafički prikaz efuzivnosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 116.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 117.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 118.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 119.** Grafički prikaz efuzivnosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 120.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 121.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 122.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 123.** Grafički prikaz efuzivnosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 124.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 125.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 126.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 127.** Grafički prikaz efuzivnosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 128.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 129.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 130.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 131.** Grafički prikaz efuzivnosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja

- Slika 132.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 133.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 134.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 135.** Grafički prikaz efuzivnosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 136.** Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja
- Slika 137.** Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 138.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 139.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 140.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „1A“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 141.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 142.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 143.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „1A“ s vodom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 144.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „9D“ s vodom kao kontaktnim sredstvom
- Slika 145.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „13“ ispitano s glatke strane
- Slika 146.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „13“ ispitano s hrapave strane
- Slika 147.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „1A“ ispitano s glatke strane
- Slika 148.** Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „1A“ ispitano s hrapave strane

Slika 149. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „9D“ ispitano s glatke strane

Slika 150. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „9D“ ispitano s hrapave strane

Slika 151. Grafički prikaz usporedbe srednjih vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za uzorke sivog lijeva u odnosu na kontaktno sredstvo i ispitanu stranu

Slika 152. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za suhu i vlažnu stranu uzorka mort/ovčja vuna „3% - ME 2“

Slika 153. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za suhu i vlažnu stranu uzorka mort/ovčja vuna „5% - ME 2“

Slika 154. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za suhu i vlažnu stranu uzorka mort/ovčja vuna „10% - ME 2“

Slika 155. Grafički prikaz usporedbe srednjih vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za suhu i vlažnu stranu uzorka mort/ovčja vuna

Slika 156. Grafički prikaz usporedbe srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti ispitivanja metodom vrućeg diska i metodom vruće ploče na uzorcima mort/ovčja vuna „5% - ME 2“ i „10% - ME 2“ u suhom stanju

Popis tablica:

Tablica 1. Preporučene granične vrijednosti toplinske provodljivosti λ [W/mK] i efuzivnosti e [$W\sqrt{s/m^2K}$] za korištenje pojedinih kalibracijskih krivulja pomoću „Mathis TCi“ uređaja

Tablica 2. Kontaktno sredstvo ovisno o vrsti materijala

Tablica 3. Utjecaj kontaktnog sredstva na veličinu koeficijenta toplinske provodljivosti

Tablica 4. Uzorci sivog lijeva s različitim strukturama grafita ispitani „Mathis TCi“ uređajem

Tablica 5. Karakteristike uzoraka mort/ovčja vuna u svježem stanju

Tablica 6. Uzorci mort/ovčja vuna ispitivani „Mathis TCi“ uređajem

Tablica 7. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „13“ (glycol) – glatka strana uzorka

Tablica 8. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „13“ (glycol) – hrapava strana uzorka

Tablica 9. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „1A“ (glycol) – glatka strana uzorka

Tablica 10. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „1A“ (glycol) – hrapava strana uzorka

Tablica 11. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „9D“ (glycol) – glatka strana uzorka

Tablica 12. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „9D“ (glycol) – hrapava strana uzorka

Tablica 13. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „13“ (voda) – glatka strana uzorka

Tablica 14. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „13“ (voda) – hrapava strana uzorka

Tablica 15. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „1A“ (voda) – glatka strana uzorka

Tablica 16. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „1A“ (voda) – hrapava strana uzorka

Tablica 17. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „9D“ (voda) – glatka strana uzorka

Tablica 18. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „9D“ (voda) – hrapava strana uzorka

Tablica 19. Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME2“ (glycol) – suho stanje

Tablica 20. Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME2“ (glycol) – suho stanje

Tablica 21. Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME2“ (glycol) – suho stanje

Tablica 22. Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME2“ (glycol) – vlažno stanje

Tablica 23. Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME2“ (glycol) – vlažno stanje

Tablica 24. Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME2“ (glycol) – vlažno stanje

Sažetak

Ispitivanje toplinskih svojstava građevnih materijala najčešće se provodi stacionarnim metodama koje su vremenski dugotrajne i zahtijevaju uzorke velikih dimenzija. Cilj ovog rada je utvrđivanje mogućnosti mjerenja toplinskih svojstava i njihov utjecaj na različite grupe građevnih materijala pri ispitivanju dinamičkom *metodom vrućeg diska*, kojom će se pokazati utjecaj same metode ispitivanja na određenu grupu materijala. Metodom vrućeg diska najčešće se ispituje šest najosnovnijih grupa materijala kao što su tekućine, prahovi, pjene i gelovi, keramike, metali i kompoziti. Tako se može zaključiti da se ovom metodom može ispitivati široki spektar materijala. Također će se objasniti princip i slijed ispitivanja nestacionarnom *metodom vrućeg diska* pomoću *Mathis TCi* uređaja, koji se kod prijašnjih ispitivanja pokazao jako dobrim u vidu jednostavne i „jeftine“ mjerne opreme samog uređaja, vremena trajanja ispitivanja koje je relativno kratko, te se ispitivanja mogu izvoditi i izvan laboratorija. Znači, ovom metodom može se služiti u laboratoriju, ali i izvan njega odnosno na terenu što uvelike olakšava rad te se time dobiva na značaju u pogledu korištenja u laboratoriju, ali i u industriji. Na kraju rada će se izmjereni rezultati toplinske provodljivosti usporediti s literaturnim podacima ili drugim dostupnim eksperimentalnim podacima.

Ključne riječi

Koeficijent toplinske provodljivosti

Efuzivnost

Mathis TCi uređaj

Metoda vrućeg diska

Uzorak sivog lijeva

Uzorak mort/ovčja vuna

Summary

Investigation of thermal properties of building materials is usually carried out by stationary methods which are time consuming and require large sample sizes. The aim of this study was to determine the possibilities of measuring the thermal properties and their impact on different groups of building materials during transient testing using *hot disk method*, which will show the impact of the test methods to a specific group of materials. Hot disc method usually examines six basic groups of materials such as liquids, powders, foams and gels, ceramics, metals and composites. Thus it can be concluded that this method can examine a wide range of materials. This study will also explain the principle of the transient hot disk *method test sequence* using *Mathis TCI* device, which in previous research performed very well in terms that it proved to be simple and "less expensive" measuring equipment of the machine itself, the approximate duration of the test, which is relatively short, and tests can be performed outside the laboratory. So, this method can use in the laboratory, but also outside of it or on the ground which greatly facilitates the work and thereby gaining importance in terms of use in the laboratory, but also in industry. At the end of the this work the measurement results will be shown and the thermal conductivity will be compared with the literature data and/or available experimental data from stationary measurement results.

Key words

Thermal conductivity

Effusivity

Mathis TCI device

Method hot disc

Sample mortar/sheep's wool

Sample cast iron

Zahvala

Zahvaljujem se prof. dr. sc. **Ivani Banjad Pečur** dipl. ing. građ. i asistentu dr. sc. **Bojanu Milovanoviću** dipl. ing. građ. na pomoći kod izrade diplomskog rada. Također se zahvaljujem **Zvezdani Matuzić** ing. građ. na pomoći u laboratoriju, te prof. dr. sc. **Zdravku Schaperlu** s Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu na uzorcima za ispitivanje.

1. Uvod

Problem sve većeg cjelokupnog globalnog zatopljenja i zabrinjavajućeg učinka čovjekova djelovanja na okoliš usmjerava se na apele pojedincu, od kojeg se traže promjene životnih navika u vezi s potrošnjom i korištenjem energije. U tome smjeru ide i industrija koja se bavi proizvodnjom građevnih materijala. Pri tome treba imati u vidu da mjerenje toplinskih svojstava ima široku primjenu, i od velike je važnosti za kontrolu kvalitete toplinsko – izolacijskih, ali i drugih građevnih materijala. Ekološki aspekti (klimatske promjene, globalno zatopljenje i efekt staklenika) i ekonomski aspekti (manja cijena grijanja/hlađenja u kontekstu kontinuiranog povećanja cijena energenata) u zgradarstvo se uvode kroz zakonodavstvo. Upravo zbog činjenice da zgradarstvo kao najveći potrošač energije ima veliki energetska i ekološki utjecaj, energetska učinkovitost, održiva gradnja i mogućnost korištenja obnovljivih izvora energije danas postaju prioriteti suvremene gradnje i energetike. Svaki proizvođač toplinsko - izolacijskih materijala, ali i drugih materijala za gradnju, mjeri i iskazuje svojstvo toplinske provodljivosti u obliku "deklarirane toplinske provodljivosti". Toplinska provodljivost λ je fizikalna veličina definirana kao količina topline u jedinici vremena, odnosno toplinski tok Φ koji prolazi nekom tvari kroz plohu njene ploštine. Provođenje topline je prirodni proces kretanja topline ukoliko postoji razlika u temperaturi unutar materijalnog tijela. Toplinska provodljivost, odnosno kondukcija događa se uslijed prirodnog htajenja za homogenom razdiobom srednje brzine molekula, a samim time i temperature u cjelokupnom sustavu tijela. Tako se može reći da je toplinska provodljivost zapravo sposobnost tijela da provodi toplinu u smjeru od više prema nižoj temperaturi, sve dok ne nastupi toplinska ravnoteža, a ona nastupa u onom trenutku kada se temperatura cijelog tijela, materijala ili sustava izjednači.

U ovom radu ispitivana je vrijednost toplinske provodljivosti uzorka mješavine morta i ovčje vune, koja je bitna iz razloga kako bi se odredila toplinsko - izolacijska svojstva istog materijala. S druge strane, također je ispitivana i vrijednost toplinske provodljivosti sivog lijeva, koja je bitna iz razloga kako bi se mogla odrediti vrijednost brzine prolaza topline kroz materijal jer se isti materijal najčešće koristi u industriji za izgradnju ovojnica spremnika topline i fluida gdje je potrebna velika brzina prolaza topline kroz ovojnica kako ne bi došlo do pregrijavanja spremnika, odnosno kako bi se spremnik brže hladio.

2. Opis znanstvenih pojmova, veličina i zakona vezanih uz znanost o toplini

2.1. Termodinamika

2.1.1. Povijesni pregled termodinamike

Suvremena termodinamika, onakva kakva se danas poznaje, plod je evolucije znanosti odnosno ljudske percepcije prirodnih pojava jer se čovjek sa toplinom susreće od svojih prapočetaka, daleko prije pojave znanosti kao takve, štoviše bez topline život na Zemlji ne bi bio moguć. Prema nekim arheološkim istraživanjima potvrđeno je da su ljudski preci prije gotovo milijun godina ovladali tehnikama paljenja vatre, što je prvi doticaj čovjeka sa stranim izvorom topline. Prvi poznati inženjer koji se pozabavio malo detaljnije termodinamikom i njenom praktičnom primjenom bio je Heron Aleksandrijski, starogrčki matematičar, inženjer i mislilac, koji se smatra najvažnijim znanstvenikom Starog vijeka. Uz brojne veoma značajne radove, koji su bili preteča mnogih danas aktualnih i modernih znanosti (matematike: otkrića imaginarnih brojeva, Heronove formule za trokut; fizike: opis loma svjetlosti, konstrukcije pumpi, vjetrenjača za pokretanje mlinova, prvi aparat na kovanice – zato se smatra ocem kibernetike). Heron je prvi opisao pojavu generiranja vodene pare, uslijed predaje topline vodi u posudi, koja posjeduje određenu količinu energije, pretvorive u mehanički rad, te kao takva može biti veoma korisna [1].

Ovaj Heronov zaključak, popraćen eksperimentom u stvari je prvi poznati parni stroj, dakle gotovo 1700 godina prije nego je isti ponovo otkrio 1712. godine engleski znanstvenik Thomas Newcomen, a usavršio u poznatu formu 1764. godine James Watt. Temelj termodinamike kao znanstvene discipline dao je francuski vojni inženjer Nicolas Leonard Sadi Carnot koji je 1824. godine objavio veoma važno djelo pod naslovom: „Osvrt na pokretačku -silu- topline i na strojeve koji tu -silu- mogu iskoristiti“ [2] u kojem je teorijski razrađen prvi kružni proces, poznat pod nazivom Carnotov desnokretni kružni proces, iako ne toliko značajan za praktičnu uporabu, Carnotov proces je od krucijalnog značaja za termodinamiku kao takvu, zbog toga što je postao svojevrsni etalon za sve druge kružne procese, ali i zbog toga što se u svom radu Carnot dotiče činjenice da pri pretvorbi topline u mehanički rad, nije moguće svu željenu toplinu pretvoriti u mehanički rad, već će se jedan dio iste uvijek „trošiti“ na zagrijavanje hladnijeg tijela [3]. Tom konstatacijom Carnot je dao temelje drugog glavnog stavka termodinamike, za čije su otkriće i matematičku formulaciju

uz njega zaslužni i škotski inženjer, matematičar i fizičar Lord Kelvin te ponajviše njemački fizičar i matematičar Rudolf Julius Clausius koji slovi za najvećeg znanstvenika svog doba (1822. – 1888.) te je svrsishodno spomenuti i njegov rad na području kinetičke teorije plinova te valja kazati kako je on prvi uveo pojam entropije, dotada nepoznate fizikalne veličine. Zanimljiv je podatak, da su Clausius i Lord Kelvin do spoznaje o drugom glavnom stavku termodinamike došli gotovo istovremeno, svaki za sebe. Jedan od temeljnih radova termodinamike objavio je 1845. godine Robert Julius von Mayer, a radi se o principu ekvivalentnosti topline i rada, to jest o zakonu očuvanju energije, koji glasi: „Energija može mijenjati oblike, ali ne može nestati niti nastati!“. Ovaj zakon temeljni je aksiom termodinamike, još znan pod nazivom: „Prvi glavni stavak termodinamike“. O ovome je svoju tvrdnju izrekao i Lavoasier, samo u malo drugačijem obliku: „Količina materije u izoliranom sustavu je konstantna“. Iako je Mayer prvi zapazio svojstvo neuništivosti i nestvorljivosti energije, odnosno: „Prvi glavni stavak termodinamike“, prve eksperimentalne potvrde dao je između 1843. i 1848. godine James Prescott Joule koji je izmjerio i kvantizirao količinu rada i topline u svom čuvenom Jouleovom pokusu: „Rad od 427 kpm, povisi temperaturu 1 kg vode za 1 °C, a ta količina topline je 1 kcal“ [1]. Uzimajući u obzir rad Carnota, Mayera, i Joulea 1850. godine Clausius je formulirao prvi i drugi glavni stavak termodinamike u onakav oblik kakav danas poznajemo, te je prvi glavni stavak termodinamike zapisao u kvantitiziranom obliku jednadžbe koja povezuje toplinu, rad i unutarnju energiju. Uz spomenute znanstvenike termodinamičare, svoj su doprinos dali još mnogi drugi, poput švedskog astronoma i fizičara A. Celsiusa koji je 1742. godine osmislio empirijsku temperaturnu skalu, koja je realizirana tako da je točki smrzavanja kemijski čiste vode pri tlaku 760 mmHg, na živinom termometru pridružena vrijednost sto, a točki vrelišta, pri istim uvjetima pridružena je vrijednost nula. Interval između te dvije točke podijeljen je na 100 jednakih dijelova, a svaki takav dio nazvan je stupanj Celzijus (1°C). Ovim otkrićem Celsius je doprinio lakšem kvantitiziranju temperature, te je omogućio lakše „rukovanje“ iznosom temperature [4]. Iako je koju godinu kasnije švedski botaničar Carl von Linne prilagodio ovu novonastalu skalu u danas poznatu formu: nula stupnjeva Celsiusovih je temperatura ledišta kemijski čiste vode pri tlaku od 760 mmHg, a sto stupnjeva Celsiusovih je temperatura vrelišta pri istim uvjetima, ona je zadržala Celsiusovo ime i danas je najupotrebljivija i najraširenija temperaturna skala na svijetu. Značajan doprinos razvoju termodinamike i fizikalne kemije koja prati izmjene topline rezultirane kemijskim reakcijama dao je američki znanstvenik Josiah W. Gibbs (Gibbsova energija) krajem 19. stoljeća. Svakako je važno spomenuti i Gay Lussaca, Boylea i Mariottea koji su zaslužni za

deterministički način određivanja termičke jednadžbe stanja idealnog plina [4]. Značajan doprinos dali su i znanstvenici te inženjeri koji su radili na kružnim procesima, poput Otta, Diesela, Ericssona, Joule, Carnot, Breytona i drugih.

Krajem 19. i početkom 20. stoljeća razvoj i napredak termodinamike biva sve progresivniji, razvijaju se teorije o zračenju crnog tijela, te zračenju kao mehanizmu prijenosa topline, a svoj obol tome su dali ponajviše Max Planck, Ludwig Boltzmann, Jožef Stefan.

S pojavom Alberta Einsteina, Edwarda Guggenheima, i drugih termodinamika je još više povećala svoj obujam te je nastala tzv. statistička termodinamika.

2.1.2. Opća definicija termodinamike

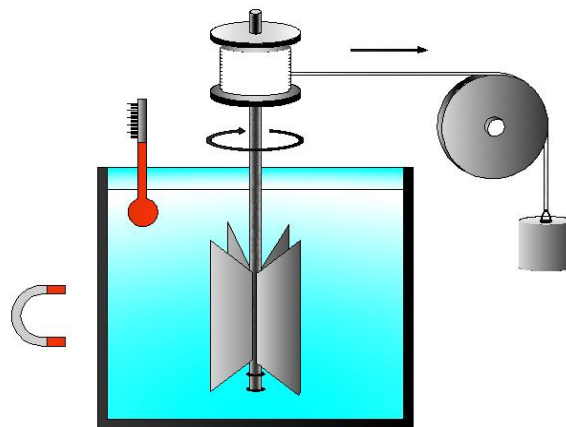
Termodinamika je naziv znanstvene discipline čiji su glavni objekti proučavanja stanja tvari. To je grana fizike, odnosno bolje rečeno jedan od temelja fizike, kemije te relativno nove znanstvene discipline pod nazivom fizikalna kemija. Doslovan prijevod riječi termodinamika znači gibanje topline ($\vartheta\epsilon\rho\mu\omicron\zeta$ /thermos/ = topao; $\delta\nu\nu\alpha\mu\iota\zeta$ /dinamis/ = gibanje), a da je moguće doći do bilo kakvih spoznaja o gibanju, odnosno prijenosu ili izmjeni topline, potrebno je poznavati toplinsko stanje same tvari. Termodinamika kao tehnička znanost nije ograničena „samo“ na stanja tvari, već obuhvaća sve objekte, pojave i zakone te uređaje koji su u svojoj naravi vezani za toplinu, odnosno kinetičku energiju molekula. Tako se u tehničkoj termodinamici pojavljuju pojmovi poput termometar, hladnjak, plinska turbina, motor s unutarnjim sagorijevanjem, kondenzator pare, ...što predstavlja veoma širok dijapazon objekata proučavanja.

Energija se nalazi svuda oko nas. Iako je u različitim oblicima ona je -sve- i -uvijek- prisutna, a jedno od njenih najznačajnijih svojstava je da ne može biti uništena, a niti stvorena ni od kuda. Zbog toga se može reći da je energija sustava konzervativno svojstvo. Ona se ne stvara i ne nestaje, već mijenja svoj oblik prelazeći iz jednog u drugi. Koji god oblik energija poprimila i kroz kakvu god transformaciju prošla, njen je apsolutni iznos jednak i konstantan. Ukoliko se jedan od oblika energije poveća, drugi se mora smanjiti i to za iznos za koji se prvi

oblik povećao. Da je tako, svjedoči zakon o održanju energije, još poznat i kao prvi glavni stavak termodinamike. Prvi glavni stavak termodinamike formuliran u obliku jednadžbe:

$$Q_{1,2} = W_{1,2} + (E_{P2} - E_{P1}) + (E_{K2} - E_{K1}) + (U_2 - U_1) + (\Sigma \Delta E_i) \quad (1)$$

Ovaj stavak jasno pokazuje da je toplina $Q_{1,2}$ koju je sustav primio od okoliša ili nekog drugog sustava (koji se naziva ogrjevni toplinski spremnik) jednak sumi svih drugih oblika energije: mehaničkog rada $W_{1,2}$, razlici potencijalne energije $E_{P2}-E_{P1}$, razlici kinetičke energije $E_{K2}-E_{K1}$, razlici unutarnje energije U_2-U_1 , te sumi razlika svih ostalih postojećih oblika energije (kemijske, električne, itd.). Eksperimentalna potvrda prvog glavnog stavka termodinamike dana je Jouleovim pokusom. Ideja koju je James Prescott Joule želio sprovesti u djelo u drugoj polovici 19. stoljeća bila je dokazati postojanje prijenosa energije iz jednog u drugi oblik uz očuvanje njenog iznosa odnosno količine (**slika 1.**).



Slika 1. Jouleov pokus [8]

Jouleov pokus načelno je proveden na sljedeći način: potencijalna energija utega, spuštanjem utega preko koloture koja je pričvršćena na osovinu s lopaticama uronjenim u vodu poznate temperature, pretvara se u kinetičku energiju. Okretanjem koloture okreću se lopatice koje miješaju vodu, te na taj način joj predaju izvjesnu količinu kinetičke energije. Voda na primljenu energije reagira zagrijavanjem što se očituje povišenjem termodinamičke temperature. Iz čega je jasno vidljivo kako je energija prešla kroz više transformacija, te time poprimila različite oblike (potencijalna, kinetička, toplinska) ali nije nestala!

2.2. *Toplina*

Nakon gornjih objašnjenja jasno je da je toplina jedan od oblika energije, no za detaljnije objašnjenje o samoj toplini i pojavama vezanih uz toplinu, potrebno je promatrati sastavne čestice kristalnih rešetki - molekule. Prirodu topline i sve njezine popratne pojave objašnjava kinetičko - molekularna teorija. Kinetičko - molekularna teorija počiva na dokazanoj tvrdnji o neprekidnom, stohastičkom i konfuznom gibanju molekula. Neovisno radi li se o fluidu (plinu ili kapljevinu) ili pak krutini, na mikroskopskoj razini sve se molekule gibaju. Gibanje molekula rezultat je kinetičke energije koju molekule posjeduju. Kinetička energija kojom se molekule gibaju, odnosno njena količina direktno je u vezi s toplinom koju molekule posjeduju. Što je veća količina energije, odnosno topline koju je neka molekula primila, to je veća i kinetička energija, a samim time i prosječna brzina molekula, i obrnuto, te što je količina topline koju neka molekula primi manja, manja je i njena kinetička energija.

2.3. *Toplinski sustav*

Sustavom se smatra dio prostora koji se izuzme od ostatka, i podvrgne proučavanju. Sustav je omeđen *granicom sustava*. U sustavu mogu biti obuhvaćene nebrojene količine tijela, svih agregatnih i toplinskih stanja. Granicu sustava određujemo proizvoljno, odnosno po potrebi.

2.4. *Toplinsko stanje*

Toplinsko stanje tijela obuhvaća sve veličine stanja koja određeno tijelo posjeduje. Svako tijelo posjeduje određene fizikalne veličine poput obujma, tlaka, temperature, entropije, entalpije, unutarnje energije, i drugih. Te veličine su mjerljive, bilo posredno ili neposredno, te imaju svoj iznos (brojčanu vrijednost), a brojčanoj vrijednosti pridružena je odgovarajuća mjerna jedinica SI sustava. Veličine stanja dijele se u dvije skupine, ovisno o tome utječe li veličina samog promatranog tijela na njih ili pak ne utječe. Veličine stanja koje su nezavisne od veličine, mase ili količine promatranog tijela nazivaju se intenzivnim veličinama stanja i tu spadaju sastav, tlak i temperatura. Nasuprot njih su ekstenzivne veličine stanja, a one ovise o veličini promatranog tijela i tu spadaju volumen, unutarnja energija, entalpija, entropija [6].

Ukoliko se neka ekstenzivna veličina stanja svede na jedinicu mase ili količine dobiva se intenzivna veličina (jer tada ona vrijedi za 1 kg ili 1 kmol dotične tvari) kao što su npr. specifična/molna unutarnja energija, specifična/molna entalpija, itd. [7].

2.5. Temperatura

Prema opće prihvaćenom objašnjenju temperatura je stupanj zagrijanosti nekog tijela. Temperatura je u uskoj vezi s prosječnom brzinom molekula. Da bi se temperatura u potpunosti definirala, potrebno je znati kako dva tijela A i B, u trenutku toplinske ravnoteže imaju istu temperaturu [5]. Mjerenje temperature provodi se posrednim putem, jer ne postoji izravan način za doći do tog podatka. Posredno mjerenje temperature podrazumijeva usporedbu temperature dotičnog tijela u određenom trenutku s nekom lako mjerljivom veličinom. A. Celsius je koristeći staklenu kapilaru zatvorenu s oba kraja i ispunjenu živom (Hg) (termometar) na veoma dosjetljiv i praktičan način izmjerio temperaturu vode u kritičnim trenucima, te je uveo u upotrebu sveprisutnu Celsiusovu temperaturnu skalu. On je naime na termometru uronjenom u kemijski čistu vodu pri tlaku 760 mmHg u trenutku smrzavanja označio položaj stupca žive i pridružio mu vrijednost 0 °C, zatim je vodi dovodio toplinu te je pri ključanju vode označio novi položaj stupca žive i pridružio mu vrijednost 100 °C. Raspon između dva označena položaja podijelio je na 100 jednakih dijelova i svaki dio je označavao jedan stupanj Celsiusev (1°C). Iako stupanj Celsiusov nije jedinica SI sustava jedinica, ona je međunarodno dopuštena i koristi se zbog svoje jednostavnosti. Osnovna SI sustavom propisana temperaturna skala je ona apsolutna ili Kelvinova [K]. Apsolutna temperaturna skala kao točku svog polazišta uzima apsolutnu nulu, a to je temperatura pri kojoj prestaje bilo kakvo gibanje molekula, dakle kinetička energija molekula pri 0 K jednaka je 0 J. Temperatura zamrzavanja kemijski čiste vode pri tlaku od 760 mmHg iznosi 273,15 K. Uz ove dvije najznačajnije temperaturne skale postoje još neke od kojih su najpoznatije Rankinova u zemljama anglosaksonskog govornog područja gdje zauzima mjesto koje ima Kelvinova u SI sustavu jedinica, te Fahrenheitova. Današnji uređaji za mjerenje temperature (termometri) ne moraju nužno biti živini, već postoji više vrsta termometara koji rade na principu promjene neke fizikalne veličine u zavisnosti od temperature. To su električni termometri čiji se rad bazira na promjeni vrijednosti električnog otpora u zavisnosti o temperaturi, laserski termometri koji očitavajući promjenu boje usijanog metala određuju

temperaturu, bimetalni prekidači također su jedni od termo elemenata iako ne nužno za precizna mjerenja temperature jer oni izloženi toplinskoj energiji u određenoj mjeri doživljavaju mehaničku deformaciju koja prekida strujni krug električnog grijača i na taj način čuva sami uređaj od pregrijavanja koje bi uzrokovalo kvar.

2.6. *Toplinski kapacitet*

Toplinskim kapacitetom c_t [kJ/K] tijelo pokazuje sposobnost za akumuliranjem topline, drugim riječima to je količina topline koju tijelo treba primiti kako bi mu se temperatura povećala za 1 K. Definira se kao omjer količine topline Q [J] i promjene temperature ΔT [K]:

$$c_p = \frac{Q}{\Delta T} \quad [\text{J/K}] \quad (2)$$

Bitno svojstvo toplinskog kapaciteta je ono da je proporcionalan masi tijela, odnosno koliko se puta poveća masa tijela, toliko se poveća i toplinski kapacitet tog istog tijela [9].

2.7. *Specifični toplinski kapacitet*

Specifični toplinski kapacitet c [J/kgK] je količina topline Q [J] potrebna da se tijelu jedinične mase m [kg] temperatura povisi za jedinicu ΔT [K], a definira se izrazom:

$$c = \frac{Q}{m \times \Delta T} = \frac{c_p}{\Delta T} \quad [\text{J/kgK}] \quad (3)$$

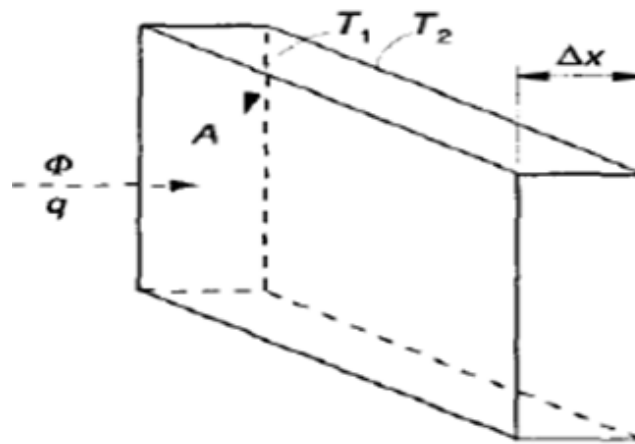
Kako se vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta mijenja od materijala do materijala, te uvelike ovisi o temperaturi pri kojoj je izmjerena, uzima se njenu srednja vrijednost unutar nekog određenog temperaturnog intervala [9].

2.8. Toplinski tok

Toplinski tok Φ [J/s] je količina topline Q [J] u jedinici vremena ΔT [s], a definira se izrazom:

$$\Phi = \lambda \times A \times \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [\text{J/s}] \quad (4)$$

Tako se na **slici 2.** može vidjeti jednodimenzionalan proces provođenja topline kroz određeni materijal.



Slika 2. Jednodimenzionalan prikaz provođenja topline [29]

2.9. Gustoća toplinskog toka

Gustoća toplinskog toka q [W/m²] predstavlja toplinski tok Φ [J/s] koji prolazi kroz jedinicu površine materijala, a definira se izrazom:

$$q = \frac{\lambda}{\Delta x} \times \Delta T \quad [\text{W/m}^2] \quad (5)$$

gdje član $\frac{\lambda}{\Delta x}$ predstavlja svojstvo toplinskog prijelaza materijala.

2.10. *Otpor prolasku topline*

Ukupni otpor prolaza topline R_o [m^2K/W] predstavlja zbroj unutarnjeg otpora prijelaza topline R_i [m^2K/W], vanjskog otpora prijelaza topline R_e [m^2K/W] i otpora propuštanja topline R [m^2K/W]. Otpor prolasku topline može se objasniti na način da ako toplina putuje iz unutarnjeg prostora prema van, ona prvo mora proći kroz granični sloj zraka koji se nalazi na površini s unutarnje strane zida (javlja se unutarnji otpor prijelaza topline), pa kroz sami zid (javlja se otpor propuštanja topline), te na kraju kroz granični sloj zraka koji se nalazi na površini s vanjske strane zida. Ukupni otpor prolasku topline može se prikazati pomoću izraza:

$$R_o = R_i + R + R_e \quad [m^2K/W] \quad (6)$$

gdje je: $R_i = 1/\alpha_i$ [m^2K/W] → otpor unutarnjeg prijelaza topline;

$R = \Delta x/\lambda$ [m^2K/W] → otpor prijelaza topline kroz materijal;

$R_e = 1/\alpha_e$ [m^2K/W] → otpor vanjskog prijelaza topline.

Koeficijent unutarnjeg otpora prijelazu topline α_i [W/m^2K] jednak je količini topline koja se u jedinici vremena prenese sa zraka iz unutarnje prostorije na površinu zida, dok je α_e [W/m^2K] koeficijent vanjskog otpora prijelazu topline koji je jednak količini topline koja se u jedinici vremena prenese s površine zida na zrak vanjskog prostora. $\Delta x/\lambda$ predstavlja omjer debljine zida Δx [m] i toplinske provodljivosti zida λ [W/mK] [10].

2.11. *Toplinska difuzivnost*

Toplinska difuzivnost α [m^2/s] ovisi o koeficijentu toplinske provodljivosti λ [W/mK], gustoći ρ [kg/m^3] i specifičnom toplinskom kapacitetu materijala c_p [J/kgK], a definirana je preko izraza:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \times c_p} \quad [m^2/s] \quad (7)$$

Ona zapravo predstavlja mjeru za prijenos topline s jedne strane materijala na drugu stranu materijala. Usporedno tome može se zaključiti da ako je veća toplinska difuzivnost materijala, veći je temperaturni gradijent u istome materijalu [11].

2.12. Efuzivnost

Efuzivnost predstavlja svojstvo prijelaza topline koje je prisutno kod materijala neovisno o tome u kojem se agregatnom stanju nalazi (prahovi, pjene i gelovi, tekućine, krutine, plinovi). Ono određuje brzinu prijelaza topline kod dva elementa koji se dodiruju, a da su pri tome različitih temperatura, odnosno predstavlja brzinu promjene temperature promatranog predmeta. Efuzivnost e [$\text{W}\sqrt{\text{s}/\text{m}^2\text{K}}$] se definira izrazom:

$$e = \sqrt{\lambda \times \rho \times c_p} \quad [\text{W}\sqrt{\text{s}/\text{m}^2\text{K}}] \quad (8)$$

gdje je: λ [W/mK] → toplinska provodljivost;

ρ [kg/m^3] → gustoća;

c_p [J/kgK] → specifični toplinski kapacitet.

3. Principi prijenosa topline

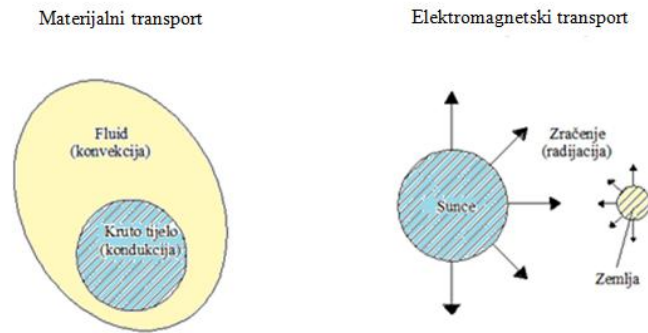
3.1. Prijenos topline

Termodinamika je grana fizike koja se primarno bavi proučavanjem problema vezanog oko prijenosa, odnosno izmjene topline između i unutar materijalnih tvari, sistema, sustava i materijala. Također se bavi proučavanjem energije, entalpije, entropije, topline, rada i spontanosti procesa, odnosno Gibbsovom energijom. Zapravo, njena je glavna zadaća proučavanje veza između toplinske energije i ostalih oblika energija u pogledu izmjena tvari u uvjetima ravnoteže. Sama izmjena energije između dva sustava različitih vrijednosti temperatura nastupa upravo iz razloga njihovih različitih vrijednosti temperatura, odnosno njihove temperaturne neravnoteže. Upravo ta izmjena energije poznata je pod pojmom „Prijelaz topline“, a sami prijelaz topline će se događati i biti će prisutan sve dok se ne uspostavi toplinska ravnoteža [5]. Toplinska ravnoteža se može objasniti na način da kada imamo dva dijela tijela unutar jednog sustava sa različitom temperaturom, toplinska ravnoteža sama po sebi nastupa onda kada se vrijednosti do maloprije različitih temperatura dvaju dijelova tijela unutar sustava međusobno ne izjednače, te se tada može reći da je temperatura cijelog tijela jednaka i da je proces prijelaza topline završen.

Smjer prelaženja topline određen temperaturom, odnosno proces prelaženja se odvija od mjesta više temperature prema mjestu niže temperature. Zapravo, može se zaključiti kako je toplina dio unutarnje energije tijela koja prelazi s područja više temperature na područje s nižom temperaturom. Proces prelaženja topline s hladnijeg dijela tijela ili od hladnijeg tijela prema toplijem tijelu je nemoguć u realnim uvjetima.

Prema svim fizikalnim načelima, izmjena topline između dva sustava s različitim temperaturnim vrijednostima provodi se na dva osnovna načina, a oni su:

- a) Materijalni transport;
- b) Elektromagnetski transport.

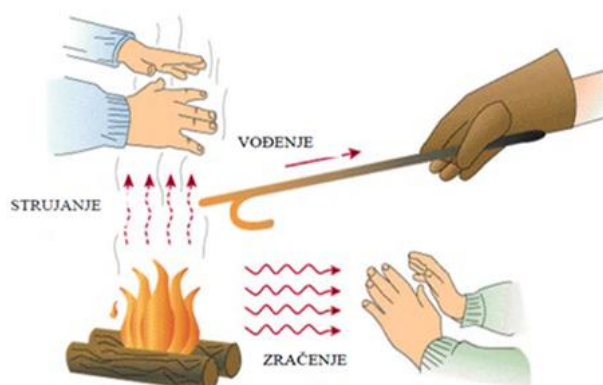


Slika 3. Podjela prema fizikalnim načinima izmjene topline [12]

Materijalni transport (**slika 3.**) je karakteriziran izmjenom topline vezanom uz samu materiju, te se tom vrstom transporta ostvaruje prijelaz topline kondukcijom ili vođenjem i konvekcijom. Druga vrsta je elektromagnetski transport (**slika 3.**), karakteriziran izmjenom topline elektromagnetskim zračenjem te u ovom slučaju izmjena topline nije vezana uz samu materiju tijela nego se sami proces odvija radijacijom ili zračenjem.

3.2. *Načini prijenosa topline*

Kao što se prije moglo vidjeti, postoje tri osnovna načina prijenosa ili izmjene topline. To prvenstveno ovisi o tome na koji se način toplina prenosi između ili unutar tijela. Dakle, moguće izmjene topline su konvekcija/strujanje, zračenje/radijacija i kondukcija/vođenje (**slika 4.**).



Slika 4. Načini prijenosa topline [29]

3.2.1. *Prijenos topline vođenjem (kondukcija)*

Ova vrsta prenošenja topline ostvaruje se provođenjem topline kroz kruta, neprozirna i homogena tijela (metali, legure itd.). Mehanizam provođenja topline može se objasniti kao transport topline na razini molekula, odnosno to je izmjena topline između dva dijela tijela gdje se toplina kreće i transferira iz područja s višom temperaturom prema području s nižom temperaturom uslijed temperaturnog gradijenta. Važno je naglasiti da ako postoji kruto, prozirno i homogeno tijelo (staklo, kvarc, itd.), tada se prijenos topline odvija i vođenjem i zračenjem ili radijacijom. U daljnjem razmatranju detaljnije će se objasniti prijenos topline vođenjem kroz kruta, neprozirna i homogena tijela koja su predmet ovog istraživanja.

3.2.2. *Prijenos topline strujanjem (konvekcija)*

Prijenos topline konvekcijom događa se najčešće kod fluida, odnosno plinova i kapljevina. Zapravo, radi se o predaji topline od fluida u gibanju na čvrstu stjenku, i obratno. To je kombinacija intermolekularnog i makroskopskog ili molarnog transporta topline, gdje je makroskopski ili molarni transport topline povezan s gibanjem tekućine. Ovisno o fizikalnom mehanizmu koji potiče gibanje, postoji slobodna ili prirodna i prisilna konvekcija. Slobodna ili prirodna konvekcija se događa onda kada je strujanje, odnosno gibanje fluida uvjetovano razlikom u gustoći, gdje razlika gustoća ovisi o samoj temperaturi tijela. Ona se ostvaruje silama uzgona. S druge strane, prisilna konvekcija se događa onda kada je strujanje/gibanje fluida poticano umjetnim putem, odnosno nametnutom ili prisilnom razlikom tlakova. Ona se ostvaruje raznim tehničkim uređajima kao što su ventilatori, pumpe, itd. Kada se to zna, može se zaključiti da će prisilna konvekcija biti intenzivnija od prirodne/slobodne konvekcije upravo iz razloga što postoji više lokalnih kontakata sitnih čestica s temperaturom u promatranom području.

3.2.3. *Prijenos topline zračenjem (radijacija)*

Zračenje se najlakše može objasniti kao izmjena topline između tijela u obliku toplinskih zraka koje se prenose kao elektromagnetski valovi. Kod toplinskog zračenja se većina energije prenosi unutar spektra zračenja valnih dužina $\eta = 0,1 - 400 \mu\text{m}$, što zapravo uključuje

dužine valova koje su smještene unutar svjetlosnog spektra. Brzina širenja elektromagnetskih valova dana je izrazom:

$$c = \eta \times \nu \tag{9}$$

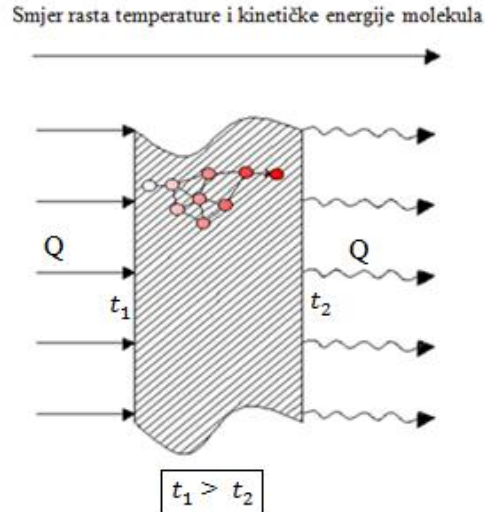
gdje je: c → brzina širenja elektromagnetskih valova;
 η → valna duljina;
 ν → frekvencija.

Količina odzračene energije prvenstveno ovisi o stanju površine i o površinskoj temperaturi tijela. Sva tijela koja imaju temperaturu veću od 0 K zrače određenu količinu energije. Kao najjednostavniji primjer zračenja može se navesti međusobni odnos Sunca i Zemlje, gdje je Sunce to tijelo koje širi toplinu, a Zemlja ono tijelo koje prihvaća toplinu.

3.3. Toplinska provodljivost

3.3.1. Općenito o toplinskoj provodljivosti

Vođenje topline je prirodni proces kretanja topline ukoliko postoji razlika u temperaturi unutar samog materijalnog tijela. Bitno je naglasiti kako je svako tijelo materijalna tvar unutar koje se događa proces vođenja topline, dok je sve izvan toga istog tijela okolina koja je uzrok dovodenja i prenošenja topline. Toplinska vodljivost, odnosno kondukcija događa se uslijed prirodnog htjenja za homogenom razdiobom srednje brzine molekula, a samim time i temperature u cjelokupnom sustavu tijela [12]. Tako se može reći da prilikom kretanja bržih molekula koje su dio toplijeg dijela tijela, te njihovim sudaranjem sa sporijim molekulama koje su dio hladnijeg dijela tijela dolazi do reakcije unutar koje brže molekule usporavaju, a sporije ubrzavaju. Na taj način dolazi do njihove izjednačenosti, te se postiže srednja brzina molekula. Ovaj proces se može pojednostaviti na način da se kaže da je toplinska provodljivost zapravo sposobnost tijela da provodi toplinu u smjeru od više prema nižoj temperaturi, sve dok se ne stvori toplinska ravnoteža, a ona nastupa u onom trenutku kada se temperatura cijelog tijela ili sustava izjednači (**slika 5.**). Pojednostavljeno, do prijenosa topline dolazi u slučaju kada je temperaturni gradijent veći od nule.



Slika 5. Konduktivni transfer topline kroz ravnu ploču [12]

3.3.2. Toplinska provodljivost

Vrijednost toplinske provodljivosti uglavnom ovisi o razlici temperature između dvaju tijela, tlaku i vrsti materijala, odnosno o njegovom molekularnom sastavu i rasporedu. Znači, tijela koja imaju gušće posloženu strukturu molekula unutar samog sustava „brže“ će provoditi toplinu od tijela koja imaju rjeđe posloženu strukturu molekula. Također što je veći temperaturni gradijent, odnosno što je veća razlika u temperaturi tijela, to će biti veća brzina provođenja topline iz jednog dijela tijela na drugi dio tijela.

Definicija toplinske provodljivosti formulirana je jednadžbom koja glasi:

$$\lambda = \frac{|q|}{|\text{grad } t|} \quad (10)$$

Iz gornje jednadžbe je jasno vidljivo da je vrijednost toplinske provodljivost ekvivalentna gustoći toplinskog toka q i temperaturnog gradijenta $\text{grad } t$. Temperatura zapravo ima dominantan utjecaj na koeficijent toplinske provodljivosti.

Ako se pak zamisli neka homogena ploha debljine d unutar nekog tijela koja je omeđena paralelnim ravninama u kojima je vrijednost temperatura t_1 i t_2 vremenski stalna, pri čemu

vrijedi da je $t_1 < t_2$. Tada se može prikazati Fourier-ov zakon vođenja topline, koji je dobivena temelju mnogo izvedenih pokusa, a glasi:

$$Q = \lambda \times A \times \frac{t_2 - t_1}{d} \times \tau \quad (11)$$

gdje simbol Q predstavlja količinu topline koja je u vremenu τ prostruji kroz promatranu plohu površine A . Pri tome simbol λ predstavlja toplinsku provodljivost, a on je karakteriziran kao jedna od osnovnih fizikalno-toplinskih svojstava materijala.

Pošto se zna da je količina topline Q zapravo energija, tada se omjer količine topline Q i vremena τ može izraziti kao snaga koja se u nauci zove toplinski tok Φ . Dakle, taj isti toplinski tok Φ koji prolazi jedinicom promatrane površine naziva se gustoćom toplinskog toka q [12].

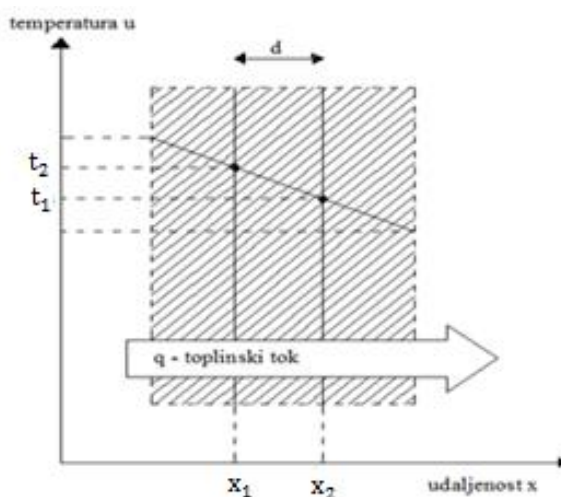
Numerička formulacija gustoće toplinskog toka može se izraziti kao:

$$q = \frac{Q}{\tau \times A} = \frac{\Phi}{A} \quad (12)$$

Tada se daljnjim uvrštavanjem Fourier-ovog izraza u izraz za gustoću toplinskog toka dobiva jednadžba za toplinski tok, koja glasi:

$$q = \lambda \times \frac{t_2 - t_1}{d} \quad (13)$$

Tako se na **slici 6.** može vidjeti vođenje topline kroz ravnu ploču napravljenu od homogenog materijala uslijed razlike temperature $t_2 > t_1$.



Slika 6. Vođenje topline kroz ravnu ploču od homogenog materijala [12]

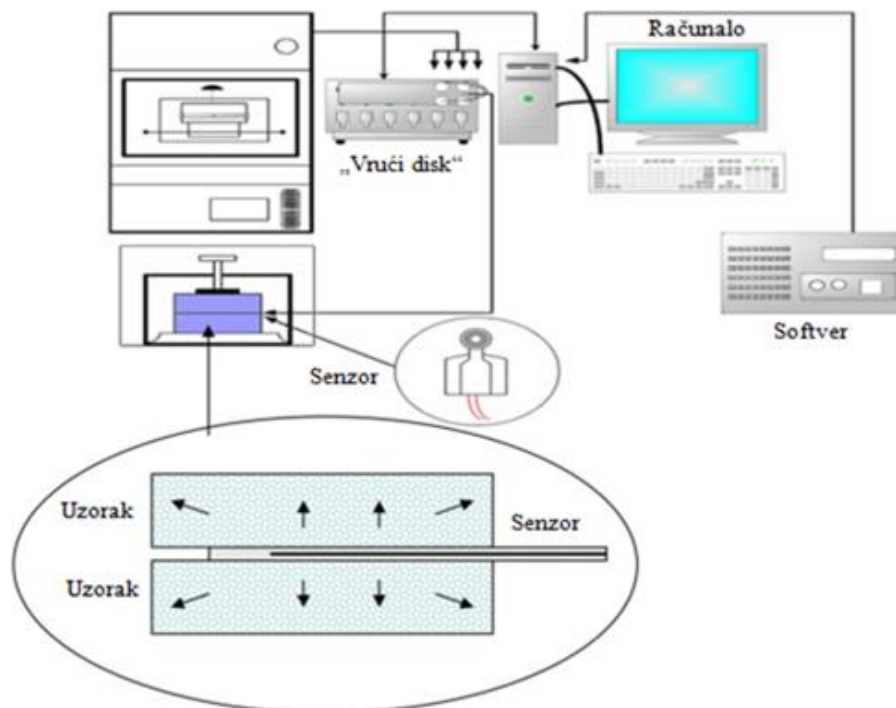
Raznim laboratorijskim ispitivanjima i pokusima dobivene su vrijednosti toplinske provodljivosti za pojedine materijale, a one su prikazane u **tablici 1.**:

Tablica 1. Preporučene granične vrijednosti toplinske provodljivosti λ [W/mK] i efuzivnosti e [$W\sqrt{s/m^2K}$] za korištenje pojedinih kalibracijskih krivulja pomoću „Mathis TCI“ uređaja [13]

Materijali pri temperaturi od 20°C	Koeficijent toplinske provodljivosti λ [W/mK]	Efuzivnost e [$W\sqrt{s/m^2K}$]
Metali	6-110	4500-19000
Keramike	0,2-4	500-3000
Kompoziti	0,2-4	500-3000
Tekućine	0-0,6	0-1660
Prahovi	0-0,6	0-1660
Pjene i gelovi	0,04-0,09	50-200

4. Metoda vrućeg diska

Metoda „vrućeg diska“ je nestacionarna metoda kod koje je senzor ujedno i zagrijavajući element. Senzor je izveden u obliku ravninske spirale, odnosno diska. Prilikom zagrijavanja elementa, odnosno žice od platine koja se nalazi unutar samog senzora, uzrokuje se trodimenzionalan toplinski tok unutar uzorka. Upravo se taj trodimenzionalni toplinski tok prenosi u smjeru senzora prema uzorku [16]. Temperatura kontakta senzora i uzorka prati se kao funkcija vremena, te se toplinska provodljivost i difuzivnost računaju pomoću kalibracijskih krivulja i izraza detaljnije opisanih u *poglavlju 4.2.3.* Kod mjerenja toplinske provodljivosti i efuzivnosti upotrebom metode „vrućeg diska“ nije potrebno poznavati vrijednost toplinskog kapaciteta materijala/uzorka koji se ispituje, ali je potrebno poznavati njegovu gustoću. Metoda je prikladna za ispitivanje pojedinih tipova uzoraka (materijala) kao što su tekućine, prahovi i pjene/gelovi, dok mjerenje uzoraka od krutog materijala (keramike, metali, kompoziti) zahtijeva dva identična uzorka istog materijala kako bi se dobila stvarna (relevantna) vrijednost toplinske provodljivosti. Detaljniji opis funkcioniranja uređaja i računalnog programa korištenog u ovom radu nalazi se u *poglavlju 4.2.*



Slika 7. Princip rada metode „vrućeg diska“ [18]

4.1. Ispitivanje toplinskih svojstava materijala prema normama

4.1.1. HRN EN 1946-2

Toplinske značajke građevnih proizvoda i elemenata-Posebni kriteriji za ocjenu laboratorija koji mjere svojstva prenošenja topline – 2. dio: Mjerenje pločastim uređajem sa zaštićenom vrućom pločom (EN 1946-2:1999)

→ *postupak mjerenja:*

Prilikom samog postupka mjerenja zadanim uređajem dokument istoga trebao bi sadržavati kriterije za procjenjivanje ostvarenih stalnih okolnih uvjeta i kriterije za određivanje mjernog intervala.

→ *uzorci testirani kontaktnom pločom:*

Dokument mjernog postupka treba sadržavati odgovarajuće smjernice o korištenju kontaktnih ploča i o nastalim pogreškama. Kontaktne ploče su potrebne u slučaju ako je toplinska otpornost uzorka manja od $0,3 \text{ m}^2\text{K/W}$. Upotreba kontaktnih ploča uvodi greške u mjerenje temperaturne razlike kroz uzorak. U razmatranje je uzeta samo nejednolikost temperature na površini uzorka koja je rezultat nejednolike debljine uslijed slabih tolerancija uređaja i uzorka, ili nehomogenosti bilo uzorka ili kontaktne ploče.

→ *procjenjivanje:*

Prilikom projektiranja, analize pogrešaka i provjere podataka potrebno je posebnu pažnju posvetiti procjenjivanju navedenog. To je bitno iz razloga kako bi se postigla maksimalna točnost u svim ispitivanim uvjetima. Ako uzorak ne dosegne određenu razinu točnosti koja se očekuje za dane uvjete ispitivanja, laborant/ispitivač bi trebao ponovno pregledati opremu i uzorke. Ako je i nakon toga nemoguće zadovoljiti uvjete ispitivanja u kojima uređaj treba doseći zahtijevanu razinu točnosti, tada sami uređaj neće zadovoljiti zahtjevima za suglasnost, odnosno zahtjevima koji se od njega očekuju. Savjet je da bi se postupci ispitivanja u tom slučaju trebali ponavljati dok se god ne zadovolji zahtijevana razina točnosti.

→ *određivanje emisivnosti:*

Emisivnost „ε“ površine uređaja je jedan od parametara koji bitno utječe na mjerenje toplinske otpornosti materijala malih gustoća. Kod mjerenja takvih materijala, emisivnost treba biti poznata. Ukupna emisivnost uređaja sa zaštićenom vrućom pločom može biti utvrđena ako prijenos topline između tople i hladne površine uređaja može biti pretpostavljen kao stacionarni prijenos u transparentnom vodljivom sredstvu omeđen s dvije paralelne beskonačno ravne izotermne površine.

4.1.2. HRN EN 1946-4

Toplinske značajke građevnih proizvoda i elemenata-Posebni kriteriji za ocjenu laboratorija koji mjere svojstva prenošenja topline – 4. dio: Mjerenje metodom vruće komore (EN 1946-4:2000)

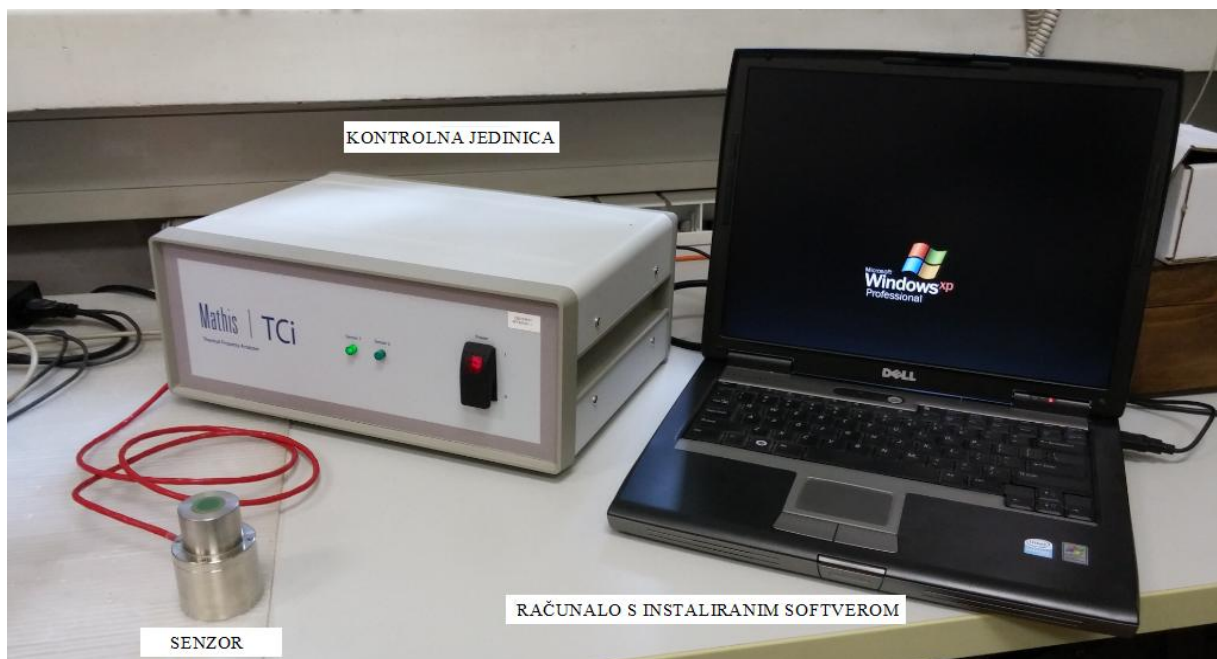
→ *opis uređaja:*

Informacije koje trebaju biti dokumentirane i raspoložive za ispitivanje prilikom procjene, odnosno vrednovanja:

- Načelo funkcioniranja;
- Tip uređaja (zaštićena vruća komora);
- Osnovne dimenzije uređaja, s određenom visinom i širinom komore za mjerenje ili područja izmjene topline u vrućoj komori;
- Jednostavni dijagrami koji opisuju model uređaja s posebnom pozornosti na protok topline i kruženje zraka;
- Položaj, povezanost i numeriranje senzora temperature;
- Električne instrumente i glavne pomoćne uređaje;
- Detalje prikupljanja podataka i odgovarajuće računalne programe za obradu podataka.

4.2. „Mathis TCI“ uređaj

„Mathis TCI“ uređaj spada u grupu eksperimentalnih uređaja koji funkcioniraju na principu metode „vrućeg diska“, a patentirani je proizvod grupacije *Mathis Instruments* [13]. Ova vrsta uređaja izravno mjeri toplinsku provodljivost i efuzivnost materijala na temelju prolaska toplinskog toka iz senzora u uzorak. Sastoji se od senzora, kontrolne jedinice i računalnog programa instaliranog na računalu (**slika 8.**).



Slika 8. Komponente uređaja

Senzor jednostrano zagrijava uzorak (materijal) konstantnim izvorom topline. Pri tome površina senzora zagrijava uzorak na 1-3 °C tijekom ispitivanja. Uzorak apsorbira dio topline, a dio ostaje na površini (sučeljku) senzora. Pad napona spiralnog grijača koji se nalazi unutar senzora mjeri se, i prije i za vrijeme samog ispitivanja. Tada se pomoću informacija o padu napona izračunava efuzivnost uzorka, a toplinska provodljivost se izračunava iz podataka o naponu, iterativnim postupcima koji će biti detaljnije objašnjeni u *poglavlju 4.2.3.*

4.2.1. Upute za rad na uređaju

→ *uzimanje uzoraka:*

Poželjno je da površina uzorka bude bez većih oštećenja i nepravilnosti kako bi se izbjegla neravna površina koja bi mogla negativno utjecati na rezultate ispitivanja. Veličina i oblik uzorka ovisi o vrsti, odnosno grupi materijala što će detaljnije biti objašnjeno u *poglavlju 4.2.5.* Ograničenje veličine uzorka praktički ne postoji, osim što postoji uvjet da minimalna dimenzija uzorka mora biti veća od 17 mm, a minimalna debljina 0,5 mm kako bi se ostvario zadovoljavajući kontakt između senzora i uzorka. Također je potrebno poznavati gustoću uzorka kojeg ispitujemo.

→ *kondicioniranje uzoraka:*

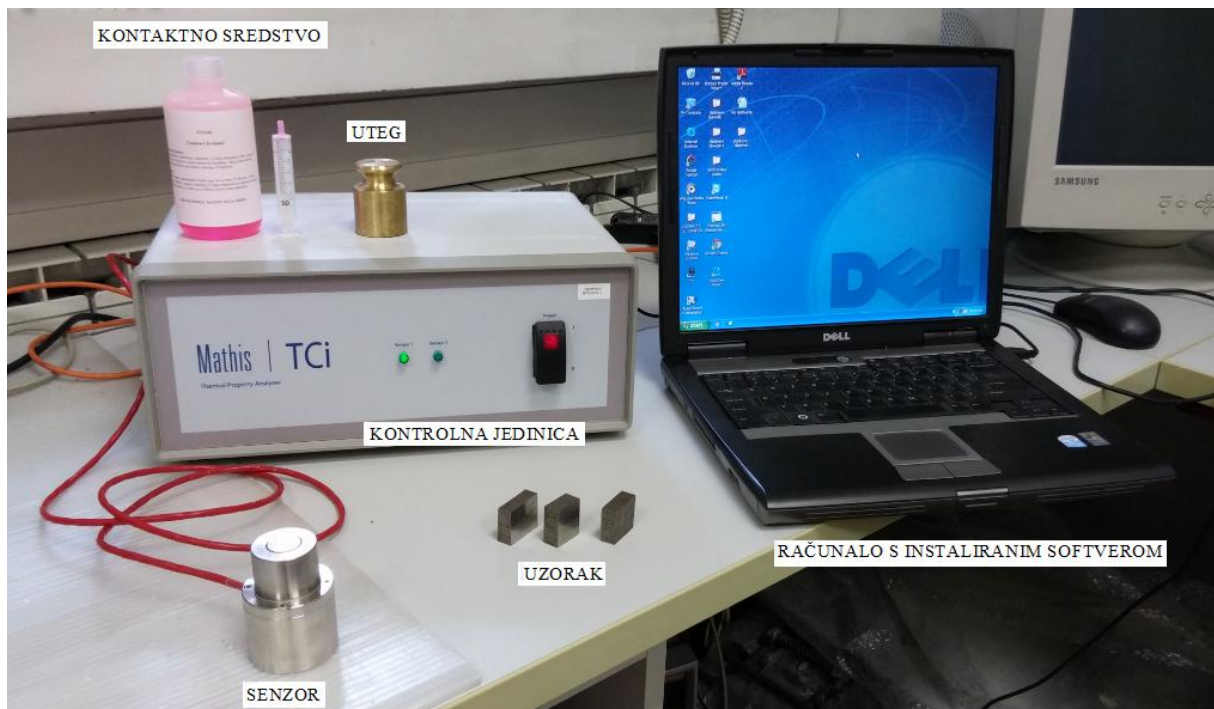
Uzorci se prije ispitivanja moraju položiti u komoru sa stalnom temperaturom od $23 \pm 2^\circ\text{C}$ i $50 \pm 5\%$ relativne vlažnosti. Uzorci se nakon toga moraju isušiti u ventiliranim sušionicima do stalne mase. U komori uzorci moraju odstajati 6 do 24 sati kako bi se dobilo idealno stanje uzorka koji se ispituje. Važno je napomenuti kako je kondicioniranje obavezno ako se radi o uzorcima od poroznih materijala (relativno malih gustoća), dok se u slučaju metala, kompozita i keramika velikih gustoća kondicioniranje uzoraka obavlja po potrebi.

→ *opis uređaja:*

Zagrijavanje spirale od platine koja se nalazi unutar senzora uzrokuje se trodimenzionalan toplinski tok koji putuje prema uzorku koji se ispituje, gdje se temperatura na kontaktu senzora i uzorka promatra kao funkcija vremena, a toplinska provodljivost i efuzivnost se računaju pomoću kalibracijskih krivulja i izraza. Prilikom mjerenja toplinske provodljivosti i efuzivnosti upotrebom metode vrućeg diska mogu se zanemariti vrijednosti toplinskog kapaciteta uzorka koji se ispituje, ali ne i gustoća samog uzorka koji je predmet ispitivanja. Osim ispitivanja toplinske provodljivosti i efuzivnosti, ovom se metodom mogu dobiti i vrijednosti difuzivnosti, specifičnog toplinskog kapaciteta i otpora prolasku topline istoga uzorka.

Prednosti ove metode za ispitivanje u odnosu na druge metode jest:

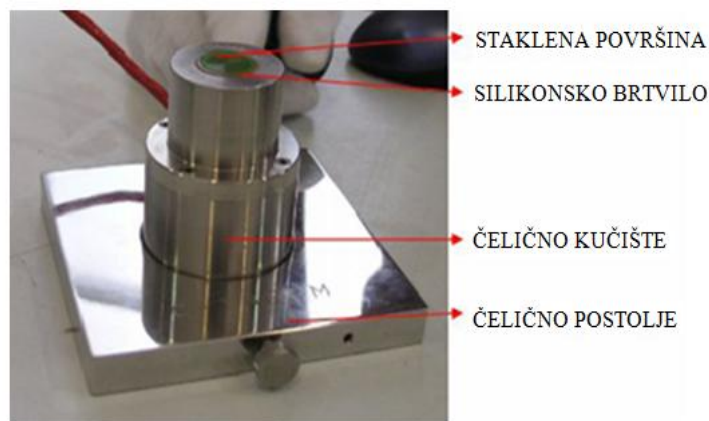
- Ispitivanje materijala u rasponu koeficijenta toplinske provodljivosti λ od 0-100 W/mK, te 0-19000 $W\sqrt{s/m^2K}$ za efuzivnost e ;
- Široki raspon temperatura pri kojima je moguće provoditi ispitivanje, od -50 °C do +200 °C;
- Ispitivanje krutih materijala, tekućina, prahova i pjena/gelova;
- Točnost i preciznost je veća od 95%, dok je pri rasponu okolne temperature 0 do +50 °C očekivana točnost izlaznih rezultata ispitivanja od oko 99%.



Slika 9. Kompletni pribor za ispitivanje

Kućište kontrolne jedinice napravljeno je od čelika, dok je kućište senzora napravljeno od nehrđajućeg čelika. Gornja površina senzora na koju se polaže uzorak napravljena je od stakla i zabrtvljena je RTV temperaturno vulkaniziranim silikonom koji služi kao zaštitna barijera staklenoj površini senzora (**slika 10.**). Spirala unutar senzora napravljena je od 10 μ m debele žice od nikla, kako bi mogla osigurati zahtijevanu čvrstoću i električnu izolaciju same spirale.

Tako se može reći da se senzor zapravo sastoji od određenog broja koncentrično omotanih prstenova (spirala) koji su izvor topline, te tu toplinu prenose na gornju staklenu površinu senzora preko koje putuje prema uzorku. Toplinski kontaktni otpor između površine senzora i površine uzorka na njihovom kontaktu, uzrokovat će stalnu temperaturnu razliku preko tankog međuprostora na njihovom kontaktu. Senzor je dizajniran za ispitivanje tekućina i prahova, ali se mogu ispitivati i kruti materijali širokog spektra gustoća, od pjena do metala. Kako je senzor sam po sebi jako osjetljiv potrebno je posvetiti pažnju pažljivom rukovanju, te ne bi trebao biti izložen prekomjernoj masi – ne više od 650 grama. Na svaki uzorak mase manje od 150 grama potrebno je staviti uteg mase 500 grama kako bi se osigurao bolji kontakt između površine uzorka i senzora. Na uzorak mase veće od 150 grama nije potrebno stavljati metalni uteg, jer i sama masa uzorka osigurava dovoljno dobar kontakt između površine uzorka i senzora.



Slika 10. Osnovni dijelovi senzora [29]

→ *priprema uzorka za ispitivanje:*

Pošto se ispitivanje odvija u laboratorijskim uvjetima, uzorak se mora prilagoditi laboratorijskim uvjetima. Znači, uzorak ne smije biti prevelikih niti premalih dimenzija. Veličina uzorka opisana je u *poglavlju 4.2.1. - uzimanje uzoraka*. Ako se radi o uzorku „velike“ vrijednosti toplinske provodljivosti (npr. metali) potrebno je nositi gumene rukavice tijekom ispitivanja kako se toplina s tijela ispitivača ne bi prenijela na uzorak, i samim time negativno utjecala na izlazne rezultate ispitivanja. Također je uzorak potrebno označiti (ako ih ima više od jednog) kako ne bi došlo do zabune tijekom ispitivanja, jer je u većini slučajeva

potrebno ispitati više uzoraka koji su vrlo slični (**slika 11.**). Nakon toga uzorak je potrebno kondicionirati, što je objašnjeno u *poglavlju 4.2.1. – kondicioniranje uzoraka*. Preporučuje se napraviti nekoliko probnih mjerenja na etalonima prije mjerodavnog ispitivanja kako bi se uočile i otklonile greške/nepravilnosti u radu samog uređaja.



Slika 11. Označavanje uzorka

Nakon što se obavi kondicioniranje uzorka, na senzor se postavlja jedno od tri moguća kontaktna sredstva: glycol, voda i glycerin (**slika 12**). Odabir kontaktnog sredstva ovisi o temperaturi, odnosno:

- Glycol (-20 do 5 ° C);
- Voda (5 do 70 ° C);
- Glycerin (70 do 150 ° C).

Za ispitivanje tekućina, pjena/gelova i prahova ne koriste se kontaktna sredstva, dok se za ispitivanje metala, kompozita i keramika koriste kontaktna sredstva (po tri kapi stavlja se na površinu senzora!). Tek se tada uzorak može postaviti na senzor, na način da prianjanje uzorka i senzora bude maksimalno iskorišteno (**slika 13.**). Uteg se stavlja na uzorak po mogućnosti, što je opisano u *poglavlju 4.2.1. – opis uređaja*.



Slika 12. Stavljanje kontaktnog sredstva na senzor

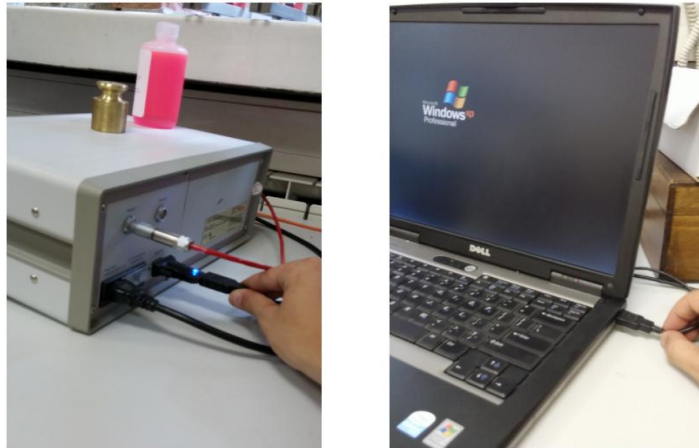


Slika 13. Stavljanje uzorka na senzor

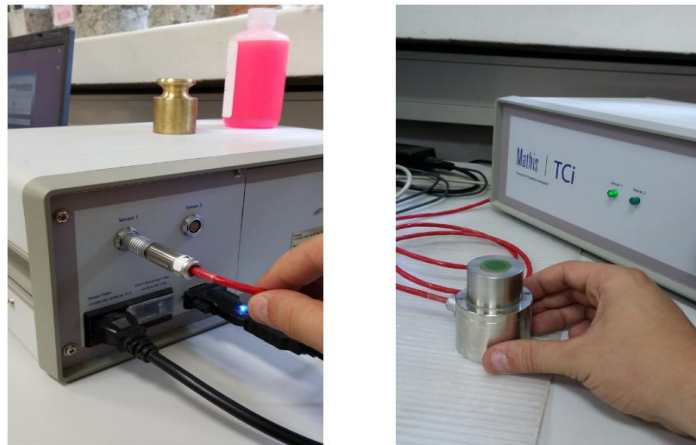
→ *priprema uređaja za rad:*

Računalo sa instaliranim računalnim programom „Mathis TCi“ potrebno je spojiti s kontrolnom jedinicom prikladnim kablovima (**slika 14.**) i senzorom (**slika 15.**). Ako se koristi samo jedan senzor, uvijek treba koristiti „Senzor 1“ priključno mjesto. Nakon što se računalo spoji s kontrolnom jedinicom, potrebno je uključiti kontrolnu jedinicu (ona se uvijek prva uključuje!) (**slika 16.**), a tek zatim računalo (**slika 17.**). Na kraju se pokreće računalni program „Mathis TCi“ na računalu, te se tek tada kreće s ispitivanjem toplinske provodljivosti uzorka.

Kompletno ispitivanje jednog uzorka provodi se svega 0,8 do 5 sekundi, što je velika prednost ove metode u odnosu na druge metode [17].



Slika 14. Povezivanje kontrolne jedinice i računala kablovima za napajanje



Slika 15. Povezivanje kontrolne jedinice i senzora sa kablovima za napajanje



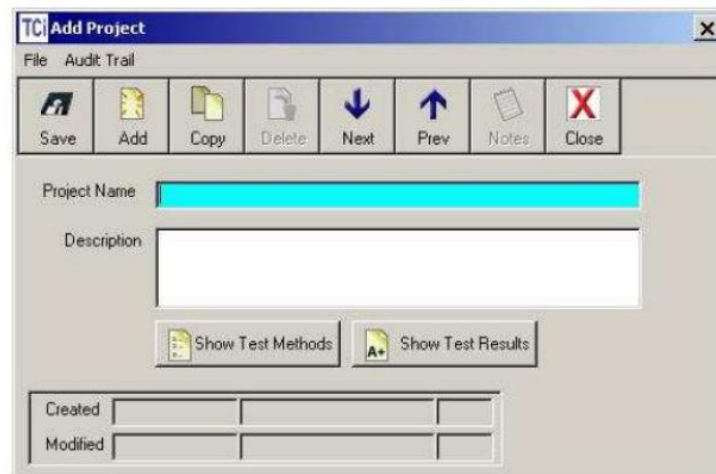
Slika 16. Uključivanje kontrolne jedinice

Slika 17. Uključivanje računala

4.2.2. Korištenje računalnog programa „Mathis TCI“ uređaja

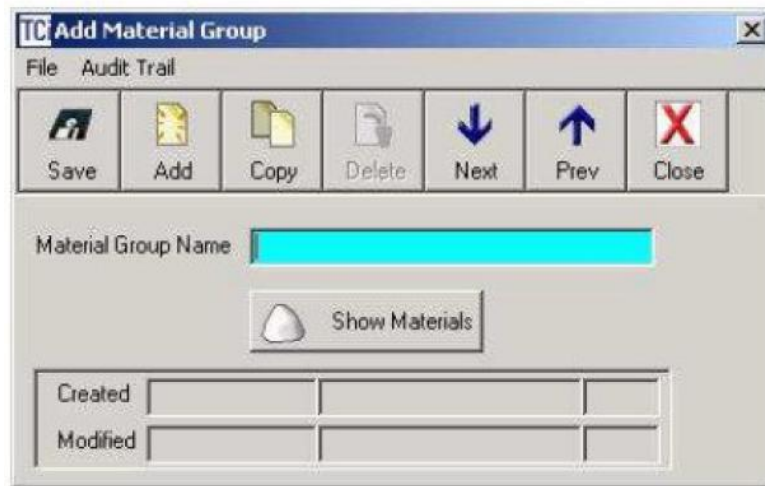
→ ulazni podaci:

Ako se započinje novo ispitivanje potrebno je otvoriti početni „prozor“ gdje su dane dvije opcije za unos podataka. Prva opcija je unos imena projekta, dok je druga opcija upis opisa projekta. Računalni program (softver) će toplinska svojstva materijala spremi pod odabrano ime u obliku dokumenta (**slika 18.**). Nakon što se projekt spremi, prelazi se na sljedeći korak kod kojega se odabire grupa materijala koja će se ispitivati. Preporuka je da se ime materijala označi prema vrsti materijala koji se ispituje kako bi se kasnije materijal o kojem se radi mogao lakše prepoznati.



Slika 18. Novi projekt [13]

Nakon što se materijalu (uzorku) koji se ispituje odabere ime, unose se podaci o tome dali će se ispitivati svojstva kompozitnih materijala, keramičkih materijala, pjena ili prahova (**slika 19.**). Nakon što se projekt spremi, prelazi se na sljedeći korak gdje se otvara novi „prozor“.



Slika 19. Grupa materijala [13]

Nakon odabira vrste materijala koji se ispituje, potrebno je otvoriti novi „prozor“ (**slika 20.**). U ovom „prozoru“ upisuju se ime i grupa materijala koji su prethodno odabrani, te se u istome „prozoru“ prikazuju poznate karakteristike materijala koje se ispituju.

Te karakteristike su:

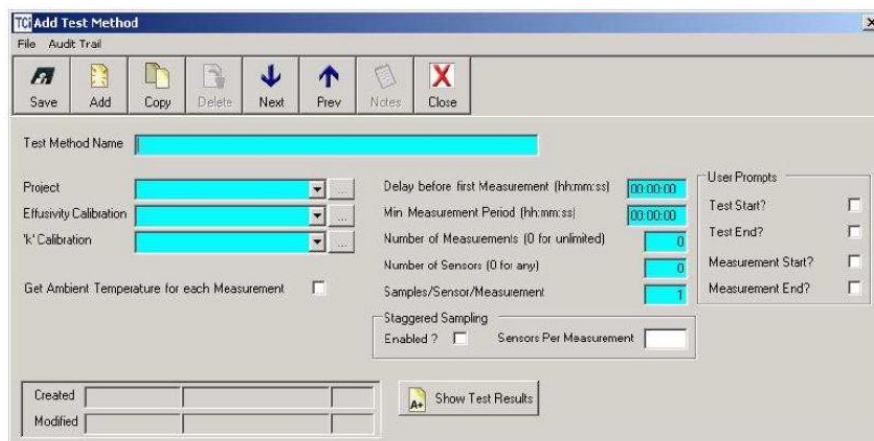
- Toplina okoline;
- Efuzivnost;
- Koeficijent toplinske vodljivosti;
- Gustoća;
- Specifični toplinski kapacitet;
- Difuzivnost.

Osim ovih karakteristika potrebna je i vrijednost gustoće materijala koji se ispituje. Gustoća je potrebna radi cjelovitosti izlaznih rezultata, a nju ispitivač mora sam izračunati i unijeti jer ju program sam ne proračunava.



Slika 20. Karakteristike materijala [13]

U zadnjem „prozoru“ (slika 21.) potrebno je unijeti ime metode ispitivanja, te se mora odabrati kalibracijska krivulja za toplinsku provodljivost i efuzivnost (ovisno o tome radi li se o keramici, kompozitu, pjenu ili prahu kako bi računalni program mogao izvršiti kalibraciju rezultata mjerenja prema odabranoj krivulji). Zatim je potrebno odabrati broj mjerenja koje će računalni program izvršiti, jer će računalni program u suprotnom izvršiti beskonačan broj mjerenja sve dok ispitivač ne zaustavi ispitivanje. Na kraju je potrebno odabrati broj senzora kojima će se vršiti ispitivanje.



Slika 21. Vrsta ispitivanja [13]

Kao kontaktno sredstvo između senzora i uzorka, odnosno na njihovom kontaktu odabire se:

Tablica 2. Kontaktno sredstvo ovisno o vrsti materijala [13]

Vrsta materijala	Kontaktno sredstvo	
Metali	+70 do +150 °C	3 x kapljica glicerina
Keramike	+5 do +70 °C	3 x kapljica vode
Kompoziti	-20 do +5 °C	3 x kapljica glycola
Tekućine	Nije potrebno	
Prahovi		
Pjene i gelovi		

Nakon što su prethodno zadane karakteristike materijala spremljene, kreće se na sami postupak ispitivanja.

Uzorak se mora pažljivo postaviti na senzor kako se uzorak ili senzor ne bi oštetili, te se mora odabrati opcija „New Test“ („Novo Ispitivanje“). Nakon toga je potrebno definirati *Novi projekt* pod opcijom „Select Project“ („Odabir Projekta“) (**slika 22.**), pritisnuti tipka „Next“ („Nastavi“).



Slika 22. Odabir projekta [13]

Tek se tada može prijeći na otvaranje sljedećeg „prozora“ gdje je zadana *Vrsta ispitivanja* sa svim potrebnim parametrima pod opcijom „Select Test Method“ („Odabir Vrste Ispitivanja“) (**slika 23.**). Nakon odabira potrebno je pritisnuti tipku „Next“ („Nastavi“).



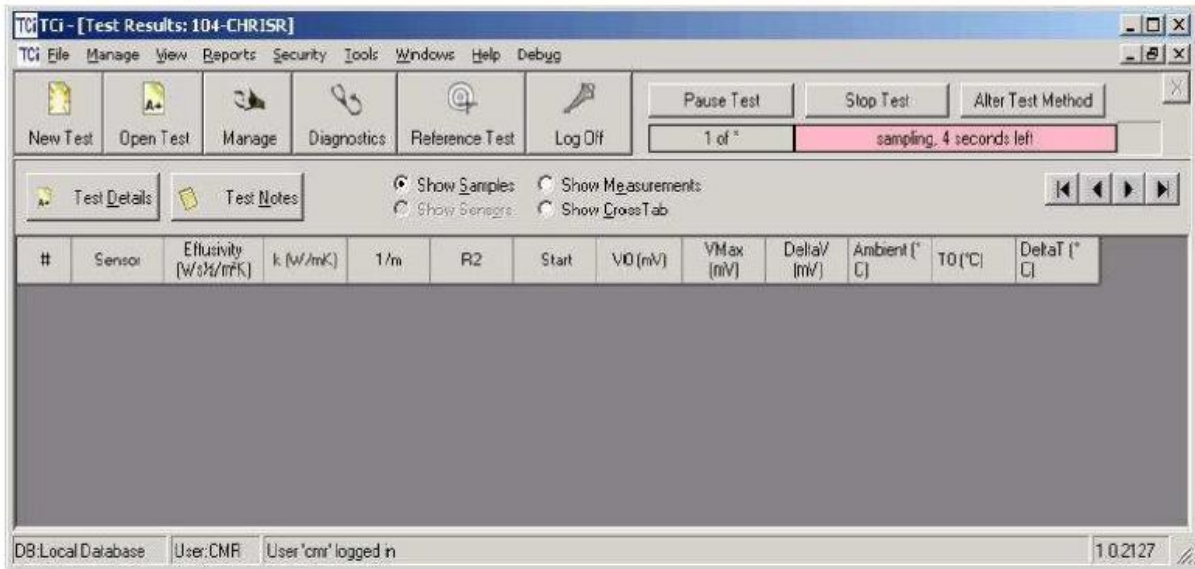
Slika 23. Odabir vrste ispitivanja [13]

Tada je potrebno otvoriti novi „prozor“ pod nazivom „Select Instrument & Sensors“ („Odaberi Uređaj i Senzor“). U ovom „prozoru“ potrebno je odabrati „Instrument“ („Uređaj“), „Sensors“ („Senzore“) i „Contact Agent“ („Kontaktno Sredstvo“) . Na kraju je potrebno provjeriti ispravnost svih parametara, te pritisnuti tipku „Start Test“ („Počinje Ispitivanje“) (**slika 24.**).



Slika 24. Počinje ispitivanje [13]

Velika prednost ispitivanja ovim uređajem je što se rezultati ispitivanja mogu vidjeti već za vrijeme ispitivanja, te ako je došlo do pogrešaka tijekom ispitivanja (ako rezultati okvirno puno odstupaju od očekivanih), ispitivanje se u svakome trenutku može prekinuti pritiskom tipke „Pause Test“ („Zaustavi Ispitivanje“) ili „Stop Test“ („Prekini Ispitivanje“) (slika 25.).



Slika 25. Prozor programa prilikom ispitivanja [13]

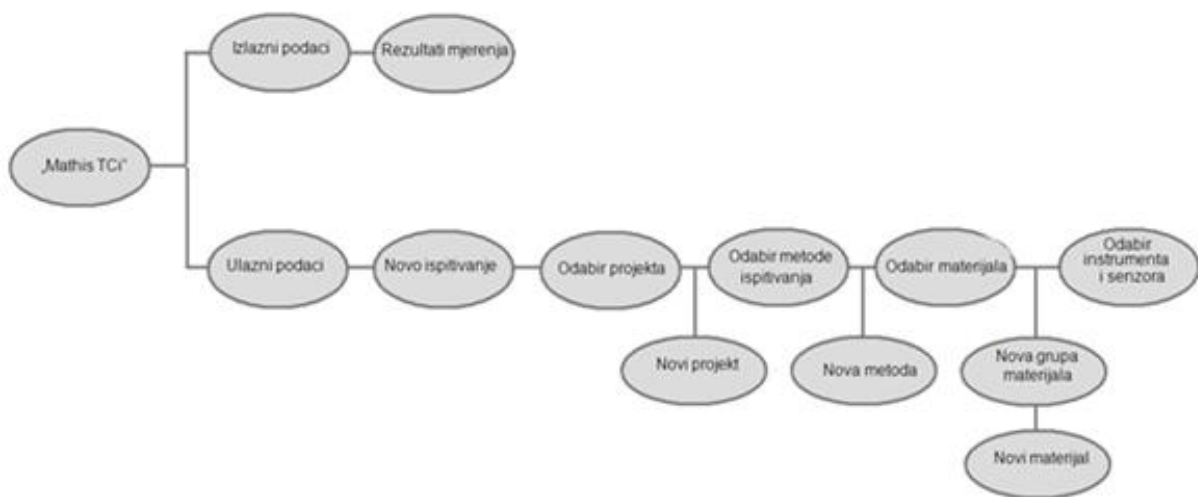
→ *izlazni podaci:*

Na kraju mjerenja dobivaju se rezultati mjerenja koji se spremaju pod rednim brojevima, a prikazani su u gornjem lijevom uglu „prozora“. Dobivena vrijednost je l/m , koja se pomoću kalibracijskih krivulja pretvara, te se dobivaju vrijednosti koeficijenata toplinske provodljivosti i efuzivnosti materijala (uzorka). Također se mogu dobiti i druga toplinska svojstva ispitivanog uzorka kao što su:

- Difuzivnost;
- Specifični toplinski kapacitet;
- Otpor prolaska topline;
- Dubina penetracije;
- Vrijeme početka mjerenja;

- Temperatura okoline;
- Temperatura uzorka za ispitivanje;
- Promjena temperature okoliša.

Na **slici 26.** može se vidjeti tijek rada „Mathis TCI“ uređaja u poligonskom obliku. U jednoj koloni vidi se tijek unosa ulaznih podataka, dok druga kolona predstavlja tijek izlaznih podataka.



Slika 26. Tijek rada „Mathis TCI“ uređaja

4.2.3. *Princip rada uređaja*

„Mathis TCi“ uređaj sastoji se od tri glavna dijela. Jedan od tih dijelova je senzor. Senzor se sastoji od spiralnog grijača sa zaštitnim prstenom koji generira jednodimenzionalni toplinski tok kroz sami materijal (uzorak), te na taj način dolazi do pada napona koji računalo mjeri i prije i tijekom prijenosa topline u smjeru od senzora prema uzorku. Podaci o padu napona registriraju se u kontrolnoj jedinici uređaja, te se preračunavaju u efuzivnost.

Uređaj mjeri promjenu napona ΔV za poznatu jakost struje I koja se dovodi u senzor i za poznati otpor senzora R . Napon senzora izračunava se prema izrazu:

$$V = I \times R \quad [V] \tag{14}$$

Ako je poznata vrijednost odnosa između napona senzora i temperature senzora, onda se može izračunati i promjena napona u vremenu. Tada je potrebno pretvoriti vrijednost promjene temperature senzora u ekvivalentnu promjenu napona pomoću koeficijenta temperaturnog otpora TCR i izraza:

$$R(T) = R_0 \times (1 + \alpha \times T) = R_0 + A \times T \quad [m^2K/W] \tag{15}$$

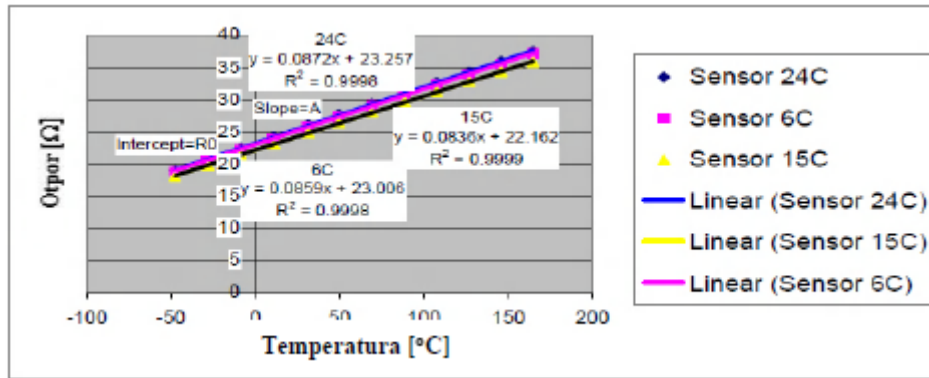
gdje su: $R(T)$ → otpor senzora na temperaturi T ;

R_0 → otpor senzora na temperaturi $^{\circ}C$;

T → temperatura senzora;

α → TCR (koeficijent temperaturnog otpora);

A → nagib pravca korelacije (otpor - temperatura) (**slika 27.**).



Slika 27. Linearni odnos temperature senzora i otpora senzora [13]

Pretpostavi li se jednodimenzionalni toplinski tok u smjeru od senzora prema uzorku, te ako se zanemari otpor na kontaktu senzora i uzorka tada je promjena kontaktne temperature dana izrazom:

$$\Delta T = \frac{1,1284 \times G \times \sqrt{t}}{e_1 + e_2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (16)$$

gdje su: T [$^{\circ}\text{C}$] \rightarrow promjena temperature na površini senzora;

G [W/m^2] \rightarrow snaga toplinskog toka koji se daje senzoru;

t [s] \rightarrow vrijeme mjereno od početka procesa;

e_1 [$\text{W}\sqrt{\text{s}/\text{m}^2\text{K}}$] \rightarrow ekvivalentna efuzivnost senzora;

e_2 [$\text{W}\sqrt{\text{s}/\text{m}^2\text{K}}$] \rightarrow efuzivnost mjenjenog materijala.

Uvrsti li se izraz $R(T) = R_0 + A \times T$ u izraz $V = I \times R$, dobiva se novi izraz, koji ako se

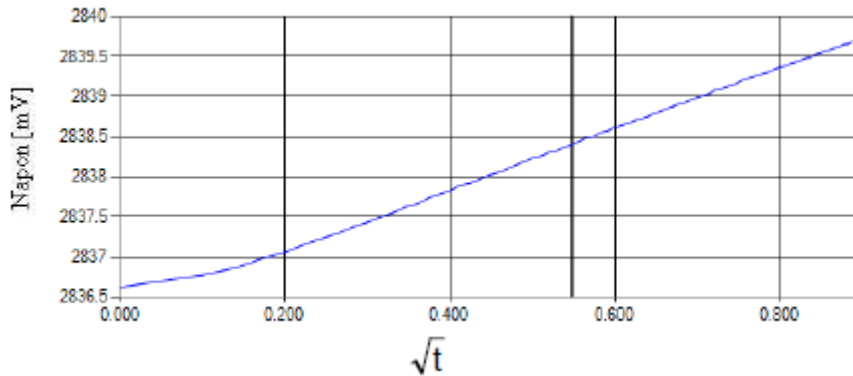
izjednači sa izrazom $\Delta T = \frac{1,1284 \times G \times \sqrt{t}}{e_1 + e_2}$ daje izraz:

$$\Delta V(t) = \frac{1,1284 \times G \times I \times A \times \sqrt{t}}{e_1 + e_2} \quad (17)$$

što se može pisati i u drugom obliku, kao:

$$\Delta V(t) = m \times \sqrt{t} \quad (18)$$

gdje je **m** nagib pravca koji opisuje promjenu napona u odnosu na korijen vremena (**slika 28.**).



Slika 28. Odnos napona i vremena [13]

Tada se vrijednost **m** računa preko izraza koji glasi:

$$m = \frac{1,1284 \times G \times I \times A}{e_1 + e_2} \quad (19)$$

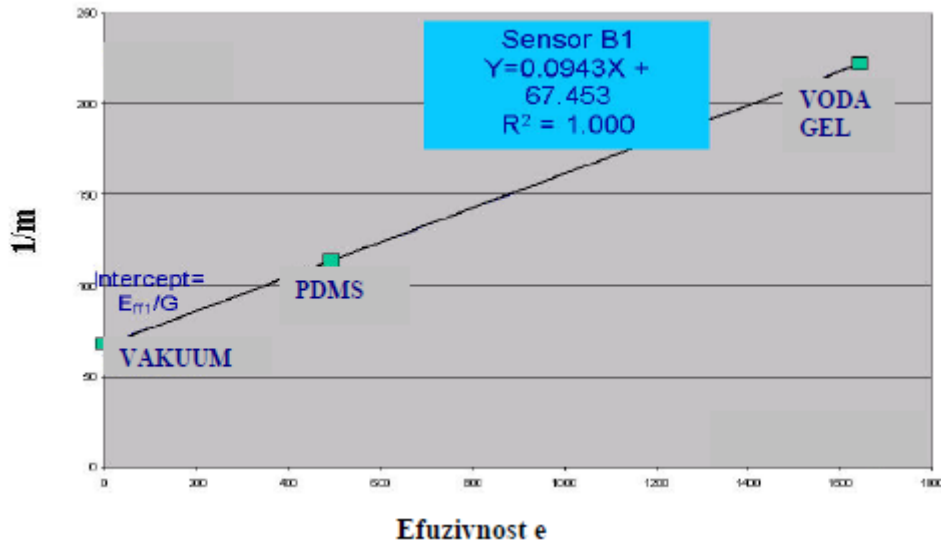
U prethodnom izrazu su vrijednosti svih parametara s desne strane izraza konstantni, a to vrijedi za kratki vremenski period. Tada se efuzivnost **e₂** računa prema sljedećem izrazu:

$$1/m = M \times e_2 + C \quad (20)$$

gdje su: **M** → nagib kalibracijske krivulje efuzivnosti: $M = \frac{1}{1,1284 \times G \times I \times A}$ (21)

C → koeficijent senzora: $C = \frac{e_1}{1,1284 \times G \times I \times A}$ (22)

Za poznatu efuzivnost e_2 , signal senzora daje koeficijente M i C . Ovaj postupak naziva se kalibracijom (slika 29.).



Slika 29. Kalibracijske krivulje u obliku pravca prikazane na dijagramu koji je opisan preko odnosa efuzivnosti i $1/m$ [13]

Kada se dobiju kalibracijske krivulje, odnosno pravci, vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti λ se kalibrira i proračunava na temelju algoritma. Taj se algoritam označava sa oznakom m^* , a koristi se iterativni proces za kalibriranje senzora na temelju poznatih vrijednosti koeficijenata toplinske provodljivosti drugih materijala. Tada je potrebno postaviti izraz:

$$\frac{1}{m-m^*} = a \times \lambda + z \quad (23)$$

gdje je: $a \rightarrow$ nagib pravca;

$z \rightarrow$ odsječak na osi x.

Tek tada se koeficijent toplinske provodljivosti uzorka izračunava preko gornjeg izraza. Na kraju se može zaključiti da se koeficijent toplinske provodljivosti uzorka zapravo računa preko poznate vrijednosti efuzivnosti.

4.2.4. Faktori koji utječu na ispitivanje toplinske provodljivosti

4.2.4.1. Temperatura

Toplinska provodljivost uvelike ovisi o vrijednosti temperature, odnosno o stupnju zagrijanosti samog materijala. Vrijednost toplinske provodljivosti materijala raste s porastom njegove srednje vrijednosti temperature, a uzrok tome je porast kinetičke energije molekula materijala, te zraka koji je sadržan u porama unutar tog istog materijala [12]. Važno je znati kako efuzivnost e ovisi o toplinskoj provodljivosti λ , pa se tako porastom srednje vrijednosti temperature povećava i sama vrijednost efuzivnosti. To vrijedi za slučaj kada je temperatura jedini varijabilni parametar, a svi ostali parametri (vlaga, gustoća, itd.) su konstantni. Prilikom toplinskih proračuna unutar kojih se određuje vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti potrebno je uzeti srednju vrijednost temperature materijala od $+10^{\circ}\text{C}$ [14].

4.2.4.2. Vlaga

Povećanjem vlažnosti materijala uvelike raste i koeficijent toplinske provodljivosti materijala λ . Razlog tome je da voda $\lambda_w = 0,58 \text{ W/mK}$ koja se nalazi unutar pora ima oko 25 puta veći koeficijent toplinske provodljivosti od zraka $\lambda_a = 0,024 \text{ W/mK}$ [15]. Prilikom smrzavanja te iste vode, odnosno prelaskom vode u led $\lambda_l = 2,18 \text{ W/mK}$ u materijalu koeficijent toplinske provodljivosti materijala naglo raste, te je tada vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti materijala veća oko 4 puta u odnosu kada se u porama nalazila voda ili oko 100 puta u odnosu kada se u porama nalazio zrak [14]. Isto vrijedi i za vrijednost efuzivnosti e , čija vrijednost također raste povećanjem vlažnosti materijala. To vrijedi u slučaju kada je vlažnost jedina varijabilna veličina, a sve ostale veličine (temperatura, gustoća, itd.) su konstantne.

4.2.4.3. Gustoća

Povećanjem gustoće, odnosno obujamske mase povećava se vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti λ materijala, i obratno, smanjenjem obujamske mase smanjuje se veličina koeficijenta toplinske provodljivosti λ materijala. Promjena koeficijenta toplinske provodljivosti materijala proizlazi iz činjenice da svaki materijal osim osnovne čvrste tvari sadrži i mnoštvo pora i šupljina ispunjenih zrakom [14]. Što je više pora i šupljina u

materijalu, znači da mu je manja obujamska masa, odnosno gustoća jer su pore i šupljine ispunjene zrakom čiji je koeficijent toplinske provodljivosti $\lambda_a = 0,024 \text{ W/mK}$. Samim time materijal ima manju vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti, te je bolji toplinski izolator jer daje veći otpor prolasku topline.

4.2.4.4. Kontaktno sredstvo

Osim osnovnih fizikalnih parametara koji utječu na veličinu koeficijenta toplinske provodljivosti, utječe i vrsta kontaktnog sredstva. Odabir samog kontaktnog sredstva ovisi o materijalu koji se ispituje. Tako pri ispitivanju različitih vrsta materijala koriste se različita kontaktna sredstva. Prilikom korištenja kontaktnih sredstava mora se u obzir uzeti njihov utjecaj na promjenu veličine koeficijenta toplinske provodljivosti. Kao kontaktno sredstvo koriste se glycol, glycerin, voda (destilirana) ili se kontaktno sredstvo uopće ne koristi u nekim slučajevima.

Tablica 3. Utjecaj kontaktnog sredstva na veličinu koeficijenta toplinske provodljivosti [13]

Kontaktno sredstvo	Utjecaj na koeficijent toplinske provodljivosti i efuzivnost
Glycol	Povećava
Glycerin	Povećava
Voda	Povećava
Bez kontaktnog sredstva	Nema utjecaja

4.2.5. Utjecaj metode na različite grupe materijala

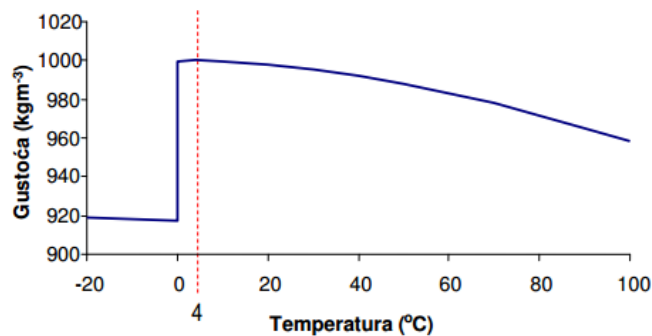
Pošto su različiti materijali sami po sebi različitih gustoća, agregatnih stanja, veličina i oblika, itd., za svaki od njih, prije i tokom mjerenja toplinske provodljivosti metodom „vrućeg diska“ potrebno je postupati na drugačiji način tijekom pripreme uzorka i senzora kako ne bi došlo do pogrešaka koje bi mogle negativno utjecati na izlazne rezultate. Drugim riječima, svaki od njih zahtjeva zasebnu pripremu. Neki uzorci materijala moraju biti većih dimenzija, a neki manjih dimenzija. Također i stanje površine, odnosno „lica uzorka“ utječe na izlazne rezultate ispitivanja. Drugim riječima, svaki uzorak prije ispitivanja mora biti dobro očišćen i precizno

polirane površine. Svaki materijal je zaseban za sebe, i svaki iziskuje posebnu, sebi svojstvenu obradu i pripremu koja je u skladu s njegovim karakteristikama.

4.2.5.1. Tekućine

→ o tekućinama:

Pod pojmom tekućina podrazumijevaju se tvari koje zauzimaju definirani volumen i koje mogu imati slobodne površine, te su one same po sebi nestlačive tvari. Za razliku od krutih tijela, tekućine reagiraju na svaku, pa i najmanju vanjsku silu i vrlo lako mijenjaju svoj oblik. Glavni parametri tekućina su njihova gustoća koja je obično konstantna po cijelom volumenu, temperatura koja je promjenjiva varijabla i viskoznost koja se razlikuje ovisno o vrsti tekućine, a prikazuje se silom otpora koja se javlja u njenoj unutrašnjosti [23]. Također je vrlo važno znati kako se gustoća tekućine, u ovom slučaju vode, mijenja u odnosu na promjenu temperature (**slika 30.**). Preporučene vrijednosti korištenja kalibracijskih krivulja kod ispitivanja tekućina „Mathis TCi“ uređajem kreću se od 0 do 0,6 W/mK [13].



Slika 30. Gustoća vode u ovisnosti o temperaturi [23]

→ bitni zahtjevi:

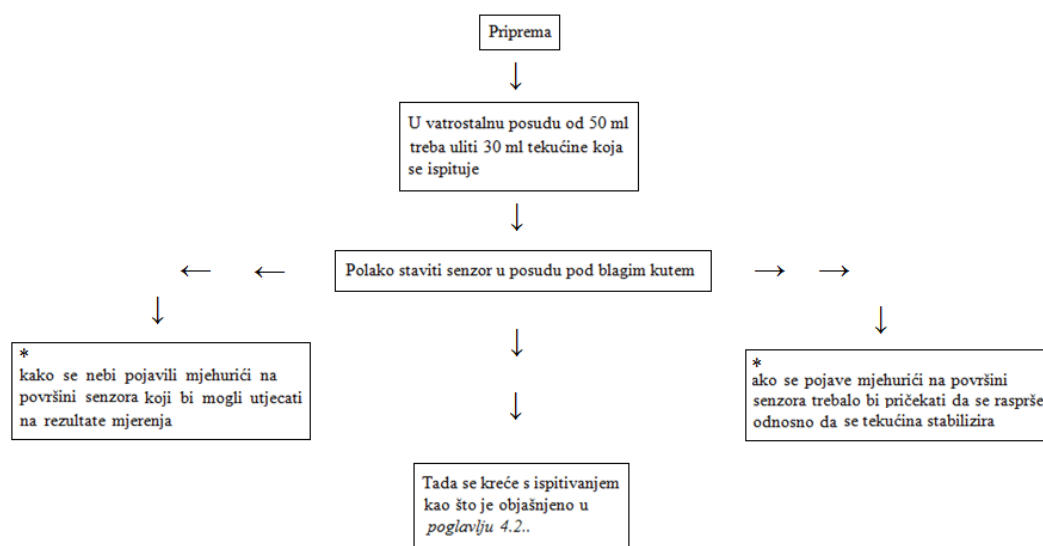
- Minimalna „debljina uzorka“ mora biti 1 mm, odnosno tekućina mora zauzimati površinu od minimalno 1 mm² na površini senzora (ali približno toliko radi različitih vrijednosti viskoznosti tekućina);

- Razina snage uređaja u trenutku ispitivanja tekućina mora biti namještena na 90, zbog očekivane male toplinske provodljivosti;
- Raspon temperature tijekom mjerenja mora biti u strogim granicama od -50 do +192 °C;
- Nije potrebno korištenje kontaktnog sredstva iz razloga jer je tekućina sama po sebi i kontaktno sredstvo i uzorak, odnosno tekućina potpuno naliježe na površinu senzora i sama sobom istiskuje sav zrak sa njihovog kontakta koji je inače eliminiran upotrebom kontaktnog sredstva;
- Prethodno kondicioniranje je potrebno, a postupak prethodnog kondicioniranja uzoraka objašnjen je u *poglavlju 4.2.1. – kondicioniranje uzoraka*

→ *postupak ispitivanja:*

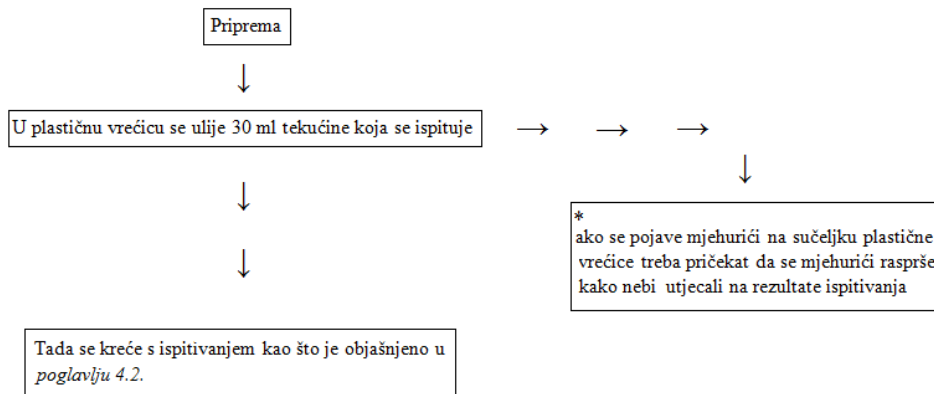
Senzori dolaze u kontakt samo s jednom stranom uzorka/tekućine. Postavljanje tekućine na senzor kod metode vrućeg diska pomoću uređaja „Mathis TCi“ može se obaviti na nekoliko načina, a najpraktičniji od njih su:

1) *Način:*



Slika 31. Opis ispitivanja toplinske provodljivosti tekućina pomoću vatrosnalne posude

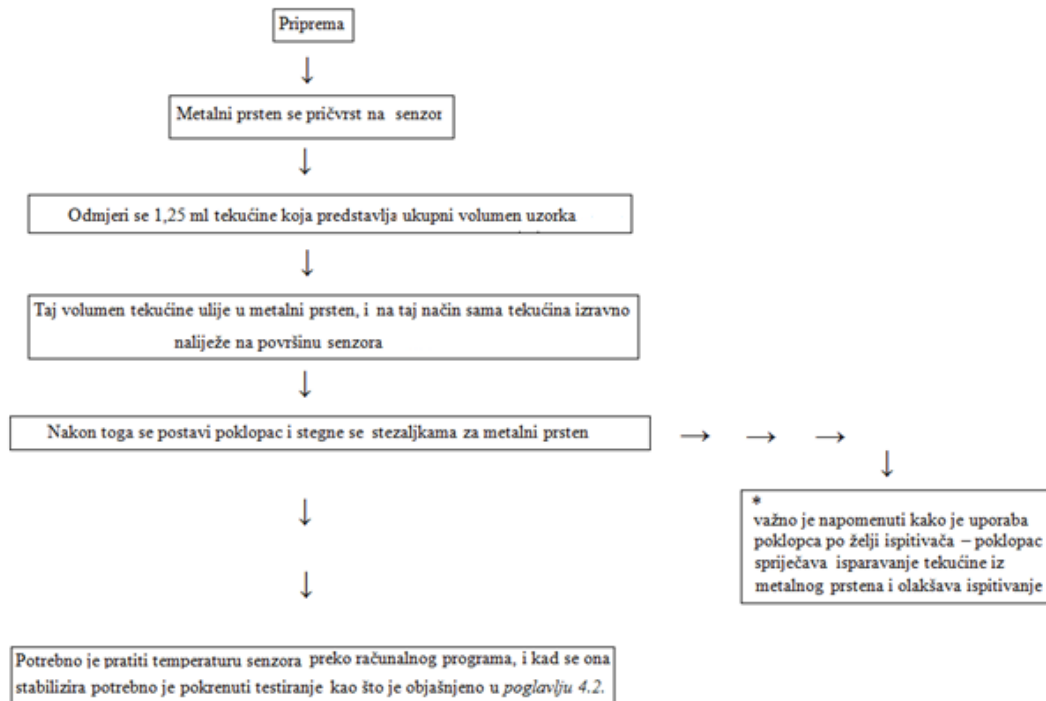
2) *Način:*



Slika 32. Opis ispitivanja toplinske provodljivosti tekućina pomoću plastične vrećice

Razlika u odnosu na prvi način je u tome što se mora oduzeti vrijednost toplinske provodljivosti plastične vrećice kako bi se dobila prava vrijednost toplinske provodljivosti tekućine.

3) *Način:*



Slika 33. Opis ispitivanja toplinske provodljivosti tekućina pomoću metalnog prstena

Na **slici 34.-36.** može se vidjeti tijekom odmjeravanja tekućine pomoću žlice, ulijevanja tekućine u metalni prsten koji je naknadno pričvršćen na senzor, nalijeganja tekućine na senzor i zatvaranje metalnog prstena nakon kojeg se može krenuti s ispitivanjem.



Slika 34. Odmjeravanje tekućine [33]



Slika 35. Nalijeganje tekućine [33]



Slika 36. Zatvaranje [33]

Dodatni dijelovi potrebni za ispitivanje toplinske provodljivosti tekućina su poklopac i razmaknica, a prikazani su na **slici 37.**



Slika 37. Dodatni dijelovi potrebni za ispitivanje tekućina [32]

Od gore prikazanih metoda najpraktičnija metoda je ova pomoću metalnog prstena (posude) koji se pričvrsti na senzor (metalni prsten dolazi u paketu s uređajem).

4.2.5.2. Prahovi

→ o prahovima:

Prahove je teško klasificirati prema poznatim kategorijama jer oni nisu krutine u pravom smislu riječi, niti su tekućine iako s njima u nekim pravcima imaju puno sličnosti. Ponašanje prahova se može okarakterizirati osobinama mehanike newtonovskih fluida, naročito zbog njihove osnovne nehomogene prirode. Prahove se može tretirati kao materijale s promjenljivom gustoćom. Gustoća je jedan od najvažnijih faktora, pogotovo kod analize praha, zbog njene različitosti za svaki materijal uslijed sila koje djeluju unutar istog materijala. Gustoća praha prvenstveno ovisi o veličini i obliku pora unutar smijese praha (**slika 38.**). Većina prahova je nehomogena i anizotropna. Preporučene vrijednosti korištenja kalibracijskih krivulja kod ispitivanja prahova „Mathis TCi“ uređajem kreću se od 0 do 0,6 W/mK [13].



Slika 38. Smjesa praha u posudi [27]

→ bitni zahtjevi:

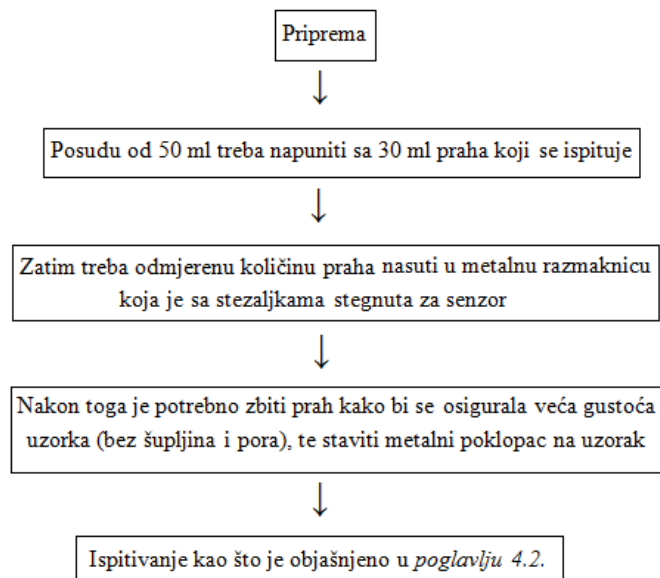
- Minimalna „debljina uzorka“ mora biti 1 mm, odnosno prah mora zauzimati površinu od minimalno 1 mm² na površini senzora;
- Uzorak praha potrebno je pažljivo postaviti na senzor, i dobro zbiti kako bi se osigurala zahtijevana zbijenost uzorka sa što je manje moguće šupljina i pora koje bi mogle utjecati na točnost izlaznih rezultata;

- Razina snage uređaja u trenutku ispitivanja tekućina mora biti namještena na 90, zbog očekivano male toplinske provodljivosti;
- Raspon temperature tijekom mjerenja mora biti u strogim granicama od -50 do +192 °C;
- Nije potrebno kontaktno sredstvo iz razloga jer su prahovi sama po sebi i kontaktno sredstvo i uzorak, odnosno prahovi potpuno naliježu na površinu senzora i sami sobom istiskuju sav zrak sa sučeljka koji je inače eliminiran upotrebom kontaktnog sredstva;
- Prethodno kondicioniranje je potrebno, a postupak prethodnog kondicioniranja uzoraka objašnjen je u *poglavljju 4.2.1. – kondicioniranje uzoraka*.

→ *postupak ispitivanja:*

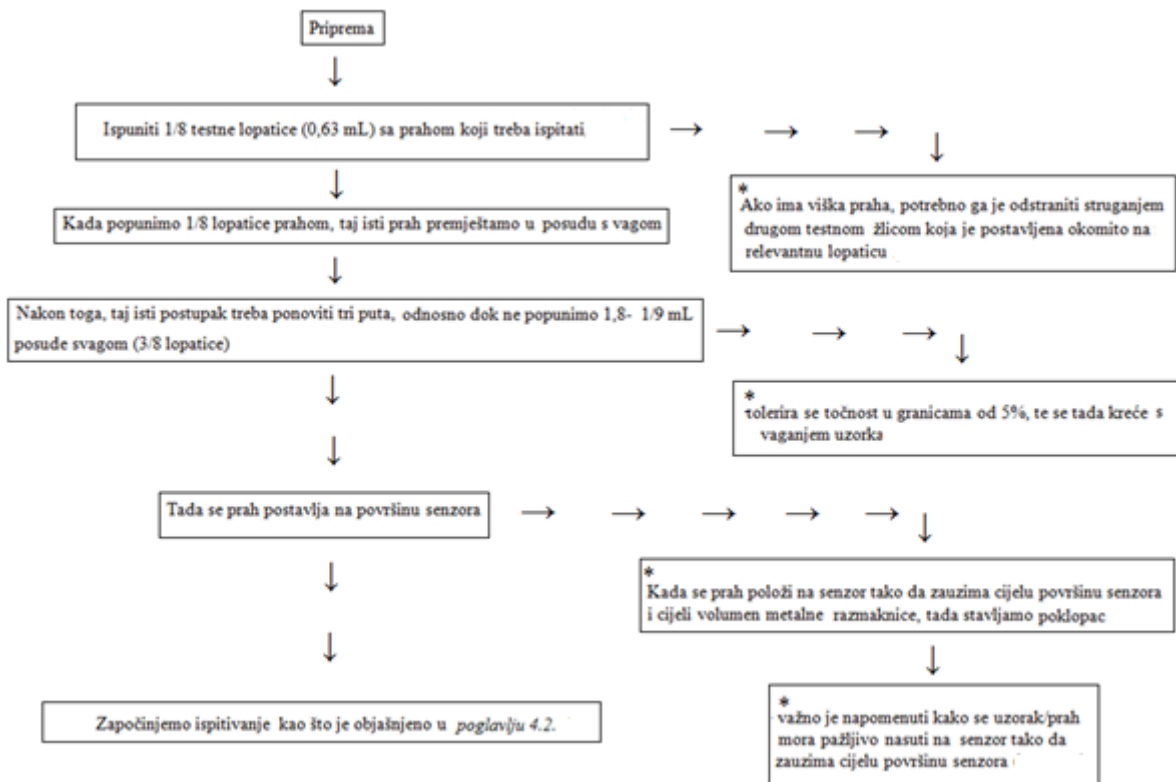
Senzori dolaze u kontakt samo s jednom stranom uzorka/praha. Postavljanje praha na senzor kod metode vrućeg diska pomoću uređaja „Mathis TCi“ može se obaviti na više načina, a najpraktičniji od njih su:

1) *Način:*



Slika 39. Opis ispitivanja toplinske provodljivosti prahova pomoću metalne razmaknice

2) Način:



Slika 40. Opis ispitivanja toplinske provodljivosti prahova pomoću metalnog prstena

Dodatna oprema koja je potrebna za provedbu ispitivanja prahova je ista kao i kod ispitivanja tekućina, te je ona prikazana na **slici 37.**, *poglavlje 4.2.5.1 - tekućine.* [19].



Slika 41. Uzimanje uzoraka [19]



Slika 42. Stavljanje uzorka u posudu s vagom [19]



Slika 43. Postavljanje uzorka na senzor [19]



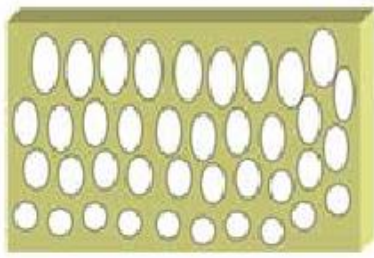
Slika 44. Postavljanje poklopca na uzorak [19]

4.2.5.3. Pjene i gelovi

→ o pjenama i gelovima:

Pjene su materijali koje karakterizira njihova mala gustoća, odnosno obujamska masa. To su tvari kod kojih je glavna karakteristika da posjeduju više ili manje velike pore i šupljine, a koje u krajnjoj liniji određuju vrijednost mase same pjene [24]. Preporučene vrijednosti korištenja kalibracijskih krivulja kod ispitivanja pjena „Mathis TCi“ uređajem kreću se od 0,04 do 0,09 W/mK [13].

Gelovi se sastoje od finih niti ili slojeva emulzija krutina i plinova. U međuprostorima te mrežaste strukture uklopljene su molekule vode [25]. Preporučene vrijednosti korištenja kalibracijskih krivulja kod ispitivanja gelova „Mathis TCi“ uređajem kreću se od 0,04 do 0,09 W/mK [13].



Slika 45. Pjenasti oblici raznih granulacija [32]



Slika 46. Gel materijal (aerogel) [31]

→ *bitni zahtjevi:*

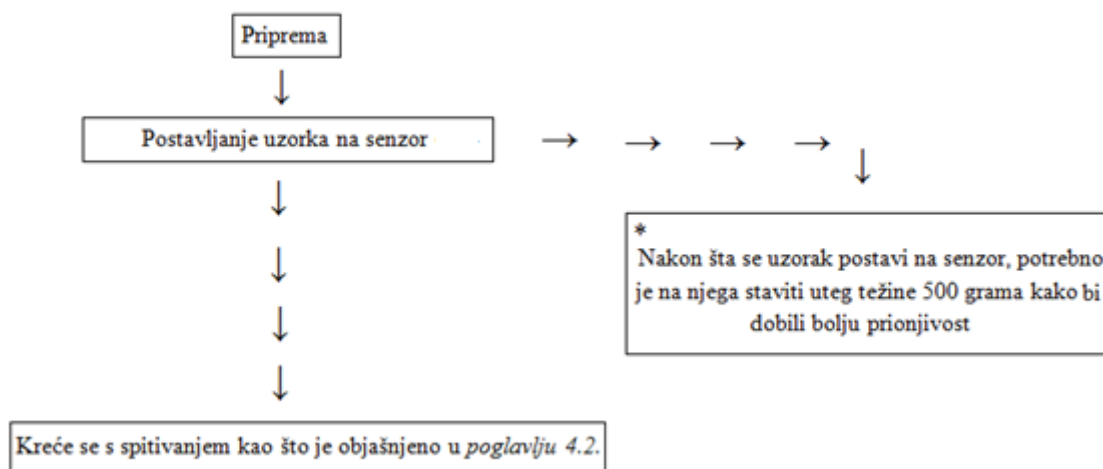
- Minimalna debljina „uzorka“ mora biti najmanje 2 mm;
- Uzorak pjene ili gela potrebno je pažljivo postaviti na senzor, te je na sami uzorak potrebno staviti predmet određene težine kako bi uzorak bolje nalijegao na površinu senzora;
- Razina snage uređaja u trenutku ispitivanja tekućina mora biti namještena na 90, zbog male očekivane toplinske provodljivosti;
- Raspon temperature tokom mjerenja mora biti u strogim granicama od -50 do +192 °C;
- Nije potrebno kontaktno sredstvo iz razloga jer gelovi imaju mogućnost deformiranja (prilagodbe) prema željenom obliku, dok su pjene dosta krhki materijali koji najčešće imaju skoro pa idealno ravnu površinu podloge bez neravnina i defekata, te su u tome slučaju sami po sebi i kontaktno sredstvo i uzorak. Gelovi se deformiraju pod vlastitom težinom i potpuno naliježu na površinu senzora i sami sobom istiskuje sav zrak sa sučeljka koji je inače eliminiran upotrebom kontaktnog sredstva, dok su pjene dosta lagani i krhki materijali na koje se obavezno postavlja uteg od 500 grama (jer uzorci pjene imaju težinu manju od 150 grama) te se na taj način istiskuje zrak koji je neposredno prije bio prisutan na sučeljku površine senzora i uzorka;

- Uzorci pjena i gelova prije ispitivanja obavezno moraju biti očišćeni od prljavština i drugih nečistoća, te pregledani kako na površini ne bi bilo udubljenja ili drugih oblika oštećenja koja mogu negativno utjecati na točnost rezultata ispitivanja;
- Predlaže se pažljivo rukovanje sa uzorcima kako nebi došlo do oštećenja uzoraka;
- Prethodno kondicioniranje je potrebno, a postupak prethodnog kondicioniranja uzoraka objašnjen je u *poglavlju 4.2.1. – kondicioniranje uzoraka*.

→ *postupak ispitivanja:*

Postavljanje pjene ili gela na senzor kod metode vrućeg diska pomoću uređaja „Mathis TCi“ može se obaviti na mnogo načina, a najpraktičniji od njih su:

1) *Način (pjene):*



Slika 47. Opis ispitivanja toplinske provodljivosti pjena i gelova direktnim postavljanjem uzorka na senzor

Uteg težine 500 grama postavljamo na uzorak kako bismo ostvarili bolji kontakt između senzora i uzorka – na taj način se osigurava dovoljno velik pritisak koji uzorku pruža dovoljno dobar kontakt na sučeljku sa senzorom, a upravo zbog toga razloga nije potrebno koristiti kontaktno sredstvo

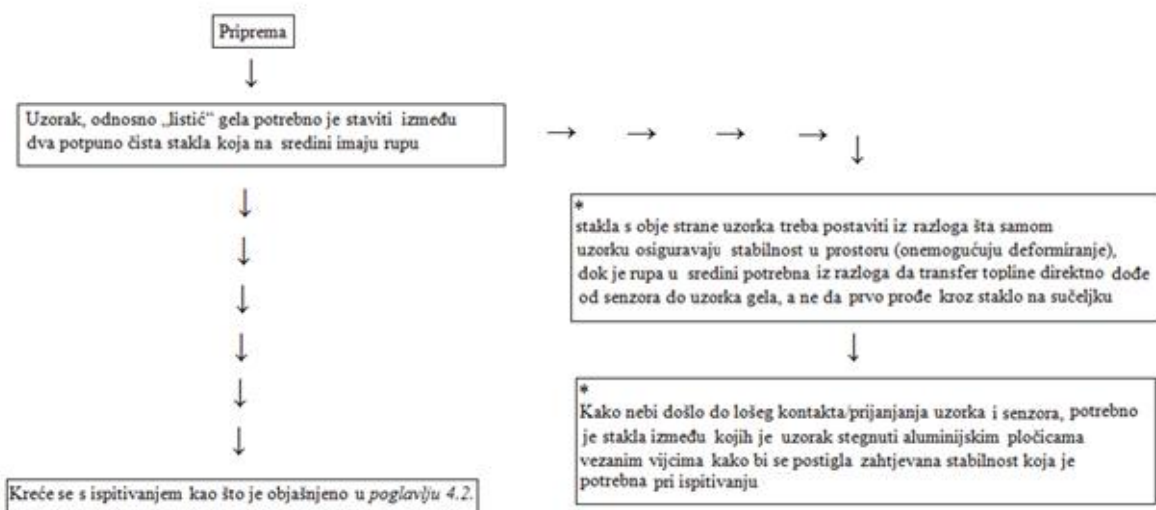
Ispitivač/laborant mora obavezno nositi rukavice kako se toplina s njegova tijela ne bi prenijela na uzorak i na taj način negativno utjecala na ispitivanje. Postavljanje uzorka od pjene na senzor može se vidjeti na **slici 48.**



Slika 48. Postavljanje uzorka na senzor

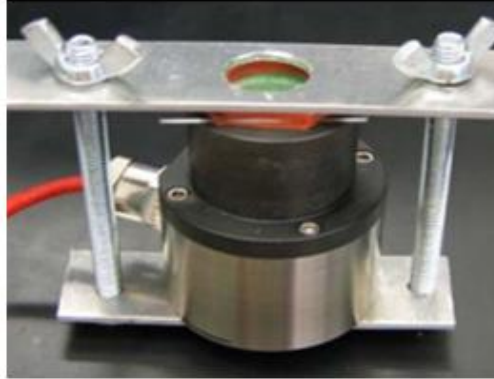
2) *Način (gelovi):*

a) *Učvršćivanje uzorka pomoću stezaljki*



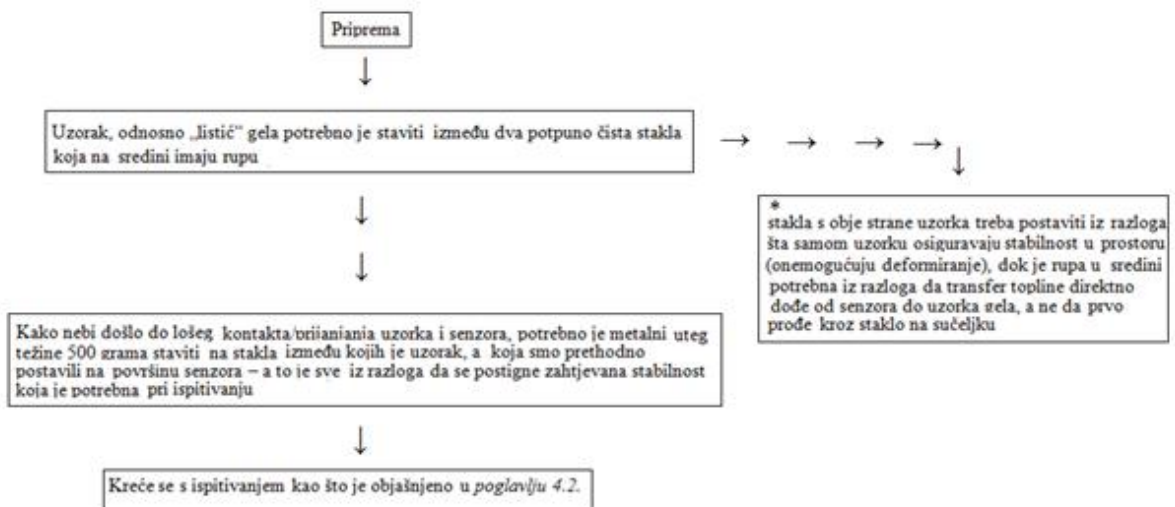
Slika 49. Opis ispitivanja toplinske provodljivosti pjena i gelova naknadnim učvršćivanjem uzorka pomoću metalnih stezaljki

Na **slici 50.** može se vidjeti učvršćivanje gel uzorka na senzor pomoću metalnih stezaljki kako ne bi došlo do deformiranja uzorka, a samim time do prodora zraka na kontakt senzora i uzorka koji bi mogao negativno utjecati na krajnje rezultate ispitivanja.



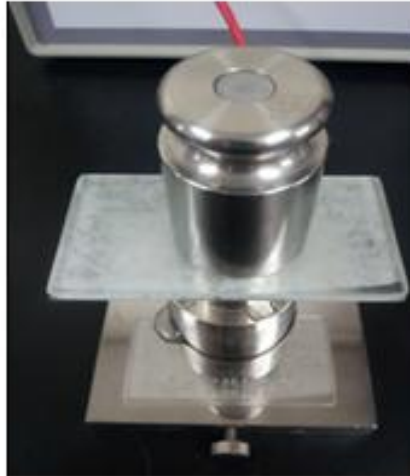
Slika 50. Učvršćivanje uzorka pomoću stezaljki [20]

b) *Učvršćivanje uzorka pomoću utega*



Slika 51. Opis ispitivanja toplinske provodljivosti pjena i gelova pomoću utega

Na **slici 52.** može se vidjeti postavljanje gel uzorka između dva stakla kako ne bi došlo do deformiranja uzorka, a samim time do prodora zraka na kontakt senzora i uzorka koji bi mogao negativno utjecati na krajnje rezultate ispitivanja. Na kraju je potrebno staviti uteg na plohu gornjeg stakla kako bi se ostvario bolji kontakt (**slika 52.**).

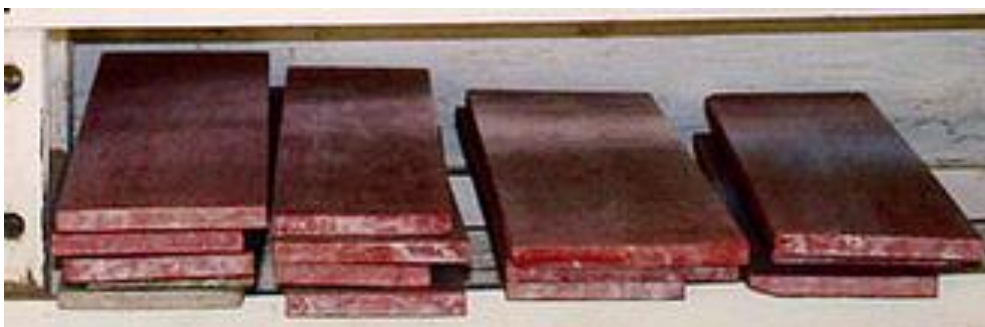


Slika 52. Učvršćivanje uzorka pomoću utega [21]

4.2.5.4. *Keramike*

→ o keramikama:

Keramički materijali su složeni kemijski spojevi koji sadržavaju nemetalne tvari i anorganske elemente. Konačna fizikalna i kemijska svojstva koja imaju pokrivaju široko područje i dobivaju se termičkom obradom ili prešanjem. Zbog svojih ionskih i kovalentnih veza, keramika je obično tvrda, krta, ima visoku temperaturu taljenja, nisku električnu i toplinske vodljivosti, dobru kemijsku i toplinsku stabilnost, te visoku tlačnu čvrstoću [26]. Preporučene vrijednosti korištenja kalibracijskih krivulja kod ispitivanja keramika „Mathis TCi“ uređajem kreću se od 0,2 do 4 W/mK [13].

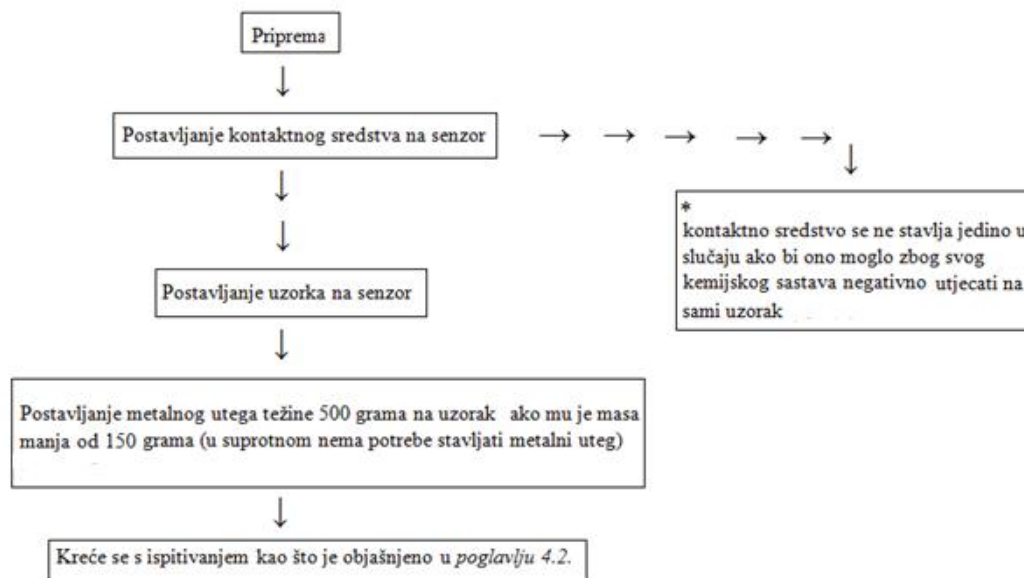


Slika 53. Keramika [35]

→ *bitni zahtjevi:*

- Minimalna debljina „uzorka“ mora biti 5 mm, a ostale dvije dimenzije moraju biti minimalne širine 17 mm;
- Na uzorke težine manje od 150 grama potrebno je staviti metalni uteg težine 500 grama kako bi se postigao bolji kontakt između senzora i uzorka, dok za uzorke težine veće od 150 grama nije potrebno stavljati metalni uteg;
- Razina snage uređaja u trenutku ispitivanja tekućina mora biti namještena na 90, zbog očekivane male toplinske provodljivosti;
- Raspon temperature tokom mjerenja mora biti u strogim granicama od -50 do +192 °C;
- Potrebno je kontaktno sredstvo na kontaktu senzora i uzorka;
- Prethodno kondicioniranje je potrebno, a postupak prethodnog kondicioniranja uzoraka objašnjen je u *poglavljju 4.2.1. – kondicioniranje uzoraka.*

→ *postupak ispitivanja:*

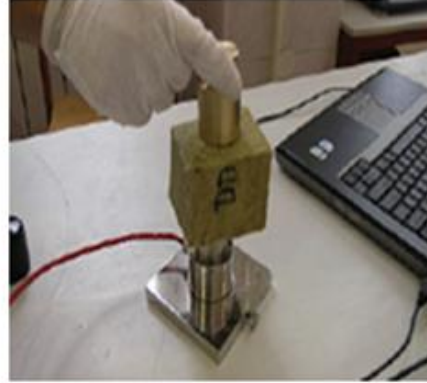


Slika 54. Opis ispitivanja toplinske provodljivosti keramika direktnim načinom postavljanja uzorka na senzor

Prilikom stavljanja metalnog utega na uzorak posebnu pažnju trebamo posvetiti stavljanju metalnog utega na uzorak kako ne bi došlo do oštećenja senzora, jer je površina senzora napravljena od veoma krhkog materijala (**slika 55.-56.**).



Slika 55. Kontaktno sredstvo i uzorci [29]



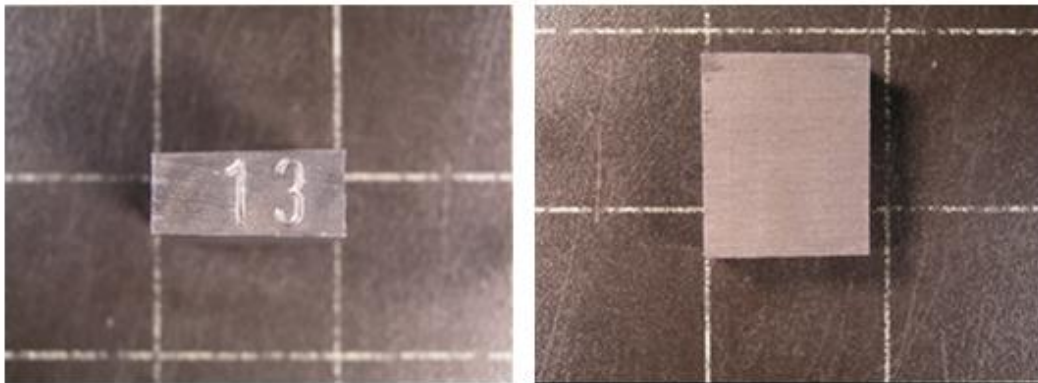
Slika 56. Postavljanje utega na uzorak [29]

4.2.5.5. *Metali*

→ o metalima:

Metali su čvrsti, tvrdi i sjajni materijali kod kojih su atomi gusto i dobro povezani jakim metalnim vezama. Tu dobru homogenu matricu čini njihov kemijski sastav koji ih prema tome svrstava u kategoriju jako dobrih toplinskih vodiča. Pošto čisti metali uglavnom imaju loša kemijska i mehanička svojstva, potrebno ih je miješati, odnosno legirati sa drugim materijalima kako bi se ostvarila veća čvrstoća, bolja obradivost, bolja toplinska svojstva ili otpornost na korozivna djelovanja. Miješanjem metala i drugih elemenata, kojih može biti jedan ili više ovisno o tome koja poboljšana svojstva zahtijevamo i očekujemo, dobivamo legure. Oni su sami po sebi jedni od najboljih vodiča topline, odnosno imaju mali otpor prolasku topline. Dobra toplinska provodljivost metala ostvaruje se iz razloga postojanja slobodnih elektrona unutar same metalne matrice. Slobodni elektroni svojim gibanjem izjednačuju temperaturu u svim točkama grijanog ili hlađenog dijela metalne matrice. Taj proces izjednačavanja temperature se događa iz smjera područja više temperature prema smjeru područja gdje je prisutna niža temperatura. Toplinska provodljivost čistog metala pada u slučaju povećanog rasipavanja slobodnih elektrona, a uzrok tome je povećanje temperature

same matrice čistog metala. Također, povećanjem legiranosti čistog metala drugim elementom koeficijent toplinske vodljivosti metala drastično opada. Uzrok toga je gubitak, odnosno smanjenje homogenosti čiste matrice metala čime se povećava rasipavanje slobodnih elektrona. Preporučene vrijednosti korištenja kalibracijskih krivulja kod ispitivanja metala „Mathis TCi“ uređajem kreću se od 6 do 110 W/mK [13].

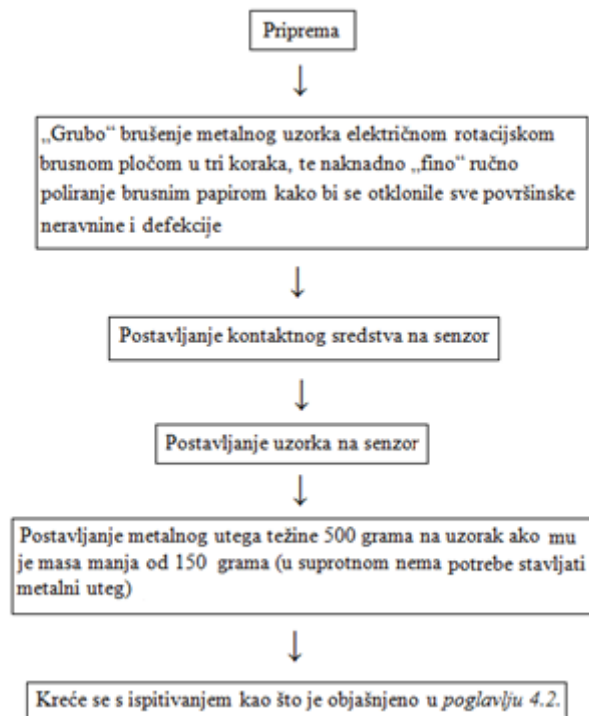


Slika 57. Metalni uzorak prikazan s dvije okomite strane

→ *bitni zahtjevi:*

- Preporuča se minimalna debljina „uzorka“ od 9 mm (5 do 12 mm), a ostale dvije dimenzije moraju biti minimalne širine 17 mm;
- Na uzorke težine manje od 150 grama potrebno je staviti metalni uteg težine 500 grama kako bi se postigao bolji kontakt između senzora i uzorka, dok za uzorke težine veće od 150 grama nije potrebno stavljati metalni uteg;
- Razina snage uređaja u trenutku ispitivanja tekućina mora biti namještena na 125, zbog očekivano velike toplinske provodljivosti;
- Raspon temperature tokom mjerenja mora biti u strogim granicama od -50 do +192 °C;
- Potrebno je kontaktno sredstvo na kontaktu senzora i uzorka;
- Prethodno kondicioniranje je potrebno, a postupak prethodnog kondicioniranja uzoraka objašnjen je u *poglavlju 4.2.1. – kondicioniranje uzoraka.*

→ postupak ispitivanja:



Slika 58. Opis ispitivanja toplinske provodljivosti metala direktnim načinom postavljanja uzorka na senzor

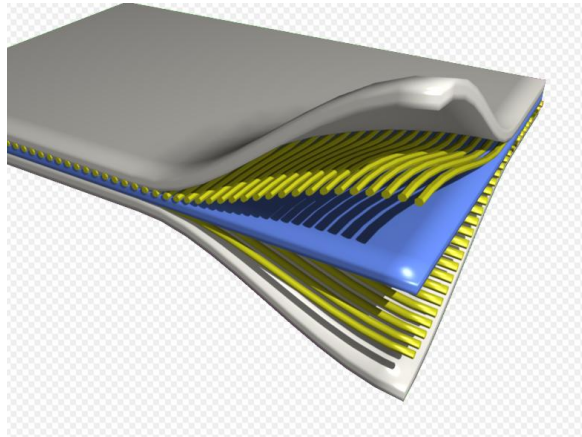
Važno je napomenuti kako se kontaktno sredstvo ne stavlja jedino u slučaju ako bi ono moglo zbog svog kemijskog sastava negativno utjecati na sami uzorak (**slika 47.**). Također je važno naglasiti kako prilikom stavljanja metalnog utega na uzorak posebnu pažnju treba posvetiti stavljanju metalnog utega na uzorak kako ne bi došlo do oštećenja senzora, jer je površina senzora napravljena od veoma krhkog materijala

4.2.5.6. Kompoziti

→ o kompozitima:

Kompoziti su materijali sastavljeni iz drugih, već gotovih materijala, uglavnom kao njihova mješavina, kako bi zajedno imali nova svojstva, odnosno ona svojstva koja svaki materijal sam ne bi imao. Sastavljeni su od najmanje dva materijala (komponentata) - jedna je

komponenta osnovni materijal, a druga je komponenta materijal kojim se modificiraju svojstva osnovnog materijala (npr. vlakna ili čestice) [28]. Preporučene vrijednosti korištenja kalibracijskih krivulja kod ispitivanja kompozita „Mathis TCi“ uređajem kreću se od 0,2 do 4 W/mK [13].

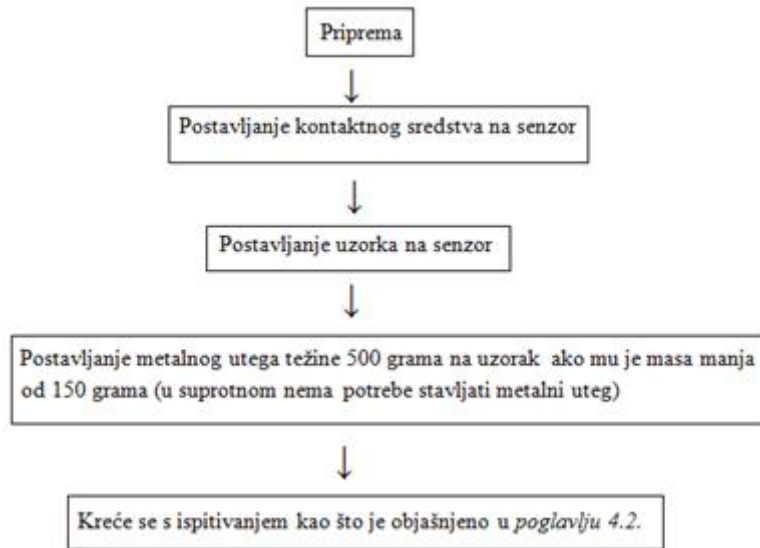


Slika 59. Kompozitni materijal [36]

→ *bitni zahtjevi:*

- Preporuča se minimalna debljina „uzorka“ od 5 mm, a ostale dvije dimenzije moraju biti minimalne širine 17 mm;
- Na uzorke težine manje od 150 grama potrebno je staviti metalni uteg težine 500 grama kako bi se postigao bolji kontakt između senzora i uzorka, dok za uzorke težine veće od 150 grama nije potrebno stavljati metalni uteg;
- Razina snage uređaja u trenutku ispitivanja tekućina mora biti namještena na 90, zbog očekivano male toplinske provodljivosti;
- Raspon temperature tokom mjerenja mora biti u strogim granicama od -50 do +192 °C;
- Potrebno je kontaktno sredstvo između senzora i uzorka;
- Potrebno je prethodno kondicioniranje, a postupak prethodnog kondicioniranja uzoraka objašnjen je u *poglavlju 4.2.1. – kondicioniranje uzoraka.*

→ postupak ispitivanja:



Slika 60. Opis ispitivanja toplinske provodljivosti kompozita direktnim načinom postavljanja uzorka na senzor

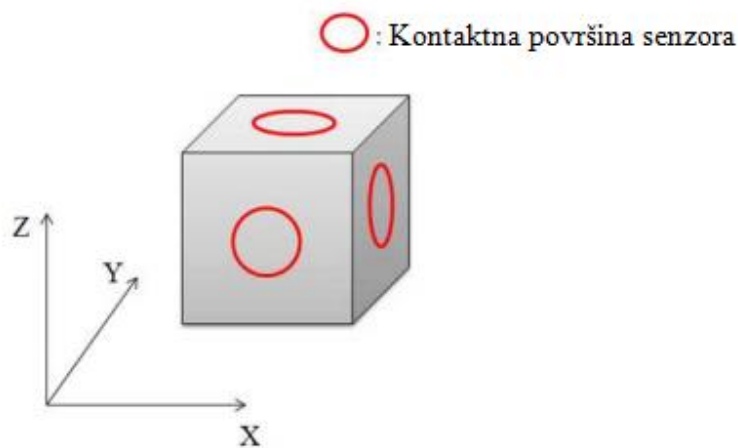
Kontaktno sredstvo se ne stavlja jedino u slučaju ako bi ono moglo zbog svog kemijskog sastava negativno utjecati na sami uzorak. Prilikom stavljanja metalnog utega na uzorak posebnu pažnju trebamo posvetiti stavljanju metalnog utega na uzorak kako ne bi došlo do oštećenja senzora, jer je površina senzora napravljena od veoma krhkog materijala [22].



Slika 61. Postavljanje metalnog utega na kompozitni uzorak [34]

→ napomena:

Kompozitni materijali su materijali koji se dobivaju miješanjem dvaju ili više materijala, te spadaju u skupinu anizotropnih materijala. Oni se najčešće proizvode metodom prešanja pod tlakom. Zbog različitih gustoća materijala koji su sadržani u samom kompozitu, te različite orijentacije samih vlakana materijala, kod ovakvih vrsta materijala je specifično to što se dobivaju različite vrijednosti toplinske provodljivosti u različitim smjerovima. Upravo zbog toga razloga potrebno je provesti ispitivanje u sva tri smjera (**slika 62.**).



Slika 62. Ispitivanje kompozitnog materijala u sva tri smjera

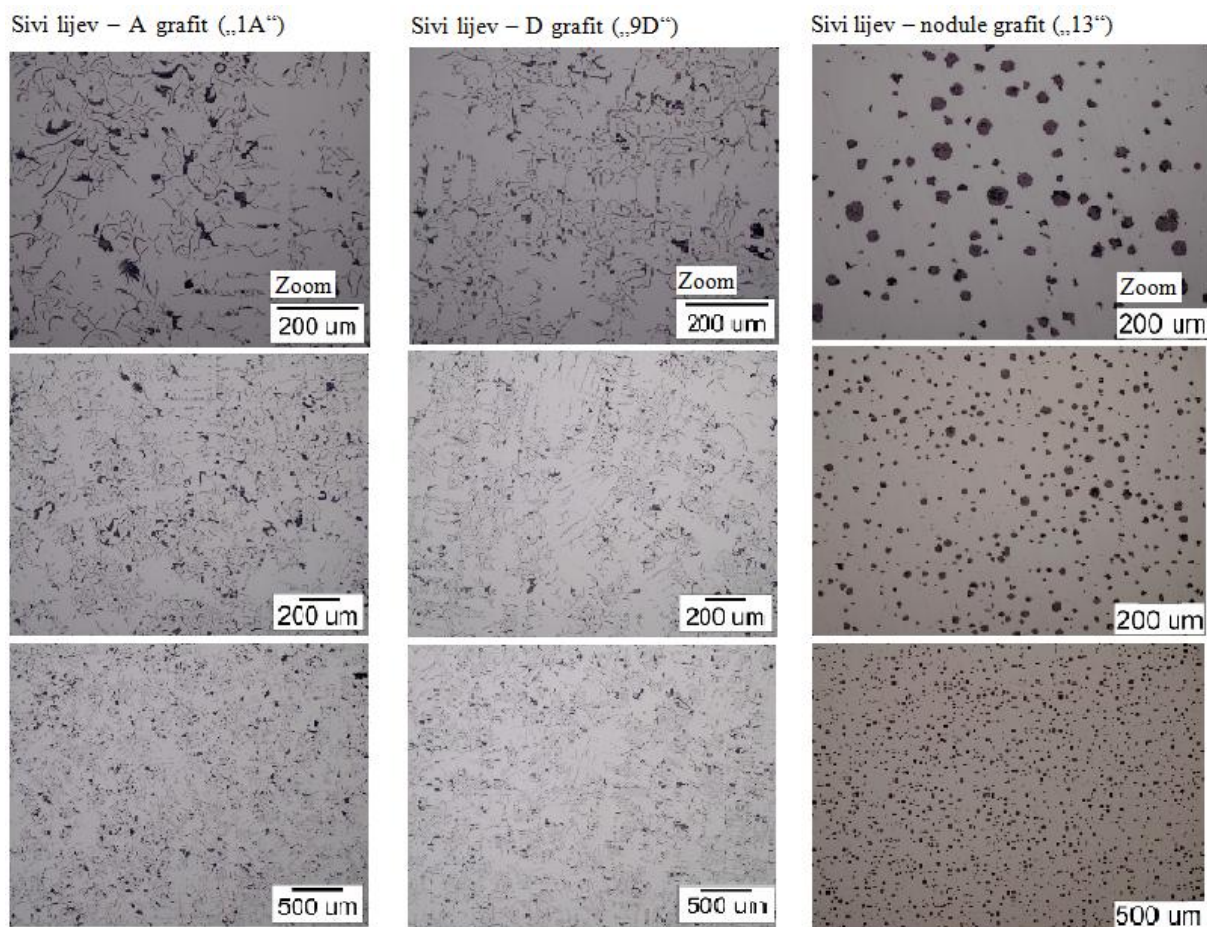
Nakon što se dobiju izlazni (konačni) rezultati ispitivanja, uspoređuju se, i dobivaju se informacije u kojem smjeru materijal ima najveću vrijednost toplinske provodljivosti, a u kojem smjeru ima najmanju vrijednost toplinske provodljivosti. Ispitivanje anizotropnih materijala kao što su kompozitni materijali iziskuje više vremena pošto se ispituju u sva tri smjera, te je kompliciraniji zbog same usporedbe, obrade i dobivanja rezultata od izotropnih materijala.

5. Ispitivanje toplinske provodljivosti materijala metodom vrućeg diska pomoću „Mathis TCI“ uređaja

- *uzorci sivog lijeva „13“; „1A“; „9D“*

Sivi lijev je legura željeza i ugljika, gdje se ugljik izlučuje iz legure u obliku grafita za vrijeme skrućivanja ili za vrijeme žarenja matrice. Na sposobnost izlučivanja grafita utječu kemijski sastav, način skrućivanja i sama obrada legure. Bitno je napomenuti da što je veća količina ugljika i silicija u leguri sa željezom, to se izlučuje više grafita i veći su sami grafitni listići unutar matrice. Količina ugljika unutar sastava sivog lijeva varira od 2% do 4,5%, dok količina silicija varira od 0,5% do 3,5%. Grafit se klasificira prema obliku, rasporedu i veličini. Prema obliku i rasporedu on može imati lisnat (lameliran), kugličast (nodulast) i čvorast oblik. Lisnati (lamelirani) grafiti se dijele u 5 skupina od A do E: tip A ima jednoličan izgled, tip B je gnijezastog izgleda (oblika), tip C je nadeutektski (stupanj zasićenosti sivog lijeva ugljikom i silicijem je visok), a tipovi D i E su pothlađeni grafiti. Prema veličini se grafiti dijele na 8 klasa. U 1. klasu spadaju grafiti koji su kod povećanja mikroskopom do 100 puta, veći od 100 μm , dok u 8. klasu spadaju listići veći od 1,5 mm.

Tijekom ispitivanja korišteni su uzorci sivog lijeva sa različitim formacijama i udjelom grafita unutar same matrice. Uzorak „13“ je legura željeza i kugličastog (nodulastog) grafita s udjelom od 6,70% grafita unutar lijeva, uzorak „1A“ je legura željeza i A grafita koji ima jednoličan izgled s udjelom od 10,50% grafita unutar lijeva, dok je uzorak „9D“ legura željeza i D grafita koji je pothlađena vrsta grafita s udjelom od 8,90% grafita unutar lijeva. Na **slici 63.** mogu se vidjeti strukture legura željeza i A grafita, željeza i D grafita, te željeza i nodula grafita pri mikroskopskom povećanju od 200 μm - zoom, 200 μm i 500 μm .



Slika 63. Vrste struktura grafita

Uzorci su prije ispitivanja s jedne strane bili podvrgnuti poliranju brusnim papirom gradacije P1200/P2500/P4000, a s druge strane grubo obrađeni brusnim papirom gradacije P1200/P2500. Tijekom samog ispitivanja obavljena su po 3 mjerenja s obje strane uzoraka (polirana i grubo obrađena strana uzorka). Unutar svakog od 3 mjerenja napravljena su po 10 ispitivanja, a između svakog ispitivanja uzorak se prirodno hladio u trajanju od 1 minute. Zbog velikog odstupanja prvog ispitivanja unutar svakog mjerenja, odbačeno je prvo ispitivanje, dok su ostalih devet ispitivanja uzeti kao relevantne vrijednosti. Kao kontaktna sredstva koristila su se voda i glycol, dok se za kalibracijsku krivulju odabrala ona za keramiku (glycol) i vodu. Uzorci su ispitani u suhom stanju na sobnoj temperaturi. Na **slici 64.** prikazani su uzorci sivog lijeva i grafita neposredno prije ispitivanja.



Slika 64. Pogled na uzorke sivog lijeva

Tablica 4. Uzorci sivog lijeva s različitim strukturama grafita ispitani „Mathis TCi“ uređajem

UZORAK	„13“	„1A“	„9D“
Vrsta grafita	nodule grafita	A grafit	D grafit
Udio grafita [%]	6,70	10,50	8,90
Dimenzije [mm]	10,72 / 30,89 / 25,87	12,32 / 27,83 / 23,41	10,98 / 27,87 / 26,05
Masa [kg]	0,059	0,056	0,055
Gustoća [kg/m ³]	6892,52	6959,12	6838,14

- *uzorci mort/ovčja vuna „3%-ME 2“; „5%-ME 2“; „10%-ME 2“*

Ovčja vuna je prirodni materijal koji se u građevinarstvu koristi kao toplinska i zvučna izolacija. Ona se koristi za izolaciju vanjskih zidova i krovništa, te kao obloga za unutarnje zidove u kombinaciji s drugim materijalima. Velika prednost ovčje vune je to što je ona potpuno prirodni materijal, te se u potpunosti može zbrinuti i reciklirati. Kvaliteta ovčje vune prvenstveno ovisi o njenom kemijskom sastavu i strukturi proteina unutar samih vlakana, a samim time ona spada u skupinu proteina pod nazivom keratini. Čista ovčja vuna sadrži 82% keratinskih proteina, koji sadrže veliku količinu sumpora (3%). Velika količina sumpora unutar keratina ovčjoj vuni daje veliku čvrstoću zbog jakih disulfidnih veza [30]. Važno je napomenuti kako su masti iz vlakana ovčje vune topljive u vodi, dok se keratin ne razgrađuje niti je topljiv u vodi.

Mješavina za uzorke mort/ovčja vuna napravljena je od smjese Portland cementa CEM IIB-M SV 42.5N, pijeska granulacije 0/4 mm, vapna, gline, metakaolina, kemijskih aditiva (plastifikator, uvučeni zrak, polimeri, stabilizator – dodatak za zadržavanje vode), te vlakana ovčje vune u količinama od 3%, 5% i 10% po volumenu uzorka (**slika 65.**) [30].



Slika 65. Mješavina morta i ovčje vune u svježem stanju [30]

Obavljena su po 3 mjerenja na svakom od 3 uzoraka u suhom i vlažnom stanju (**slika 66.**). Za uzorke „3%-ME 2“ i „5%-ME 2“ napravljena su po 3 mjerenja sa po 10 ispitivanja u trajanju od 1 minute, dok je za uzorak „10%-ME 2“ napravljeno po 3 mjerenja sa po 5 ispitivanja u trajanju od 1 minute. Kao kontaktno sredstvo koristio se glycol, dok se kalibracijska krivulja uzela za keramiku (glycol). Zbog velikog odstupanje prvog ispitivanja unutar svakog mjerenja, odbačeno je prvo ispitivanje, dok su ostalih devet odnosno četiri ispitivanja uzeta kao relevantne vrijednosti



Slika 66. Pogled na uzorke mort/ovčja vuna

Tablica 5. Karakteristike uzoraka mort/ovčja vuna u svježem stanju

KARAKTERISTIKE UZORAKA U SVJEŽEM STANJU	3%-ME 2	5%-ME 2	10%-ME 2
Konzistencija (flow table) [mm]	148	150	143
Količina vode potrebna za obradivost > 140 mm [ml/dm ³]	219,20	287,40	488,40
Temperatura mješavine [°C]	23,40	22,40	22,00
Sadržaj zraka [%]	30	40	34

Također je važno napomenuti kako su uzorci ispitani na sobnoj temperaturi u suhom i vlažnom stanju, prilikom čega su uzorci 90 minuta držani pod vodom kako bi se uzorak natopio vodom. Uslijed upijanja vode u uzorak, uzorku se povećala masa. Samim time što je veća masa uzorka, veća mu je i gustoća koja direktno utječe na vrijednosti toplinske vodljivosti materijala.

Tablica 6. Uzorci mort/ovčja vuna ispitivani „Mathis TCi“ uređajem

UZORAK	3%-ME 2		5%-ME 2		10%-ME 2	
	SUHO	VLAŽNO	SUHO	VLAŽNO	SUHO	VLAŽNO
Volumenska količina vlakana [%]	3		5		10	
Dimenzije [mm]	39,87/40,00/158,97		41,31/39,70/159,50		40,41/40,27/159,91	
Masa [kg]	0,33	0,35	0,29	0,34	0,26	0,35
Gustoća [kg/m ³]	1301,64	1418,97	1108,26	1293,89	1008,36	1353,85

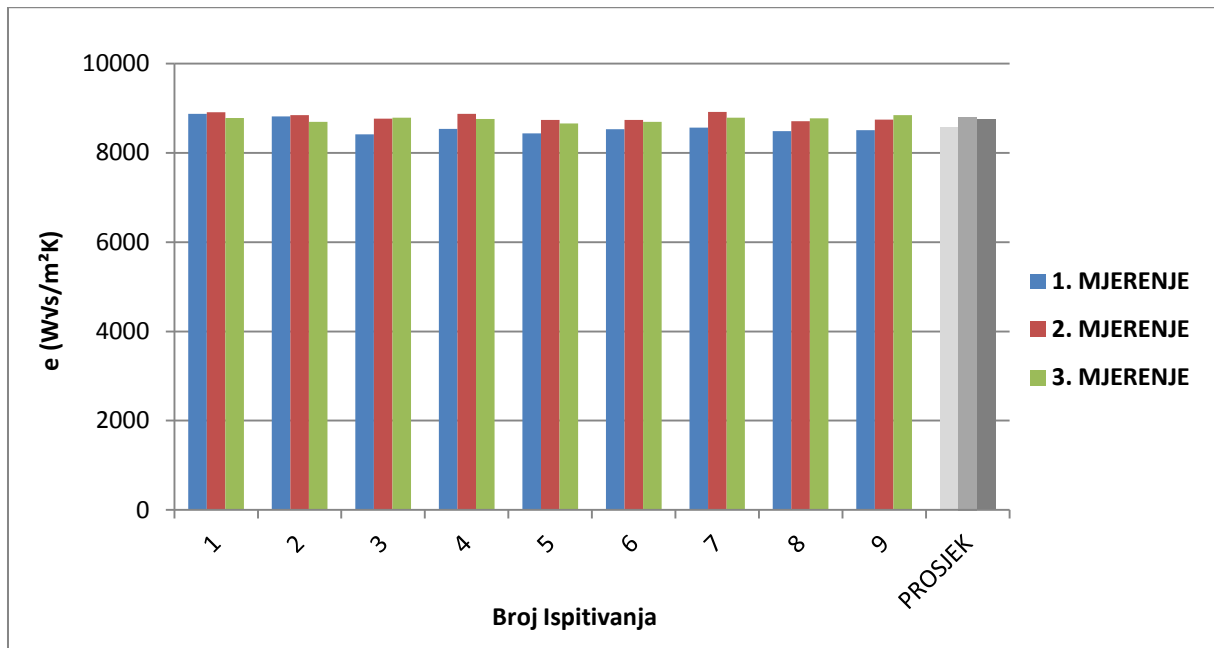
5.1. Analiza rezultata dobivenih ispitivanjem

5.1.1. Sivi lijev „13“ (glycol) – glatka strana

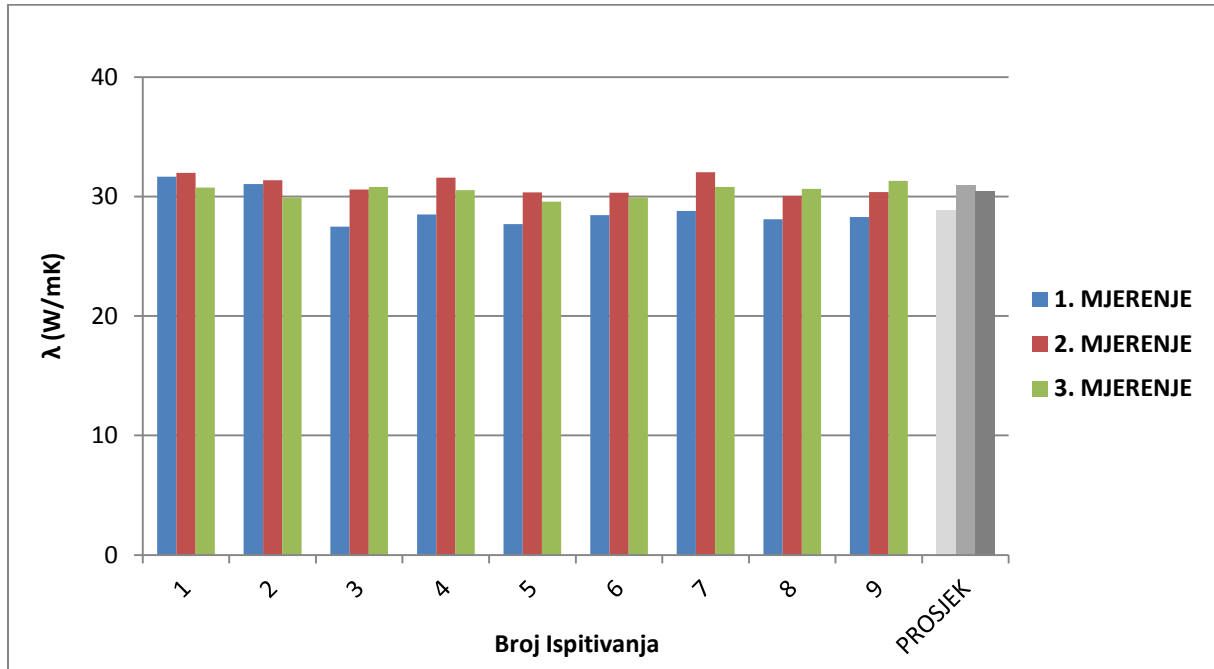
Rezultati ispitivanja glatke strane uzorka sivog lijeva „13“ sa kontaktnim sredstvom glycol prikazani su u **tablici 7.**, a grafički su prikazani na **slikama 67-70:**

Tablica 7. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „13“ (glycol) – glatka strana uzorka

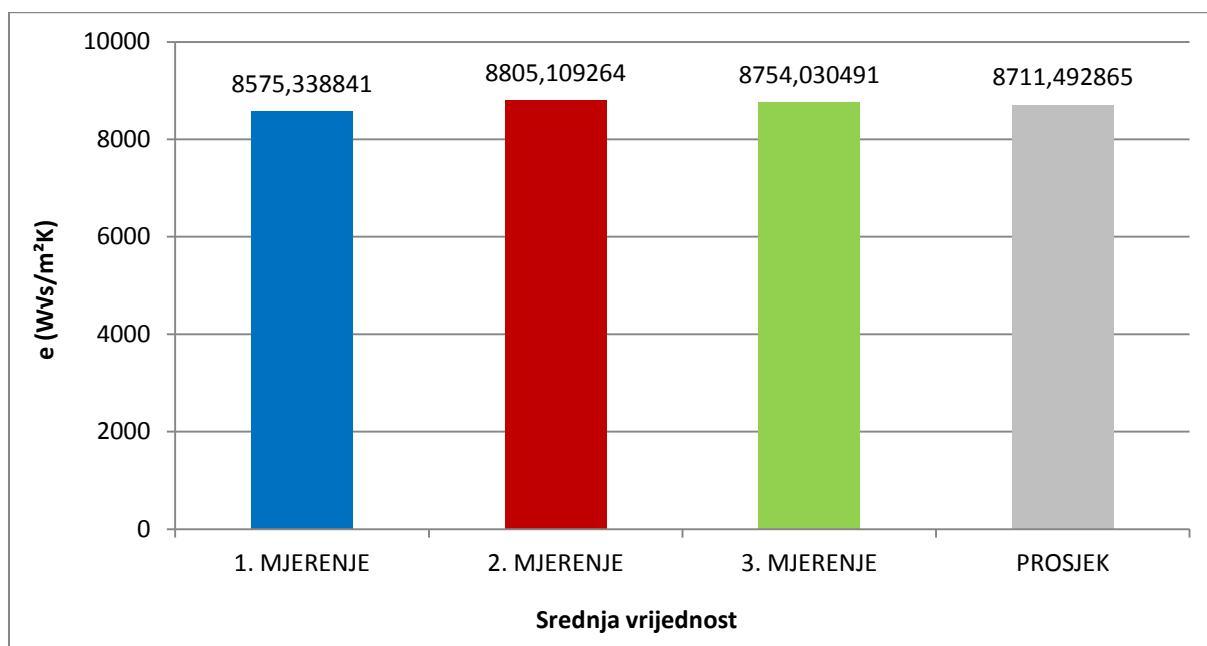
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	8878,028775	31,6621673	8910,812808	31,984349	8785,10456	30,769271
2	8814,574116	31,0492445	8847,188345	31,362534	8692,954083	29,912354
3	8414,719258	27,4844362	8767,551145	30,603891	8790,000868	30,815586
4	8536,217343	28,5164100	8871,345474	31,596953	8761,465802	30,546796
5	8440,542478	27,7002604	8740,164393	30,347901	8656,644777	29,582222
6	8529,62001	28,4592805	8737,703785	30,325022	8695,43574	29,935071
7	8568,532949	28,7981070	8917,669906	32,052220	8789,50139	30,810858
8	8487,075025	28,0939148	8709,775643	30,066720	8771,147085	30,637687
9	8508,739619	28,2793076	8743,771878	30,381481	8844,020111	31,331940
SREDNJA VRIJEDNOST	8575,338841	28,8936809	8805,109264	30,969008	8754,030491	30,482421
STANDARDNA DEVIJACIJA	161,5226007	1,46109745	81,41233277	0,7783439	59,80352589	0,5574511
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	1,88%	5,06%	0,92%	2,51%	0,68%	1,83%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	8711,492865			30,11503679		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	100,9128198			0,93229751		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	1,16%			3,13%		



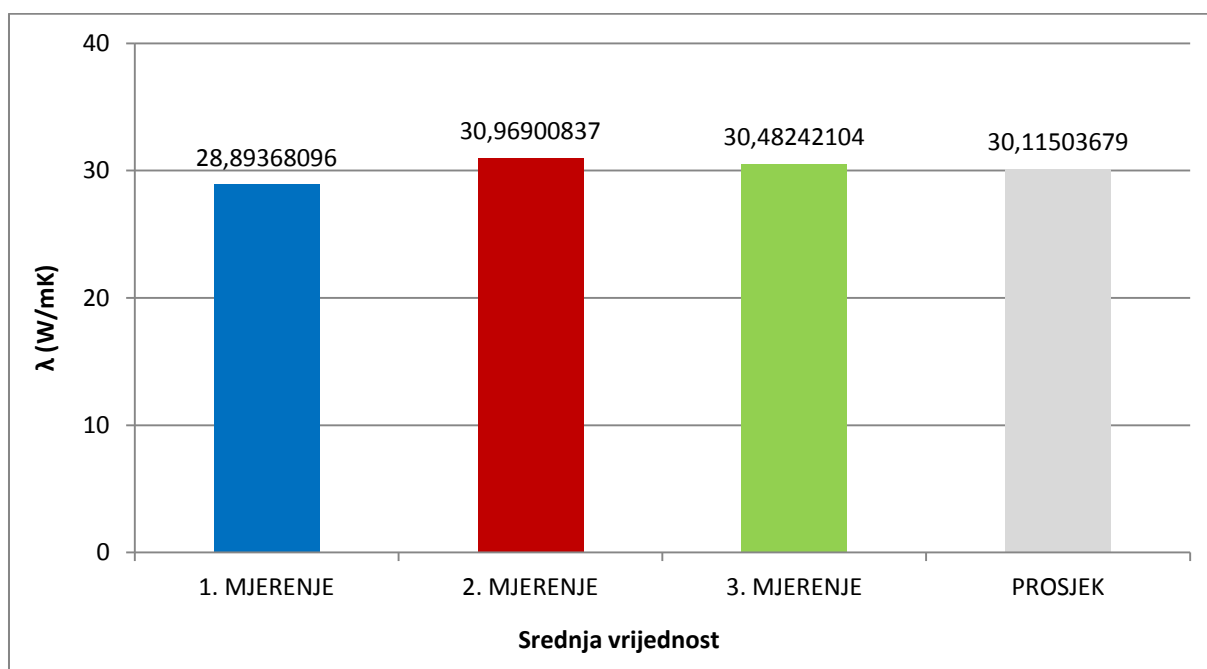
Slika 67. Grafički prikaz efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 68. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 69. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom



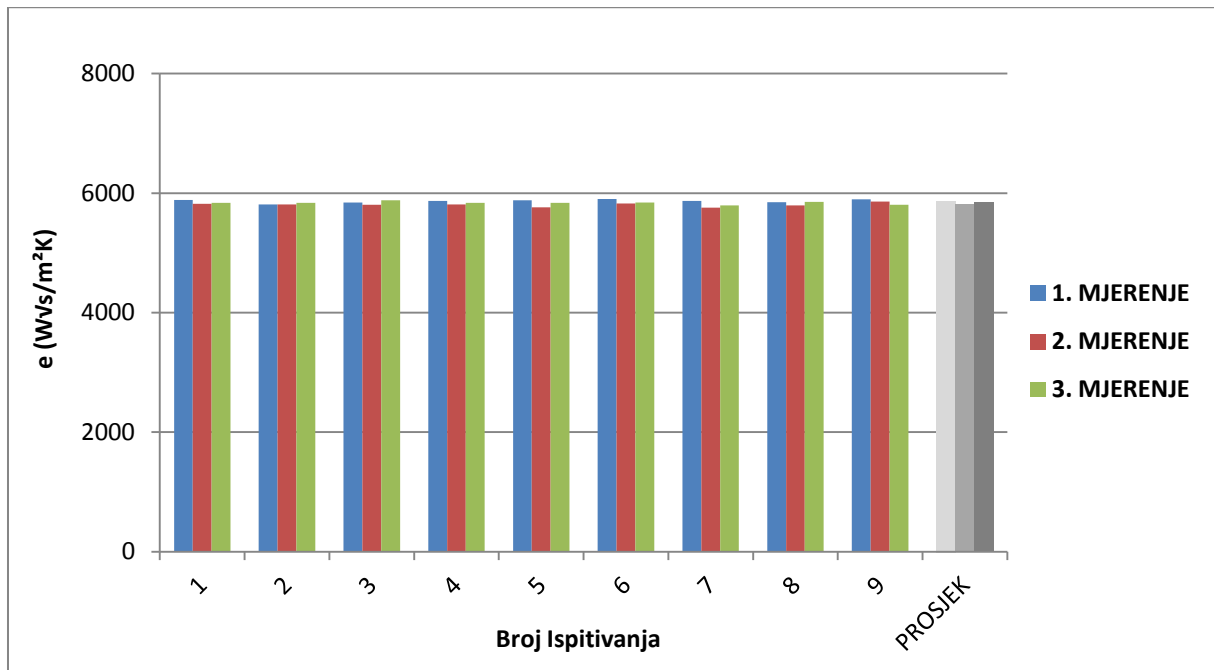
Slika 70. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom

5.1.2. Sivi lijev „13“ (glycol) – hrapava strana

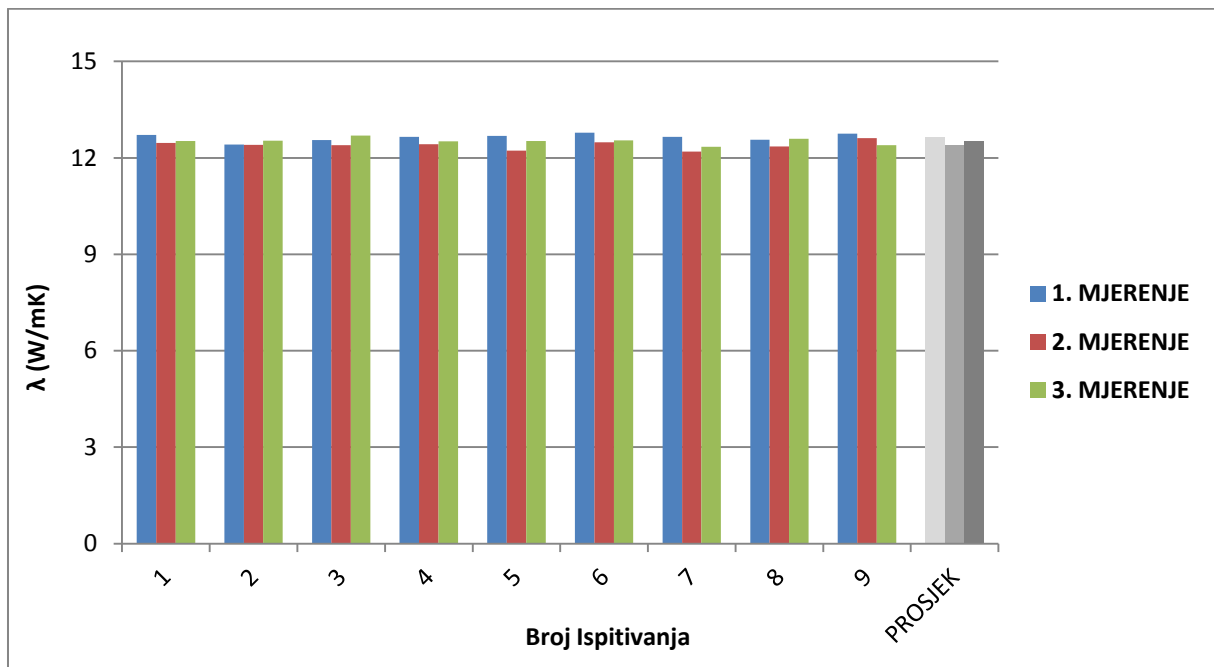
Rezultati ispitivanja hrapave strane uzorka sivog lijeva „13“ sa kontaktim sredstvom glycol prikazani su u **tablici 8.**, a grafički su prikazani na **slikama 71-74:**

Tablica 8. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „13“ (glycol) – hrapava strana uzorka

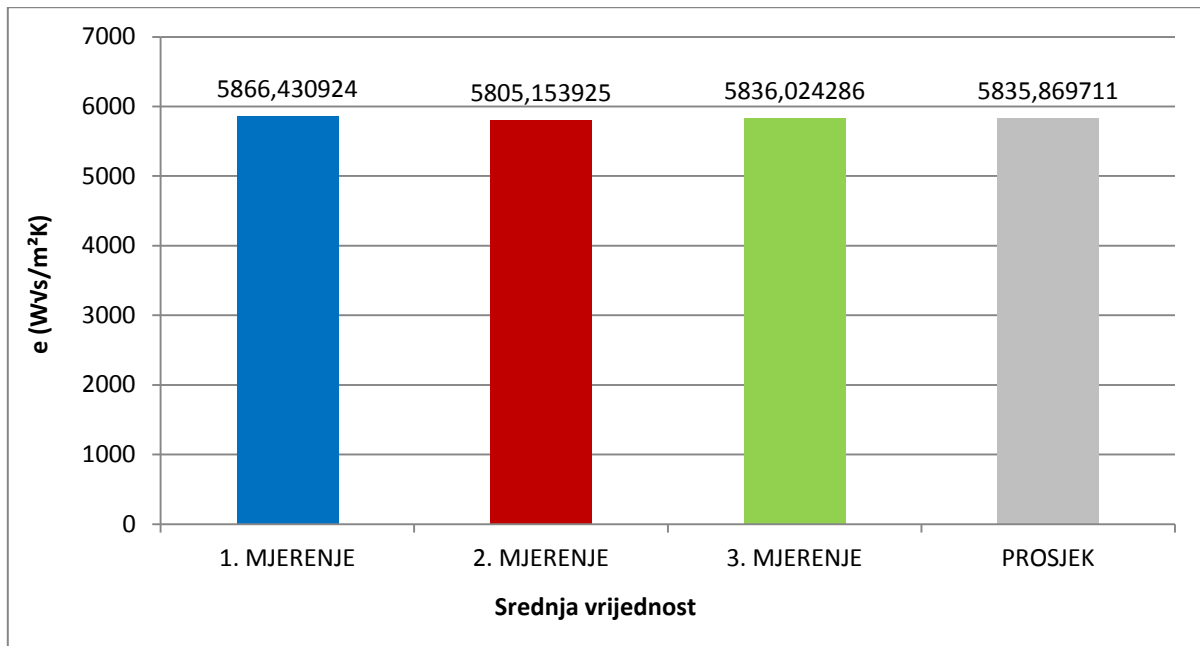
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	5809,476628	12,4118901	5808,49043	12,407941	5839,135117	12,531086
2	5844,727417	12,5536565	5804,444856	12,391751	5878,123659	12,689078
3	5870,339881	12,6574180	5811,757429	12,421026	5835,582254	12,516762
4	5876,929009	12,6842158	5761,749218	12,221846	5837,231504	12,523409
5	5899,909019	12,7780094	5828,289593	12,487399	5843,19344	12,547462
6	5870,170987	12,6567317	5754,792691	12,194327	5791,51918	12,340131
7	5847,304549	12,5640681	5795,348608	12,355408	5855,311523	12,596457
8	5893,878531	12,7533453	5859,412505	12,613070	5805,919782	12,397656
9	5883,184627	12,7112755	5853,709549	12,601203	5849,391048	12,573541
SREDNJA VRIJEDNOST	5866,430924	12,6418904	5805,153925	12,395032	5836,024286	12,518182
STANDARDNA DEVIJACIJA	28,3822116	0,11493961	32,28395468	0,1290958	25,24581678	0,1016706
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,48%	0,91%	0,56%	1,04%	0,43%	0,81%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	5835,86971			12,51858033		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	28,6373277			0,115235376		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,49%			0,92%		



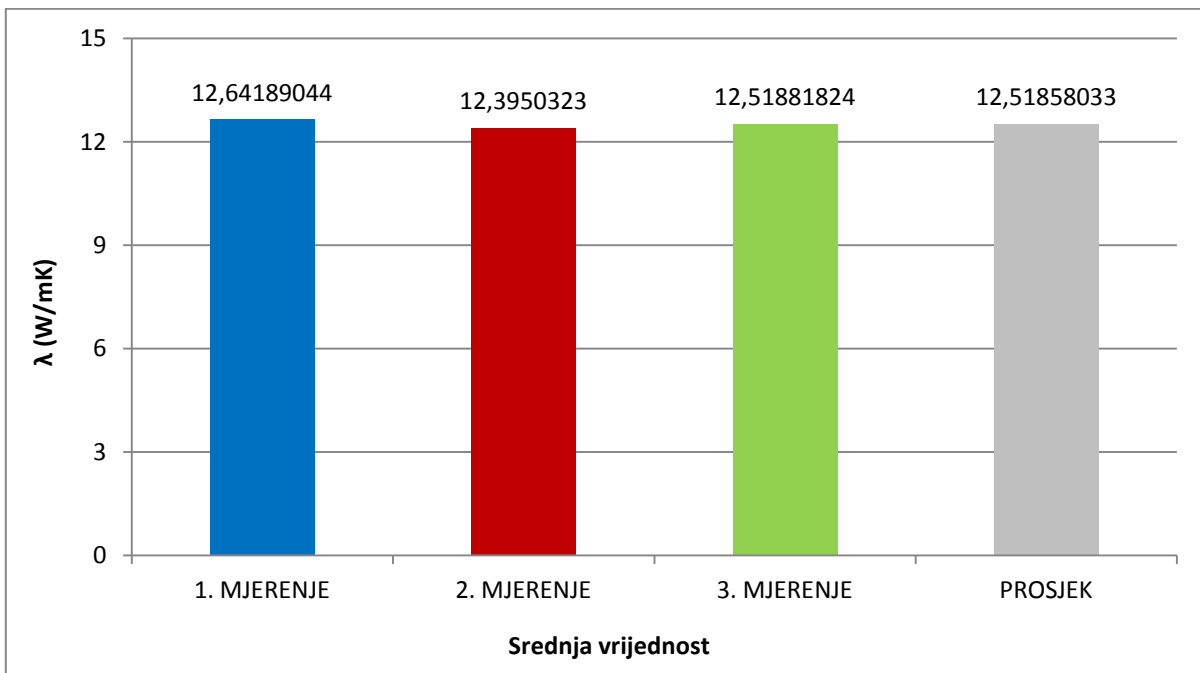
Slika 71. Grafički prikaz efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 72. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 73. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom



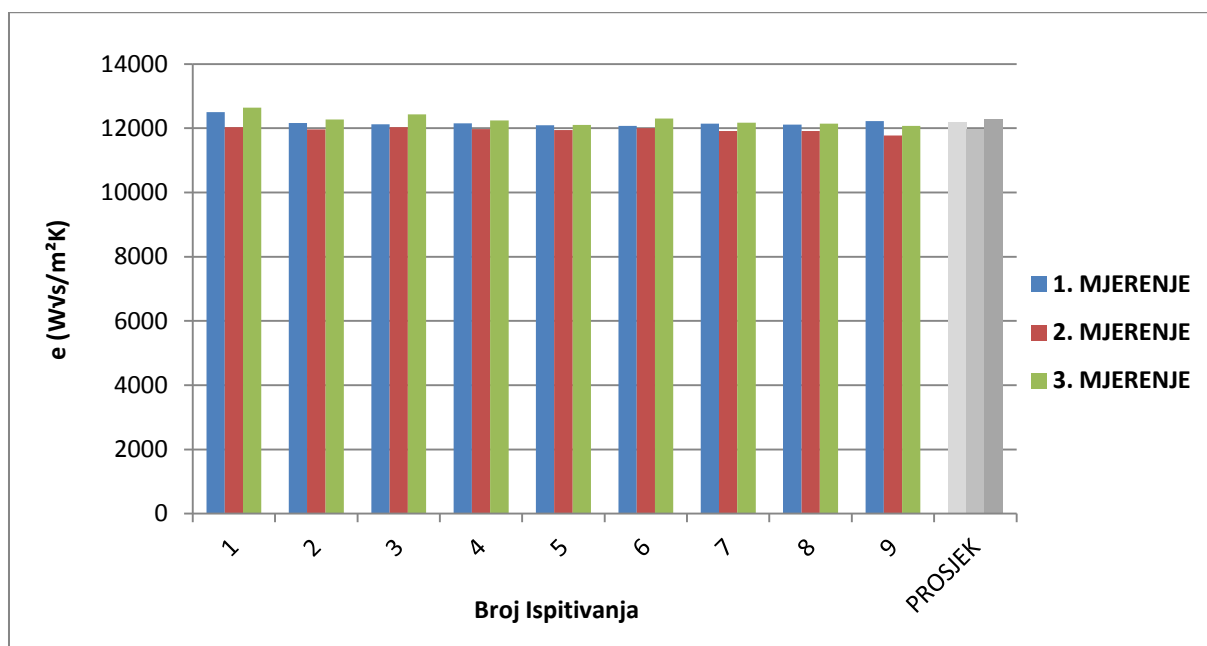
Slika 74. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom

5.1.3. Sivi lijev „1A“ (glycol) – glatka strana

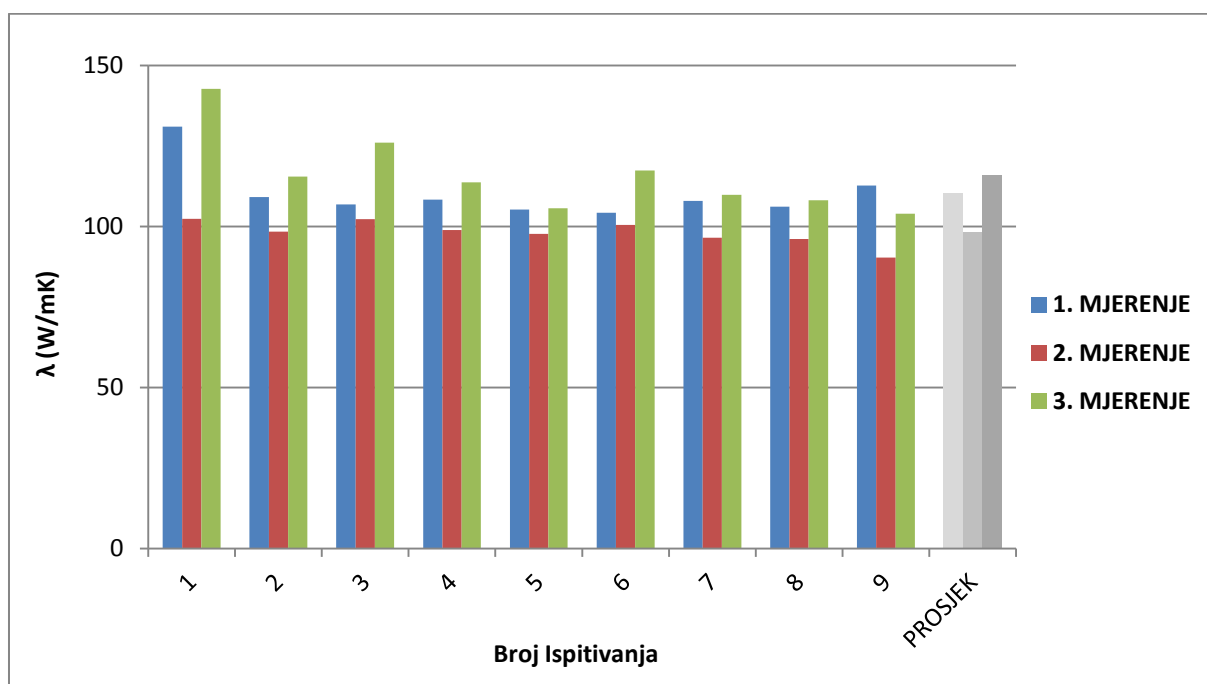
Rezultati ispitivanja glatke strane uzorka sivog lijeva „1A“ sa kontaktnim sredstvom glycol prikazani su u **tablici 9.**, a grafički su prikazani na **slikama 75-78:**

Tablica 9. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „1A“ (glycol) – glatka strana uzorka

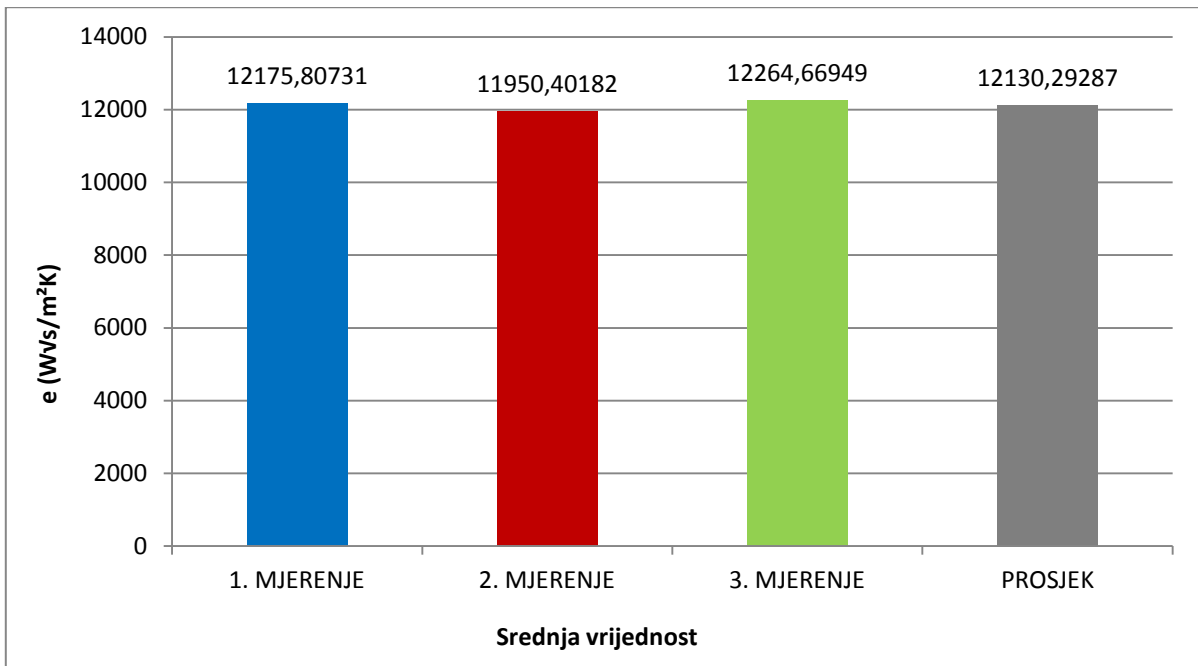
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	12496,90882	131,037364	12037,71905	102,32548	12638,65458	142,73120
2	12164,17303	109,115135	11958,98727	98,437133	12271,56542	115,48140
3	12123,30217	106,842250	12037,31428	102,30485	12429,90648	126,06164
4	12149,86703	108,310636	11969,51657	98,943226	12243,13019	113,73727
5	12093,74585	105,246325	11944,51113	97,748097	12102,20725	105,69921
6	12074,7262	104,239755	12001,35569	100,49935	12302,54288	117,43239
7	12142,37112	107,892971	11917,50942	96,483377	12177,21709	109,85723
8	12110,36402	106,138819	11909,64407	96,119902	12146,69783	108,13372
9	12226,80754	112,755636	11777,05888	90,307006	12070,10373	103,99748
SREDNJA VRIJEDNOST	12175,80731	110,175432	11950,40182	98,129826	12264,66949	115,90350
STANDARDNA DEVIJACIJA	128,2695038	8,205346351	79,87414496	3,69962771	178,5108708	12,1085147
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	1,05%	7,45%	0,67%	3,77%	1,46%	10,45%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	12130,29287			108,0695897		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	128,8848399			8,004496271		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	1,06%			7,22%		



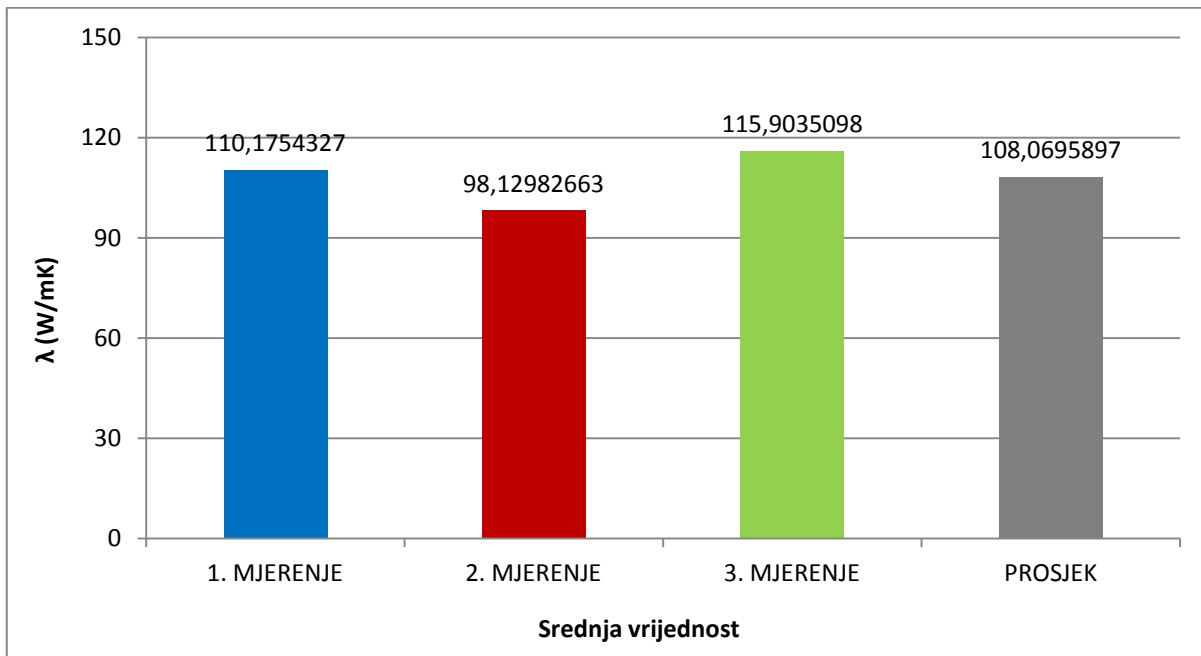
Slika 75. Grafički prikaz efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 76. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 77. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom



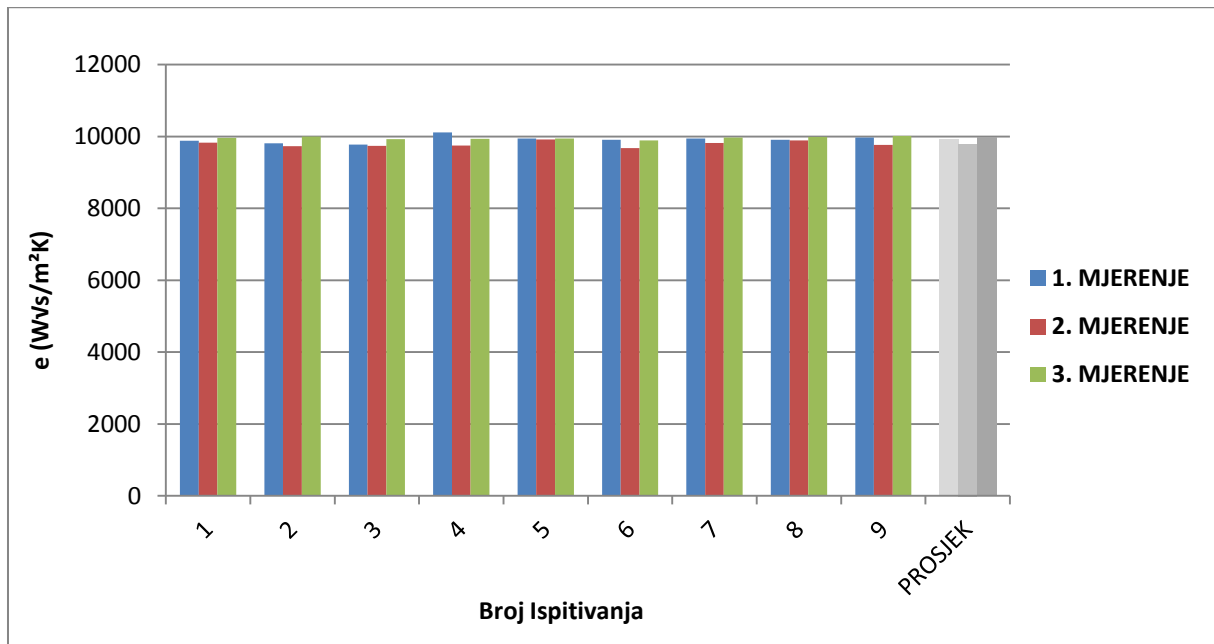
Slika 78. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom

5.1.4. Sivi lijev „1A“ (glycol) – hrapava strana

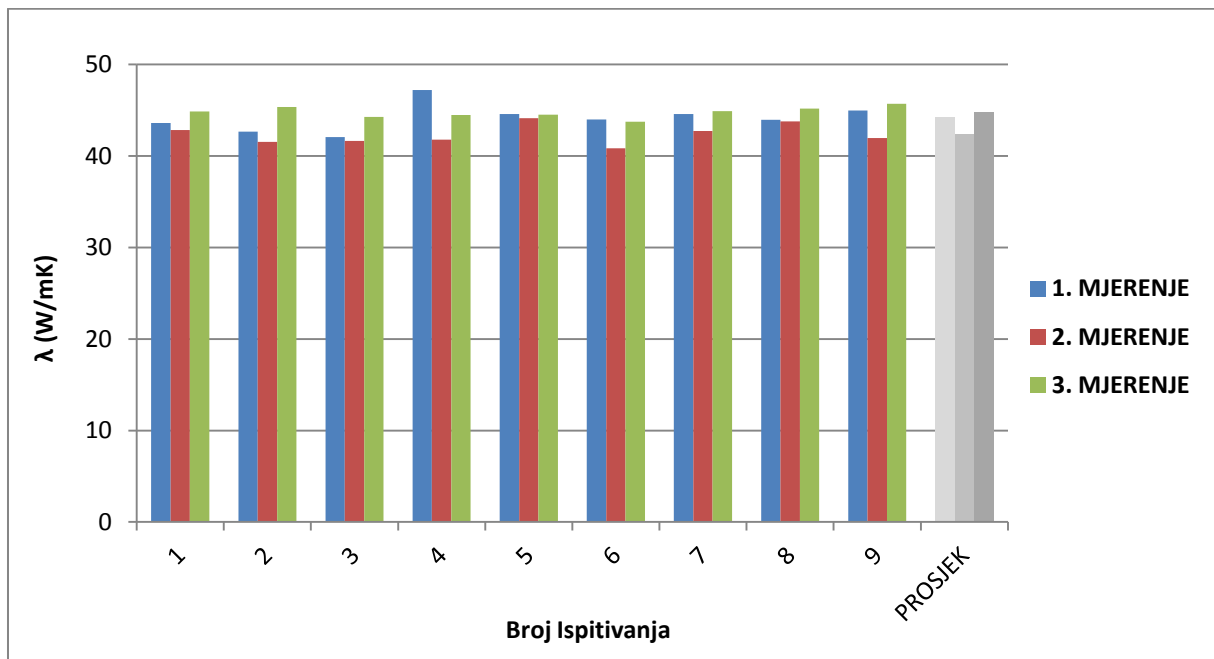
Rezultati ispitivanja hrapave strane uzorka sivog lijeva „1A“ sa kontaktim sredstvom glycol prikazani su u **tablici 10.**, a grafički su prikazani na **slikama 79-82:**

Tablica 10. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „1A“ (glycol) – hrapava strana uzorka

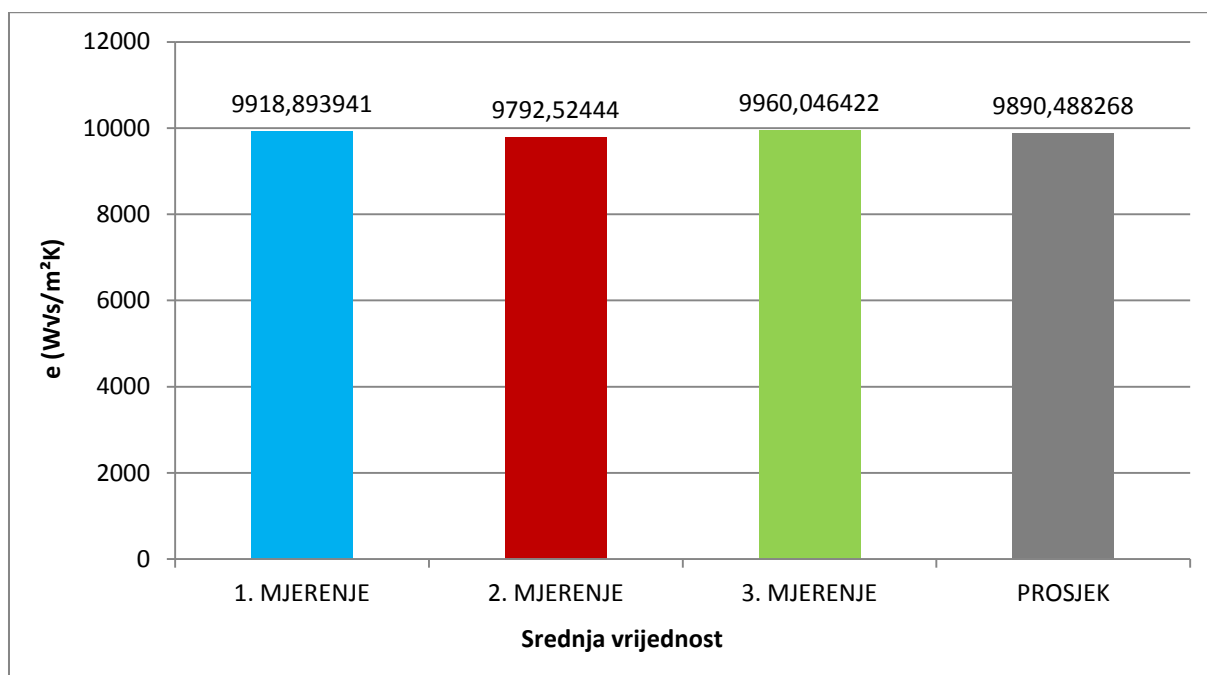
BROJ ISPITIVANJA	4. MJERENJE		5. MJERENJE		6. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	9881,476249	43,61594397	9827,003079	42,8343316	9966,253315	44,8699035
2	9815,48827	42,67144884	9735,302583	41,5591195	9998,520767	45,3596409
3	9773,770213	42,0880051	9742,18449	41,6531064	9925,469787	44,2608378
4	10115,86108	47,20156598	9751,811261	41,7850396	9939,782002	44,4733322
5	9948,742624	44,60705428	9915,974944	44,1206025	9942,970874	44,5208602
6	9908,530097	44,01105231	9681,742998	40,8368767	9890,905919	43,7531308
7	9946,996412	44,58095357	9820,12217	42,7369008	9969,236552	44,9148876
8	9905,871777	43,97202177	9893,052365	43,7844370	9986,565504	45,1773708
9	9973,308751	44,97638829	9765,526071	41,9739303	10020,71308	45,7005743
SREDNJA VRIJEDNOST	9918,893941	44,19160379	9792,52444	42,3649272	9960,046422	44,7811709
STANDARDNA DEVIJACIJA	98,02322221	1,464076045	77,26881342	1,08605998	39,78872066	0,59715969
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,99%	3,31%	0,79%	2,56%	0,40%	1,33%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	9890,488268			43,77923398		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	71,69358543			1,049098572		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,73%			2,40%		



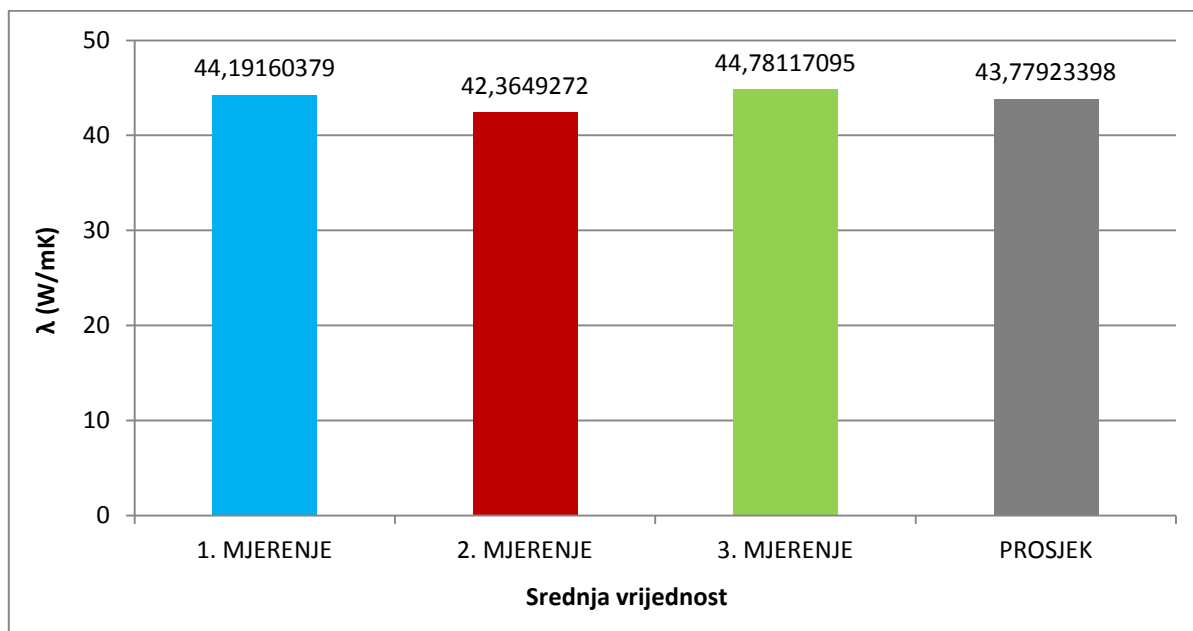
Slika 79. Grafički prikaz efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 80. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 81. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktim sredstvom



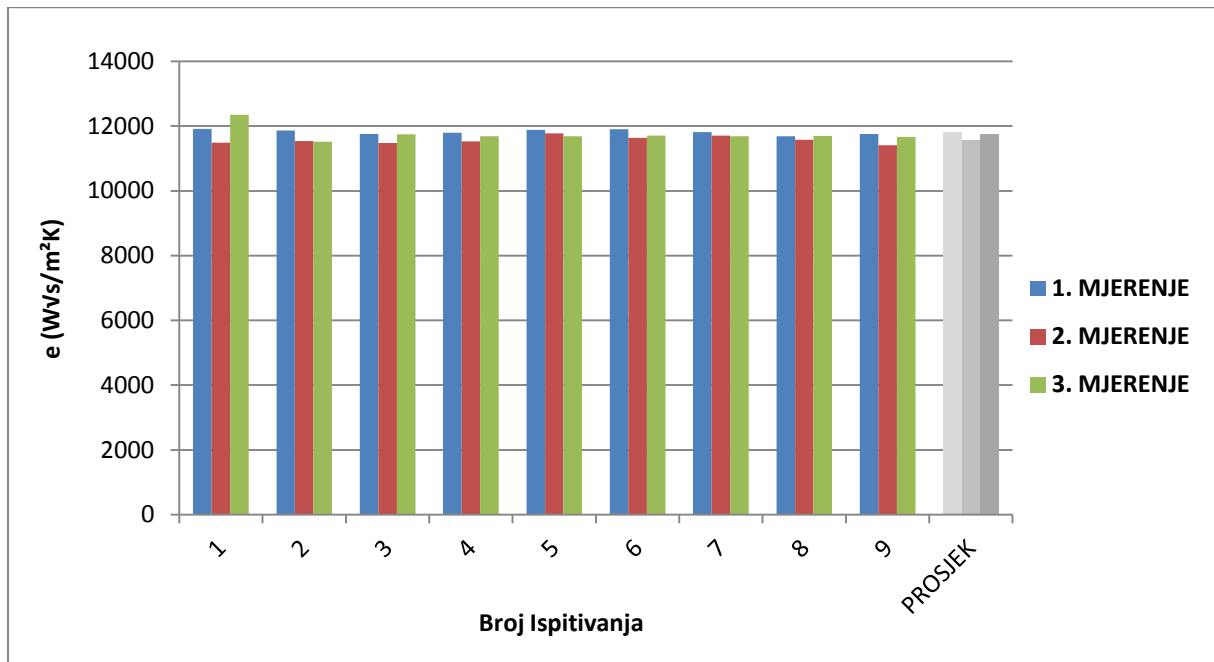
Slika 82. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s glycolom kao kontaktim sredstvom

5.1.5. Sivi lijev „9D“ (glycol) – glatka strana

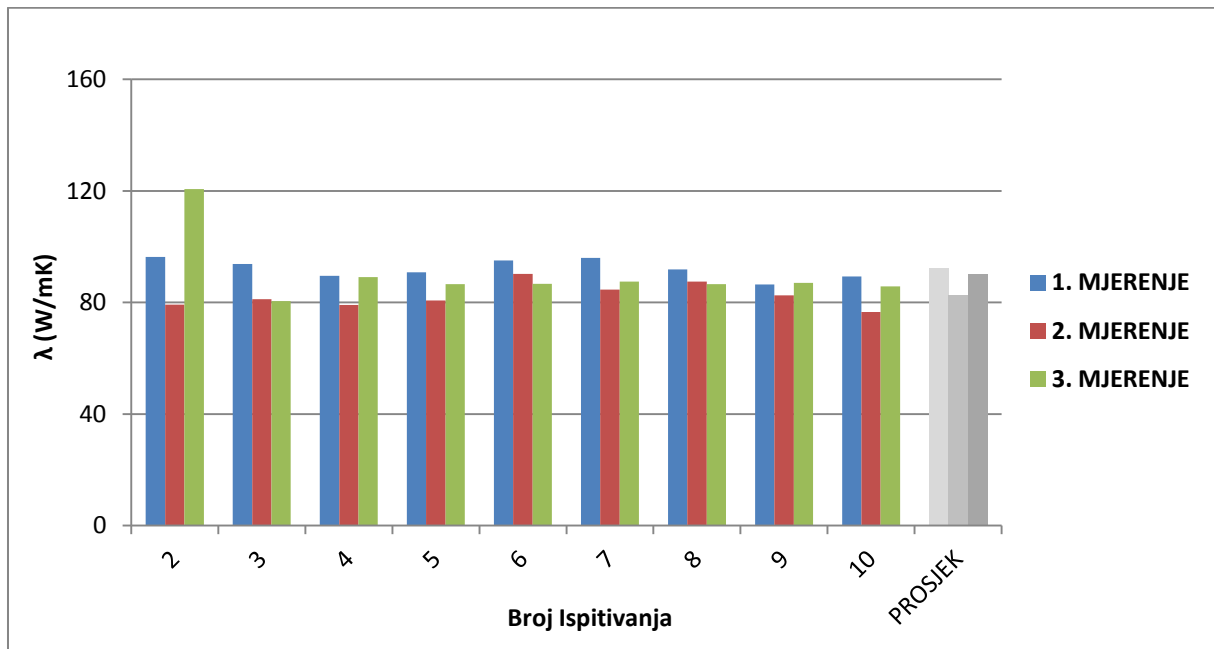
Rezultati ispitivanja glatke strane uzorka sivog lijeva „9D“ sa kontaktnim sredstvom glycol prikazani su u **tablici 11.**, a grafički su prikazani na **slikama 83-86:**

Tablica 11. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „9D“ (glycol) – glatka strana uzorka

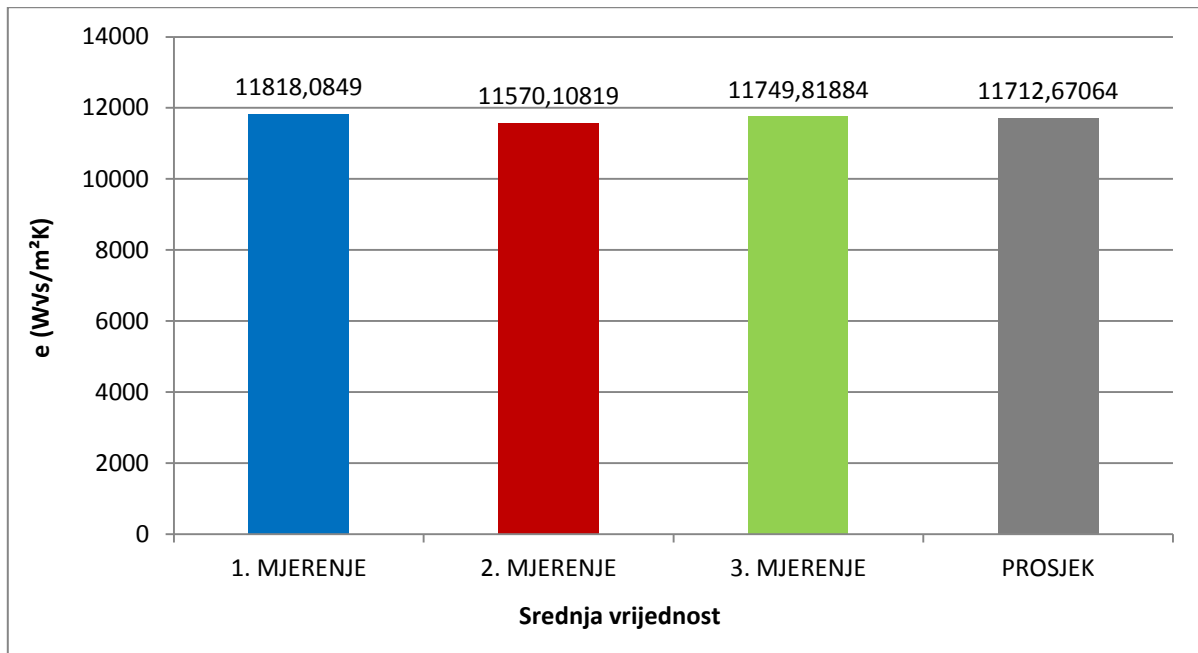
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	11913,3315	96,29003643	11483,19259	79,235321	12352,3037	120,683133
2	11859,4514	93,85107583	11537,95473	81,1327561	11521,1596	80,5434440
3	11758,1410	89,5231612	11481,33312	79,1720963	11747,5414	89,0886607
4	11789,6205	90,83349823	11526,14194	80,7175729	11685,0688	86,5938952
5	11887,9462	95,12847628	11776,21627	90,2718629	11688,6744	86,7348806
6	11906,9815	95,99735614	11633,77873	84,626567	11707,0172	87,4577263
7	11812,8670	91,82072932	11709,46216	87,554789	11684,7135	86,5800216
8	11681,6776	86,46161996	11578,50761	82,5834988	11696,5847	87,0454543
9	11752,7469	89,30162964	11404,3866	76,6221479	11665,3057	85,8274561
SREDNJA VRIJEDNOST	11818,0849	92,13417589	11570,10819	82,4351791	11749,81884	90,0616302
STANDARDNA DEVIJACIJA	79,74414833	3,408033461	118,2636952	4,35564019	234,3225572	11,7166489
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,67%	3,70%	1,02%	5,28%	1,99%	13,01%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	11712,67064			88,21032844		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	144,1101336			6,493440861		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	1,23%			7,33%		



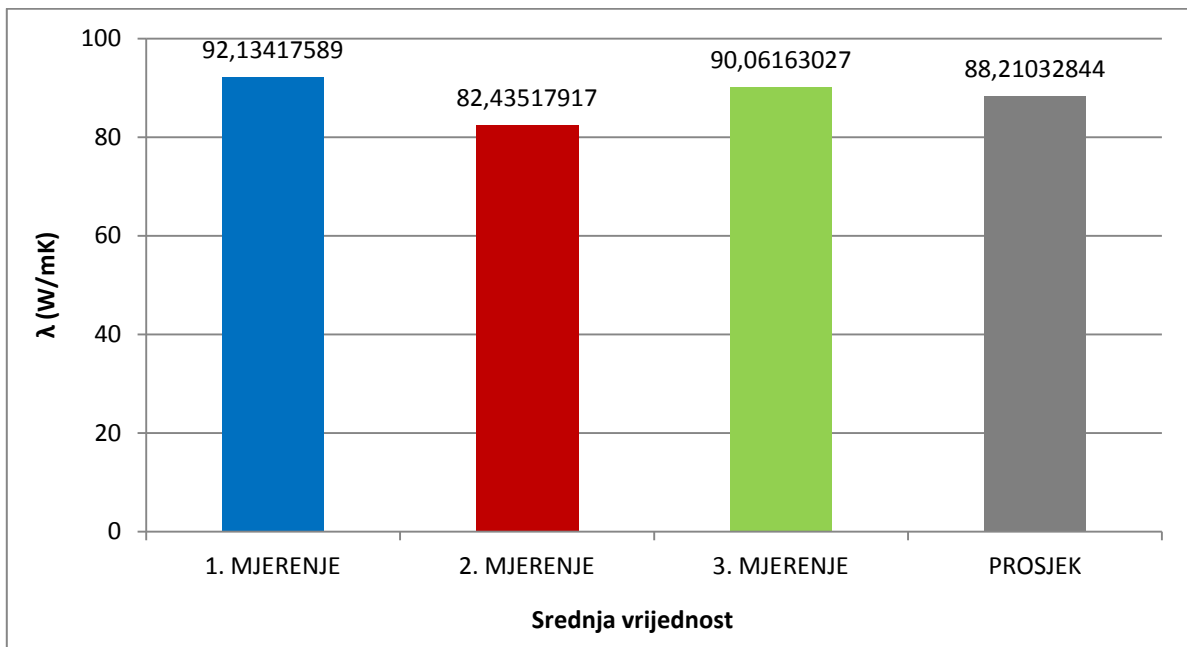
Slika 83. Grafički prikaz efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 84. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 85. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom



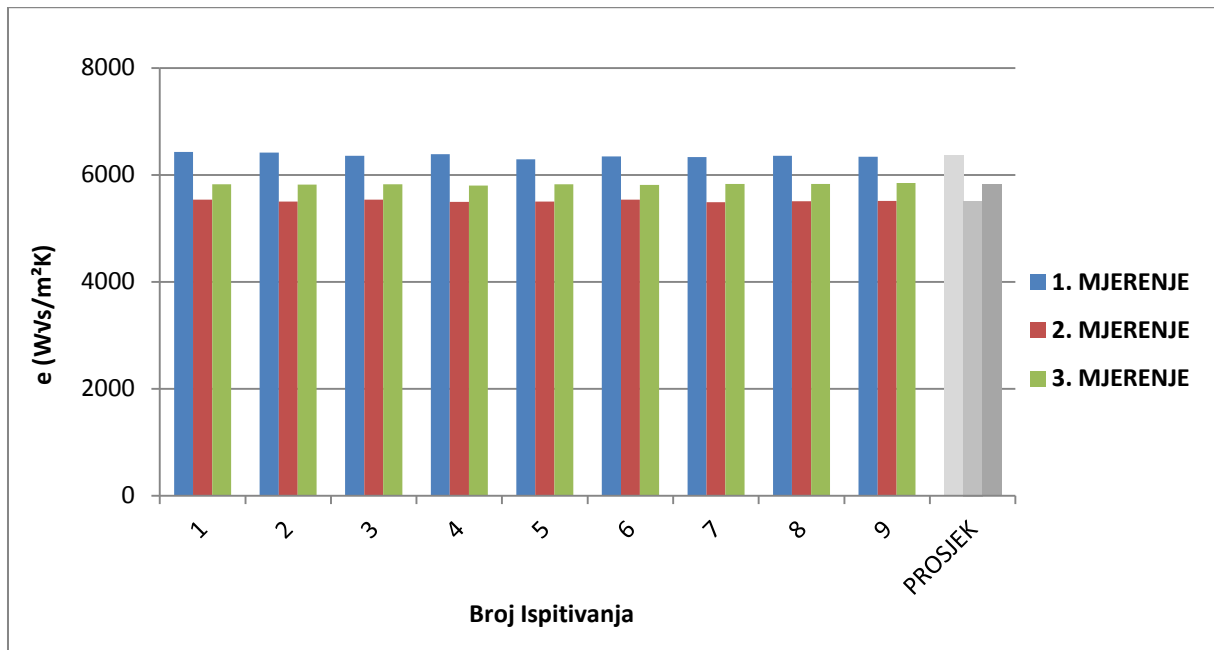
Slika 86. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom

5.1.6. Sivi lijev „9D“ (glycol) – hrapava strana

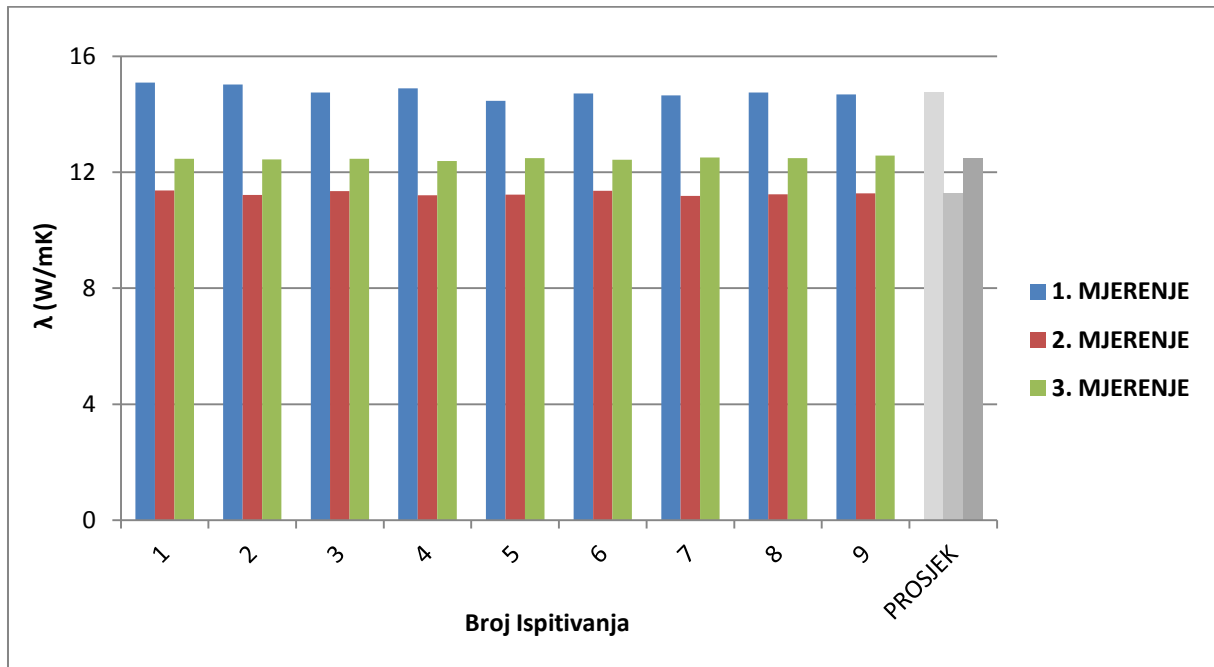
Rezultati ispitivanja hrapave strane uzorka sivog lijeva „9D“ sa kontaktim sredstvom glycol prikazani su u **tablici 12.**, a grafički su prikazani na **slikama 87-90:**

Tablica 12. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „9D“ (glycol) – hrapava strana uzorka

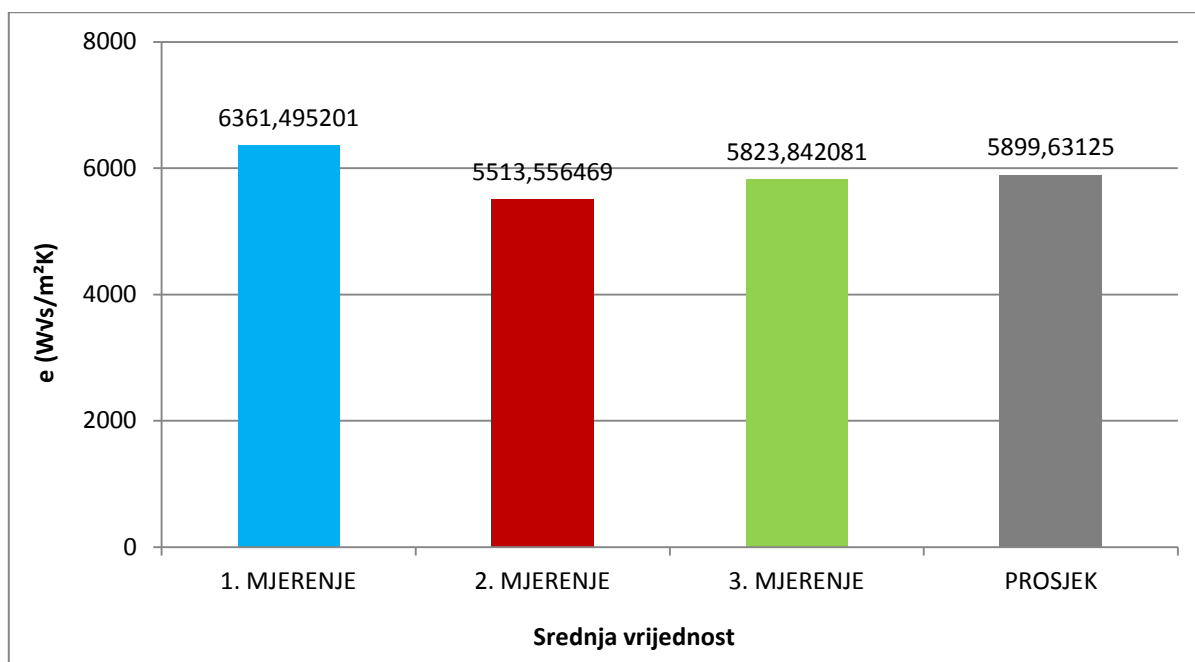
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	6427,913329	15,08613717	5539,713273	11,3654940	5823,291087	12,4673040
2	6413,946293	15,02105574	5498,522934	11,2114841	5815,931537	12,4377598
3	6355,079793	14,74929581	5534,838512	11,3471901	5822,276264	12,4632270
4	6386,640981	14,89449211	5495,514785	11,2002945	5801,668569	12,3806508
5	6292,686292	14,46565726	5503,101365	11,2285299	5826,721057	12,4810912
6	6347,910719	14,71647686	5538,412107	11,3660639	5814,496997	12,4320070
7	6333,185617	14,64925462	5491,044882	11,1836819	5832,101175	12,5027400
8	6355,553605	14,75146695	5506,001098	11,2393352	5828,705732	12,4890740
9	6340,540179	14,68279787	5514,859268	11,2723886	5849,386315	12,5724831
SREDNJA VRIJEDNOST	6361,495201	14,77962604	5513,556469	11,2676672	5823,842081	12,4695930
STANDARDNA DEVIJACIJA	41,87929804	0,192380177	19,30439621	0,07214356	13,21453486	0,05312645
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,66%	1,30%	0,35%	0,64%	0,23%	0,43%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	5899,63125			12,8389621		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	24,7994097			0,105883397		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,41%			0,79%		



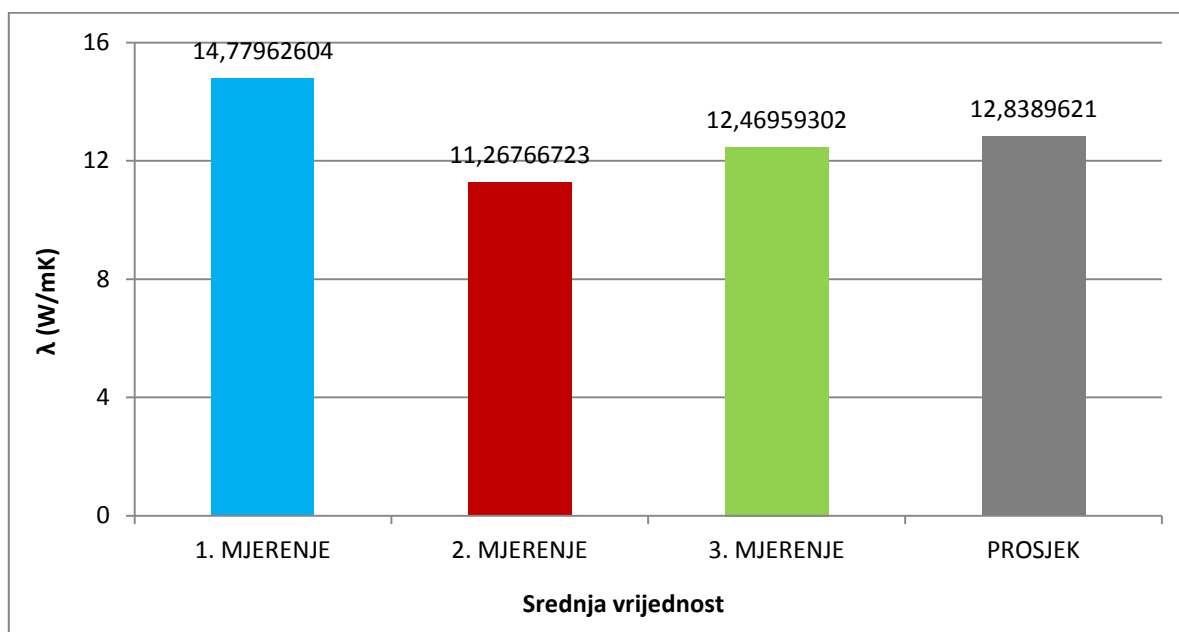
Slika 87. Grafički prikaz efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 88. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 89. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom



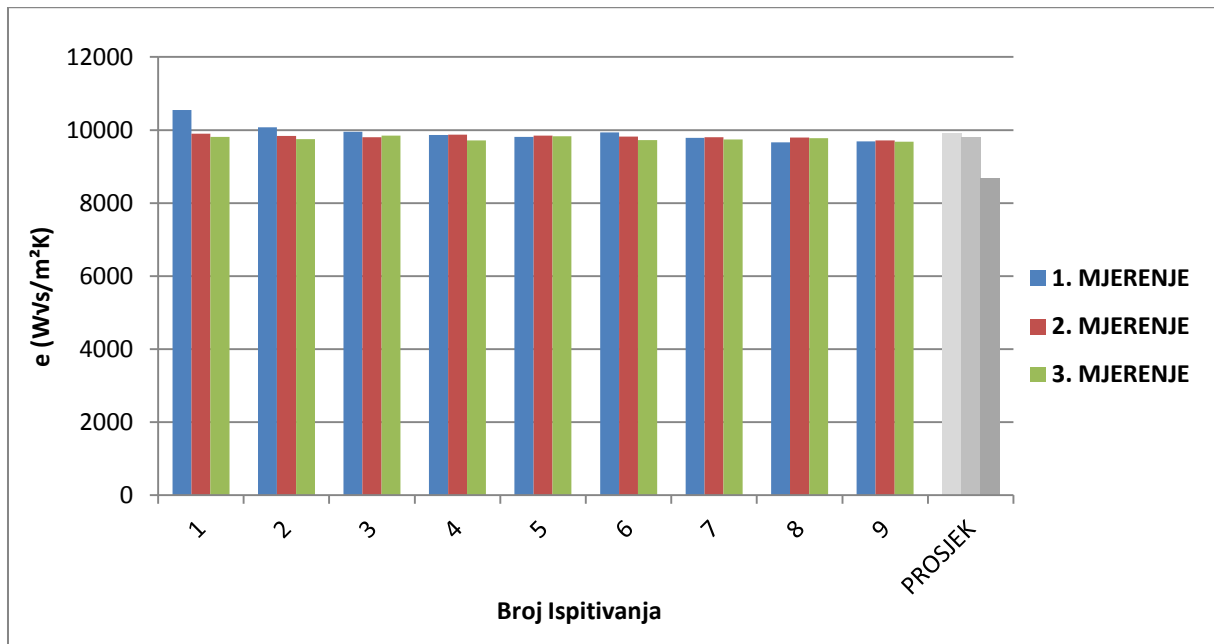
Slika 90. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom

5.1.7. Sivi lijev „13“ (voda) – glatka strana

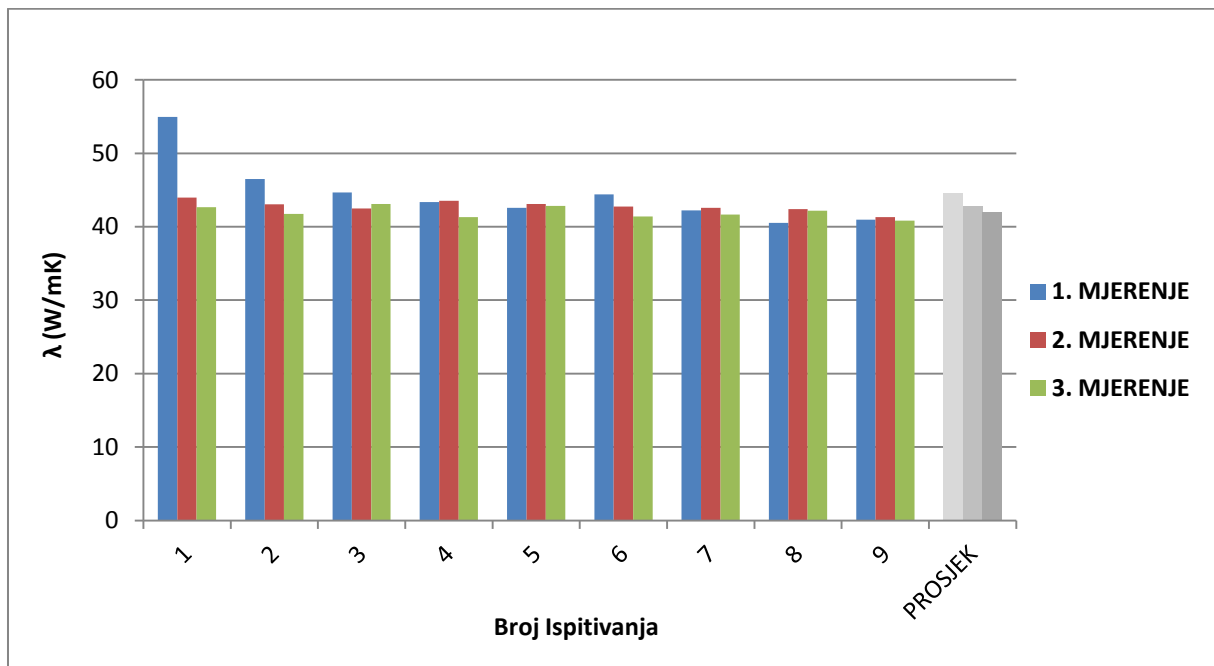
Rezultati ispitivanja glatke strane uzorka sivog lijeva „13“ sa kontaktnim sredstvom vodom prikazani su u **tablici 13.**, a grafički su prikazani na **slikama 91-94:**

Tablica 13. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „13“ (voda) – glatka strana uzorka

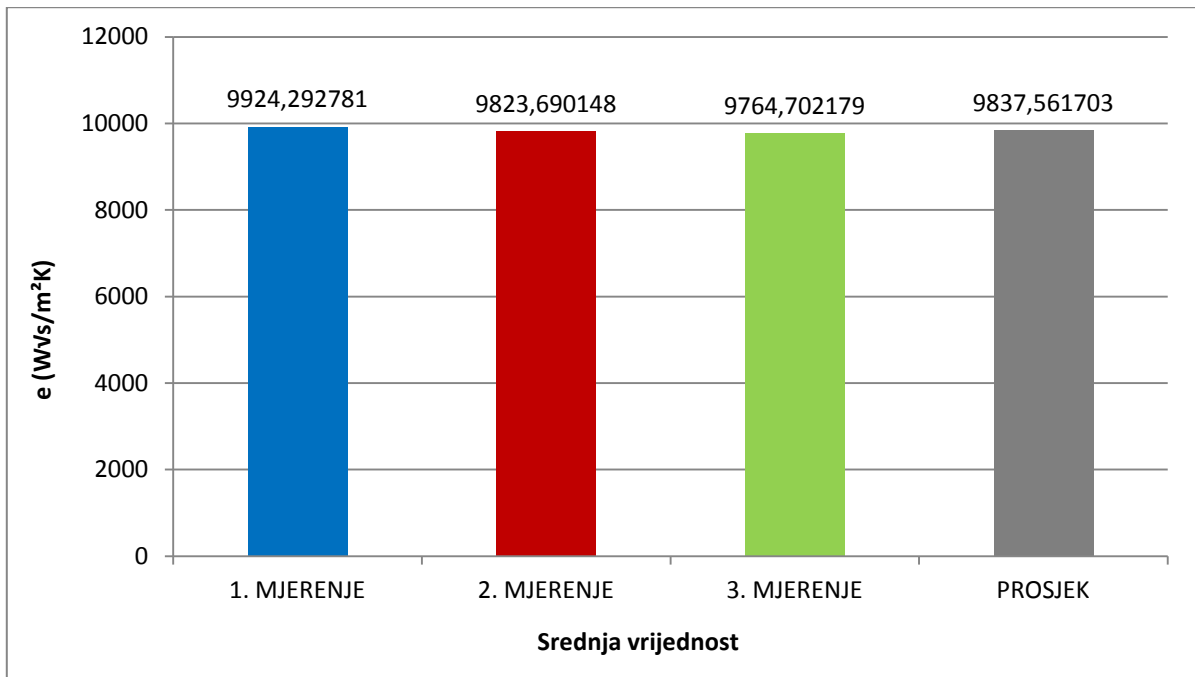
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	10548,52253	54,94106519	9904,177964	43,9471761	9815,477386	42,6712952
2	10072,29111	46,50620125	9842,581238	43,0559806	9747,50495	41,725956
3	9953,789619	44,68260511	9802,386368	42,4870917	9846,680843	43,1145584
4	9864,054154	43,36395462	9876,156529	43,5387984	9717,049919	41,3111582
5	9809,884582	42,59247256	9845,560781	43,0985439	9828,111346	42,8500512
6	9934,968765	44,40172048	9820,557355	42,7430543	9721,84828	41,3761591
7	9784,729151	42,24026544	9807,726221	42,562104	9742,145684	41,6525756
8	9659,199047	40,53768086	9795,87979	42,3959210	9781,180372	42,1908818
9	9691,196067	40,96317425	9718,185091	41,326524	9682,320829	40,8445825
SREDNJA VRIJEDNOST	9924,292781	44,46990442	9823,690148	42,7950215	9764,702179	41,9708020
STANDARDNA DEVIJACIJA	267,7113709	4,349142261	53,25581309	0,75070200	56,224214	0,77771313
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	2,70%	9,78%	0,54%	1,75%	0,58%	1,85%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	9837,561703			43,07857602		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	125,730466			1,959185802		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	1,27%			4,46%		



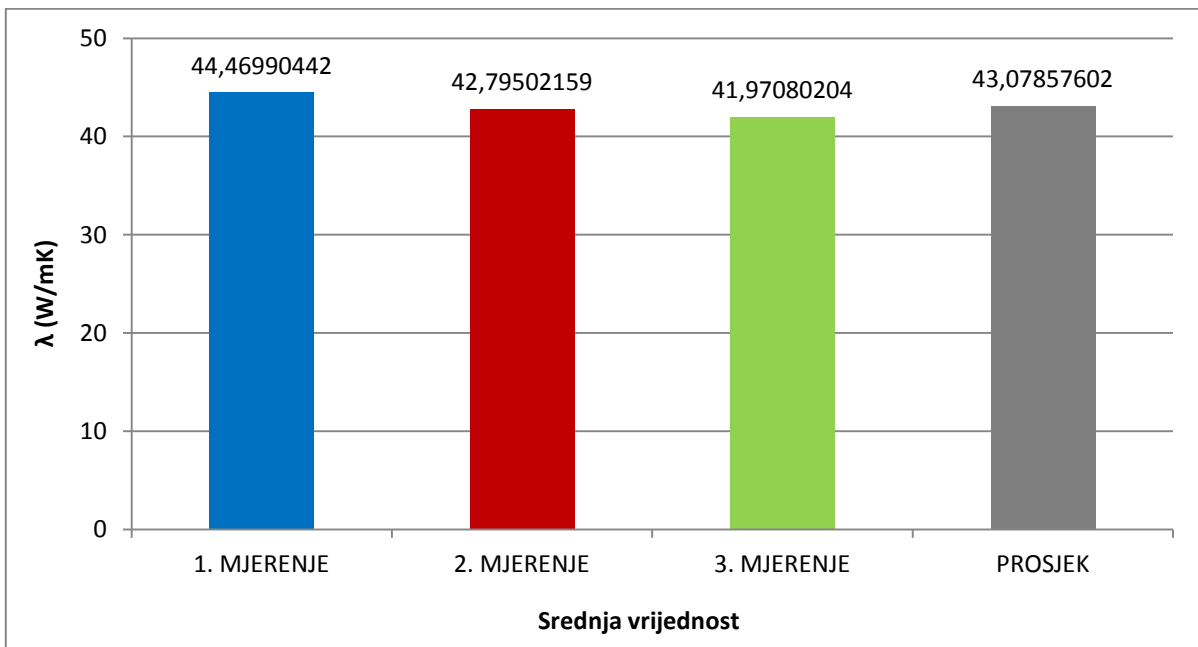
Slika 91. Grafički prikaz efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktним sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 92. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktним sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 93. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktim sredstvom



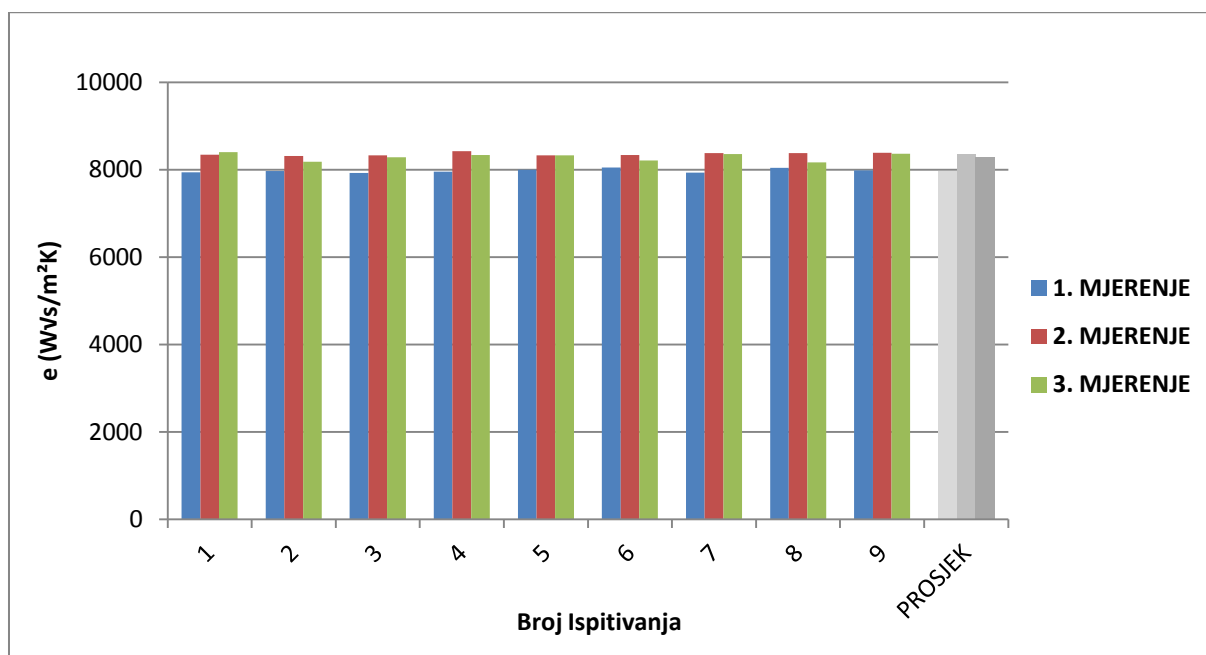
Slika 94. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktim sredstvom

5.1.8. Sivi lijev „13“ (voda) – hrapava strana

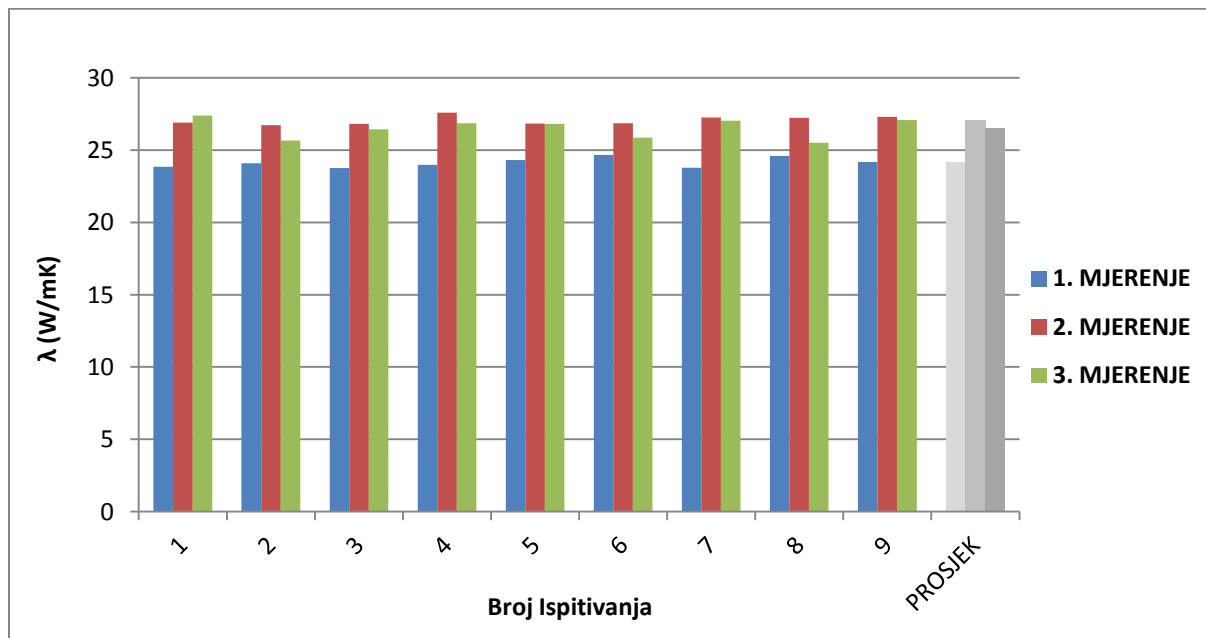
Rezultati ispitivanja hrapave strane uzorka sivog lijeva „13“ sa kontaktnim sredstvom vodom prikazani su u **tablici 14.**, a grafički su prikazani na **slikama 95-98:**

Tablica 14. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „13“ (voda) – hrapava strana uzorka

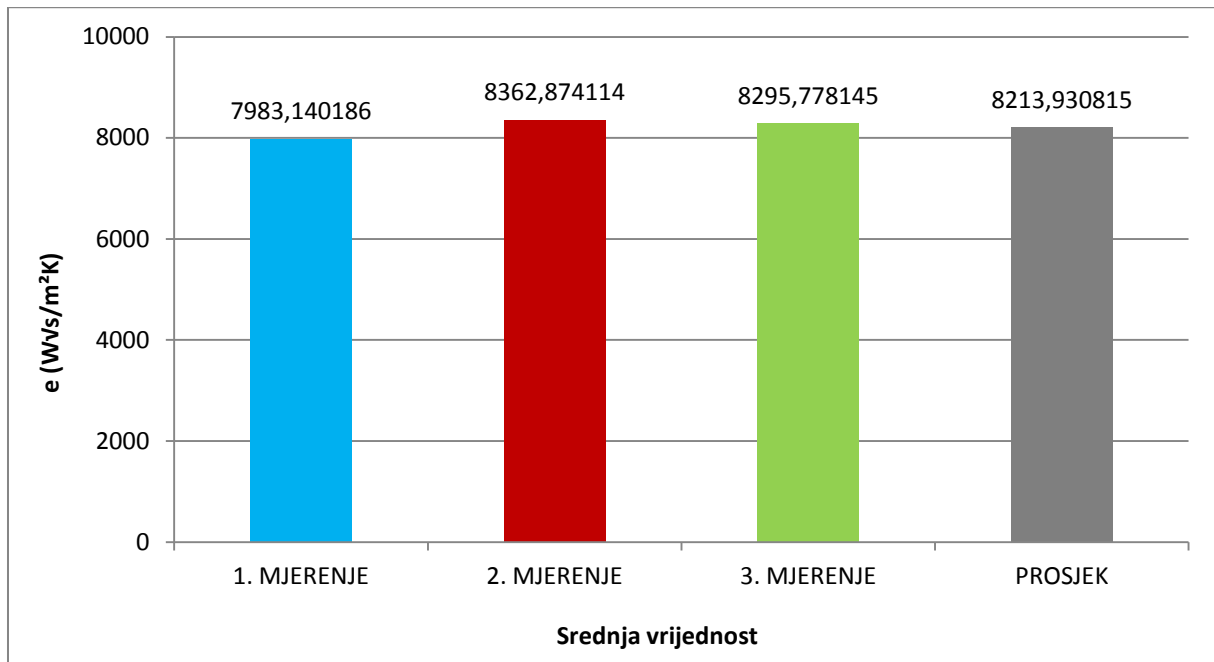
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	7944,383997	23,85541063	8343,912292	26,9020720	8404,414321	27,3988279
2	7977,287126	24,09197845	8321,383465	26,7196203	8187,818774	25,66509119
3	7931,310652	23,76208544	8334,236404	26,8235451	8285,733973	26,4336534
4	7962,591951	23,98602304	8427,098887	27,5876698	8339,878479	26,8693043
5	8006,366689	24,30308743	8336,108027	26,8387152	8334,333024	26,8243280
6	8055,673727	24,66547377	8338,155034	26,8553175	8214,568541	25,8726420
7	7933,628849	23,77860649	8386,701475	27,2523624	8360,678739	27,0387388
8	8046,42165	24,59704535	8384,769755	27,2364413	8168,420897	25,5156982
9	7990,59703	24,1883661	8393,501689	27,3084906	8366,156554	27,0835540
SREDNJA VRIJEDNOST	7983,140186	24,13645297	8362,874114	27,0582483	8295,778145	26,5224264
STANDARDNA DEVIJACIJA	46,03929955	0,334340296	35,94897671	0,29492851	85,85549193	0,6837047
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,58%	1,39%	0,43%	1,09%	1,03%	2,58%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	8213,930815			25,90570925		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	55,94792273			0,437657838		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,68%			1,68%		



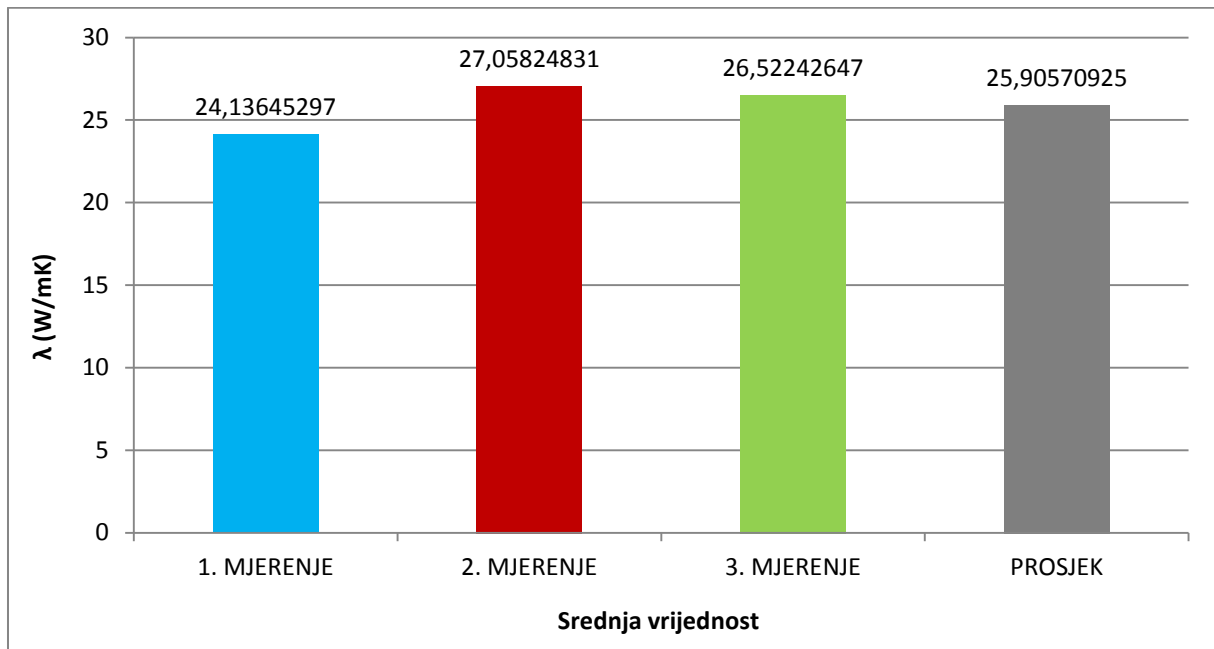
Slika 95. Grafički prikaz efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 96. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 97. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktim sredstvom



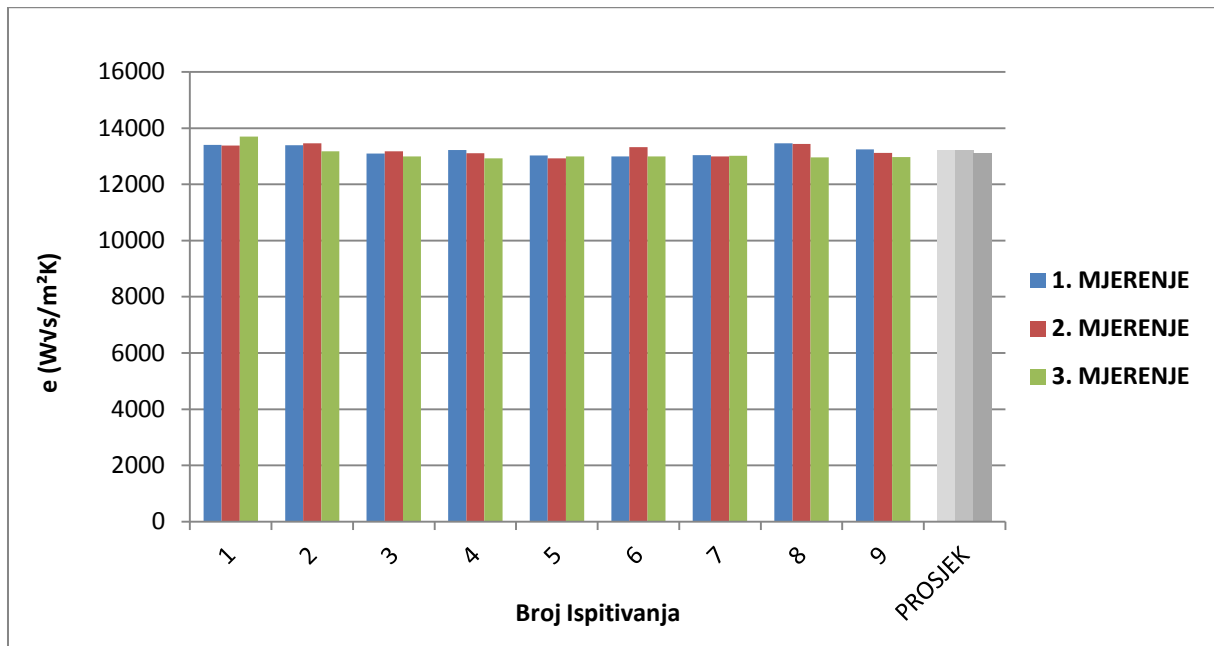
Slika 98. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktim sredstvom

5.1.9. Sivi lijev „1A“ (voda) – glatka strana

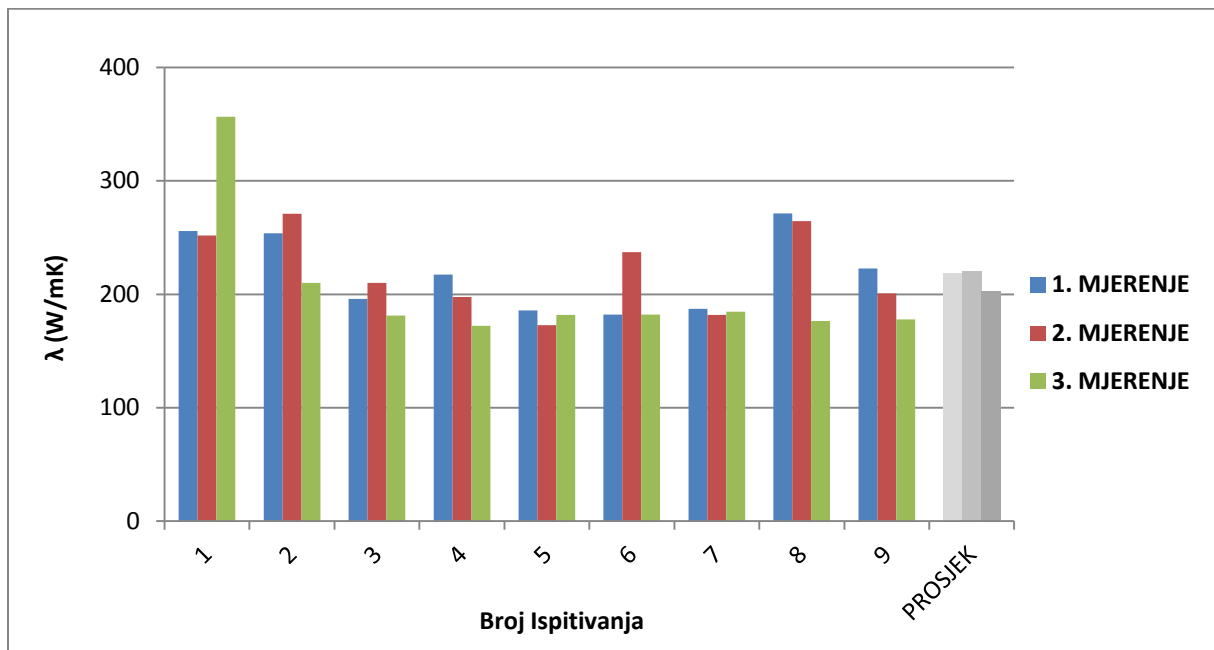
Rezultati ispitivanja glatke strane uzorka sivog lijeva „1A“ sa kontaktnim sredstvom vodom prikazani su u **tablici 15.**, a grafički su prikazani na **slikama 99-102:**

Tablica 15. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „1A“ (voda) – glatka strana uzorka

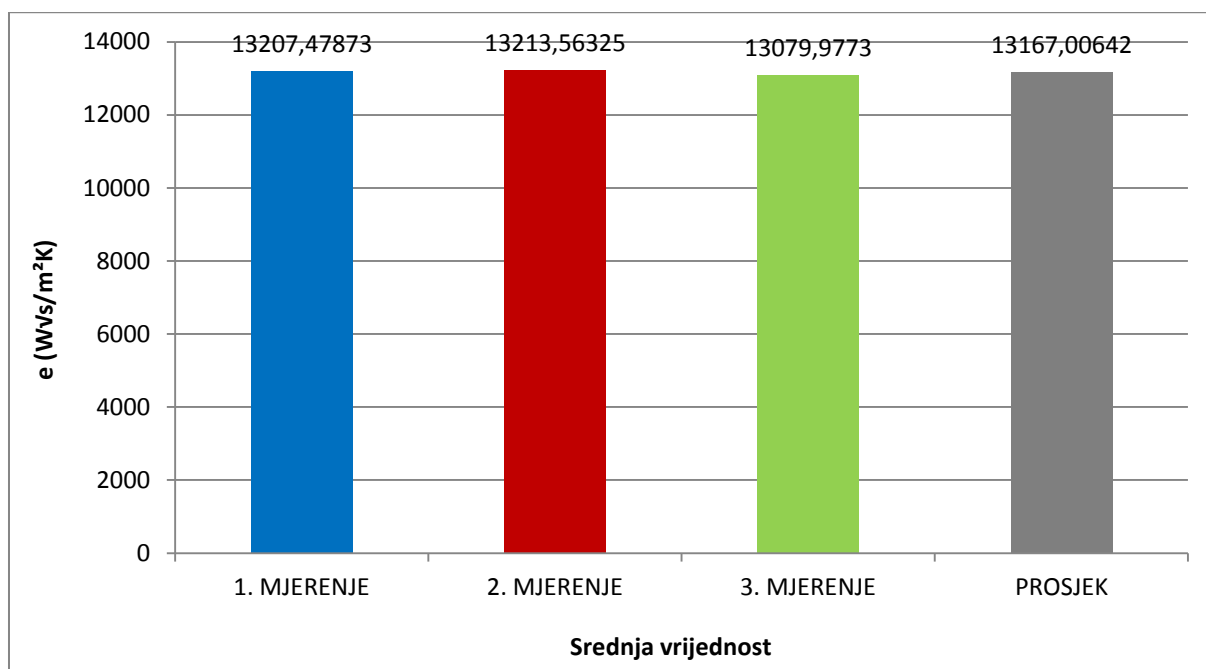
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	13398,8855	255,8130657	13382,59245	251,808308	13696,0467	356,528396
2	13391,2656	253,9257849	13457,01835	271,099241	13180,3005	210,179964
3	13094,0580	196,0164391	13179,19479	209,986855	12990,6483	181,135954
4	13220,3349	217,3922065	13104,66303	197,665185	12921,8750	172,304216
5	13024,6199	185,7977902	12926,89949	172,923661	12995,0023	181,721852
6	12997,5270	182,0631244	13319,29669	237,279069	12998,2434	182,160179
7	13034,5356	187,1986349	12995,4997	181,788995	13016,3503	184,643606
8	13457,8474	271,3293229	13433,03752	264,595882	12954,8722	176,444936
9	13248,2343	222,686192	13123,86719	200,714467	12966,4565	177,940269
SREDNJA VRIJEDNOST	13207,47873	219,1358401	13213,56325	220,873518	13079,9773	202,562152
STANDARDNA DEVIJACIJA	178,6111762	34,16077364	193,0037006	36,3157918	242,1440797	58,7348266
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	1,35%	15,59%	1,46%	16,44%	1,85%	29,00%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	13167,00642			214,1905038		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	204,5863188			43,07046406		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	1,55%			20,34%		



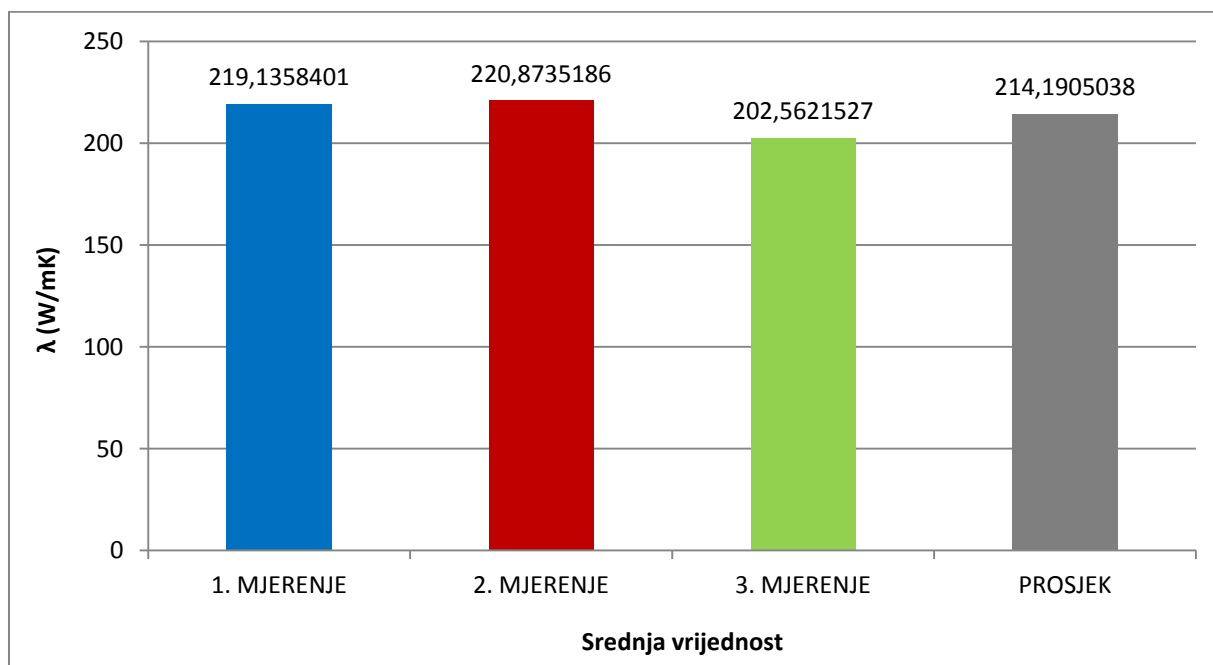
Slika 99. Grafički prikaz efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 100. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 101. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s vodom kao kontaktim sredstvom



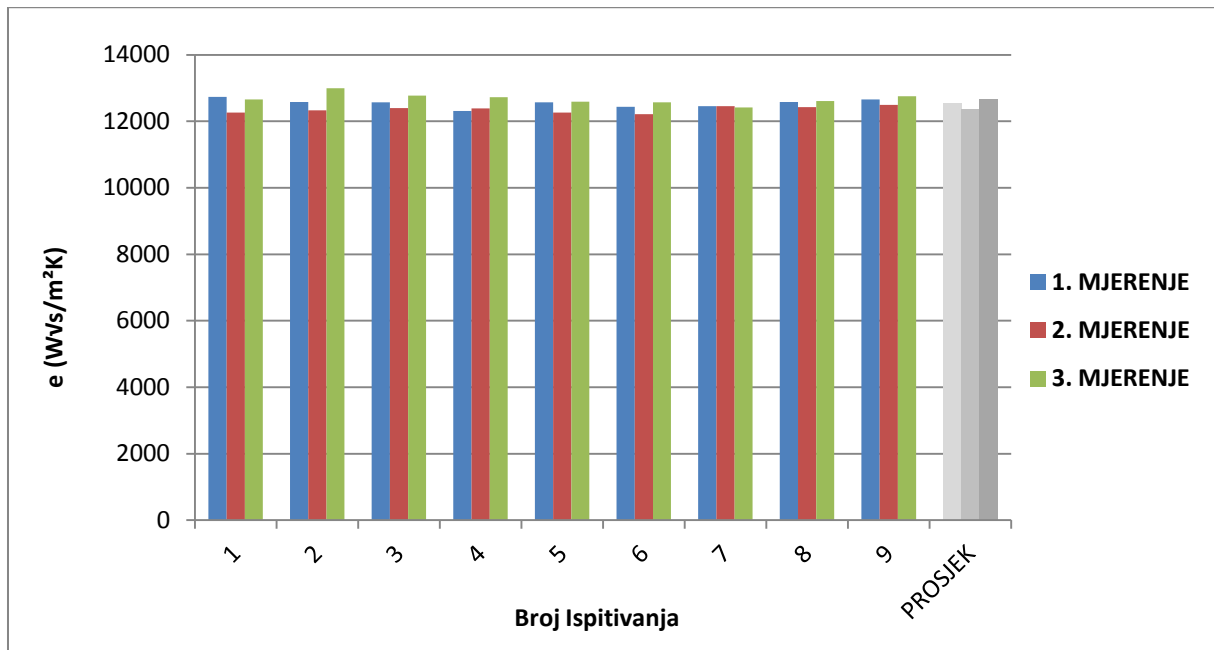
Slika 102. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s vodom kao kontaktim sredstvom

5.1.10. Sivi lijev „1A“ (voda) – hrapava strana

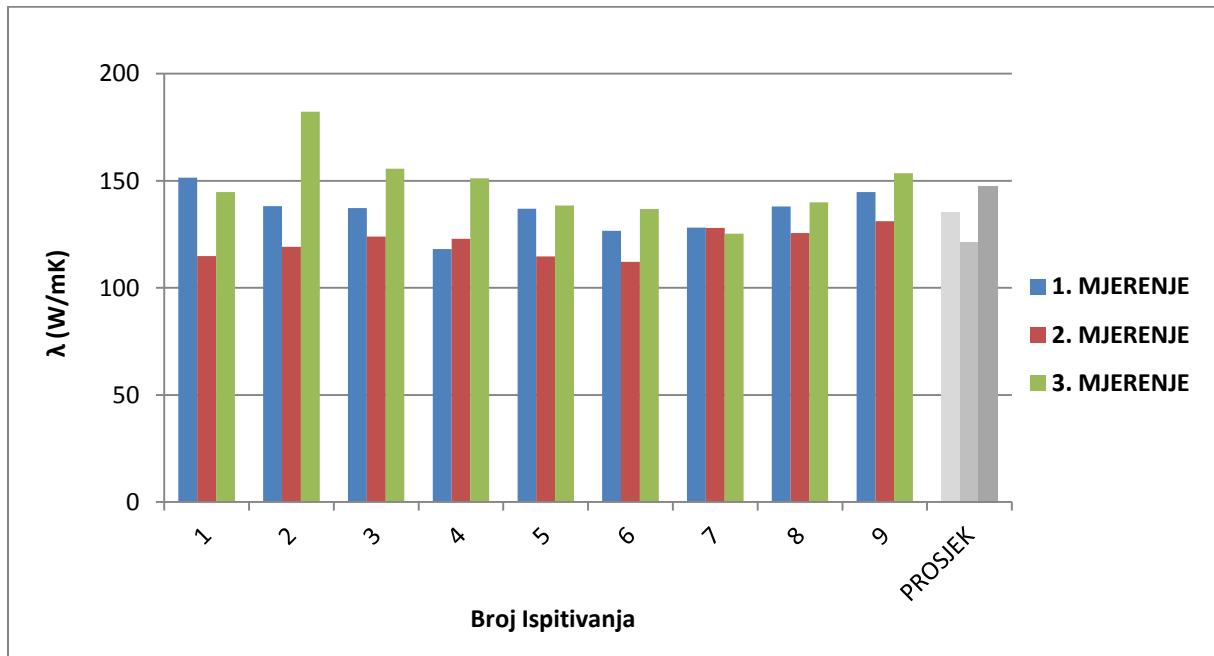
Rezultati ispitivanja hrapave strane uzorka sivog lijeva „1A“ sa kontaktnim sredstvom vodom prikazani su u **tablici 16.**, a grafički su prikazani na **slikama 103-106:**

Tablica 16. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „1A“ (voda) – hrapava strana uzorka

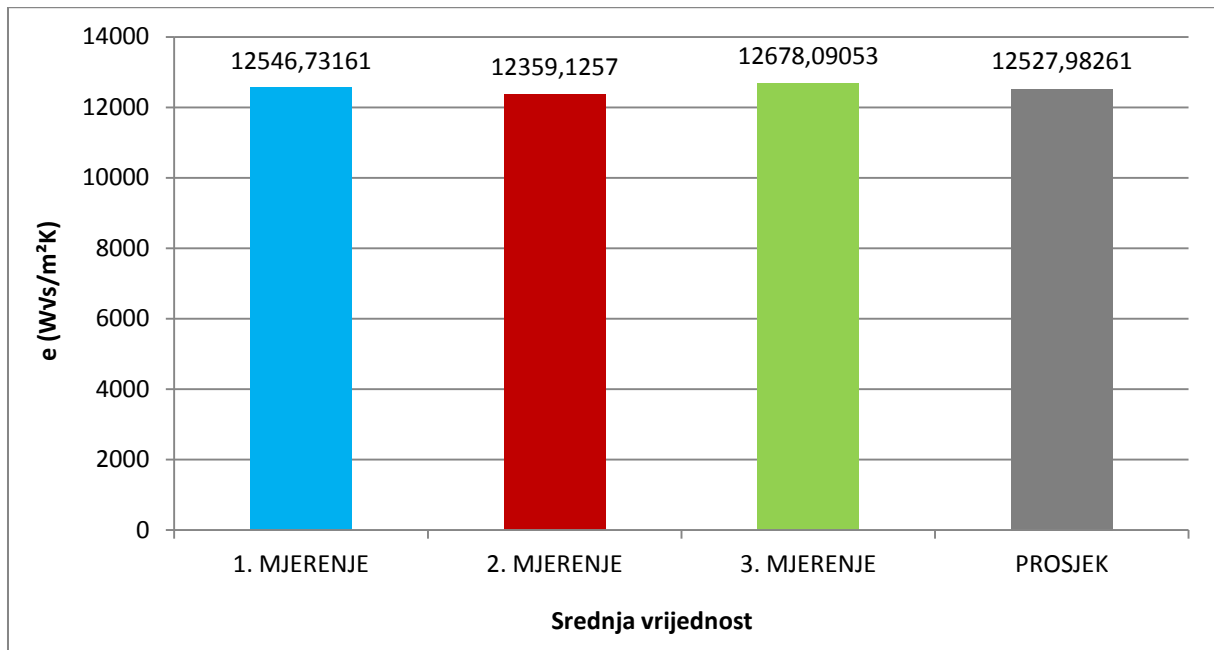
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]
1	12732,81956	151,5244923	12260,90457	114,822351	12661,28915	144,763575
2	12586,52723	138,2315299	12329,14681	119,151980	12999,12624	182,279883
3	12574,4359	137,2222302	12399,36161	123,897657	12774,60635	155,730296
4	12314,38987	118,1930172	12386,14221	122,980318	12728,80049	151,130311
5	12570,82064	136,9228847	12259,5885	114,741423	12589,35723	138,469583
6	12437,90195	126,6385819	12217,73397	112,215978	12569,76211	136,835473
7	12459,0809	128,1884347	12457,24565	128,052873	12419,80217	125,338828
8	12584,28102	138,0430791	12423,97208	125,636282	12607,09557	139,977730
9	12660,32741	144,6762154	12498,03588	131,123881	12752,97547	153,528356
SREDNJA VRIJEDNOST	12546,73161	135,5156073	12359,1257	121,402527	12678,09053	147,561557
STANDARDNA DEVIJACIJA	125,1915629	9,946228213	97,41845037	6,54310959	162,8659653	16,1141838
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	1,00%	7,34%	0,79%	5,39%	1,28%	10,92%
	e [W√s/m ² K]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	12527,98261			134,8265639		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	128,4919929			10,86784054		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	1,02%			7,88%		



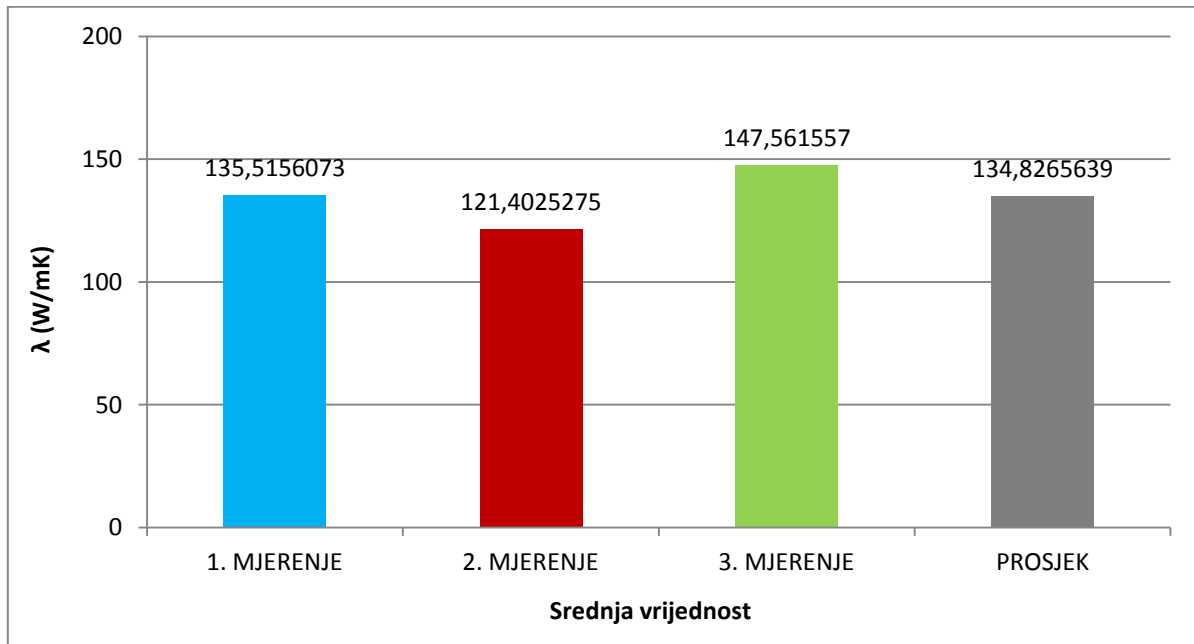
Slika 103. Grafički prikaz efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 104. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 105. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s vodom kao kontaktim sredstvom



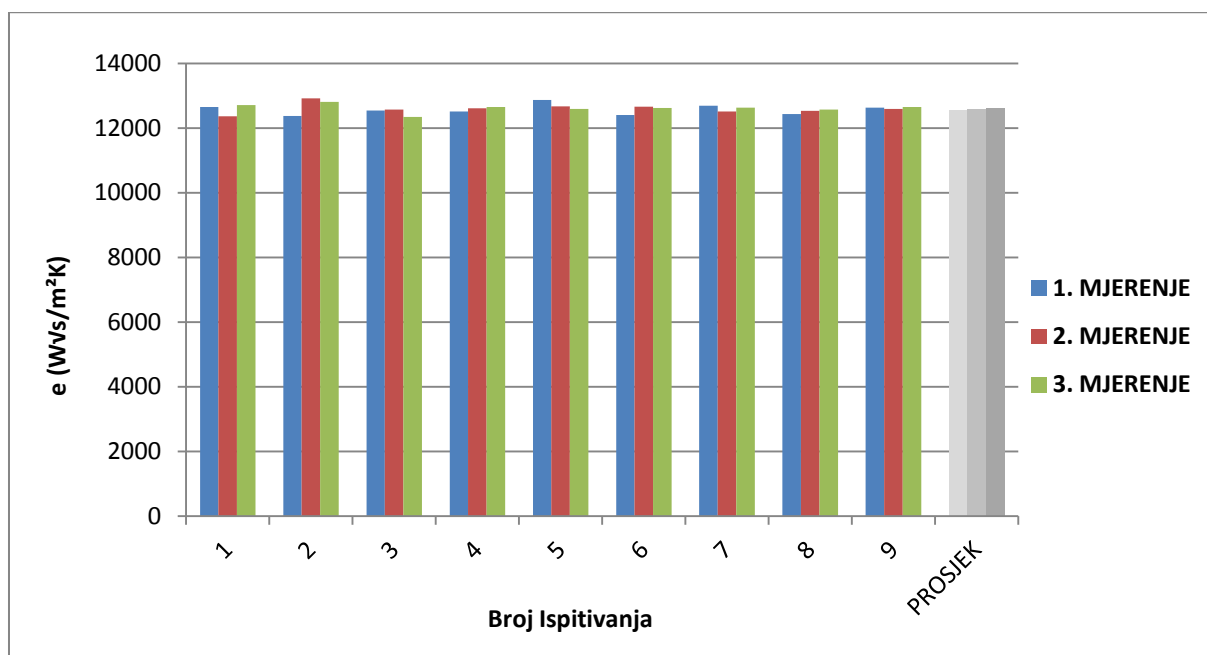
Slika 106. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „1A“ s vodom kao kontaktim sredstvom

5.1.11. Sivi lijev „9D“ (voda) – glatka strana

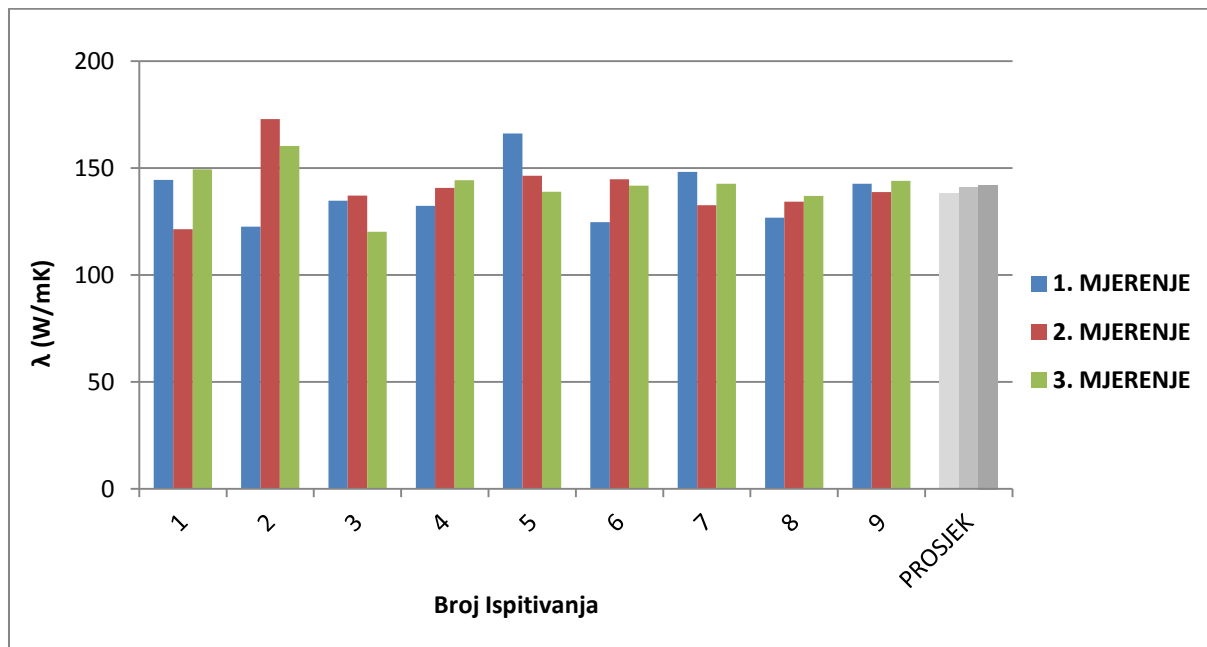
Rezultati ispitivanja glatke strane uzorka sivog lijeva „9D“ sa kontaktnim sredstvom vodom prikazani su u **tablici 17.**, a grafički su prikazani na **slikama 107-110:**

Tablica 17. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „9D“ (voda) – glatka strana uzorka

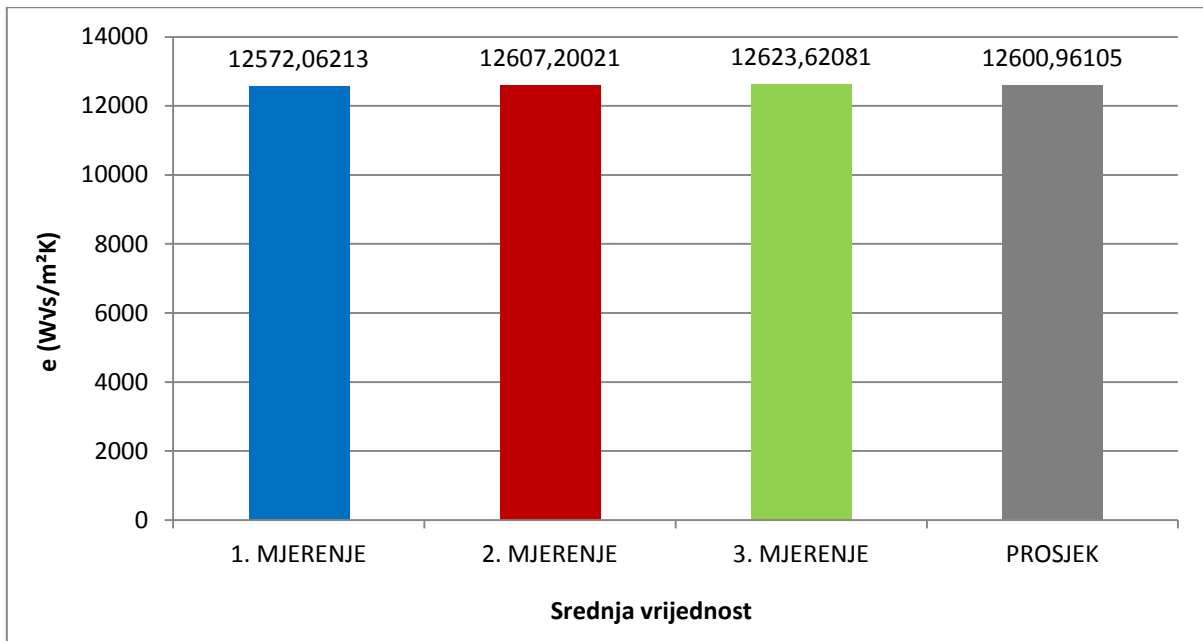
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	12657,8332	144,4500701	12363,43833	121,431065	12710,9597	149,401657
2	12380,6969	122,6057475	12926,51243	172,875803	12818,2409	160,342311
3	12543,9858	134,7351726	12572,39639	137,053220	12344,1868	120,142728
4	12512,5385	132,2458223	12615,7907	140,727262	12655,9055	144,275705
5	12869,6700	166,090937	12679,41662	146,427275	12593,8833	138,851767
6	12409,4057	124,602339	12661,60973	144,792716	12626,5609	141,665213
7	12697,6804	148,1369365	12516,15033	132,527758	12637,8662	142,661295
8	12439,4743	126,7525675	12536,89267	134,166784	12571,6690	136,993036
9	12637,2739	142,6088156	12592,5947	138,742769	12653,3145	144,041911
SREDNJA VRIJEDNOST	12572,06213	138,0253787	12607,20021	140,971628	12623,62081	142,041736
STANDARDNA DEVIJACIJA	158,4882777	13,88097502	151,7759067	14,0626326	127,1354169	10,6877749
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	1,26%	10,06%	1,20%	9,98%	1,01%	7,52%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	12600,96105			140,3462478		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	145,7998671			12,87712751		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	1,16%			9,19%		



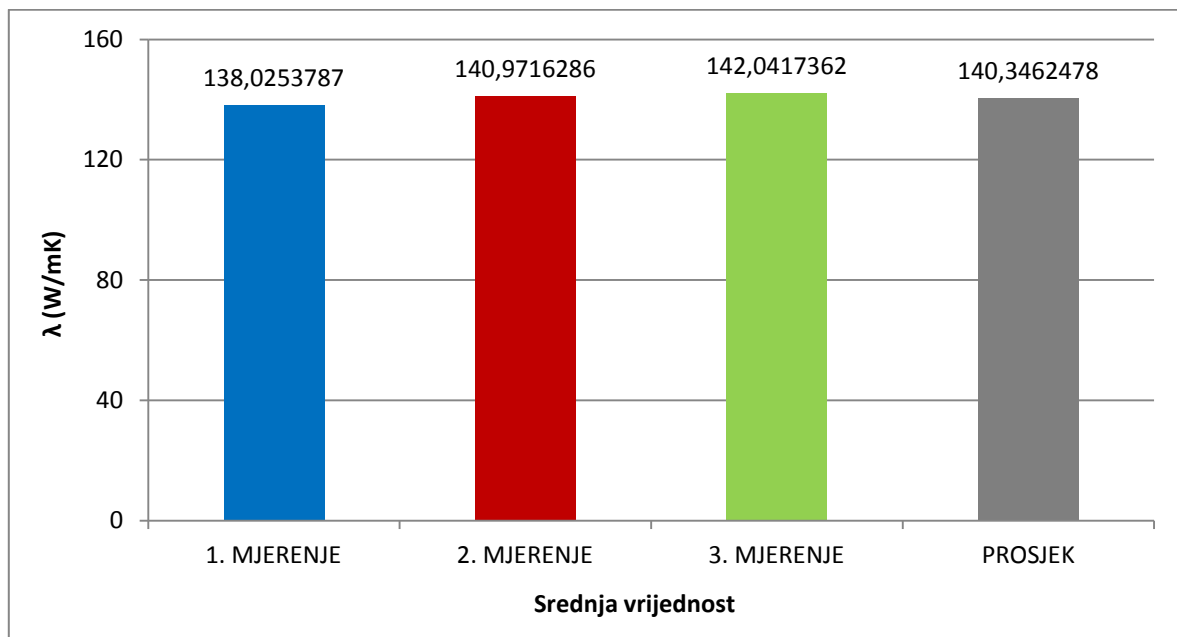
Slika 107. Grafički prikaz efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 108. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 109. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktim sredstvom



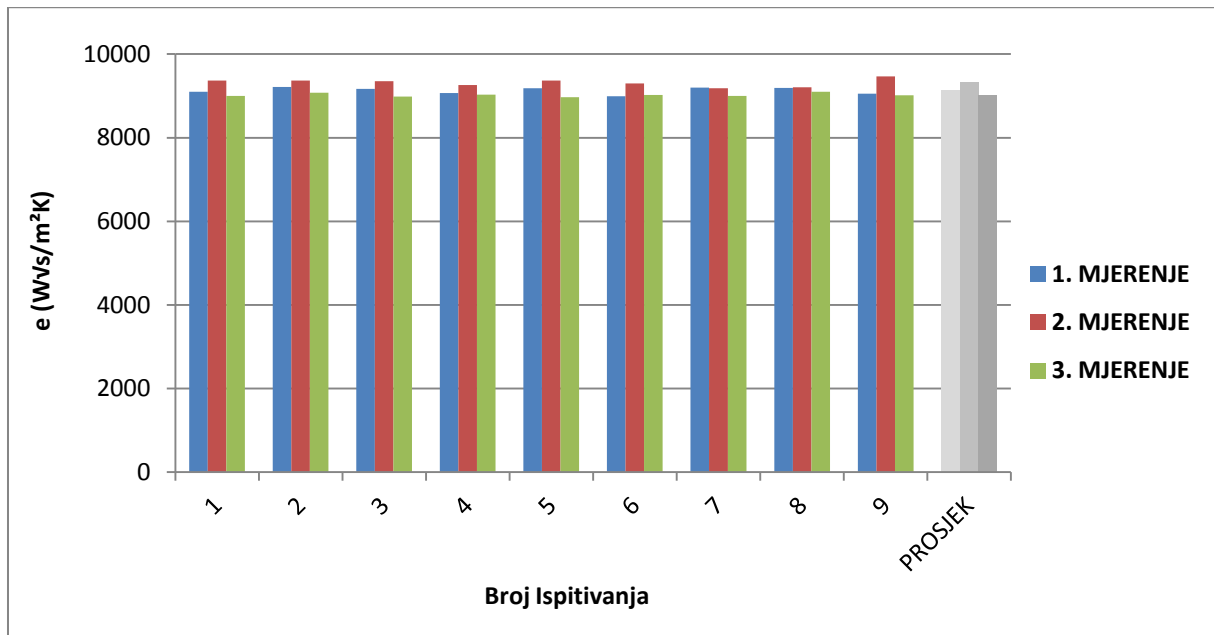
Slika 110. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za glatku stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktim sredstvom

5.1.12. Sivi lijev „9D“ (voda) – hrapava strana

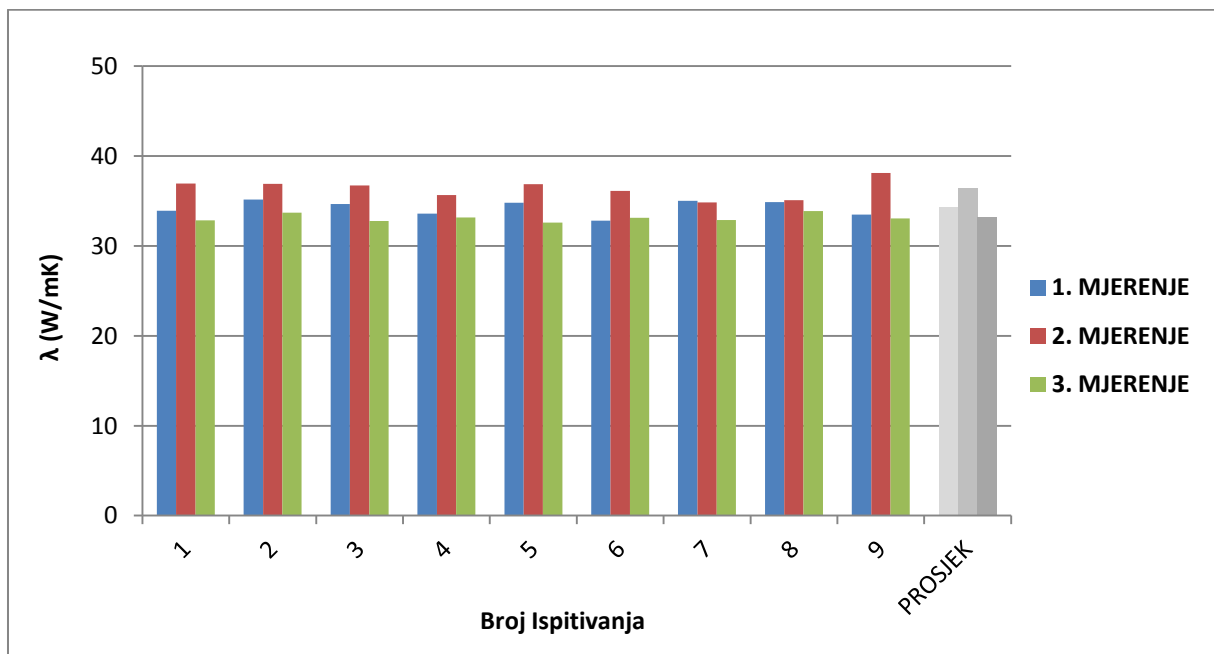
Rezultati ispitivanja hrapave strane uzorka sivog lijeva „9D“ sa kontaktnim sredstvom vodom prikazani su u **tablici 18.**, a grafički su prikazani na **slikama 111-114:**

Tablica 18. Rezultati ispitivanja uzorka sivog lijeva „9D“ (voda) – hrapava strana uzorka

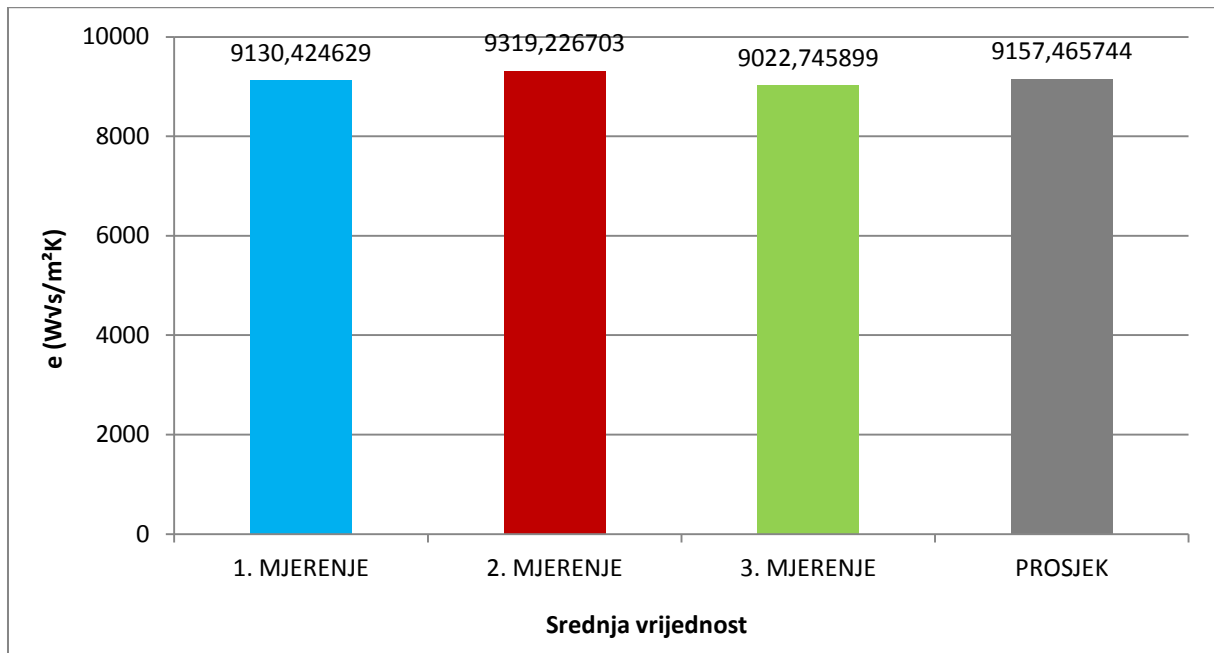
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	9371,295614	36,9494194	9711,492005	41,2360318	9116,316248	34,0942486
2	9100,505416	33,92615972	9370,52547	36,9403646	8996,627777	32,8460559
3	9214,231591	35,15781496	9366,615579	36,8944375	9079,252622	33,7017753
4	9170,174675	34,67438511	9352,430189	36,7284005	8988,52161	32,7634986
5	9068,61172	33,59009597	9259,140175	35,6590279	9027,462011	33,1623444
6	9181,069932	34,79318518	9364,265192	36,8668628	8971,782933	32,5937975
7	8991,874611	32,79761755	9298,688328	36,1076421	9024,419478	33,1309750
8	9200,136097	35,00226519	9183,888281	34,8239959	9001,213372	32,8928668
9	9189,729967	34,88796359	9208,077896	35,0898035	9097,437871	33,8936629
SREDNJA VRIJEDNOST	9130,424629	34,2559227	9319,226703	36,3595933	9022,745899	33,1166481
STANDARDNA DEVIJACIJA	78,08435921	0,830969788	90,32286187	1,04048642	41,43344344	0,42902317
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,86%	2,43%	0,97%	2,86%	0,46%	1,30%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	9157,465744			34,57738807		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	69,94688818			0,766826464		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,76%			2,19%		



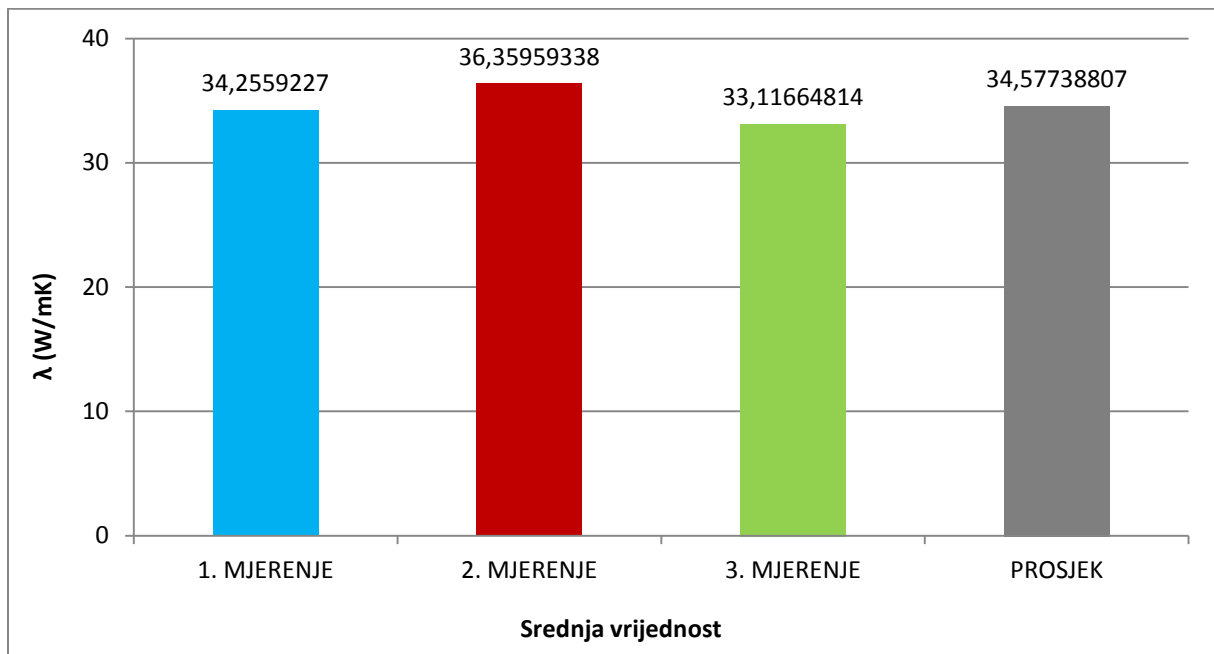
Slika 111. Grafički prikaz efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 112. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 113. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktnim sredstvom



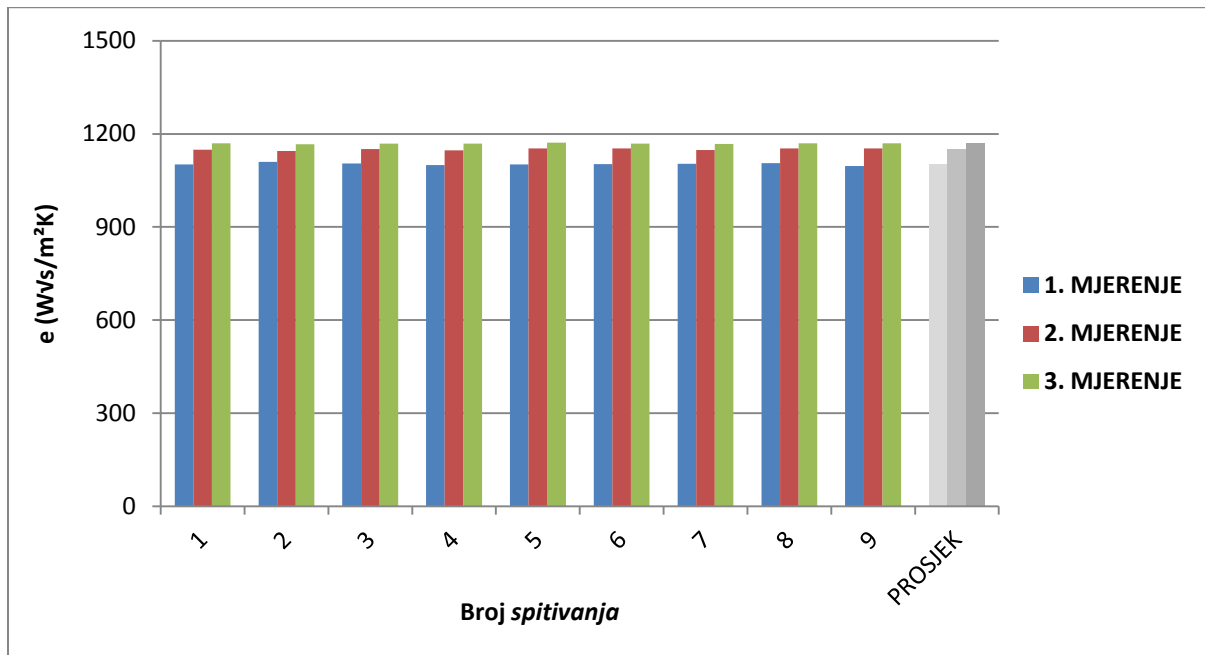
Slika 114. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za hrapavu stranu uzorka sivog lijeva „9D“ s vodom kao kontaktnim sredstvom

5.1.13. Mort/Ovčja vuna „3%-ME 2“ (glycol/suho stanje uzorka)

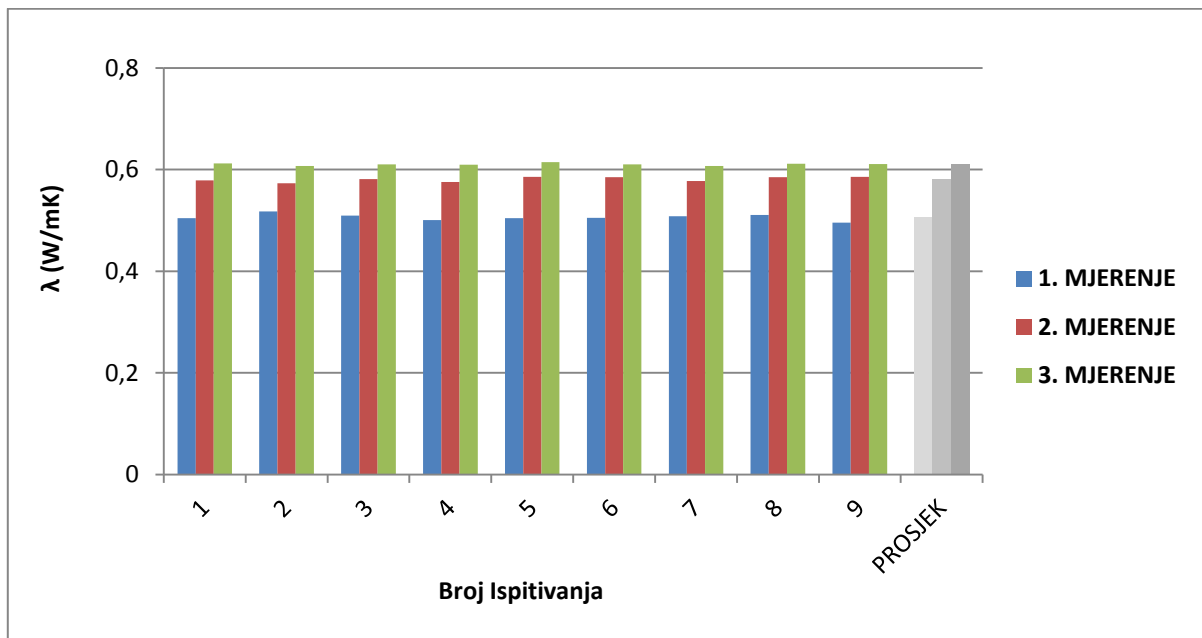
Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ u suhom stanju sa glycolom kao kontaktnim sredstvom prikazani su u **tablici 19.**, a grafički su prikazani na **slikama 115-118:**

Tablica 19. Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ (glycol) – suho stanje

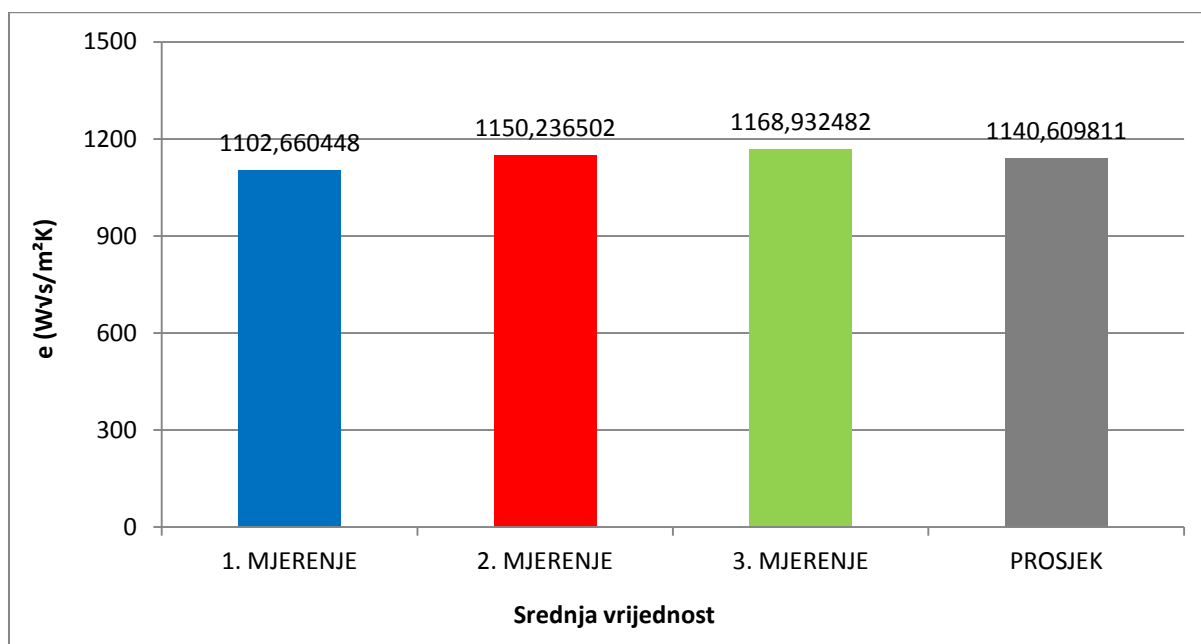
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	1101,703694	0,50475724	1149,057213	0,57908403	1169,881714	0,61196396
2	1109,827602	0,51746540	1145,11994	0,57288077	1166,654794	0,60686118
3	1104,554038	0,50921398	1150,55838	0,58145026	1168,761471	0,61019217
4	1099,07107	0,50064288	1146,721056	0,57540285	1168,527344	0,60982192
5	1101,376366	0,50424558	1153,424977	0,58597049	1171,813953	0,61502080
6	1102,09834	0,50537417	1152,852837	0,58506812	1168,994007	0,61055993
7	1103,770753	0,50798903	1148,211433	0,57775113	1167,047027	0,60748127
8	1105,562725	0,51079167	1152,908928	0,58515658	1169,466296	0,61130689
9	1095,979449	0,49581357	1153,273754	0,58573197	1169,245731	0,61095804
SREDNJA VRIJEDNOST	1102,660448	0,50625484	1150,236502	0,58094402	1168,932482	0,61046291
STANDARDNA DEVIJACIJA	3,95299507	0,00618054	3,112698727	0,00490630	1,521798837	0,00240679
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,36%	1,22%	0,27%	0,84%	0,13%	0,39%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	1140,609811			0,56588726		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	2,862497545			0,004497881		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,25%			0,82%		



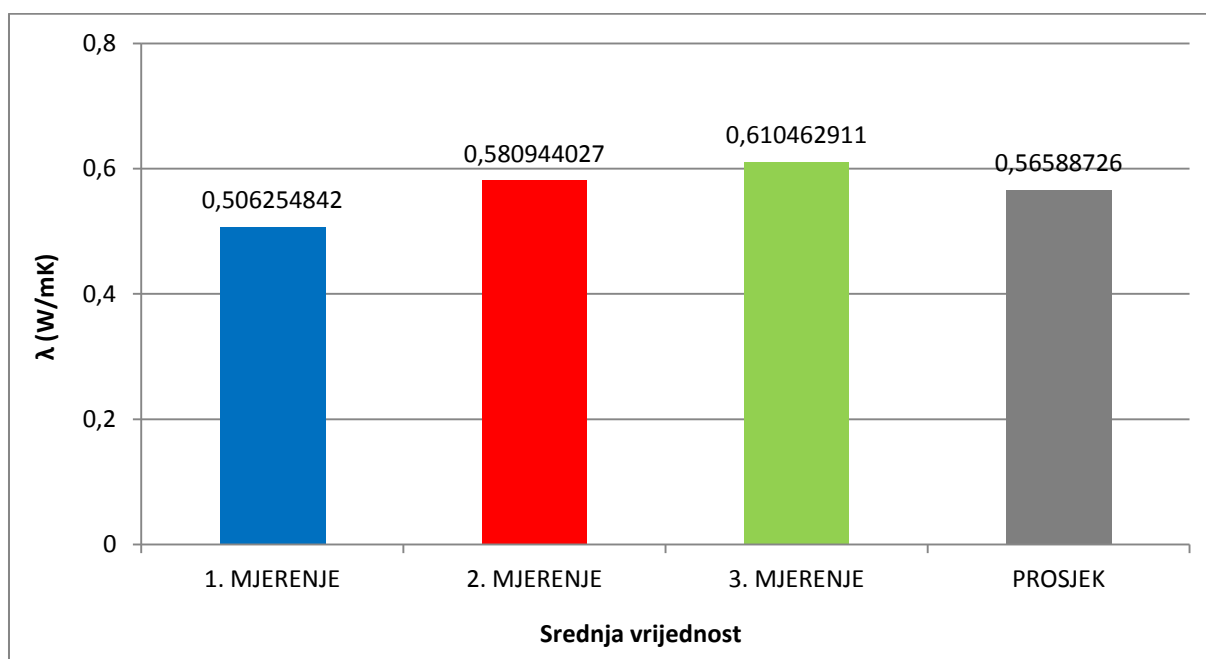
Slika 115. Grafički prikaz efuzivnosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 116. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 117. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom



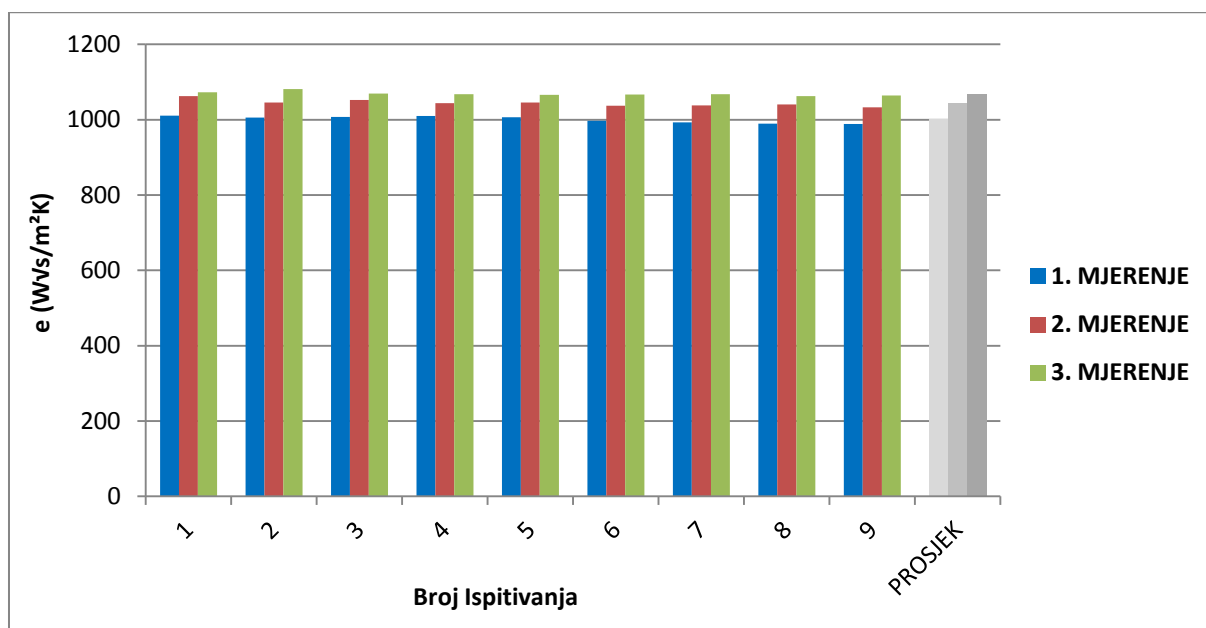
Slika 118. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom

5.1.14. Mort/Ovčja vuna „5%-ME 2“ (glycol/suho stanje uzorka)

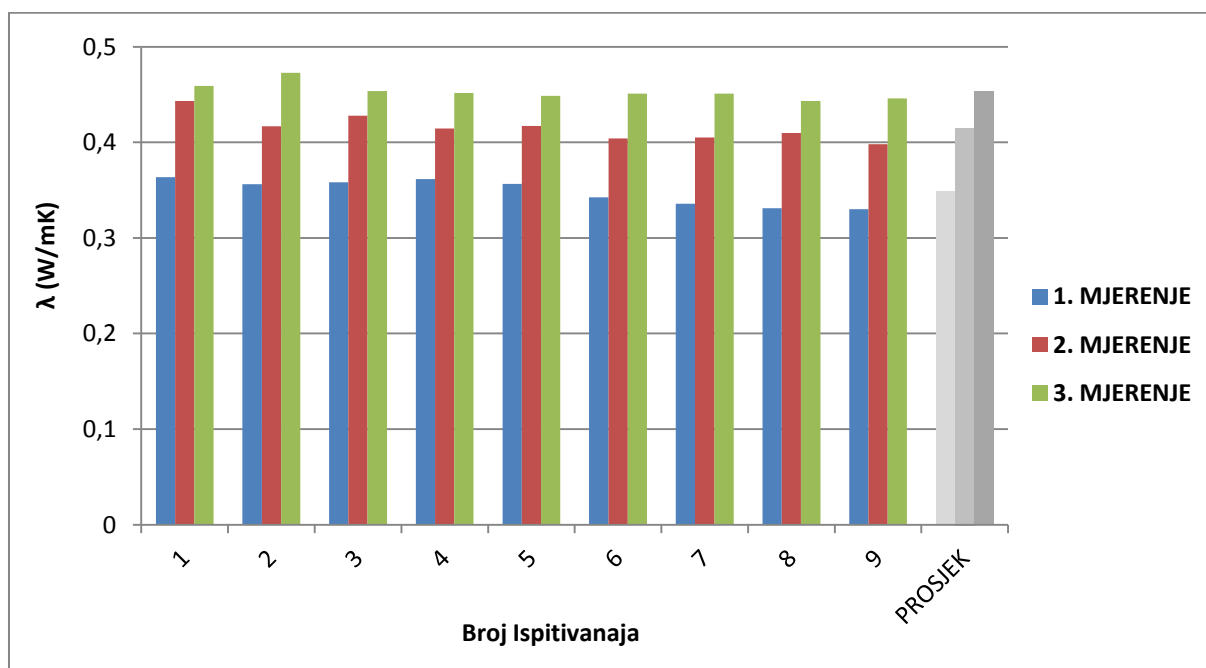
Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ u suhom stanju sa glycolom kao kontaktnim sredstvom prikazani su u **tablici 20.**, a grafički su prikazani na **slikama 119-122:**

Tablica 20. Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ (glycol) – suho stanje

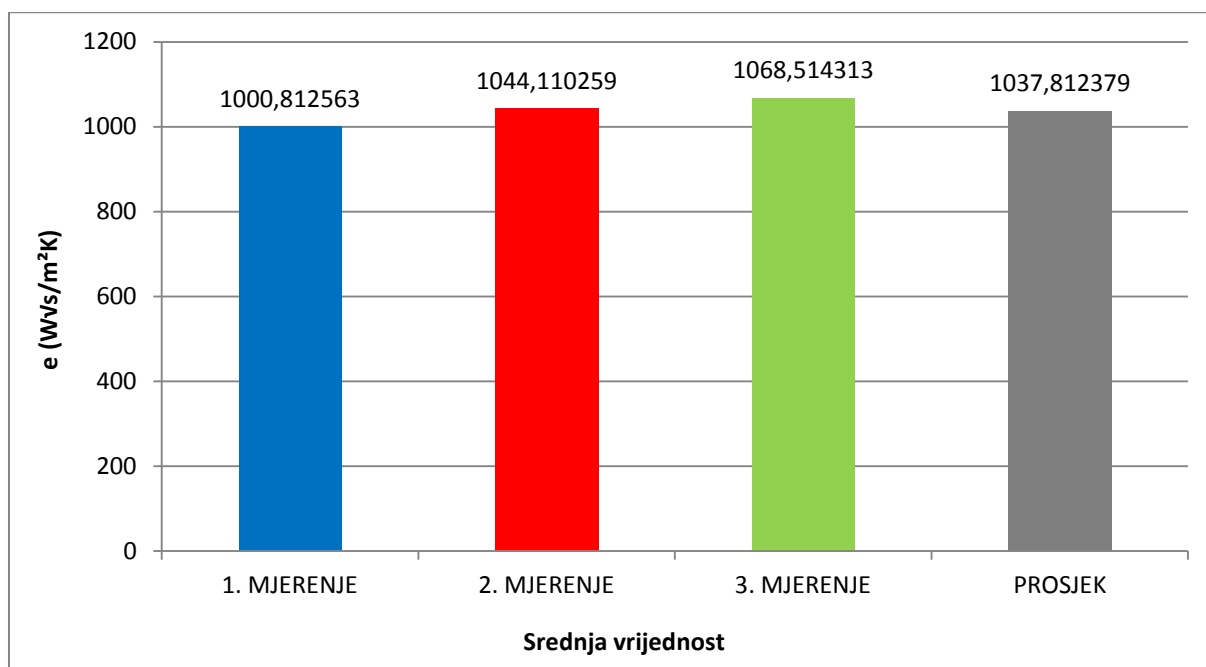
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	1010,647939	0,363532966	1062,2782	0,44333709	1072,43926	0,45912680
2	1005,988559	0,356365918	1045,174238	0,41682099	1081,269772	0,47287144
3	1007,198909	0,358227122	1052,350936	0,42793742	1068,974055	0,45373896
4	1009,463862	0,361711077	1043,583992	0,41435962	1067,563823	0,45154719
5	1006,07316	0,356496	1045,458543	0,41726110	1065,756755	0,44873945
6	997,0164493	0,342581228	1036,919963	0,40405243	1067,098617	0,45082429
7	992,5852495	0,335781016	1037,697299	0,40525412	1067,199416	0,45098092
8	989,4878654	0,331030785	1040,572193	0,40969983	1062,325546	0,44341060
9	988,8510748	0,3300545	1032,956971	0,39792853	1064,001573	0,44601317
SREDNJA VRIJEDNOST	1000,812563	0,348420068	1044,110259	0,41518346	1068,514313	0,45302809
STANDARDNA DEVIJACIJA	8,805218374	0,013523614	8,880806871	0,01375346	5,581494743	0,00868041
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,88%	3,88%	0,85%	3,31%	0,52%	1,92%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	1037,812379			0,405543877		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	7,755839996			0,011985829		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,75%			3,04%		



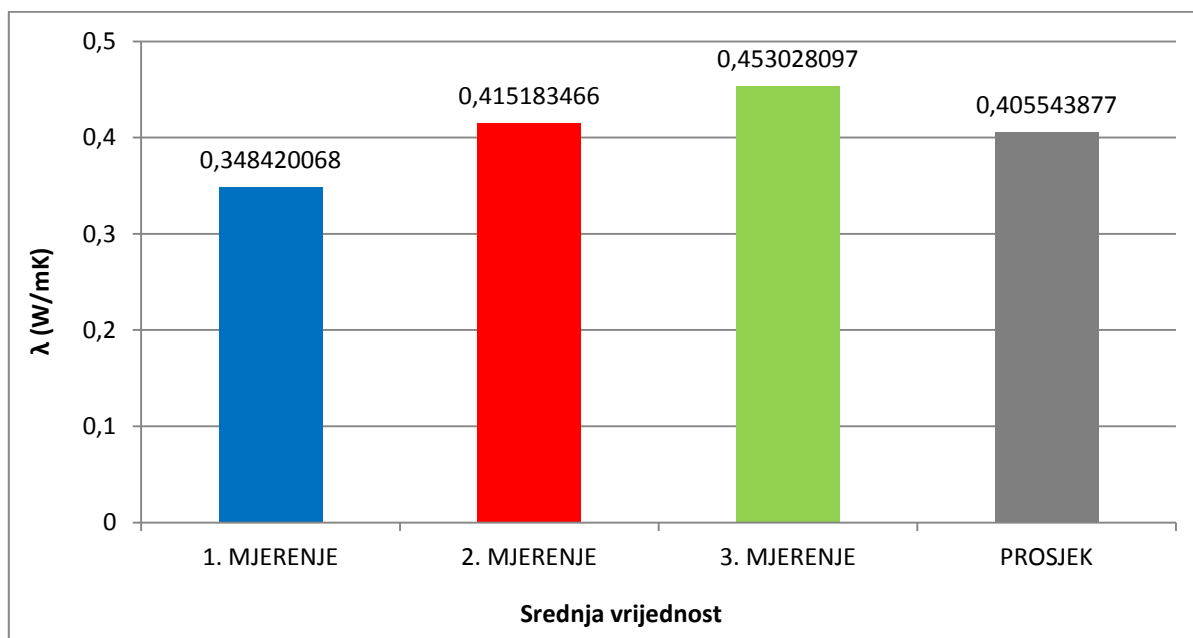
Slika 119. Grafički prikaz efuzivnosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 120. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 121. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom



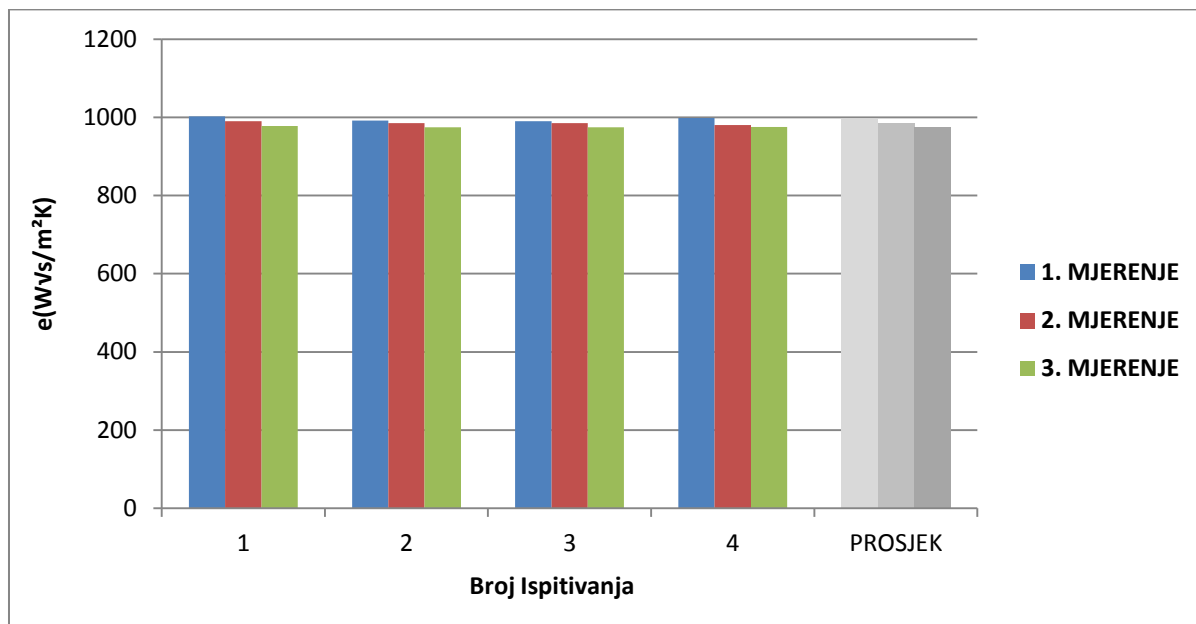
Slika 122. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom

5.1.15. Mort/Ovčja vuna „10%-ME 2“ (glycol/suho stanje uzorka)

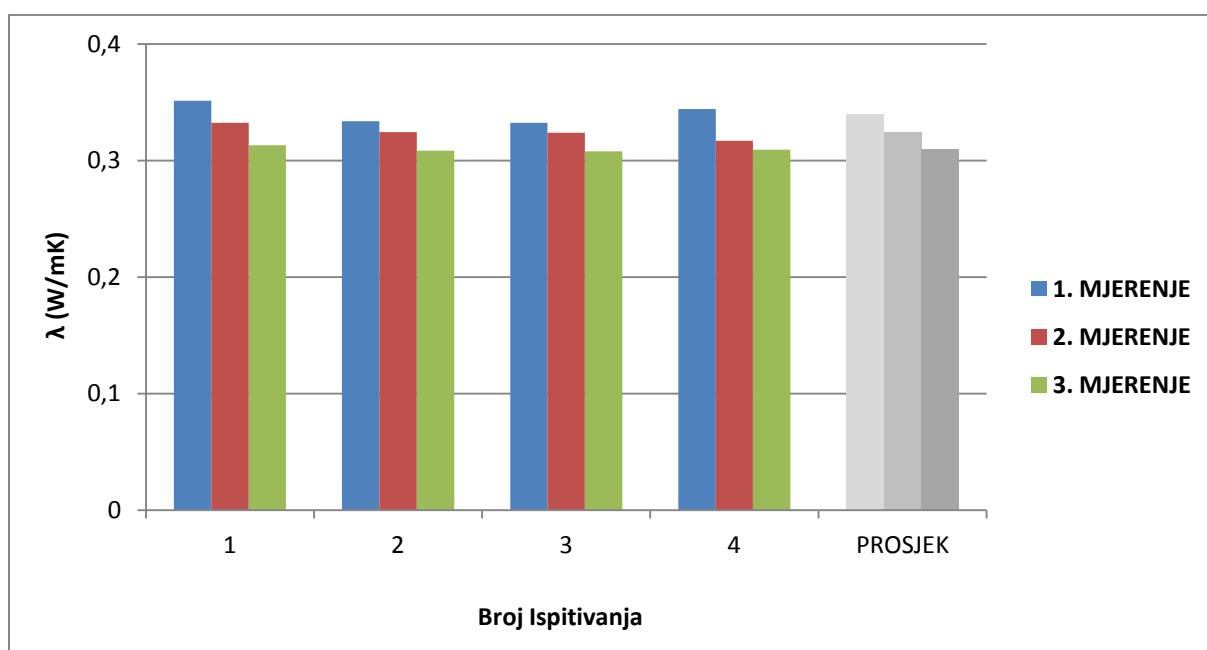
Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ u suhom stanju sa glycolom kao kontaktnim sredstvom prikazani su u **tablici 21.**, a grafički su prikazani na **slikama 123-126:**

Tablica 21. Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ (glycol) – suho stanje

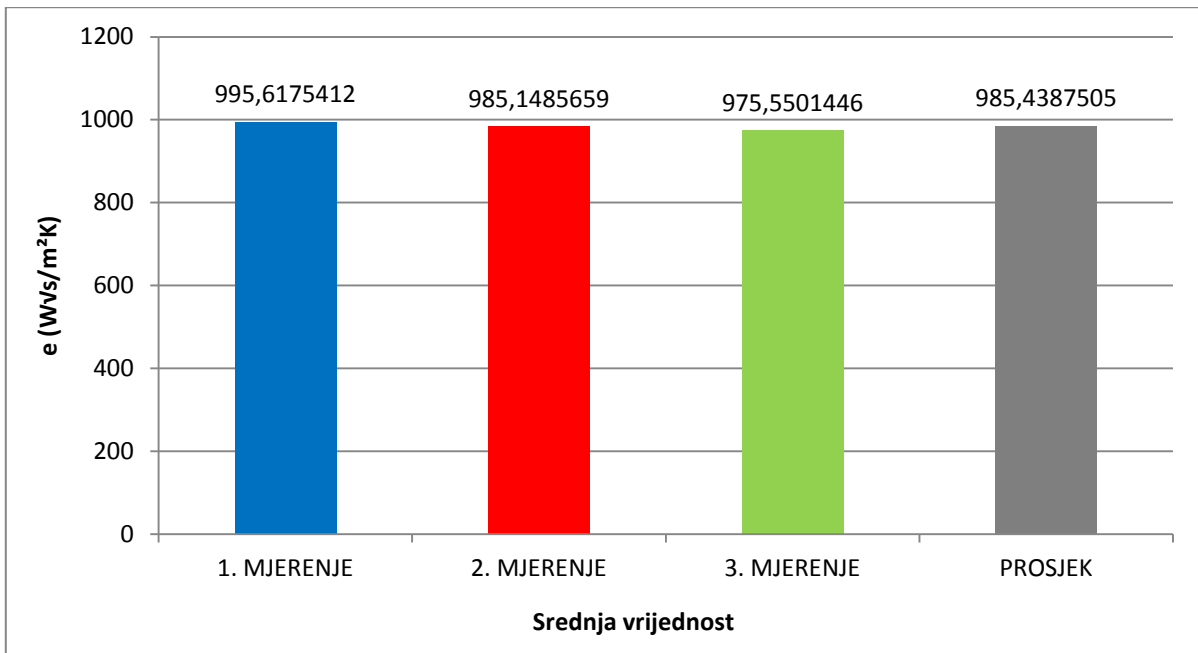
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	1002,663219	0,351254403	990,3669677	0,33237874	977,8431445	0,31319477
2	991,3332283	0,333860577	985,1594835	0,32439690	974,681333	0,30835805
3	990,3979193	0,332426205	984,7660579	0,32379416	974,4759512	0,30804396
4	998,0757979	0,344207695	980,3017544	0,31695760	975,2001495	0,30915151
SREDNJA VRIJEDNOST	995,6175412	0,34043722	985,1485659	0,32438185	975,5501446	0,30968707
STANDARDNA DEVIJACIJA	5,810461743	0,008919203	4,117836408	0,00630912	1,558746304	0,00238445
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,58%	2,62%	0,42%	1,94%	0,16%	0,77%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	985,4387505			0,324835384		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	3,829014818			0,005870929		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,39%			1,78%		



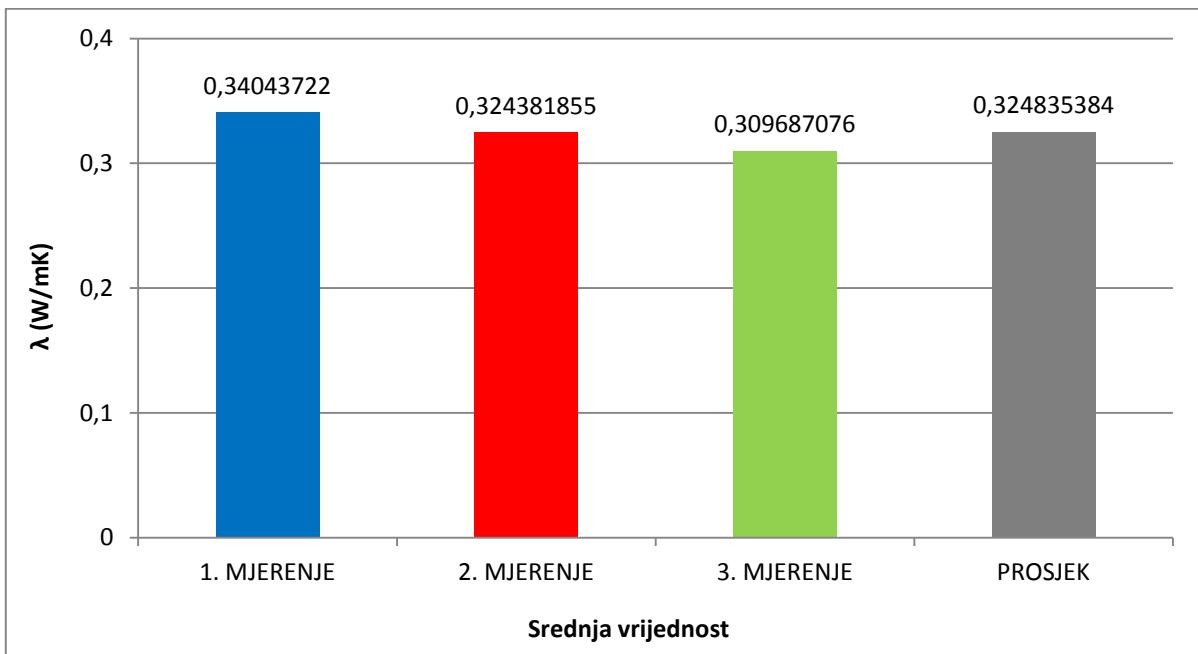
Slika 123. Grafički prikaz efuzivnosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 124. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 125. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom



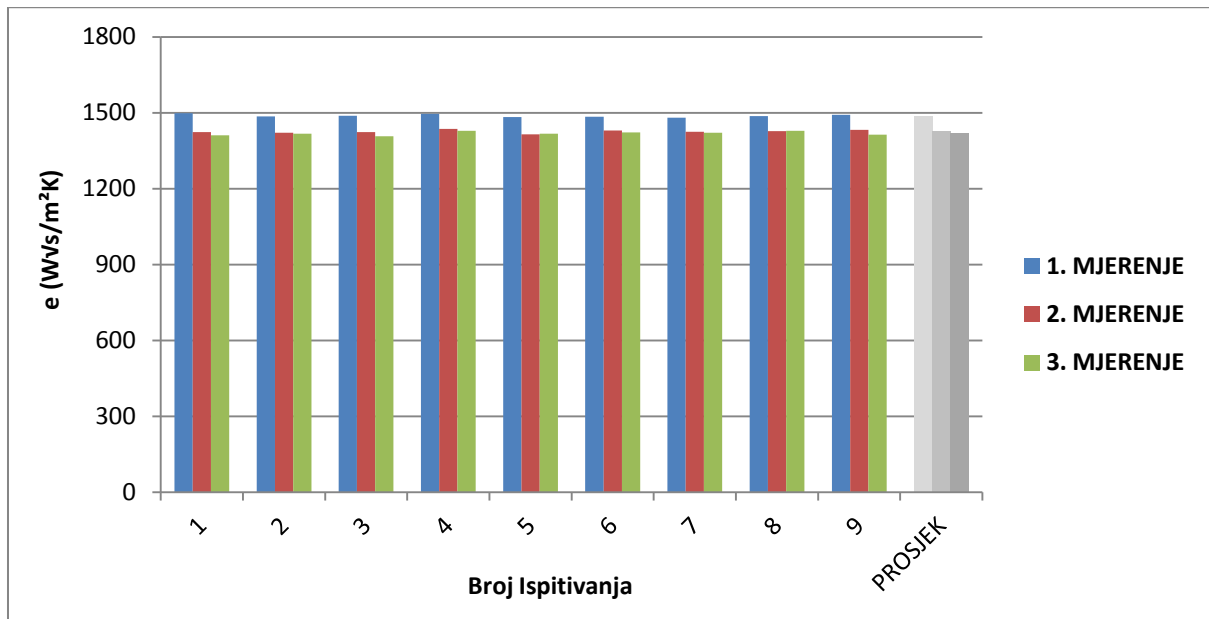
Slika 126. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za suho stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom

5.1.16. Mort/Ovčja vuna „3%-ME 2“ (glycol/vlažno stanje uzorka)

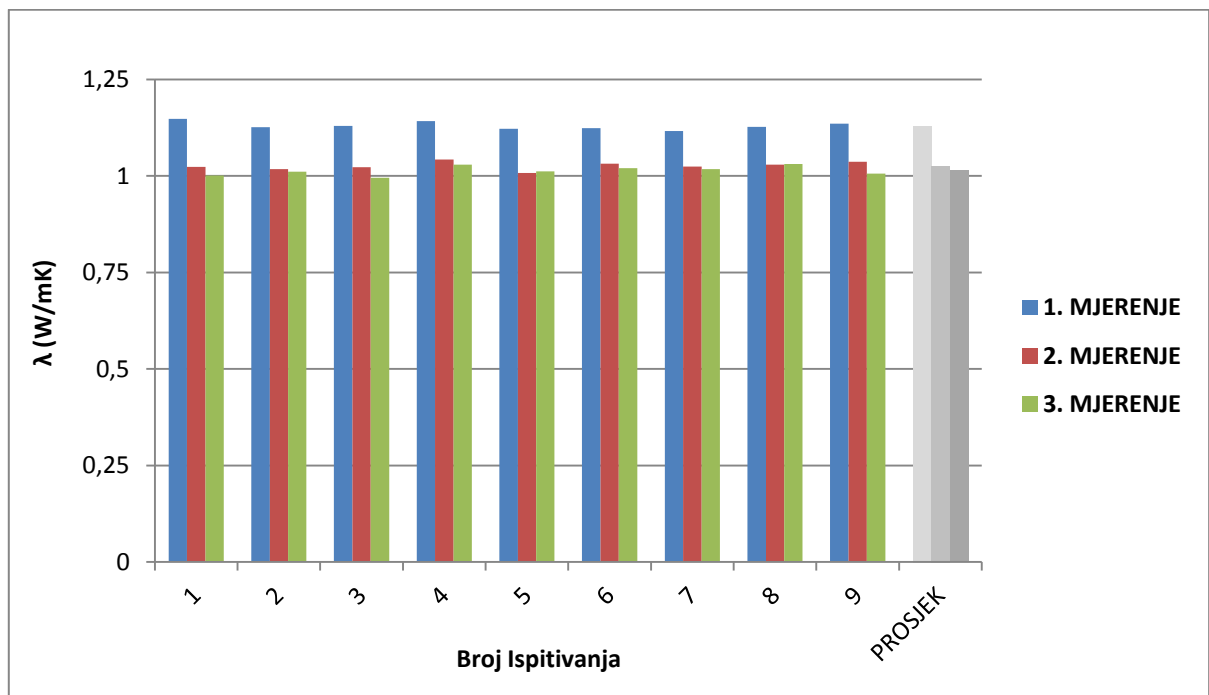
Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ u vlažnom stanju sa glycolom kao kontaktnim sredstvom prikazani su u **tablici 22.**, a grafički su prikazani na **slikama 127.-130:**

Tablica 22. Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ (glycol) – vlažno stanje

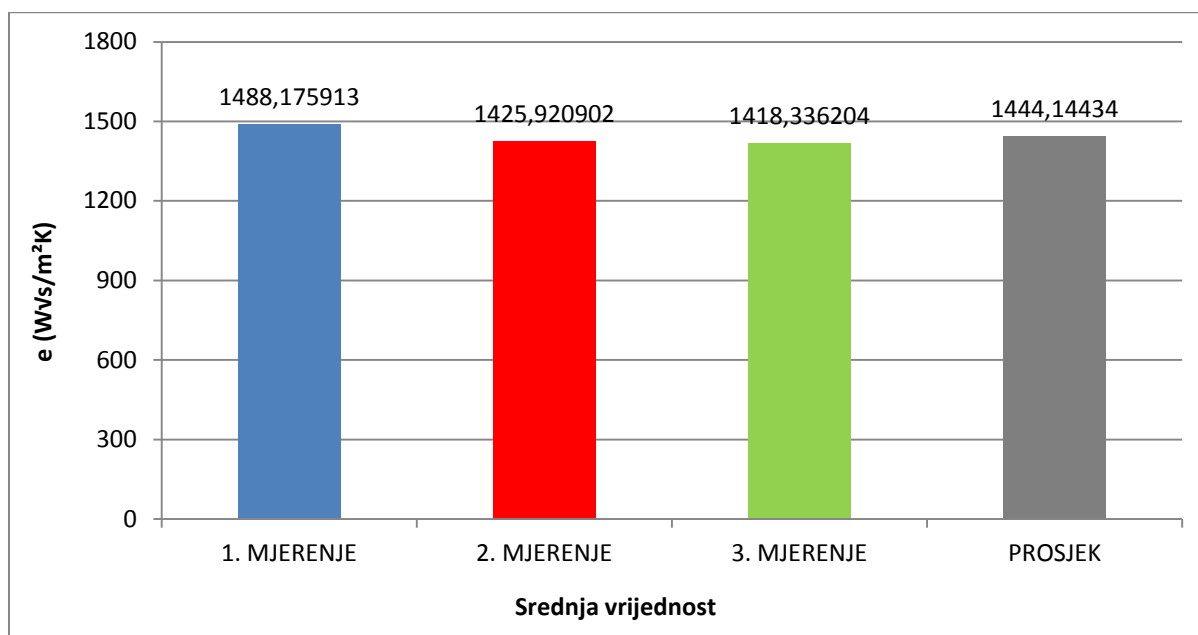
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]
1	1498,72012	1,147294817	1423,982706	1,02290950	1410,519089	1,00067491
2	1485,870575	1,125792937	1420,504444	1,01716027	1416,773664	1,01099755
3	1487,905515	1,129194881	1423,889228	1,02275495	1407,08698	0,99501531
4	1495,367052	1,14167925	1435,638724	1,04220135	1427,931253	1,02944321
5	1483,559688	1,121931148	1414,897156	1,00789935	1417,310366	1,01188386
6	1484,415667	1,123361416	1429,29166	1,03169145	1422,011724	1,01965123
7	1479,991474	1,115971284	1424,836096	1,02432061	1420,723187	1,01752173
8	1486,476496	1,126805768	1427,804212	1,02923012	1428,811913	1,03089753
9	1491,276635	1,134833287	1432,443895	1,03690967	1413,857661	1,00618353
SREDNJA VRIJEDNOST	1488,175913	1,129651643	1425,920902	1,0261197	1418,336204	1,01358511
STANDARDNA DEVIJACIJA	5,949968529	0,009951864	6,243160932	0,01032520	7,350307256	0,01214128
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,40%	0,88%	0,44%	1,01%	0,52%	1,02%
	e [W√s/m ² K]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	1444,14434			1,056452152		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	6,514478906			0,010806116		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,45%			1,03%		



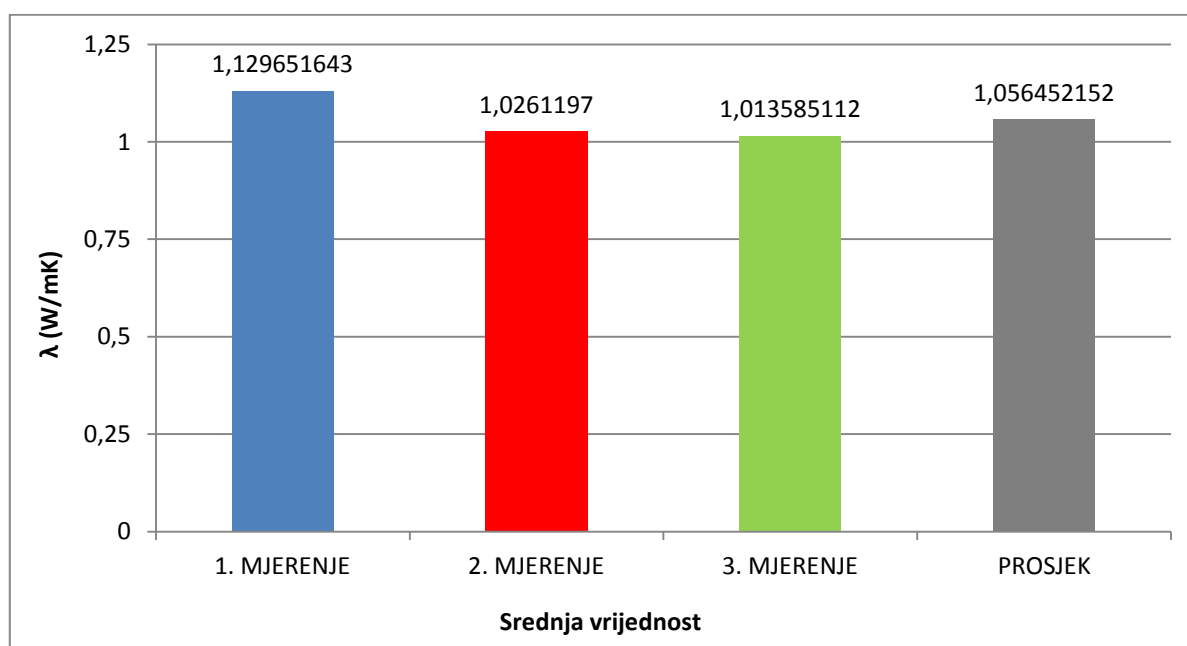
Slika 127. Grafički prikaz efuzivnosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 128. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 129. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom



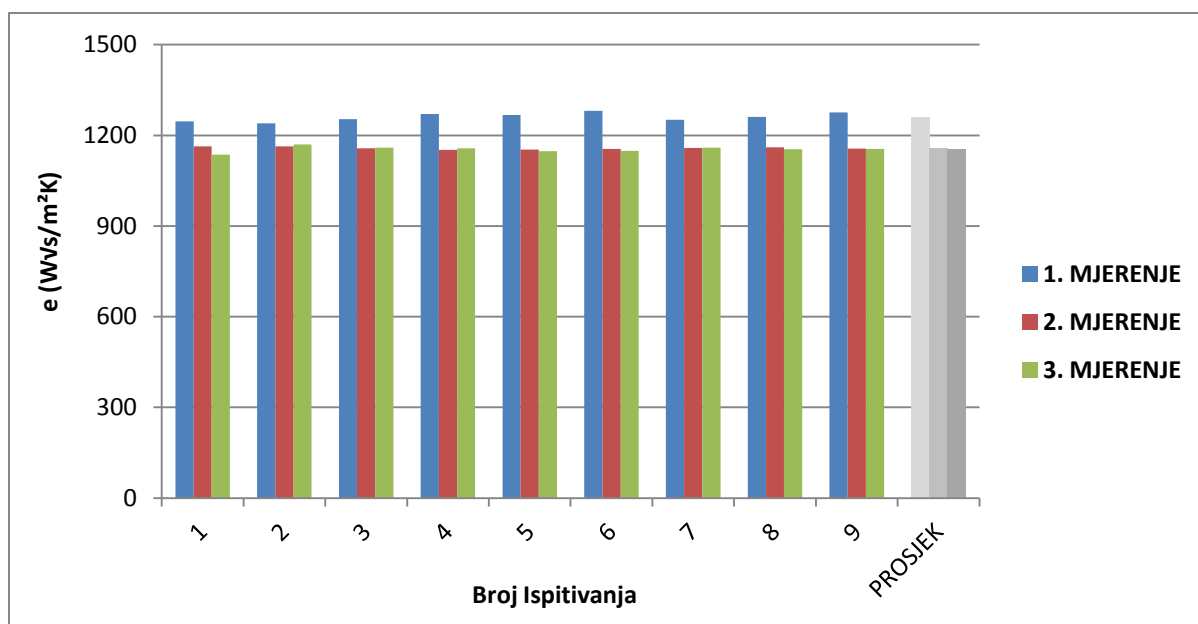
Slika 130. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „3%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom

5.1.17. Mort/Ovčja vuna „5%-ME 2“ (glycol/ vlažno stanje uzorka)

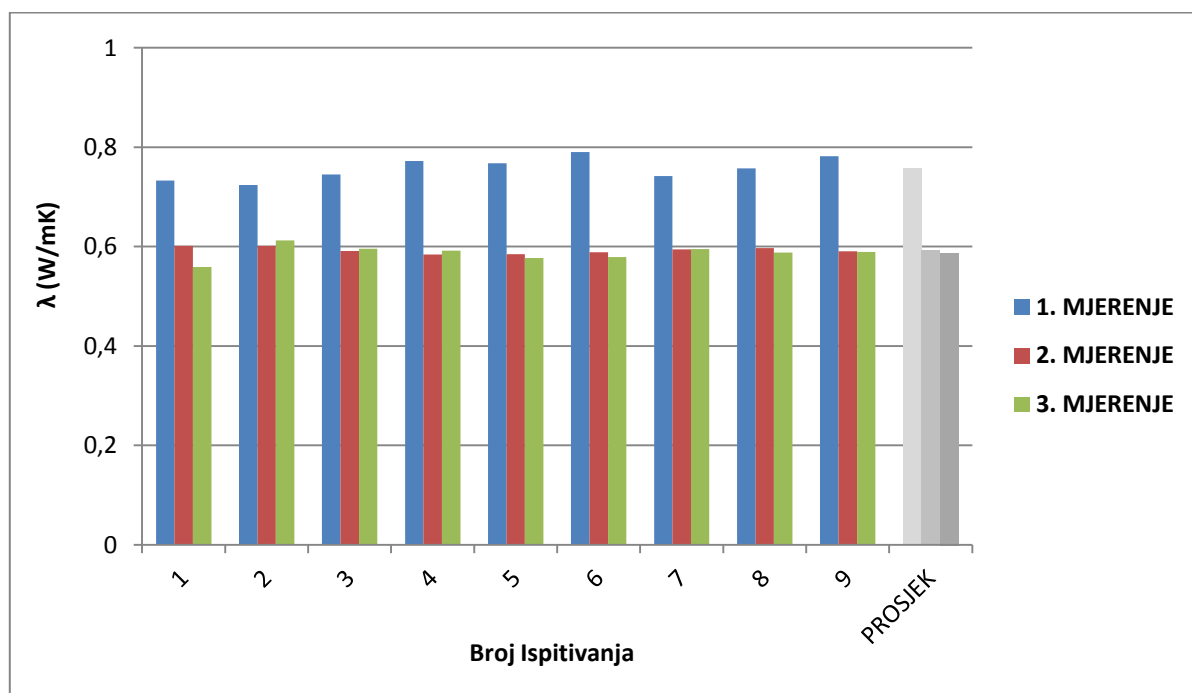
Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ u vlažnom stanju sa glycolom kao kontaktnim sredstvom prikazani su u **tablici 23.**, a grafički su prikazani na **slikama 131-134:**

Tablica 23. Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ (glycol) – vlažno stanje

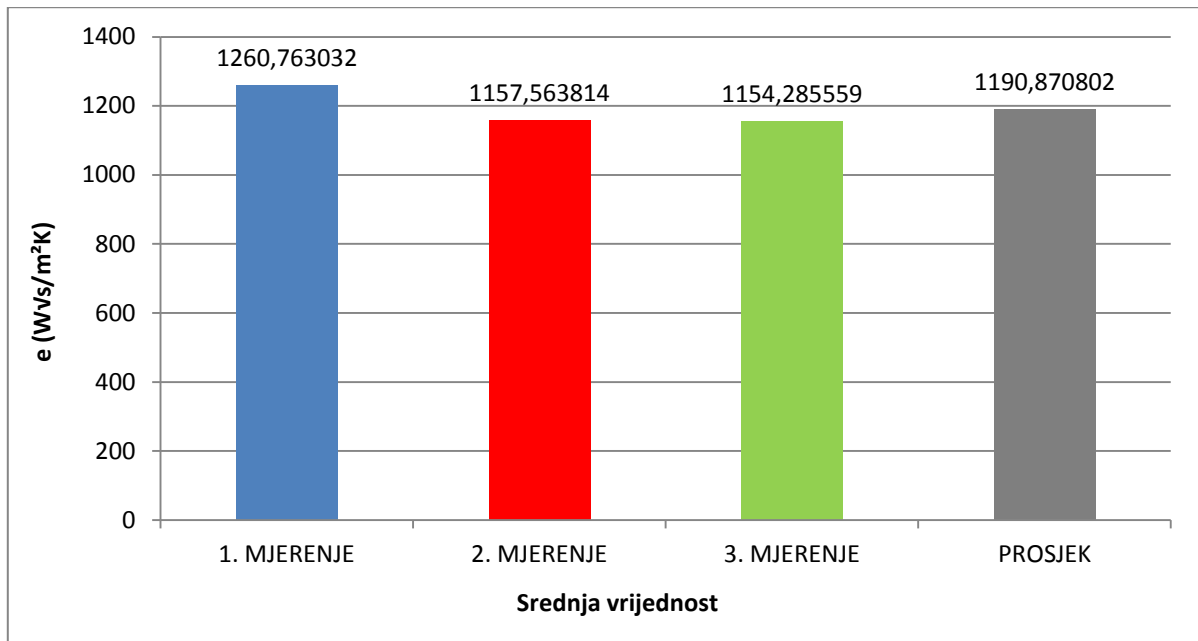
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	1245,732853	0,732735446	1163,352707	0,60164249	1136,270245	0,55895327
2	1240,210493	0,723888823	1163,183346	0,60137491	1169,958036	0,61208468
3	1253,444105	0,745102825	1156,617527	0,59100733	1159,6021	0,59578584
4	1270,33978	0,77225836	1152,323029	0,58423260	1157,135675	0,59182507
5	1267,503371	0,767693967	1152,630162	0,58471695	1147,820972	0,57713585
6	1281,227344	0,789799748	1154,816893	0,58816615	1149,091513	0,57913809
7	1251,387174	0,741802276	1158,630836	0,59418514	1158,986798	0,59474710
8	1260,981324	0,757207136	1160,173491	0,59662082	1154,450454	0,58758806
9	1276,040847	0,781439427	1156,346334	0,59057937	1155,254235	0,58885614
SREDNJA VRIJEDNOST	1260,763032	0,75688089	1157,563814	0,59250286	1154,285559	0,58733854
STANDARDNA DEVIJACIJA	14,04982274	0,022577187	4,104409307	0,00647876	9,343467074	0,01473533
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	1,11%	2,98%	0,35%	1,09%	0,81%	2,51%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	1190,870802			0,645574102		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	9,165899708			0,014597094		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,76%			2,20%		



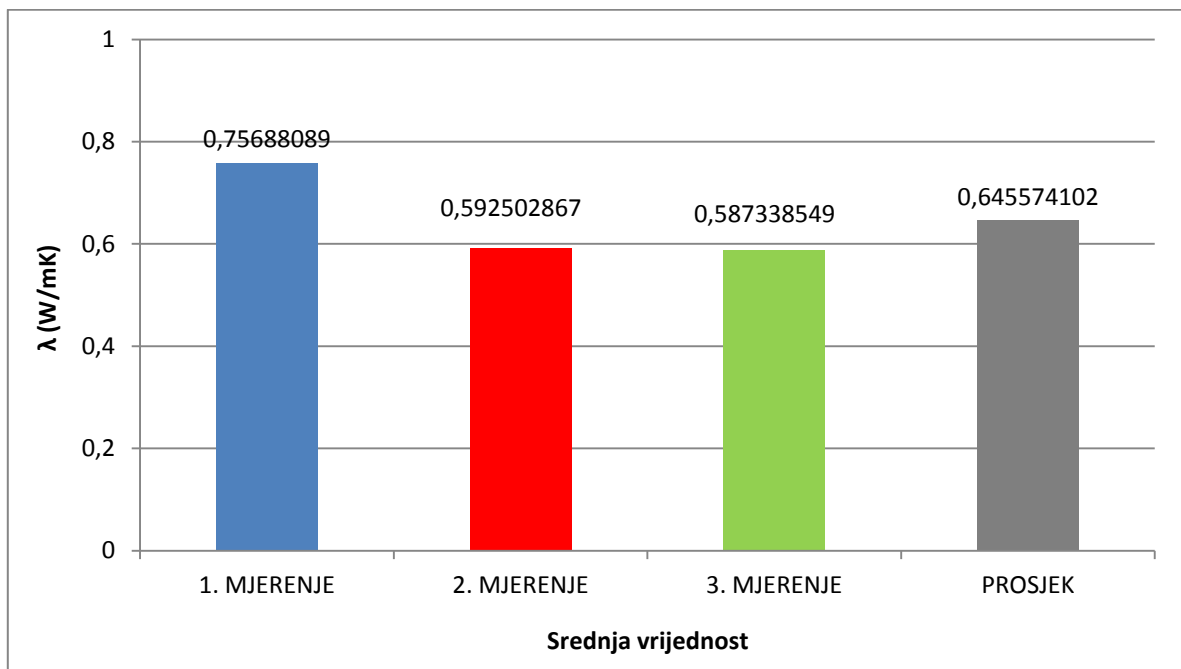
Slika 131. Grafički prikaz efuzivnosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 132. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 133. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom



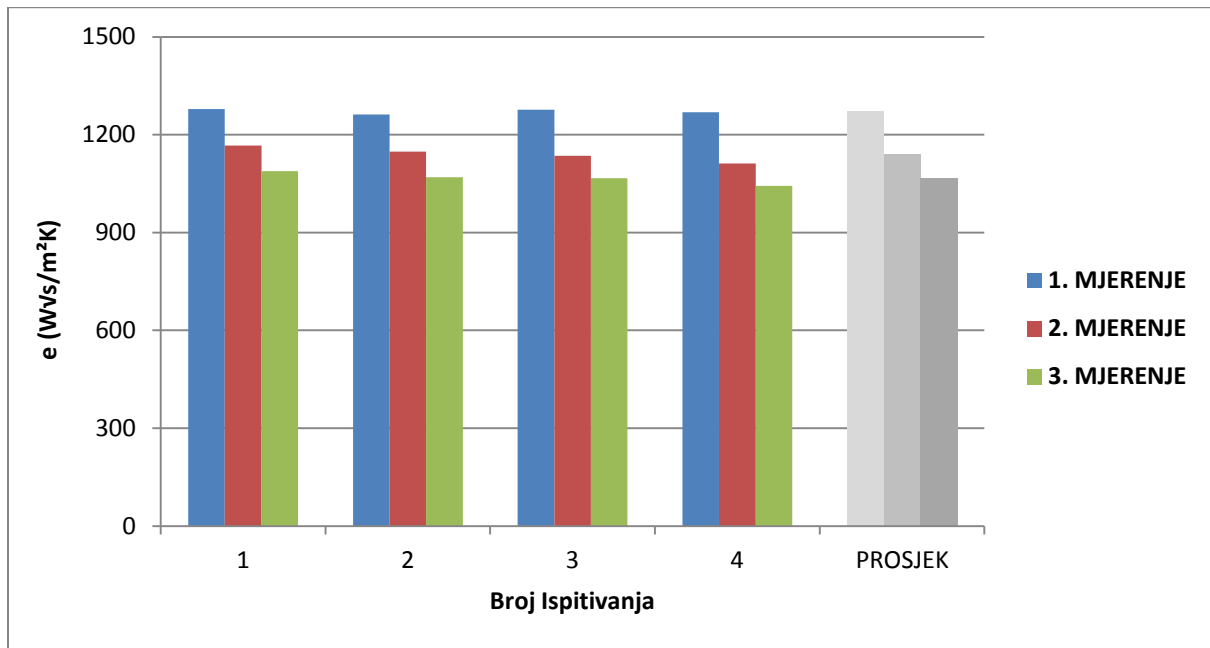
Slika 134. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „5%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom

5.1.18. Mort/Ovčja vuna „10%-ME 2“ (glycol/ vlažno stanje uzorka)

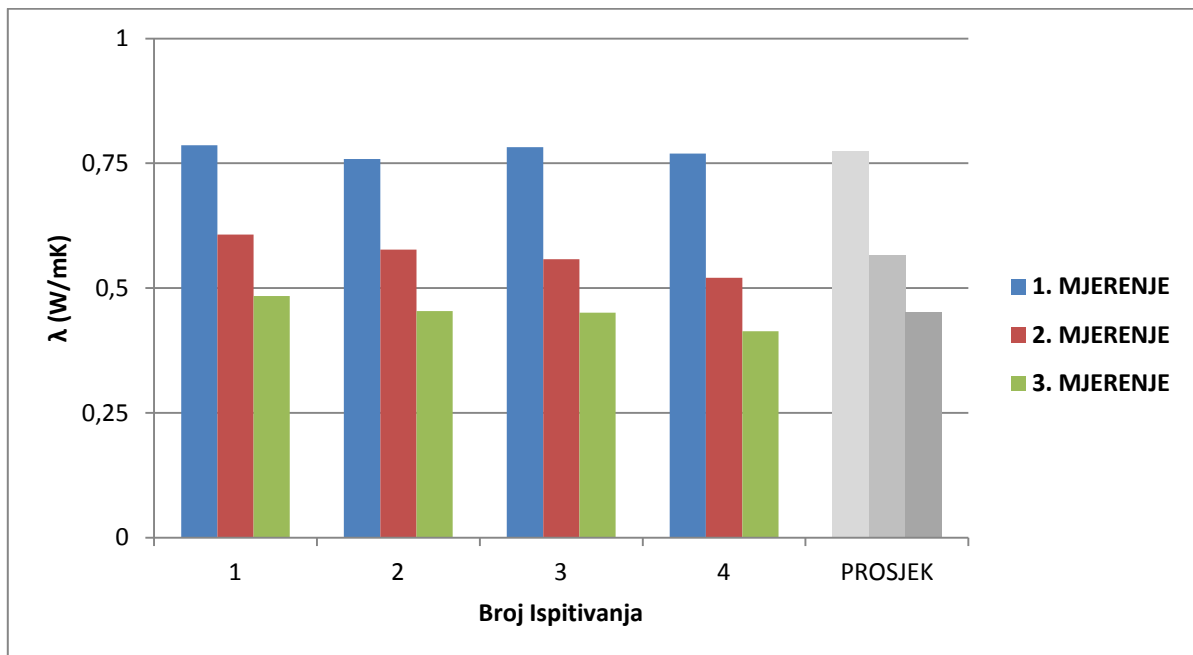
Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ u suhom stanju sa glycolom kao kontaktnim sredstvom prikazani su u **tablici 24.**, a grafički su prikazani na **slikama 135-138:**

Tablica 24. Rezultati ispitivanja uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ (glycol) - vlažno stanje

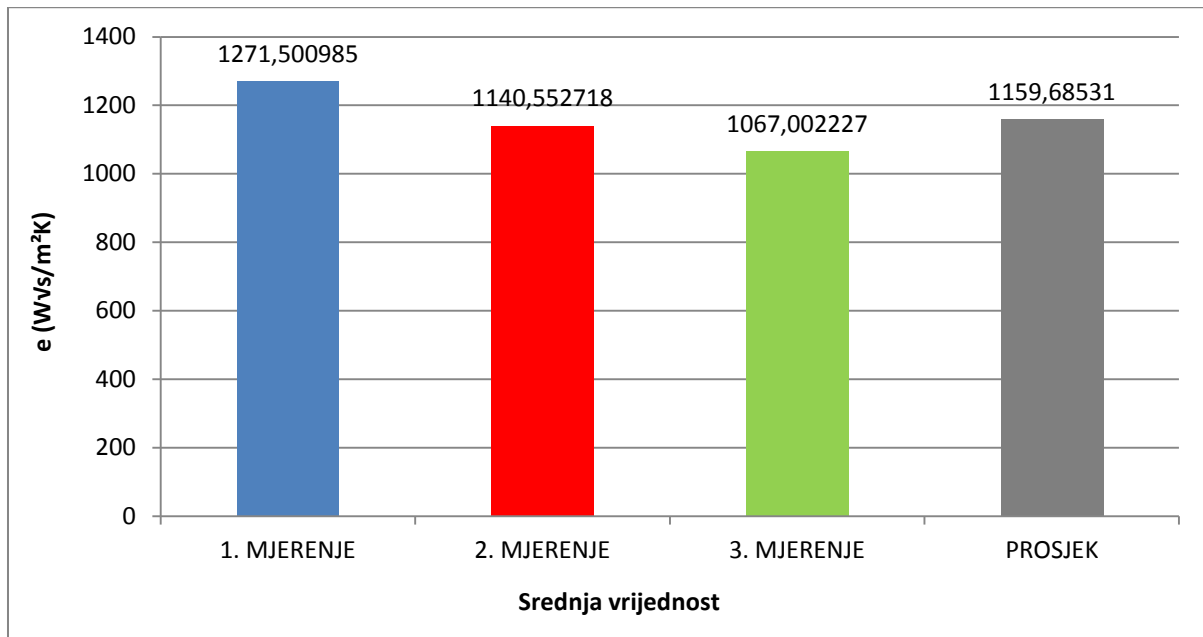
BROJ ISPITIVANJA	1. MJERENJE		2. MJERENJE		3. MJERENJE	
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]	λ [W/mK]
1	1278,9857	0,786185426	1167,00152	0,60740932	1088,426508	0,48402625
2	1261,801354	0,758525012	1147,725718	0,57698576	1069,298731	0,45424364
3	1276,541746	0,782246516	1135,688019	0,55803778	1067,10166	0,45082902
4	1268,675141	0,769579324	1111,795614	0,52054664	1043,182009	0,41373754
SREDNJA VRIJEDNOST	1271,500985	0,774134069	1140,552718	0,56574487	1067,002227	0,45070911
STANDARDNA DEVIJACIJA	7,82087939	0,012588823	23,10575251	0,03635273	18,54441895	0,02880645
KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	0,62%	1,63%	2,03%	6,43%	1,74%	6,39%
	e [$W\sqrt{s/m^2K}$]			λ [W/mK]		
UKUPNA SREDNJA VRIJEDNOST	1159,68531			0,596862688		
UKUPNA STANDARDNA DEVIJACIJA	16,49035028			0,025916004		
UKUPNI KOEFICIJENT VARIJACIJE [%]	1,46%			4,81%		



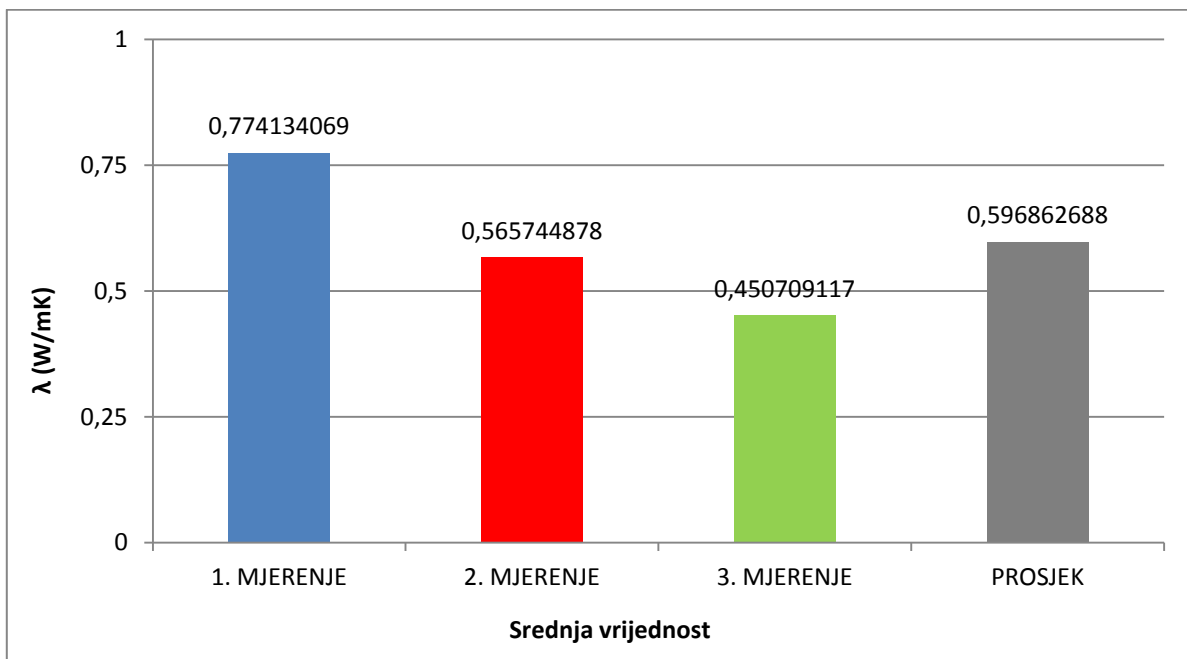
Slika 135. Grafički prikaz efuzivnosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktim sredstvom za sva 3 mjerenja



Slika 136. Grafički prikaz koeficijenta toplinske provodljivosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktim sredstvom za sva 3 mjerenja



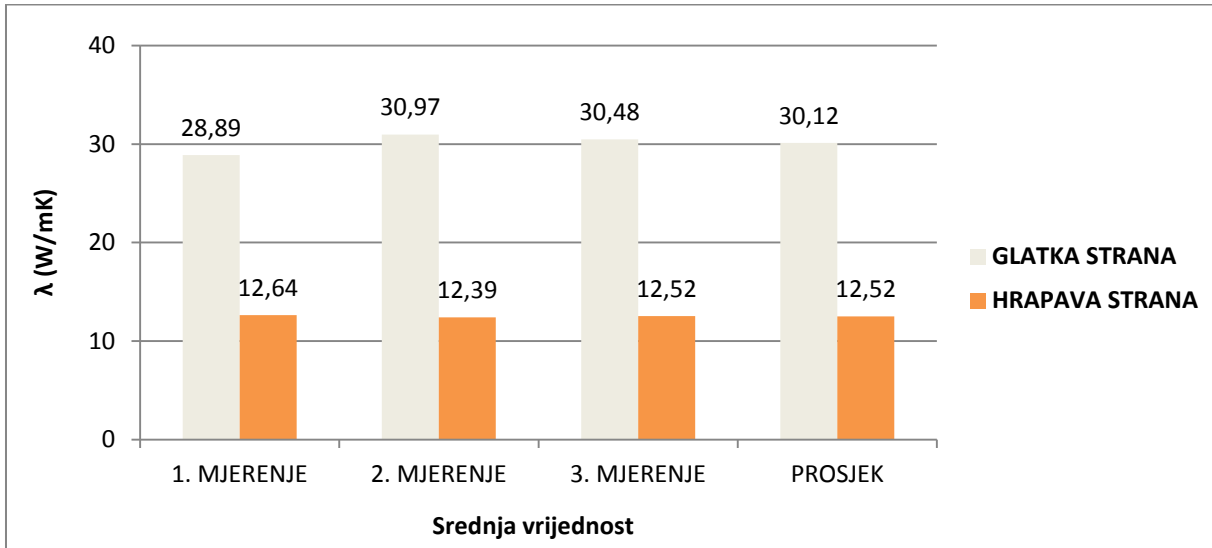
Slika 137. Grafički prikaz srednje vrijednosti efuzivnosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom



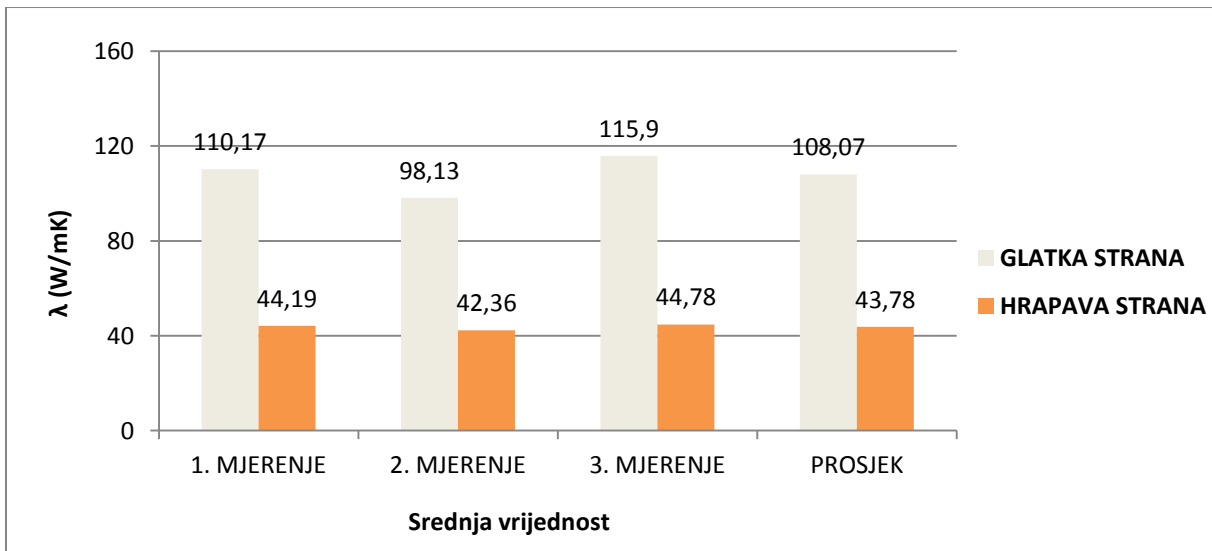
Slika 138. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za vlažno stanje uzorka mort/ovčja vuna „10%-ME 2“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom

5.2. Usporedba rezultata

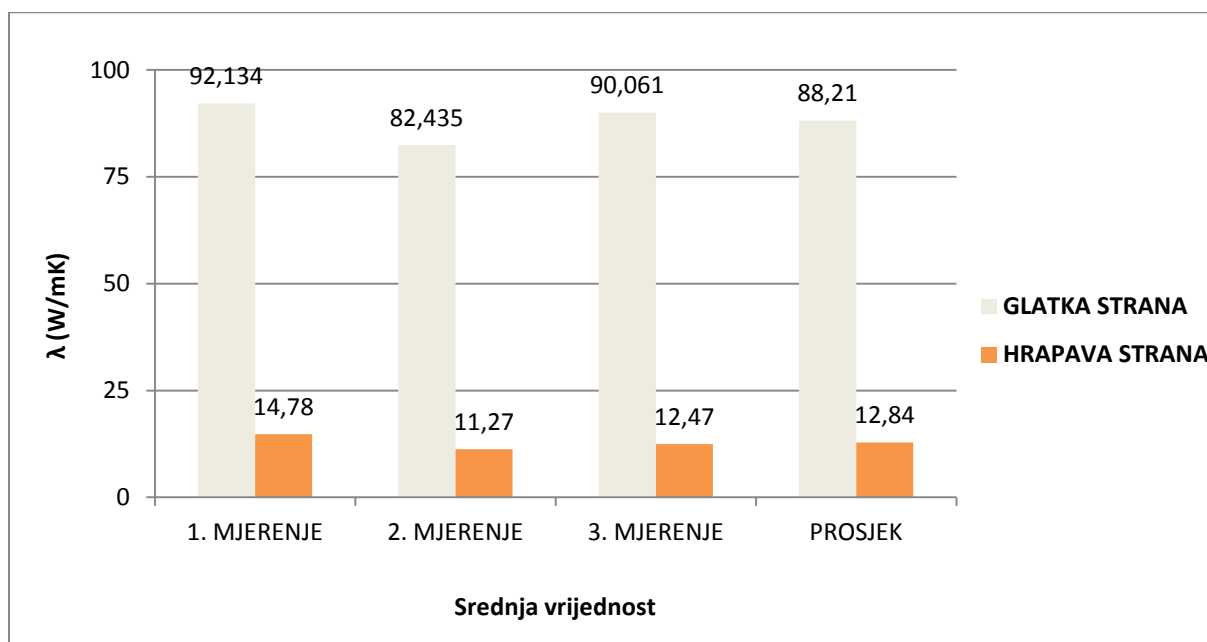
5.2.1. Usporedba rezultata ispitivanja na uzorcima sivog lijeva u odnosu na ispitanu stranu uzorka (glatka/hrapava)



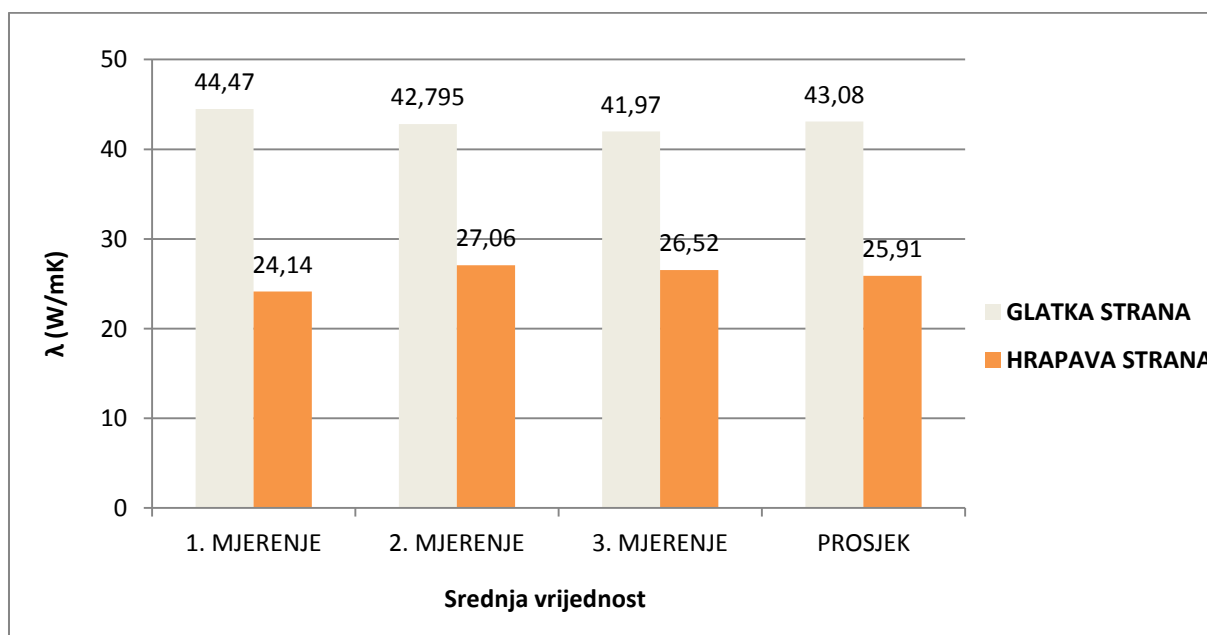
Slika 139. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „13“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom



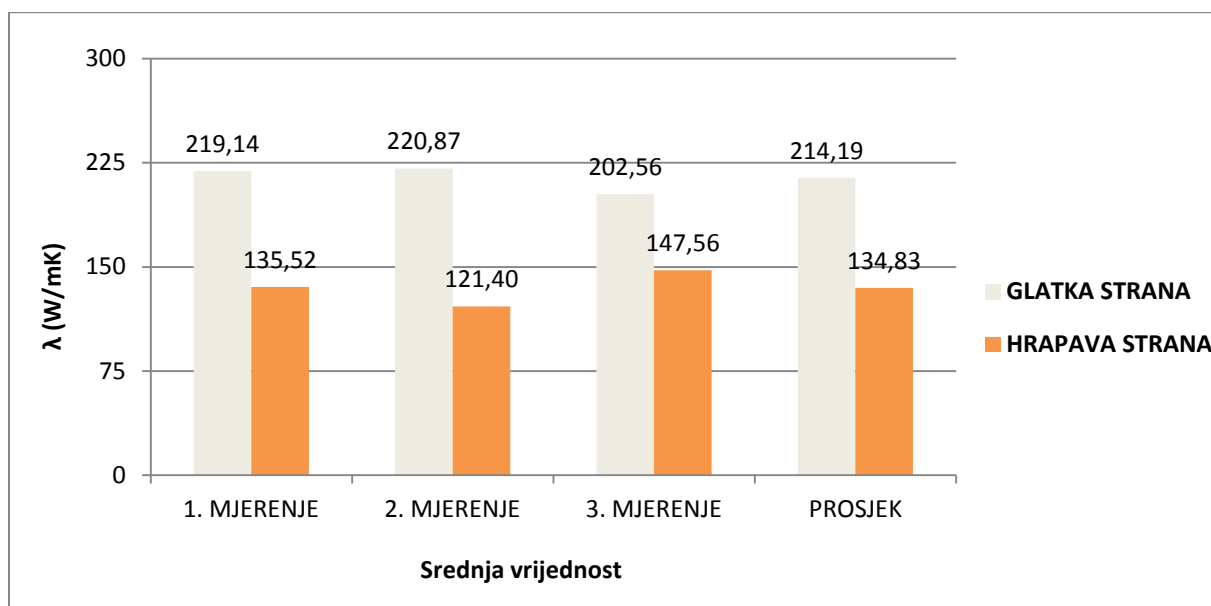
Slika 140. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „1A“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom



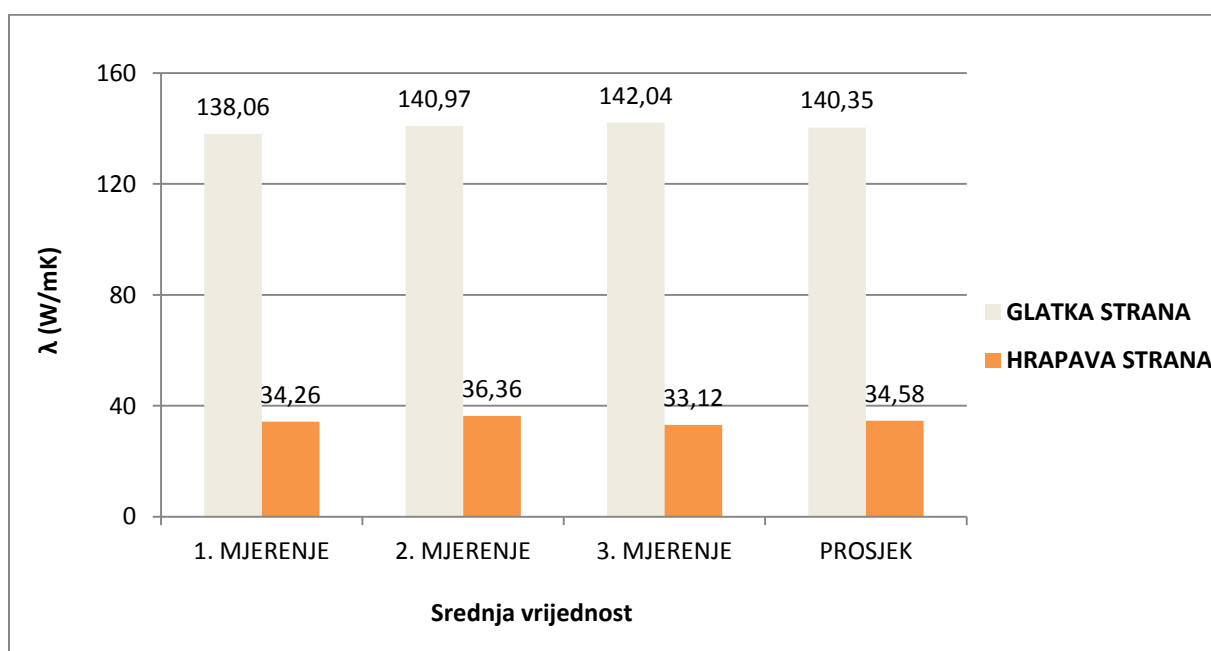
Slika 141. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „9D“ s glycolom kao kontaktnim sredstvom



Slika 142. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „13“ s vodom kao kontaktnim sredstvom



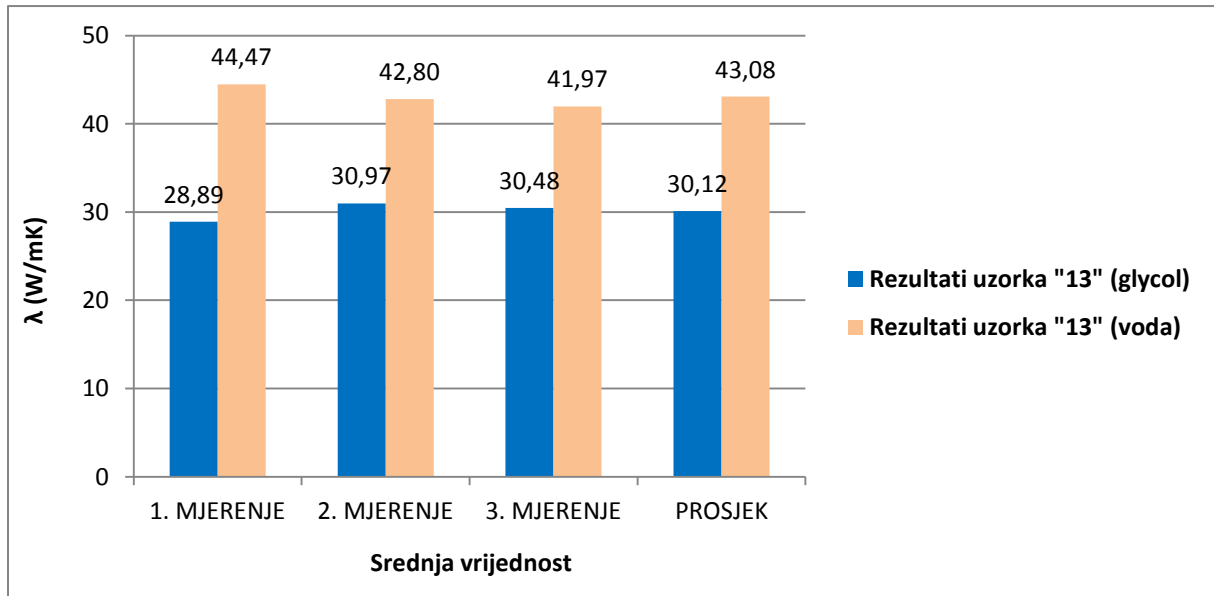
Slika 143. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „1A“ s vodom kao kontaktim sredstvom



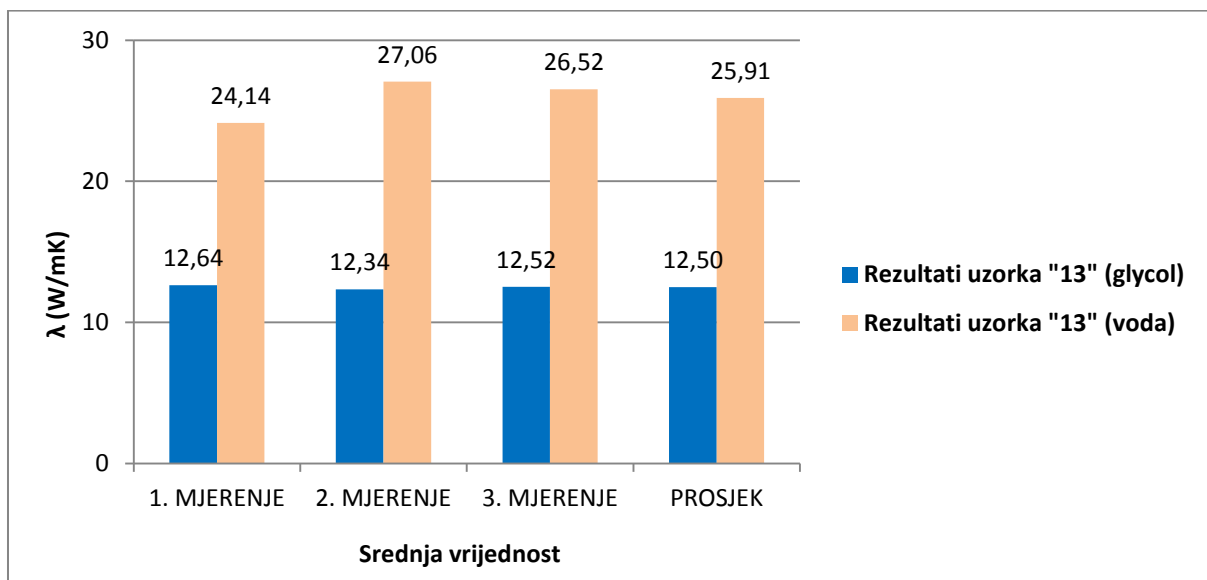
Slika 144. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „9D“ s vodom kao kontaktim sredstvom

Ispitivanje toplinske provodljivosti provodilo se na uzorcima sivog lijeva s različitim formacijama grafita koji su s jedne strane bili podvrgnuti poliranju brusnim papirom gradacije P1200/P2500/P4000 (glatka strana uzorka), dok su s druge strane bili grubo obrađeni brusnim papirom gradacije P1200/P2500 (hrapava strana hrapava) bez dodatnog poliranja brusnim papirom gradacije P4000. Rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti prikazani na grafovima (**slika 139.-144.**) jasno pokazuju da toplinska provodljivost materijala uvelike ovisi o stanju podloge materijala na kojem se provodi ispitivanje. Tako se na grafovima može vidjeti kako su na poliranoj (glatkoj) strani dobivena veća toplinska provodljivost u odnosu na ne poliranu (hrapavu) stranu za isti uzorak. Razlog dobivanja manje toplinske provodljivosti na ne poliranoj (hrapavoj) strani uzorka je taj što je na toj strani uvučen zrak u neravnine na samoj površini uzorka, a zrak sam po sebi ima „nižu“ toplinsku provodljivost od sivog lijeva te time smanjuje konačnu vrijednost toplinske provodljivosti uzorka. Također, može se vidjeti kako su dobivene manje razlike toplinske provodljivosti u odnosu na poliranu i ne poliranu (hrapavu) stranu kod uzorka „13“ nego kod uzoraka „1A“ i „9D“ (**slika 139.-144.**). Razlog tome je ravnomjernija, odnosno „finija“ obrada površine uzorka „13“ u odnosu na uzorke „1A“ i „9D“, te razlika u strukturi čestica grafita za svaki pojedini uzorak.

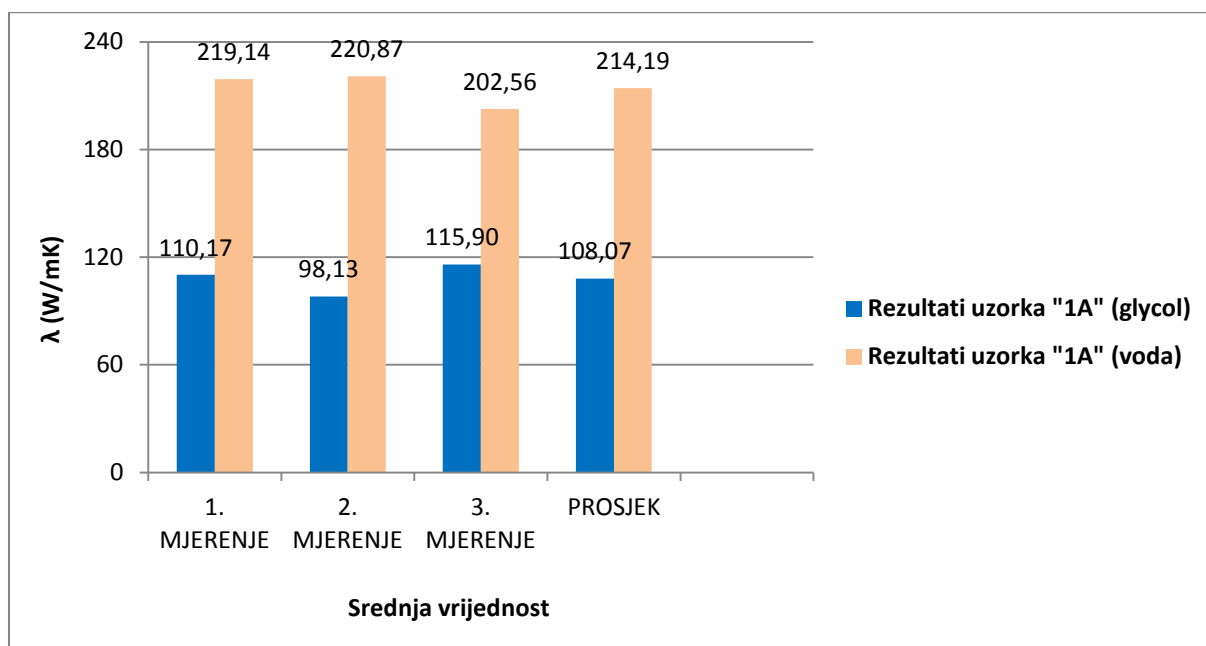
5.2.2. Usporedba rezultata ispitivanja na uzorcima sivog lijeva u odnosu na korišteno kontaktno sredstvo (glycol/voda)



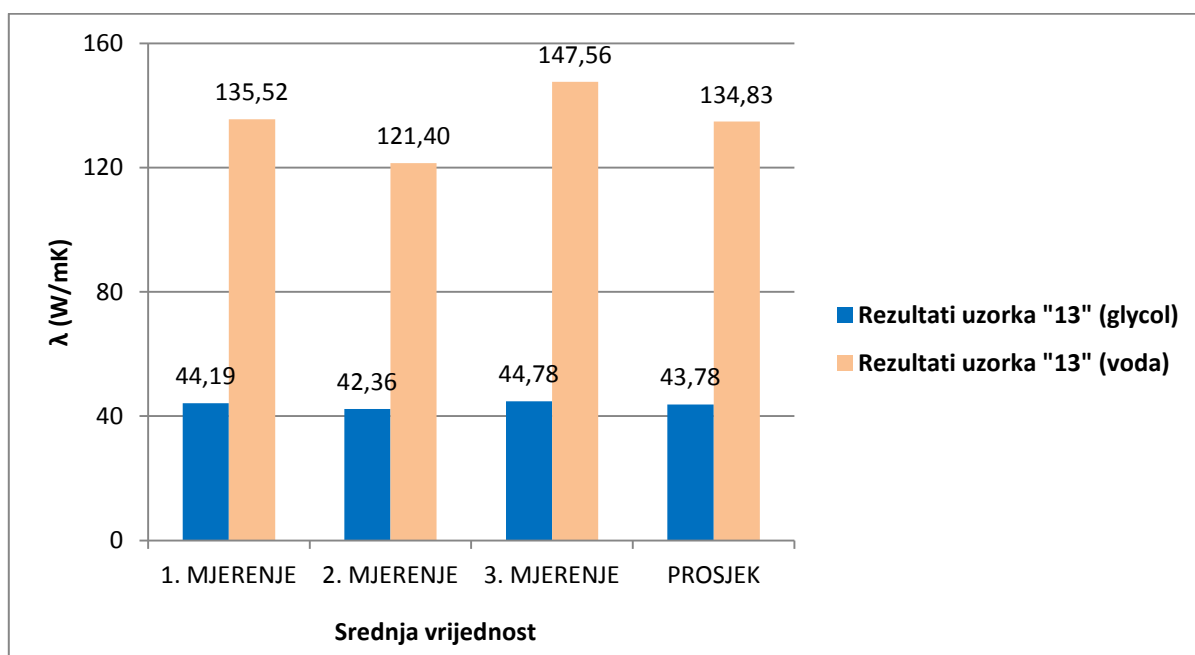
Slika 145. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „13“ ispitano s glatke strane



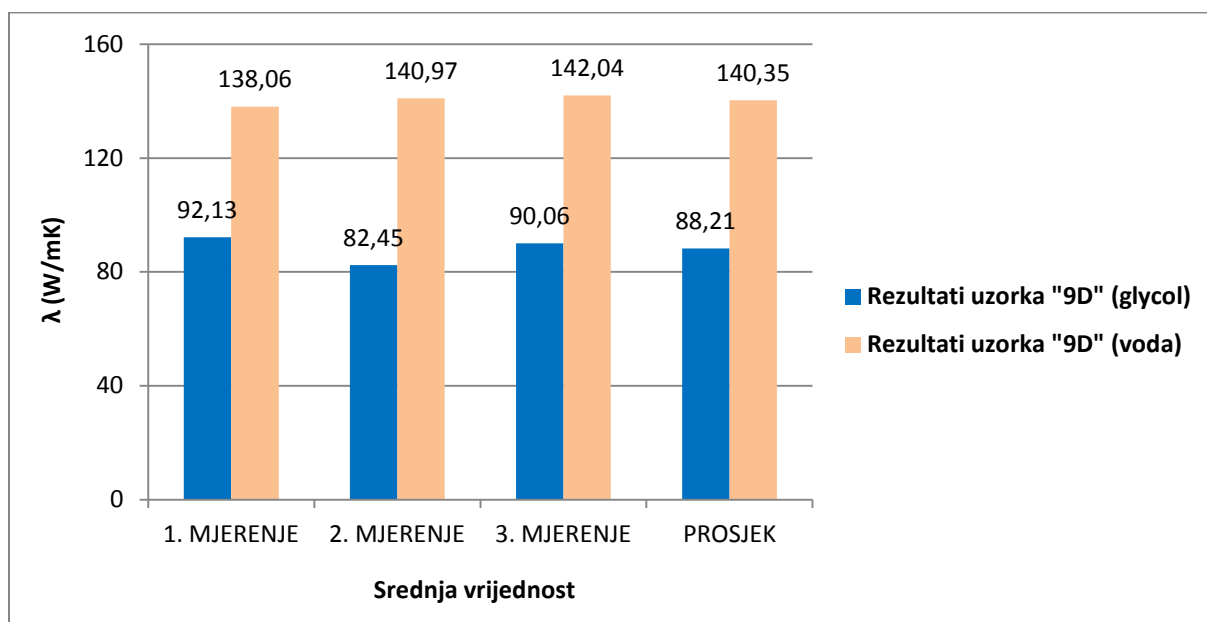
Slika 146. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „13“ ispitano s hrapave strane



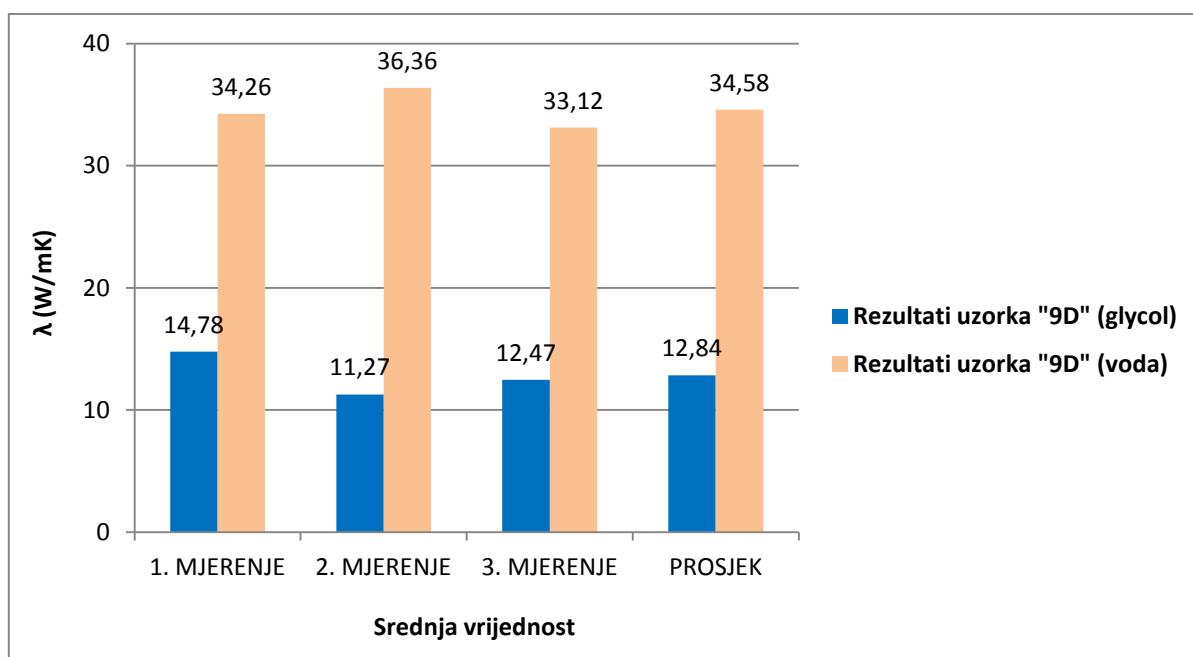
Slika 147. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „1A“ ispitano s glatke strane



Slika 148. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „1A“ ispitano s hrapave strane

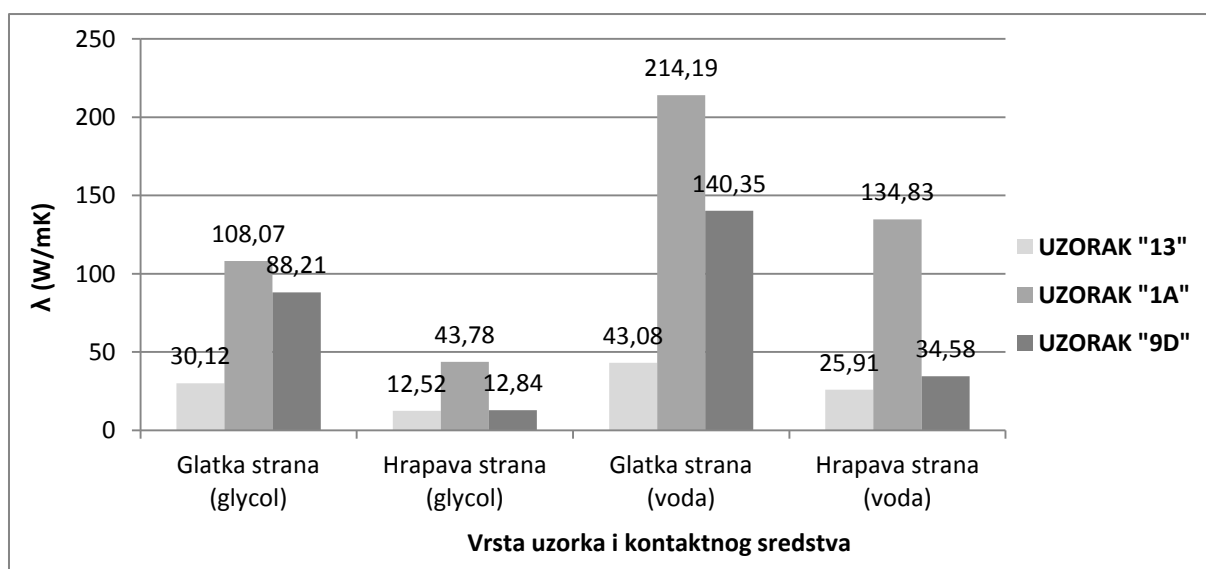


Slika 149. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „9D“ ispitano s glatke strane



Slika 150. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za sivi lijev „9D“ ispitano s hrapave strane

Kontaktno sredstvo na kontaktu senzora i uzorka koristi se iz razloga da se postigne što bolji njihov međusobni kontakt, odnosno da ono bude direktna prenosnica prilikom prodiranja toplinskog toka iz senzora u uzorak. Tijekom ispitivanja toplinske provodljivosti uzorka sivog lijeva kao kontaktno sredstvo koristila se voda i glycol. Na grafovima (**slika 145.-150.**) se jasno može vidjeti kako kontaktno sredstvo ima utjecaja na veličinu konačne vrijednosti toplinske provodljivosti. Tako se može vidjeti kako se upotrebom vode kao kontaktnog sredstva dobivaju veće vrijednosti toplinske provodljivosti u odnosu na korištenje glycola kao kontaktnog sredstva (**slika 151.**). Razlog tome može biti što voda ima vrijednost toplinske provodljivosti 0,58 W/mK, a glycol 0,147 do 0,258 W/mK, te je zbog toga manja vrijednost toplinske provodljivosti dobivena kod ispitivanja uzoraka s glycolom kao kontaktnim sredstvom jer je toplinski tok na putu iz senzora u uzorak imao manji otpor prilikom prolaska kroz glycol.



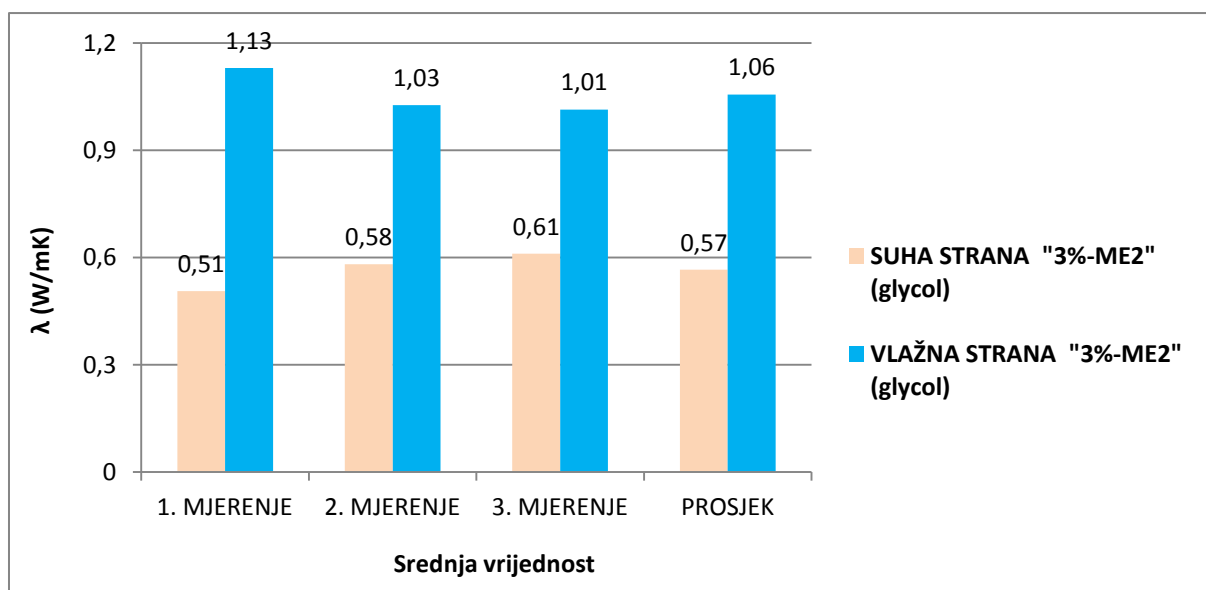
Slika 151. Grafički prikaz usporedbe srednjih vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za uzorke sivog lijeva u odnosu na kontaktno sredstvo i ispitanu stranu

Tako se može vidjeti kako uzorak sivog lijeva s nodulastim grafitom (uzorak „13“) u odnosu na ispitanu stranu uzorka (glatka/hrapava strana) ima najmanju vrijednost toplinske provodljivosti, dok uzorak sivog lijeva s pothlađenim grafitom (uzorak „9D“) ima nešto veću vrijednost toplinske provodljivosti (**slika 151.**). Najveća vrijednost toplinske provodljivosti dobivena je kod uzorka sivog lijeva s grafitom jednoličnog izgleda (uzorak „1A“) (**slika 151.**). Također vidimo kako je najmanja razlika u vrijednosti toplinske provodljivosti u

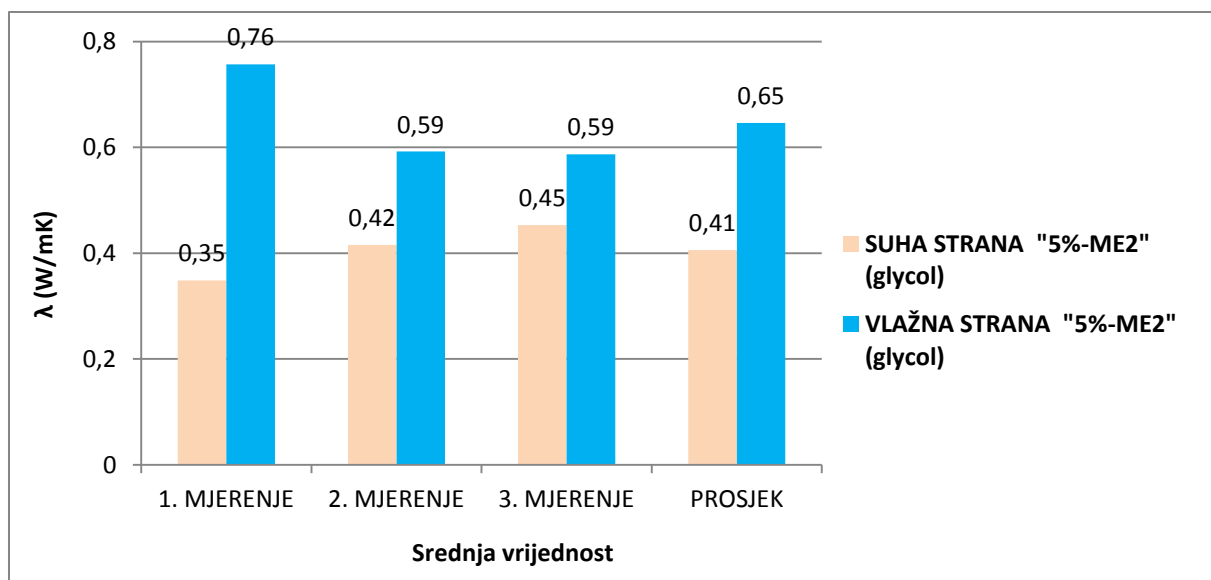
odnosu na korišteno kontaktno sredstvo dobivena kod uzorka sivog lijeva s nodulastim grafitom (uzorak „13“), dok je kod uzorka sivog lijeva s pothlađenim grafitom (uzorak „9D“) dobivena nešto veća razlika (**slika 151.**). Najveća razlika toplinske provodljivosti u odnosu na korišteno kontaktno sredstvo dobivena je kod uzorka sivog lijeva s grafitom jednoličnog izgleda (uzorak „1A“) (**slika 151.**).

Glavni razlog je u tome što uzorak „1A“ ima 10,5% grafita unutar matrice sivog lijeva, uzorak „9D“ ima 8,90% grafita unutar matrice sivog lijeva, a uzorak „13“ ima 6,70% grafita unutar matrice sivog lijeva. Kako se zna da koeficijent toplinske provodljivosti željeza iznosi ≈ 80 W/mK, a koeficijent toplinske provodljivosti grafita 25 do 274 W/mK, može se zaključiti da što je veći udio grafita unutar matrice sivog lijeva to će biti veća toplinska provodljivost uzorka. Također je razlog u tome što je matrica grafita jednoličnog izgleda „1A“ unutar sivog lijeva povezana i spojena sitnim kanalićima u obliku mreže nepravilnog oblika, te na taj način dopušta toplini da lakše prolazi kroz promatrani materijal jer je toplinska provodljivost grafita veća od toplinske provodljivosti samog željeza (**slika 63.**). S druge strane, matrica pothlađenog grafita „9D“ unutar sivog lijeva je u obliku mreže sastavljene od sitnih točkica koje su gusto povezane, ali nisu spojene te time onemogućuje brže prelaženje topline kroz grafit koji ima veću toplinsku provodljivost od željeza (**slika 63.**), dok je matrica nodulastog grafita „13“ rijetko raspršena u obliku kuglica unutar sivog lijeva te time daje najveći otpor prolasku topline kroz uzorak (**slika 63.**).

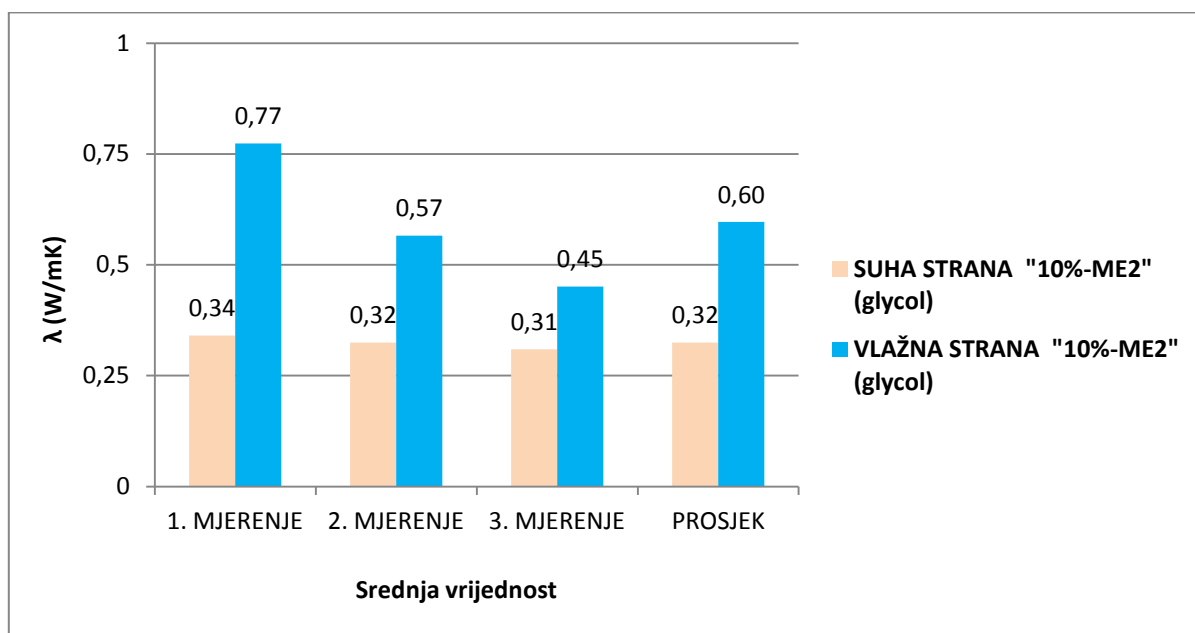
5.2.3. Usporedba rezultata ispitivanja suhog i vlažnog stanja na uzorcima mort/ovčja vuna



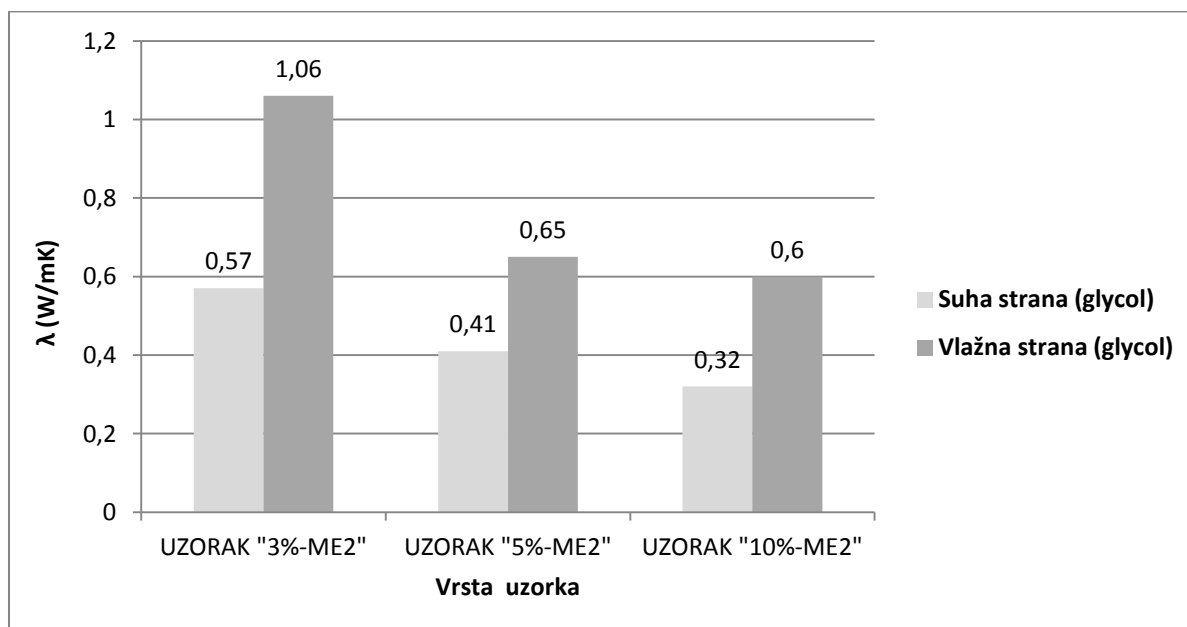
Slika 152. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za suhu i vlažnu stranu uzorka mort/ovčja vuna „3% - ME 2“



Slika 153. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za suhu i vlažnu stranu uzorka mort/ovčja vuna „5% - ME 2“



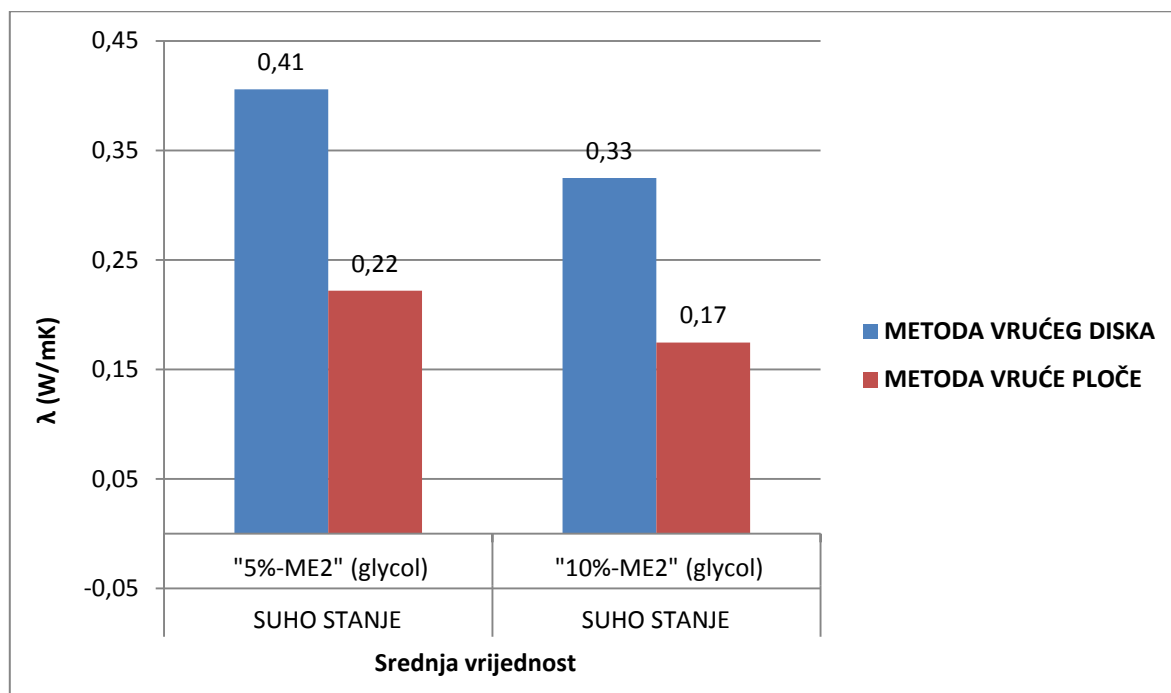
Slika 154. Grafički prikaz srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za suhu i vlažnu stranu uzorka mort/ovčja vuna „10% - ME 2“



Slika 155. Grafički prikaz usporedbe srednjih vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti za suhu i vlažnu stranu uzorka mort/ovčja vuna

Ispitivanje se provodilo na suhim i potpuno vodom zasićenim uzorcima mješavine morta i ovčje vune (3%, 5%, 10%). Uzorci su prvo ispitani u suhom stanju, a zatim su se ti isti uzorci držali u vodi 90 minuta kako bi postigli potpunu zasićenost te tako ne bi imali sposobnost upijanja glycola (kontaktno sredstvo). Na grafovima (**slika 152.-154.**) se tako može vidjeti kako uzorci natopljeni vodom imaju veću toplinsku vodljivost od suhих uzoraka, a to proizlazi iz konstatacije da natopljeni uzorak ima veću masu od suhog uzorka, a samim time i veću gustoću koja je u direktnom odnosu s veličinom vrijednosti toplinske provodljivosti. Također, vodom natopljeni uzorci imaju manju količinu zraka (voda je zauzela volumen zraka), a samim time veću toplinsku provodljivost (**slika 155.**) iz razloga što voda sama po sebi ima veću toplinsku provodljivost od zraka koji je u suhim uzorcima sadržan u postocima od 30%, 34% i 40% - ovisno o količini ovčje vune unutar mješavine [30]. Bitno je još napomenuti kako uzorci s većim količinskim postotkom ovčje vune imaju manju gustoću, a samim time i manju toplinsku provodljivost od uzoraka s manjom količinom ovčje vune jer mikrostrukturu uzorka čine vlakna ovčje vune koja imaju manju toplinsku provodljivost od cementne matrice (**slika 155.**). Na kraju još treba napomenuti kako kod uzoraka u suhom stanju vrijednost toplinske provodljivosti raste od prvog prema trećem ispitivanju jer uzorak upija kontaktno sredstvo koje ima veću toplinsku provodljivost od zraka, dok kod uzoraka u vlažnom stanju vrijednost toplinske provodljivosti pada od prvog prema trećem mjerenju jer se uzorak suši i time gubi vodu koja ima bolju toplinsku provodljivost od zraka (**slika 152.-154.**).

5.2.4. Usporedba rezultata ispitivanja dobivenih metodom vrućeg diska i metodom vruće ploče na uzorcima mort/ovčja vuna u suhom stanju



Slika 156. Grafički prikaz usporedbe srednje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti ispitivanja metodom vrućeg diska i metodom vruće ploče na uzorcima mort/ovčja vuna „5% - ME 2“ i „10% - ME 2“ u suhom stanju

Na grafu iznad (**slika 156.**) vide se vrijednosti dobivene toplinske provodljivosti za uzorak morta s 5% i 10% sadržaja ovčje vune unutar cementne matrice. Također se vide razlika u vrijednostima rezultata dobivenih tijekom ispitivanja metodom vrućeg diska i vruće ploče na istim uzorcima. Razlozi razlike rezultata su korištenje kontaktnih sredstava kod korištenja metode vrućeg diska koja navlaže površinu uzorka, te na taj način negativno utječu na izlazne vrijednosti rezultata jer njihova prisutnost u uzorku smanjuje ili povećava vrijednost toplinske provodljivosti samog materijala ovisno o tome dali je uzorak koji se ispituje manje ili veće toplinske provodljivosti od samog kontaktnog sredstva. Na razlike rezultata također utječe korištenje neadekvatnih kalibracijskih krivulja za pojedine rezultate i ovisnost o vanjskim uvjetima kao što su nedovoljno dobro ostvaren kontakt na sučeljku senzora i uzorka, ispitivač, način postavljanja senzora, različito kondicioniranje uzoraka, itd..

6. Zaključak

Objašnjen je način rada uređaja „Mathis TCI“, te je ispitano ukupno šest različitih vrsta materijala ovom metodom. Uređaj „Mathis TCI“ radi na principu metode vrućeg diska, a njime se može ispitivati toplinska provodljivost, ali i druga toplinska svojstva širokog spektra materijala. To je zapravo brza i jednostavna, ali osjetljiva metoda koja se koristi za kontrolu kvalitete u proizvodnji i razvitku materijala. Prema preporukama proizvođača dane su kalibracijske krivulje za ispitivanje šest najosnovnijih grupa materijala kao što su tekućine, prahovi, pjene i gelovi, keramike, metali i kompoziti, dok je za ispitivanje ostalih vrsta materijala potrebno poznavanje jedinstvenih kalibracijskih krivulja za svaki pojedini materijal. Također je utvrđeno da nije dovoljno koristiti samo kalibracijske krivulje prema preporukama proizvođača, nego je potrebno provesti korekcije kalibracijskih krivulja za svaki pojedini materijal kako bi se dobili točni rezultati ispitivanja. Glavne prednosti uređaja „Mathis TCI“ su jednostavna i jeftina mjerna oprema, kratko vrijeme ispitivanja, te ispitivanje u laboratoriju ali i izvan njega pri zatečenim atmosferskim utjecajima. Glavni nedostaci ove metode su subjektivnost pri određivanju mjernog intervala, iskustvo ispitivača, ostvarenost nepotpunog kontakta između senzora i uzorka, te poznavanje kalibracijskih krivulja za svaki pojedini materijal. Pošto je sve te faktore skoro pa nemoguće uskladiti, ispitivanje nestacionarnom metodom vrućeg diska pomoću uređaja „Mathis TCI“ ne daje potpuno točne rezultate toplinske provodljivosti i efuzivnosti, te je rezultate ove metode najbolje shvatiti kao kvalitativni rezultat. S druge strane, velika prednost ove metode je u tome što uređaj izravno mjeri toplinsku provodljivost i efuzivnost, te pruža jednostavnu upotrebu uređaja, a samim time uvelike skraćuje vrijeme ispitivanja u odnosu na druge metode ispitivanja.

Ispitivanjem uzoraka sivog lijeva u odnosu na korišteno kontaktno sredstvo (glycol i voda) i ispitano stranu uzorka (glatka i hrapava) utvrđeno je da su dobivene najveće vrijednosti toplinske provodljivosti za uzorak sivog lijeva s grafitom jednoličnog izgleda (uzorak „1A“), dok je za uzorak sivog lijeva s pothlađenim grafitom (uzorak „9D“) dobivena nešto manja vrijednost toplinske provodljivosti. Najmanja vrijednost toplinske provodljivosti je dobivena za uzorak sivog lijeva s nodulastim grafitom (uzorak „13“). Uzrok tome je različita formacija i udio grafita unutar uzorka sivog lijeva. S druge strane, ispitivanjem uzoraka mješavine morta i ovčje vune u odnosu na korišteno kontaktno sredstvo (glycol) i ispitano stanje uzorka (suho i vlažno) utvrđeno je da su dobivene najveće vrijednosti toplinske provodljivosti za uzorak s

najmanjim postotkom ovčje vune (3% ovčje vune unutar mješavine), dok je za uzorak s udjelom ovčje vune od 5% unutar mješavine dobivena nešto manja vrijednost toplinske provodljivosti. Za uzorak s udjelom ovčje vune od 10% dobivena je najmanja vrijednost toplinske provodljivosti. Glavni uzrok tome je da uzorci s većim količinskim postotkom ovčje vune imaju manju gustoću, a samim time i manju toplinsku provodljivost od uzoraka s manjom količinom ovčje vune jer mikrostrukturu uzorka čine vlakna ovčje vune koja imaju manju toplinsku provodljivost od cementne matrice. Također se može vidjeti kako su dobivene veće vrijednosti toplinske provodljivosti kod ispitivanja uzoraka mješavine i morta ovčje vune (udio ovčje vune od 5% i 10% unutar mješavine) u suhom stanju metodom vrućeg diska u odnosu na ispitivanje metodom vruće ploče. Razlozi razlike rezultata su korištenje kontaktnih sredstava kod korištenja metode vrućeg diska koja navlaže površinu uzorka, te na taj način negativno utječu na izlazne vrijednosti rezultata jer njihova prisutnost u uzorku smanjuje ili povećava vrijednost toplinske provodljivosti samog materijala ovisno o tome dali je uzorak koji se ispituje manje ili veće toplinske provodljivosti od samog kontaktnog sredstva. Na razlike rezultata također utječe korištenje neadekvatnih kalibracijskih krivulja za pojedine rezultate i ovisnost o vanjskim uvjetima kao što su nedovoljno dobro ostvaren kontakt na sučeljku senzora i uzorka, ispitivač, način postavljanja senzora, različito kondicioniranje uzoraka, itd..

Literatura:

- [1] Petrić N.; Vojnović I.; Martinac V.: „*Tehnička termodinamika*“, Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, Sveučilište u Splitu, Split, 2007.
- [2] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/96405/Sadi-Carnot> (preuzeto 13.01.2014.)
- [3] Carnot S.: „*Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a developper cette puissance*“, Sér. 2, Annales scientifiques de l'École Normale Supérieure, 1872.
- [4] Galović, A.: „*Termodinamika I*“, II. prerađeno izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2002..
- [5] Bošnjaković, F.: „*Nauka o toplini, I dio*“, V. Popravljeno izdanje, Tehnička knjiga, Udžbenici sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1978..
- [6] Halasz, B.: „*Zbirka zadataka iz uvoda u termodinamiku*“, I. Izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Udžbenici sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009..
- [7] Inženjerski priručnik IP1, temelji inženjerskih znanja, I. Izdanje, Školska knjiga, Zagreb 1996.. (autor poglavlja Doc.dr.sc. Boris Halasz)
- [8] <http://www.ine.estranky.sk/clanky/premeny-energii.html>
- [9] Kulišić, P.: „*Mehanika i toplina*“, Školska knjiga, Zagreb, 2005.
- [10] <http://www.gradri.hr/> (preuzeto 12.06.2014.)
- [11] <http://en.wiktionary.org/wiki/diffusivity> (preuzeto 14.06.2014.)
- [12] Šimetin, V.: „*Građevinska fizika*“, Građevinski institut-fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1983.
- [13] MathisInstruments: „*Mathis TCi User Manual*“, c-Therm Technologies Ltd., 21 Alison Blvd., Fredericton, Canada
- [14] Buzov A.: „*Osnove energetike i fizike zgrade*“, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split
- [15] http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html
(preuzeto 11.06.2014.)
- [16] Jaković, M.; Slaviček I.: „*Analiza toplinskih svojstava građevnih materijala primjenom metode vrućeg diska*“, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2010.
- [17] Mikulić, D.; Milovanović, B.: „*TCi system for non-destructive determination of thermal properties of materials*“, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, Zagreb, Croatia

- [18] Al-Ajlan; Saleh, A.: „*Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique*“, Energy Research Institute, Saudi Arabia, 2006.
- [19] Harris A.; Sorensen D. N.: „*Thermal Conductivity Testing of Minimal Volumes of Energetic Powders*“, Naval Surface Warfare Center Indian Head Division, Indian Head, MD, USA, 2007.
- [20] Oldenburg S. J.; Siekkinen A. R.; Darlington T. K.; Baldwin R. K.: „*Optimized Nanofluid Coolants for Spacecraft Thermal Control Systems*“, nanoComposix, Inc., 2007.
- [21] Cha J.; Kim S.; Park K. W.; Lee D. R.; Jo J. H.; Kim S.: „*Improvement of window thermal performance using aerogelinsulation film for building energy saving*“, Akade'miai Kiado', Budapest, Hungary 2013.
- [22] Suleiman B. M.: „*The Effective Thermal Transport in Composite Materials*“, Department of Applied Physics, College of Sciences, University of Sharjah, United Arab Emirates
- [23] Andreić Ž.: „*Temelji mehanike fluida*“, Rudarsko-Geološko-Naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2014.
- [24] http://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinska_izolacija (preuzeto 27.06.2014.)
- [25] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Gel> (preuzeto 27.06.2014.)
- [26] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Keramika> (preuzeto 27.06.2014.)
- [27] Barbalić J.: „*Mjerenje i modeliranje tijeka topline hidratacije u betonu*“, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2011.
- [28] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Materijal> (preuzeto 28.06.2014.)
- [29] Kozjak N.: „*Ispitivanje toplinskih svojstava materijala*“, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [30] Štirmer N.; Milovanović B.; Sokol J.M.: „*Cement composites reinforced with sheep's wool*“, Department of materials, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, Zagreb, Croatia, 2014.
- [31] <http://en.wikipedia.org/wiki/Aerogel> (preuzeto 02.09.2014.)
- [32] <http://www.ctherm.com/applications/> (preuzeto 02.09.2014.)
- [33] Harris A.: „*TCI's Application in the Thermal Conductivity Characterization of Explosives*“, c-Therm Technologies Ltd., 21 Alison Blvd., Fredericton, Canada, 2010.
- [34] Harris A.: „*TCI's Application in the Thermal Conductivity Characterization of Nanomaterials*“, c-Therm Technologies Ltd., 21 Alison Blvd., Fredericton, Canada
- [35] <http://en.wikipedia.org/wiki/Pottery> (preuzeto 02.09.2014.)
- [36] http://en.wikipedia.org/wiki/Composite_material (preuzeto 02.09.2014.)