

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Igor Šuljić mag. ing. mech.

**ODREĐIVANJE RADNIH ZNAČAJKI HIBRIDNIH
ZUPČANIKI PROIZVEDENIH ADITIVNOM
TEHNOLOGIJOM**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2026.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Igor Šuljić mag. ing. mech.

***Određivanje radnih značajki hibridnih zupčanika
proizvedenih aditivnom tehnologijom***

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2026.

BIBLIOGRAFSKI PODACI

Doktorska disertacija je izrađena na Zavodu za strojarstvo i brodogradnju, Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor: doc. dr. sc. Vjekoslav Tvrdić

Rad br. xxx

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

Ključne riječi: FDM, iskoristivost, polimeri, regresijska analiza, temperatura tijela, trošenje, zupčanici

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarstvo

Znanstvena grana: Opće strojarstvo (konstrukcije)

Institucija na kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: doc. dr. sc. Vjekoslav Tvrdić

Broj stranica: 188

Broj slika: 105

Broj tablica: 31

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 113

PODACI O OCJENI I OBRANI DISERTACIJE

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. xxx
2. xxx
3. xxx
4. xxx
5. xxx

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. xxx
2. xxx
3. xxx
4. xxx
5. xxx
6. xxx
7. xxx

Disertacija obranjena dana: xx.xx.2026.

Određivanje radnih značajki hibridnih zupčanika proizvedenih aditivnom tehnologijom

Sažetak:

U ovom radu je provedena eksperimentalna analiza radnih značajki polimernih i hibridnih zupčanika. Hibridni zupčanici sastavljeni su od polimerne matrice i metalnih umetaka (aluminij i čelik), a polimerni zupčanici i polimerna matrica hibridnih zupčanika proizvedeni su taložnim srašćivanjem (FDM), postupkom aditivne tehnologije koji je energetski učinkovitiji u usporedbi s drugim postupcima proizvodnje polimernih proizvoda. Unatoč brojnim prednostima polimera, loša toplinska svojstva uzrokuju ubrzano zagrijavanje što negativno utječe na druge radne značajke, trošenje i iskoristivost. S ciljem smanjenja zagrijavanja predstavljeni su hibridni zupčanici gdje hibridna tehnologija polimera i metala kombinira prednosti oba materijala što omogućava poboljšanje radnih značajki. Polimerni zupčanici i polimerna matrica hibridnih zupčanika su izrađeni od poliamida (PA).

U svrhu eksperimentalnog istraživanja radnih značajki polimernih i hibridnih zupčanika, razvijen je eksperimentalni sustav za ispitivanje zupčanika s mehanički otvorenim tokom snage s pripadajućom mjernom opremom. Eksperimentalno ispitivanje primjenjuje ubrzani postupak ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja koji pouzdano zamjenjuje standardna dugotrajna ispitivanja s konstantnim opterećenjem.

Inicijalno je provedeno istraživanje polimernih zupčanika proizvedenih u dvije različite rezolucije (kvalitete), a na temelju ostvarenih rezultata hibridni zupčanici proizvedeni su isključivo u većoj rezoluciji. Istraživanje radnih značajki hibridnih zupčanika obuhvaća prvi put predstavljene nove konstrukcijske izvedbe, ali i eksperimentalnu validaciju već postojeće izvedbe. Usporedbom rezultata potvrđene su poboljšane radne značajke hibridnih zupčanika u odnosu na polimerne, a kod svih ispitivanih zupčanika uočena je veza između zagrijavanja, trošenja i iskoristivosti. Prema planu eksperimenta, prošireno je istraživanje na novoj konstrukcijskoj izvedbi hibridnih zupčanika koja je ostvarila najznačajnije poboljšanje radnih značajki. Primjenom regresijske analize dobiveni su matematički modeli koji opisuju radne značajke u ovisnosti u ulaznim parametrima, kao i optimalne vrijednosti ulaznih parametara.

Ključne riječi:

FDM, iskoristivost, polimeri, regresijska analiza, temperatura tijela, trošenje, zupčanici

Determination of operating characteristics of hybrid gears produced using additive manufacturing

Abstract:

In this thesis, an experimental analysis of the operating characteristics of polymer and hybrid gears was performed. Hybrid gears are made of a polymer matrix and metal inserts (aluminum and steel), where polymer gears and the polymer matrix of hybrid gears were both produced with Fused Deposition Modeling (FDM), an additive manufacturing process that is more energy efficient in comparison with other polymer manufacturing processes. Despite the numerous advantages of polymers, poor thermal properties cause accelerated heating, which negatively affects other operating characteristics, wear and efficiency. In order to reduce heating, hybrid gears were introduced, where the hybrid technology of polymers and metals combines the advantages of both materials, which allows operating characteristics improvement. Polymer gears and the hybrid gears polymer matrix were made of polyamide (PA).

For the experimental investigation of hybrid and polymer gears operating characteristics purposes, a non-mechanically closed-loop test rig with associated measuring equipment has been developed. Experimental research employs an accelerated step load test procedure with a gradual increase in load, which reliably replaces standard long-term steady load tests.

Initially, investigation of polymer gears manufactured in two different resolutions (qualities) has been conducted, and based on the achieved results, hybrid gears were produced exclusively in higher resolution. Investigation on the performance characteristics of hybrid gears involves first time introduced novel designs, but also experimental validation of already existing design. Comparison of the results confirmed enhanced operating characteristics of hybrid gears compared to polymer gears, and a correlation between heating, wear and efficiency was observed for all tested gears. In accordance with the experimental design, research on a new hybrid gear design that achieved the most significant operating characteristics improvement has been expanded. With regression analysis employed, mathematical models that describes dependence of the operating characteristics on input parameters were obtained, as well as optimal values of input parameters.

Keywords:

FDM, efficiency, polymers, regression analysis, bulk temperature, wear, gears

ZAHVALA

xxx

SADRŽAJ

BIBLIOGRAFSKI PODACI	ii
PODACI O OCJENI I OBRANI DISERTACIJE	iii
SAŽETAK	iv
ABSTRACT	v
ZAHVALA	vii
POPIS TABLICA	xi
POPIS SLIKA	xiii
POPIS OZNAKA I KRATICA	xx
1. UVOD	1
1.1. Motivacija	1
1.2. Pregled dosadašnjih istraživanja – polimerni zupčanci	7
1.2.1. Polimerni zupčanci spregnuti s metalnim	7
1.2.2. Utjecaj vlage i brzine vrtnje na rad polimernih zupčanika	10
1.2.3. Vlasknima ojačani polimerni zupčanci i podmazivanje	11
1.2.4. Mehanizmi trošenja polimernih zupčanika	14
1.2.5. Stupanj iskoristivosti polimernih zupčanika i razina buke	20
1.2.6. Modifikacija geometrije ozubljenja	23
1.2.7. Zagrijavanje polimernih zupčanika i hibridni zupčanci.....	25
1.2.8. Aditivna proizvodnja polimernih zupčanika	30
1.3. Zaključak pregleda dosadašnjih istraživanja	34
1.4. Hipoteza	36
1.5. Znanstveni doprinosi disertacije	37

1.6. Pregled rada	37
2. POLIMERI	39
2.1. Podjela polimera	40
2.2. Nadmolekulna struktura i fizička stanja polimera	41
2.3. Proizvodnja, razgradnja i uporaba polimera	44
2.4. Konstruktivski polimerni materijali	46
3. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE ZUPČANIKA	52
3.1. Eksperimentalno ispitno postolje	53
3.1.1. Pogon i upravljanje	53
3.1.2. Ubrzani test ispitivanja i kriteriji otkazivanja zupčanika	59
3.1.3. Ispitni zupčanici	61
3.1.4. Proizvodnja zupčanika	67
3.2. Mjerna oprema	70
3.2.1. Zagrijavanje zupčanika	70
3.2.2. Trošenje zupčanika.....	73
3.2.3. Stupanj iskoristivosti zupčanika.....	75
4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA	77
4.1. Polimerni zupčanici	78
4.1.1. Zagrijavanje polimernih zupčanika	80
4.1.2. Trošenje polimernih zupčanika	84
4.1.3. Stupanj iskoristivosti polimernih zupčanika	90
4.2. Hibridni zupčanici	91
4.2.1. Zagrijavanje hibridnih zupčanika	98
4.2.2. Trošenje hibridnih zupčanika.....	101

4.2.3. Stupanj iskoristivosti hibridnih zupčanika	104
4.3. Alternativne konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika	105
4.3.1. Zagrijavanje hibridnih zupčanika	108
4.3.2. Trošenje hibridnih zupčanika	110
4.3.3. Stupanj iskoristivosti hibridnih zupčanika	112
4.4. Usporedba radnih značajki polimernih i hibridnih zupčanika	113
4.4.1. Zagrijavanje polimernih i hibridnih zupčanika	114
4.4.2. Trošenje polimernih i hibridnih zupčanika	115
4.4.3. Stupanj iskoristivosti polimernih i hibridnih zupčanika	117
4.4.4. Granice nosivosti polimernih i hibridnih zupčanika	118
5. STATISTIČKA OBRADA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA, MODELIRANJE RADNIH ZNAČAJKI I OPTIMIZACIJA ULAZNIH PARAMETARA ISPITIVANJA NOVE KONSTRUKCIJSKE IZVEDBE HIBRIDNIH ZUPČANIKA	122
5.1. Planiranje i parametri eksperimenta	122
5.2. Matematički model za određivanje zagrijavanja hibridnih zupčanika	127
5.3. Matematički modeli za određivanje trošenja hibridnih zupčanika	133
5.4. Matematički model za određivanje iskoristivosti hibridnih zupčanika	141
5.5. Optimizacija radnih značajki hibridnih zupčanika	146
6. ZAKLJUČAK	150
LITERATURA	153

POPIS TABLICA

<i>Tablica 1.1 Oštećenja polimernih zupčanika [9, 31]</i>	14
<i>Tablica 2.1 Svojstva poliamida PA 6 i PA 66 [4, 9, 83, 84]</i>	48
<i>Tablica 2.2 Reološki modeli [85, 86, 87]</i>	51
<i>Tablica 3.1 Tehničke karakteristike odabranog motora i generatora</i>	54
<i>Tablica 3.2 Tehničke karakteristike uređaja za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje</i>	57
<i>Tablica 3.3 Parametri i geometrija ispitivanih zupčanika</i>	63
<i>Tablica 3.4 Dimenzije poligonih profila [96]</i>	65
<i>Tablica 3.5 Mehanička i toplinska svojstva materijala [64, 65]</i>	65
<i>Tablica 3.6 Parametri FDM postupka proizvodnje i svojstva materijala [97]</i>	68
<i>Tablica 3.7 Gubici snage u ležajevima u ovisnosti i opterećenju</i>	76
<i>Tablica 4.1 Broj nanesenih slojeva i vrijeme za proizvodnju u ovisnosti o rezoluciji</i>	79
<i>Tablica 4.2 Masa polimernih zupčanika prije (1) i poslije (2) ispitivanja</i>	88
<i>Tablica 4.3 Masa hibridnih zupčanika prije (1) i poslije (2) ispitivanja</i>	103
<i>Tablica 4.4 Masa hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima/diskom prije (1) i poslije (2) ispitivanja</i>	111
<i>Tablica 4.5 Masa polimernih i hibridnih zupčanika prije (1) i poslije (2) ispitivanja</i>	116
<i>Tablica 5.1 Ulazni parametri s pripadajućim razinama</i>	124
<i>Tablica 5.2 Plan eksperimenta i utjecajni parametri</i>	125
<i>Tablica 5.3 Eksperimentalni rezultati temperature tijela T_{bulk}</i>	127
<i>Tablica 5.4 Analiza varijance temperature tijela T_{bulk}</i>	129
<i>Tablica 5.5 Rezultati regresijske analize (T_{bulk})</i>	129

<i>Tablica 5.6 Eksperimentalni rezultati trošenja</i>	134
<i>Tablica 5.7 Analiza varijance razlike mjere preko zubi ΔW_4</i>	136
<i>Tablica 5.8 Rezultati regresijske analize (ΔW_4)</i>	136
<i>Tablica 5.9 Analiza varijance promjene mase Δm</i>	138
<i>Tablica 5.10 Rezultati regresijske analize (Δm)</i>	139
<i>Tablica 5.11 Eksperimentalni rezultati stupnja iskoristivosti η_z</i>	141
<i>Tablica 5.12 Analiza varijance stupnja iskoristivosti η_z</i>	143
<i>Tablica 5.13 Rezultati regresijske analize (η_z)</i>	144
<i>Tablica 5.14 Optimalne vrijednosti utjecajnih ulaznih parametara i predviđeni rezultati odzivnih veličina</i>	147
<i>Tablica 5.15 Eksperimentalni rezultati odzivnih veličina pri optimalnim vrijednostima utjecajnih ulaznih parametara</i>	148
<i>Tablica 5.16 Odstupanja predviđenih i eksperimentalnih rezultata odzivnih veličina pri optimalnim vrijednostima utjecajnih ulaznih parametara</i>	148

POPIS SLIKA

<i>Slika 1.1</i> Proizvodnja plastike po svijetu u 2004. godini [1]	2
<i>Slika 1.2</i> Vrste plastike u ukupnoj svjetskoj proizvodnji u 2004. godini [1]	2
<i>Slika 1.3</i> Piramida plastomera [5]	3
<i>Slika 1.4</i> Stanje površine boka zuba PP zupčanika spregnutog s metalnim zupčanicom proizvedenog (a) konvencionalnim i (b) WEDM postupkom [14]	8
<i>Slika 1.5</i> Izmjerena (crveno) i izračunata temperatura u korijenu zuba (plavo): bez (lijevo) i sa sredstvom za podmazivanje (desno) [17]	9
<i>Slika 1.6</i> Stanje površine boka zuba pogonskog i gonjenog PA 6 zupčanika sa zasićenosti vlagom od 100 % [21]	11
<i>Slika 1.7</i> Ubrzani postupak ispitivanja i zagrijavanje ispitivanih zupčanika [25]	12
<i>Slika 1.8</i> Stanje površine boka zuba u području ispod kinematske kružnice (lijevo) i iznad kinematske kružnice (desno) [34]	15
<i>Slika 1.9</i> Površina boka zuba POM zupčanika nakon 10^7 ciklusa [35]	16
<i>Slika 1.10</i> Površina boka zuba gonjenog POM zupčanika [36]	16
<i>Slika 1.11</i> Trošenje zuba POM zupčanika pri opterećenju od 1,4 Nm [37]	17
<i>Slika 1.12</i> Radni vijek i trošenje POM i PA 66 polimernih zupčanika (ciklusi $\cdot 10^6$) [41]	18
<i>Slika 1.13</i> Odstupanja od položaja polimernih zupčanika [42]	19
<i>Slika 1.14</i> (a) Pukotina u korijenu zuba zupčanika i (b) pokidana vlakna unutar osnovnog polimera [44]	20
<i>Slika 1.15</i> Promjena stupnja iskoristivosti s brzinom vrtnje [45]	21
<i>Slika 1.16</i> Shematski prikaz PBT-GF 15 (a) homogenog i (b) FGM zupčanika [48]	22
<i>Slika 1.17</i> (a) Faktor prigušenja i (b) promjena razine buke zupčanika [49]	23

<i>Slika 1.18 Zahvatna linija (od točke A do E) (a) evolventnog zupčanika i (b) S-zupčanika [52]</i>	<i>24</i>
<i>Slika 1.19 Zagrijavanje S-zupčanika (S) i evolventnog zupčanika (E) pri različitim opterećenjima [52]</i>	<i>24</i>
<i>Slika 1.20 Zupčanik s modificiranom širinom boka zuba [54]</i>	<i>25</i>
<i>Slika 1.21 Usporedba numeričkog i analitičkog modela [57]</i>	<i>26</i>
<i>Slika 1.22 Rezultati termo-mehaničkog modela i eksperimentalni rezultati promjene temperature tijela zupčanika T_{bulk} pri srednjim opterećenjima [62]</i>	<i>28</i>
<i>Slika 1.23 Polimerni zupčanik s provrtom u korijenu zuba [63]</i>	<i>28</i>
<i>Slika 1.24 Različiti oblici metalnih umetaka s pripadajućom geometrijom: (a) traka, (b) T profil, (c) dvostruki T profil i (d) evolventni profil [64]</i>	<i>29</i>
<i>Slika 1.25 Stopa trošenja POM zupčanika proizvedenih različitim tehnologijama</i>	<i>30</i>
<i>Slika 1.26 Postupak taložnog srašćivanja (FDM) [68]</i>	<i>31</i>
<i>Slika 1.27 Tipovi otkaza PA 618 zupčanika ovisno o opterećenju [75]</i>	<i>33</i>
<i>Slika 2.1 Vrste polimerizacija i polimera [79]</i>	<i>40</i>
<i>Slika 2.2 Nadmolekulna struktura polimera – (a) amorfna, (b) kristalasta i (c) kristalna [5]</i>	<i>42</i>
<i>Slika 2.3 Građa i struktura polimera [80]</i>	<i>42</i>
<i>Slika 2.4 Fizička stanja polimera: (a) staklasto, (b) gumasto i (c) kapljevito [78]</i>	<i>43</i>
<i>Slika 2.5 Pojednostavljeni prikaz sustava za injekcijsko prešanje [6]</i>	<i>44</i>
<i>Slika 2.6 Postupci odvajanja: (a) Maag, (b) Fellows, (c) odvalno glodanje i (d) kopirno glodanje pločastim glodalom [7]</i>	<i>45</i>
<i>Slika 2.7 Modul elastičnosti polimera: (a) PA 6 i (b) PA 66 [9]</i>	<i>49</i>
<i>Slika 2.8 Vlačna čvrstoća: (a) PA 6 i (b) PA 66 [9]</i>	<i>49</i>
<i>Slika 3.1 Eksperimentalni sustav za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika: (a) shematski prikaz i (b) stvarni sustav [89]</i>	<i>54</i>

<i>Slika 3.2 (a) Frekventni pretvarač i (b) regenerativna jedinica</i>	55
<i>Slika 3.3 Uređaj za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje s pripadajućim spojka [90]</i>	56
<i>Slika 3.4 Siemens LOGO! PLC jedinica</i>	58
<i>Slika 3.5 Eksperimentalni sustav za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika s mehanički otvorenim tokom snage</i>	58
<i>Slika 3.6 Dijagram ubrzanog postupka ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja</i>	59
<i>Slika 3.7 Mjerilo razine buke</i>	61
<i>Slika 3.8 Bočna zračnost [21]</i>	62
<i>Slika 3.9 Shematski prikaz (a) polimernog zupčanika i (b) polimerne matrice hibridnog zupčanika</i>	64
<i>Slika 3.10 Geometrijske karakteristike utora u polimernoj matrici i metalnog umetka</i>	66
<i>Slika 3.11 Stroj za aditivnu proizvodnju Ultimaker S5</i>	67
<i>Slika 3.12 (a) Polimerni zupčanik i (b) hibridni zupčanik s aluminijskim umecima</i>	69
<i>Slika 3.13 Uređaj za mjerenje temperature i relativne vlažnosti Testo 175H1</i>	70
<i>Slika 3.14 Infracrvena termalna kamera Hikvision DS-2TD2637B-10/P</i>	71
<i>Slika 3.15 Određivanje faktora emisivnosti ϵ</i>	72
<i>Slika 3.16 (a) Mjerenje temperature tijela zupčanika T_{bulk} i (b) termalna slika zupčanika</i>	73
<i>Slika 3.17 Mjera preko 3 zuba [83]</i>	74
<i>Slika 3.18 (a) Precizna vaga i (b) 3D profilometar</i>	75
<i>Slika 4.1 Metodologija eksperimentalnog ispitivanja</i>	77
<i>Slika 4.2 Model polimernog zupčanika (Ultimaker Cura)</i>	79

<i>Slika 4.3 Temperatura tijela T_{bulk} polimernih zupčanika različitih rezolucija (kvaliteta)</i>	80
<i>Slika 4.4 Površinska hrapavost boka zuba polimernog zupčanika (a) veće i (b) manje rezolucije prije ispitivanja</i>	82
<i>Slika 4.5 Površinska hrapavost boka zuba polimernog zupčanika veće rezolucije nakon ispitivanja</i>	83
<i>Slika 4.6 Matematički modeli za predviđanje temperature tijela T_{bulk} polimernih zupčanika s naznačenim linijama trenda</i>	84
<i>Slika 4.7 Mjera preko zubi prije (1) i nakon (2) ispitivanja polimernih zupčanika</i>	85
<i>Slika 4.8 Odvojene čestice (krhotine) u fazi uhodavanja</i>	86
<i>Slika 4.9 Primjer promjene razine buke za vrijeme ispitivanja polimernih zupčanika više rezolucije</i>	87
<i>Slika 4.10 Gomilanje polimernog materijala na vrhu zuba zupčanika</i>	89
<i>Slika 4.11 Trošenje boka zuba gonjenog polimernog zupčanika (a) veće i (b) manje rezolucije</i>	89
<i>Slika 4.12 Stupanj iskoristivosti η_z polimernih zupčanika različitih rezolucija</i>	90
<i>Slika 4.13 (a) Nova konstrukcijska izvedba hibridnih zupčanika s (b) pripadajućom geometrijom</i>	93
<i>Slika 4.14 Taljenje zuba hibridnog zupčanika s (a) aluminijskim i (b) čeličnim umecima</i>	94
<i>Slika 4.15 (a) Druga varijanta nove konstrukcijska izvedbe hibridnih zupčanika i (b) geometrija metalnog umetka</i>	95
<i>Slika 4.16 (a) Treća varijanta nove konstrukcijska izvedbe hibridnih zupčanika i (b) pripadajuća geometrija metalnog umetka</i>	96
<i>Slika 4.17 (a) Potporna struktura na koju se oslanja (b) prevjes za slučaj simetrične izvedbe polimerne matrice</i>	97

<i>Slika 4.18 Termografska slika (a) hibridnog i (b) polimernog zupčanika nakon 25 minuta ubrzanog postupka ispitivanja (2 Nm)</i>	98
<i>Slika 4.19 Temperatura tijela T_{bulk} hibridnih zupčanika</i>	100
<i>Slika 4.20 Matematički modeli za predviđanje temperature tijela T_{bulk} hibridnih zupčanika s naznačenim linijama trenda</i>	101
<i>Slika 4.21 Mjera preko zubi prije (1) i nakon (2) ispitivanja hibridnih zupčanika s umecima u obliku trake</i>	102
<i>Slika 4.22 Trošenje boka zuba gonjenog hibridnog zupčanika s (a) aluminijskim i (b) čeličnim umecima</i>	103
<i>Slika 4.23 Stupanj iskoristivosti η_z hibridnih zupčanika s umecima u obliku trake</i>	104
<i>Slika 4.24 (a) Nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika s (b) pripadajućom geometrijom polimerne matrice</i>	106
<i>Slika 4.25 Hibridni zupčanik s (a) aluminijskim diskom i (b) aluminijskim diskom s pjenom</i>	107
<i>Slika 4.26 Proizvedena aluminijska pjena</i>	108
<i>Slika 4.27 Temperatura tijela T_{bulk} hibridnih zupčanika s različitim aluminijskim umecima</i>	108
<i>Slika 4.28 Matematički modeli za predviđanje temperature tijela T_{bulk} hibridnih zupčanika s aluminijskim diskom i diskom s aluminijskom pjenom</i>	110
<i>Slika 4.29 Mjera preko zubi prije (1) i nakon (2) ispitivanja hibridnih zupčanika s različitim aluminijskim umecima</i>	111
<i>Slika 4.30 Stupanj iskoristivosti η_z hibridnih zupčanika s različitim aluminijskim umecima</i>	113
<i>Slika 4.31 Usporedba temperature tijela T_{bulk} polimernih i hibridnih zupčanika</i>	114
<i>Slika 4.32 Mjera preko zubi prije (1) i nakon (2) ispitivanja polimernih i hibridnih zupčanika</i>	115

<i>Slika 4.33 Trošenje boka zuba gonjenog (a) polimernog i (b) hibridnog zupčanika</i>	116
<i>Slika 4.34 Stupanj iskoristivosti η_z polimernih i hibridnih zupčanika</i>	117
<i>Slika 4.35 Prošireni ubrzani postupak ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja</i>	118
<i>Slika 4.36 Promjena razine buke za vrijeme ispitivanja (a) polimernih i (b) hibridnih zupčanika</i>	119
<i>Slika 4.37 Usporedba temperature tijela T_{bulk} polimernih i hibridnih zupčanika prilikom određivanja granica nosivosti</i>	120
<i>Slika 5.1 Centralno kompozitni plan za tri parametra [109]</i>	123
<i>Slika 5.2 Graf ostataka u ovisnosti o rednom broju eksperimenta (T_{bulk})</i>	128
<i>Slika 5.3 Temperatura tijela T_{bulk} u ovisnosti o okretnom momentu i brzini vrtnje</i>	130
<i>Slika 5.4 Temperatura tijela T_{bulk} u ovisnosti o vremenu ispitivanja</i>	131
<i>Slika 5.5 Usporedba eksperimentalnih rezultata i predviđanja matematičkog modela (T_{bulk})</i>	131
<i>Slika 5.6 Predviđanje temperature tijela T_{bulk} prema različitim matematičkim modelima</i>	132
<i>Slika 5.7 Graf ostataka u ovisnosti o rednom broju eksperimenta (ΔW_4)</i>	135
<i>Slika 5.8 Graf ostataka u ovisnosti o rednom broju eksperimenta (Δm)</i>	135
<i>Slika 5.9 Razlika mjere preko zubi ΔW_4 u ovisnosti o okretnom momentu i brzini vrtnje</i>	137
<i>Slika 5.10 Usporedba eksperimentalnih rezultata i predviđanja primjenom matematičkog modela (ΔW_4)</i>	138
<i>Slika 5.11 Promjena mase Δm u ovisnosti o okretnom momentu i brzini vrtnje</i>	139
<i>Slika 5.12 Usporedba eksperimentalnih rezultata i predviđanja matematičkog modela (Δm)</i>	140

<i>Slika 5.13 Graf ostataka u ovisnosti o rednom broju eksperimenta (η_z)</i>	142
<i>Slika 5.14 Stupanj iskoristivosti η_z u ovisnosti o okretnom momentu i brzini vrtnje</i>	144
<i>Slika 5.15 Usporedba eksperimentalnih rezultata i predviđanja matematičkog modela (η_z)</i>	145

POPIS OZNAKA I KRATICA

(1)	prije ispitivanja
(2)	poslije ispitivanja
.stl	Standard Tessellation Language
3D	trodimenzionalni
3D CAD	trodimenzionalni računalnom potpomognuti
3D Printing	trodimenzionalno tiskanje
A_{xy}	mjerna površina
A	okretni moment (ulazni parametar)
ABS	akrilonitril butadien stiren
ANOVA	analiza varijance
APME	Udruženju europskih proizvođača polimernih materijala
ASTM	Američko društvo za ispitivanje i materijale
ATSP	aromatični termo reaktivni kopolijester
a	debljina utora/metalnog umetka
a_0	osni razmak
B	brzina vrtnje (ulazni parametar)
BS	Britanski standard
b	širina utora/metalnog umetka
b_z	širina zupčanika
b_0, \dots, b_k	koeficijenti modela
C	vrijeme ispitivanja (ulazni parametar)
CAD	računalom podržano dizajniranje
CCD	centralno kompozitni plan
CF	uglična vlakna

c	duljina utora/metalnog umetka
DIN	Njemački institut za norme
D_{sr}	srednji promjer profila
D_u	unutarnji promjer profila
D_v	vanjski promjer profila
d	diobeni promjer
d_a	tjemeni promjer
d_b	temeljni promjer
d_f	podnožni promjer
E	linearna elastična opruga
e	ekscentričnost profila
EMC	Electromagnetic Compatibility
engl.	engleski
FDM/FFF	taložno srašćivanje ili odlaganje taline
FEM	metoda konačnih elemenata
FESB	Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje
FGM	funkcionalno stupnjevani materijal
FZG	Istraživački centar za zupčanike i prijenosnike
F_{rL}	radijalno opterećenje ležaja
GF	staklena vlakna
H_0	nulta statistička hipoteza
h	dubina utora (paoka) u polimernoj matrici
ISO	Međunarodna organizacija za normizaciju
k	broj parametara ili faktora u eksperimentu
j_p	profilna zračnost
j_t	kružna (obodna) zračnost

j_r	radijalna zračnost
L	referentna dužina
LWIR	dugovalna kamera
MoS ₂	molibden disulfid
MWIR	srednjevalna kamera
m	modul
njem.	njemački
PA	poliamid (najlon)
PA 11	poliamid na osnovi aminoundekanske kiseline
PA 12	poliamid na osnovi dodekanske kiseline
PA 46	poliamid na osnovi politetrametilen adipinske kiseline
PA 6	poliamid na osnovi ϵ kaprolaktana
PA 6-CF 30	poliamid na osnovi ϵ kaprolaktana s dodatkom 30 % ugljičnih vlakana
PA 6-GF 20	poliamid na osnovi ϵ kaprolaktana s dodatkom 20 % staklenih vlakana
PA 6-GF 30	poliamid na osnovi ϵ kaprolaktana s dodatkom 30 % staklenih vlakana
PA 610	poliamid na osnovi heksametilendiamin sebacinske kiseline
PA 612	poliamid na osnovi heksametilendiamin dodekanske kiseline
PA 612-CF 20	poliamid na osnovi heksametilendiamin dodekanske kiseline s dodatkom 20 % ugljičnih vlakana
PA 618	poliamid na osnovi PA 6 i PA 66, kopolimer
PA 66	poliamid na osnovi heksametilendiamin adipinske kiseline
PA 66-CF 20	poliamid na osnovi heksametilendiamin adipinske kiseline s dodatkom 20 % ugljičnih vlakana
PA 66-GF 20	poliamid na osnovi heksametilendiamin adipinske kiseline s dodatkom 20 % staklenih vlakana
PA 66-CF 30	poliamid na osnovi heksametilendiamin adipinske kiseline s dodatkom 30 % ugljičnih vlakana

PA 66-GF 30	poliamid na osnovi heksametilendiamin adipinske kiseline s dodatkom 30 % staklenih vlakana
PA 6/66	poliamid na osnovi PA 6 i PA 66, kopolimer (ϵ kaprolaktama i heksametilendiamin adipinske kiseline)
PBT	polibutilen tereftalat
PBT-GF 15	polibutilen tereftalat s dodatkom 15 % staklenih vlakana
PBT-GF 30	polibutilen tereftalat s dodatkom 30 % staklenih vlakana
PC	polikarbonat
PE	polietilen
PEI	polieter imid
PET	polietilen tereftalat
PEEK	polieter eter keton
PI	poliimid
PID	proporcionalna, integralna i diferencijalna
PI-CF 15	poliimid s dodatkom 15% ogljičnih vlakana
PLA	polilaktid
PLA-CF 10	polilaktid s dodatkom 10 % staklenih vlakana
PLA-GF 10	polilaktid s dodatkom 10 % ogljičnih vlakana
PLC	programabilni logički kontroler
POM	polioksimetilen (poliacetal)
POM-GF 28	poli(oksimetilen) s dodatkom 28 % staklenih vlakana
PP	polipropilen
PS	polistiren
PTFE	politetrafluoretilen (Teflon)
PUR	poliuretan
PVC	polivinil klorid
PVD	vakumsko taloženje

P_L	gubici snage u ležaju
R_a	srednje aritmetičko odstupanje profila
RSM	metoda odzivne površine
R^2	koeficijent determinacije, zbroj kvadrata odstupanja
R^2_{adj}	prilagođeni koeficijent determinacije
R^2_{pred}	predviđajući koeficijent determinacije
S_a	srednja aritmetička visina površine
SEM	skenirajući elektronski mikroskop
SI	silikon
SLA	fotopolimerizacija ili stereolitografija
SLS	selektivno lasersko srašćivanje
s	debljina zuba na diobenoj kružnici
T_1	okretni moment na pogonskom zupčaniku
T_2	okretni moment na gonjenom zupčaniku
T_{amb}	temperatura okoline
T_{bulk}	temperatura tijela zupčanika
T_{flash}	trenutna temperatura u zahvatu spregnutih zupčanika
T_g	temperatura staklišta (staklastog prijelaza)
T_t	temperatura tališta
t	ukupno vrijeme ispitivanja u ubrzanom postupku ispitivanja
VDI	Udruga njemačkih inženjera
v_L	obodna brzina ležaja
WEDM	elektroerozijska obrada žicom
W_4	mjera preko zubi
$W_{4, e}$	teorijska gornja granica mjere preko zubi
$W_{4, i}$	teorijska donja granica mjere preko zubi

Z	visina mjerenog profila
x	udaljenost utora/metalnog umetka od vrha zuba
Y	odzivna površina
z	broj zubi
α	udaljenost stanja u osima od središnje točke
α_n	kut profila
ΔW_4	razlika mjere preko zubi
Δm	promjena (gubitak) mase
ε	emisivnost
ε_{el}	elastična ili energijska deformacija
ε_{en}	entropijska ili viskoelastična deformacija
ε_p	plastična ili viskofluidna deformacija
ε_u	ukupna relativna deformacija
ε_a	stupanj prekrivanja profila
η	viskozni prigušivač
η_z	stupanj iskoristivosti zupčanog para
μ_L	koeficijentu trenja u ležaju
ρ_f	polumjer zaobljenja prijelazne krivulje

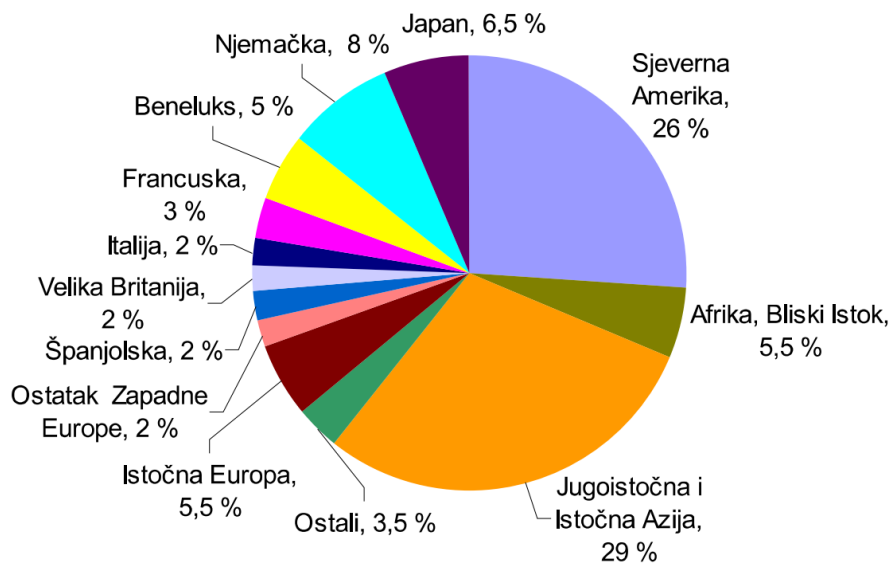
1. UVOD

1.1. Motivacija

Ubrzani razvoj i napredak novih tehnologija karakteristika je današnjeg gospodarstva. Takav razvoj i napredak tehnologija u pravilu prati i razvoj novih materijala, a glavni ciljevi su pouzdanost, iskoristivost (učinkovitost), te brza i jeftina proizvodnja uz što niži utrošak energije. U novije vrijeme sve veći je naglasak i na zaštiti i očuvanju okoliša, a polimerni materijali nametnuli su se kao jedno od rješenja za navedene zahtjeve tržišta. Brzi postupci prerade polimera u odnosu na metale te nizak utrošak energije za proizvodnju i oblikovanje proizvoda povećali su njihovu konkurentnost na tržištu. Danas se polimeri ubrajaju među najvažnije tehničke materijale, a svojstva koja posjeduju i mogućnost daljnjeg razvoja istih razlog su njihove sve veće zastupljenosti.

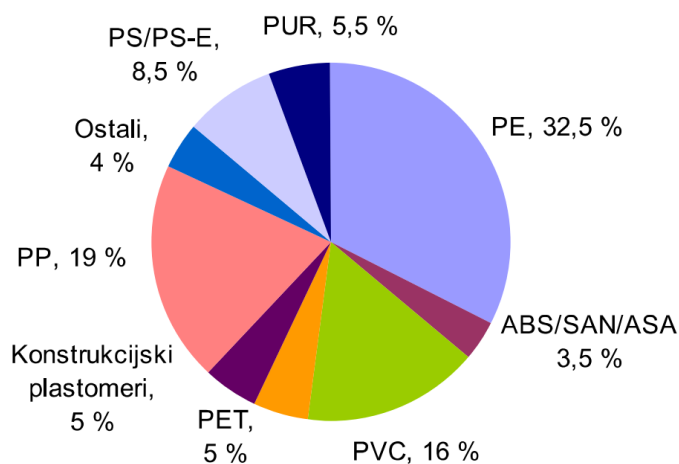
Tri osnovne skupine polimera su elastomeri, duromeri i plastomeri. Duromeri i plastomeri se upotrebljavaju kao konstrukcijski materijali, a poznati su i pod zajedničkim nazivom plastika. Proizvodnja plastike 1950. godine iznosila je oko milijun tona, dok je 2004. godine iznosila 224 milijuna tona. Također, u odnosu na 2003. godinu proizvodnja plastike se povećala za 5,7 %. Ako se toj broju pridoda i proizvodnja elastomera, ukupna svjetska proizvodnja polimera 2004. godine premašila je 250 milijuna tona [1]. Za usporedbu, godišnja proizvodnja čelika 2007. godine iznosila je oko 1300 milijuna tona, a 1950. godine oko 100 milijuna tona. Navedeno ukazuje da je proizvodnja plastike u periodu od oko 50 godina nadmašila proizvodnju čelika za oko 17 puta. Za proizvodnju čelika potrebno je oko 350 kJ/cm^3 energije, koliko je potrebno za proizvodnju energijski najzahtjevnijih polimera poput polioksimetilena (POM). Upravo iz navedenih razloga, prema nedavno provedenim istraživanjima, 19 % polimernih materijala je danas nemoguće zamijeniti alternativnim materijalima [2].

Slika 1.1 prikazuje udio pojedinih zemalja i regija u ukupnoj proizvodnji plastike prema podacima iz 2004. godine. Primjetno je da u proizvodnji plastike dominiraju gospodarski razvijenije zemlje, međutim, zbog poboljšanja uvjeta života i životnog standarda očekuje se veći razvoj i rast polimerne industrije i u do sada slabije razvijenim zemljama. Razvoj novih i poboljšanih polimernih materijala u polimernoj industriji posljednjih godina, među kojima se nekima primjena tek traži dok se neki već primjenjuju, uzrokovalo je i razvoj i napredak tehnologije proizvodnje i prerade polimera. Postojeći postupci prerade polimernih materijala poput injekcijskog prešanja se neprestano unaprjeđuju, a uvode se i novi ekonomičniji postupci većih kapaciteta kojima je moguće proizvoditi sve zahtjevnije polimerne tvorevine.



Slika 1.1 Proizvodnja plastike po svijetu u 2004. godini [1]

Iako je 2004. godine proizvodnja široko primjenjivih polimera poput polietilena (PE), polivinil klorida (PVC), polipropilena (PP), polietilen tereftalata (PET) i sl. dominirala u odnosu na konstrukcijske (inženjerske) plastomere (Slika 1.2), danas se ta situacija mijenja te njihov udio raste jer oni sve češće zamjenjuju metale.

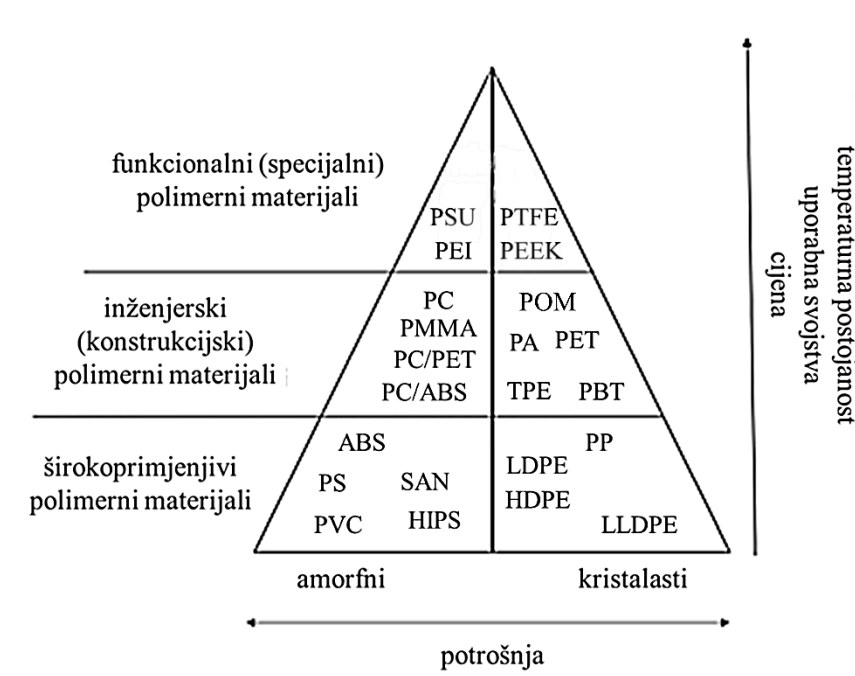


Slika 1.2 Vrste plastike u ukupnoj svjetskoj proizvodnji u 2004. godini [1]

Sve strože regulative iz područja zaštite okoliša zahtijevaju oporabu (recikliranje) što utječe na izbor samih materijala. Važno je napomenuti da je plastični otpad i dalje zanemariv u usporedbi s drugim vrstama otpada. Prema Udruženju europskih proizvođača polimernih materijala (engl. Association of Plastics Manufacturers in Europe – APME), danas PlasticsEurope, plastični otpad je sudjelovao sa samo 0,73 % masenog udjela u ukupnoj količini otpada stvorenog 2003. godine [1]. Velika prednost jest to što je polimere moguće reciklirati, uglavnom usitnjavanjem početnog proizvoda od kojeg se izrađuju novi proizvodi, a kvaliteta recikliranih polimernih

materijala potpuno je jednaka kvaliteti potpuno novih polimernih proizvoda. Kao posljedica kemijskih i fizičkih utjecaja okoline dolazi do razgradnje polimera, što se može iskoristiti za samostalnu razgradnju polimernog otpada iz okoliša. Stoga se danas nastoji proizvoditi biorazgradive polimere koji pridonose zaštiti i očuvanju okoliša [3].

Bolja mehanička, toplinska i tribološka svojstva plastomera u odnosu na duromere i elastomere razlog je njihove primjene u konstrukcijama i dijelovima konstrukcija. Kao najznačajnija skupina konstrukcijskih plastomera izdvajaju se polioksimetilen (POM) poznat i kao poliacetal, poliamidi (PA) poznati kao najloni, polibutilen tereftalat (PBT), akrilonitril butadien stiren (ABS), poliimid (PI) te funkcionalni (specijalni) polimerni materijal polieter eter keton (PEEK) [4]. Uz navedene plastomere, Slika 1.3 prikazuje i druge plastomere koji se primjenjuju u konstrukcijama i elementima konstrukcija.



Slika 1.3 Piramida plastomera [5]

Plastomeri imaju dugačak radni vijek, malu gustoću, dobro podnose dinamička opterećenja, dobro prigušuju vibracije, otporni su na trošenje, uglavnom ne zahtijevaju podmazivanje i nisu podložni koroziji. Nedostatak im je gubitak postojanosti i degradacija mehaničkih svojstava pri povišenim temperaturama, kao i sklonost puzanju. Podnose radnu temperaturu do oko 100 °C, a kratkotrajno do 150 °C. Toplinska vodljivost im je oko 200 puta lošija, a koeficijent toplinskog širenja 6 do 7 puta veći u odnosu na konstrukcijske čelike. Neki plastomeri skloni su upijanju vlage, a dodatkom ugljičnih (engl. Carbon Fiber – CF) ili staklenih (engl. Glass Fiber – GF) vlakana osnovnoj polimernoj matrici mogu im se poboljšati mehanička i toplinska

svojstva. Kod većine plastomera deformacija ne ovisi samo o opterećenju već i o vremenu djelovanja opterećenja (viskoelastičnost), ali i o temperaturi, zbog čega je teško opisati njihovo ponašanje.

Mogućnost proizvodnje sintetskih polimera sa širokom paletom mehaničkih, triboloških i toplinskih svojstava omogućilo je njihovu primjenu u raznim elementima konstrukcija, ali i čitavim konstrukcijama s visokim zahtjevima sigurnosti, pouzdanosti i funkcionalnosti. Jedan takav konstrukcijski element je zupčanik, najznačajniji predstavnik mehaničkih prijenosnika snage i gibanja. Zupčanici se koriste u različitim uređajima, od malih uređaja poput sata pa sve do velikih uređaja poput brodskih reduktora, a proizvode se od raznih metalnih i nemetalnih materijala. Njihova najveća prednost je kompaktna konstrukcijska izvedba i male ugradbene dimenzije što omogućava prenošenje velikih opterećenja i brzina vrtnje uz malu masu. Zubi zupčanika u radu su podvrgnuti različitim dinamičkim (cikličkim) opterećenjima. Korijen zuba opterećen je na savijanje i tlak, dok je bok zuba izložen velikim kontaktnim naprezanjima. Prolaskom zuba kroz zahvat smjerovi i iznosi opterećenja se mijenjaju što nepovoljno utječe na otpornost trošenju i radni vijek zupčanika.

Serijska proizvodnja polimernih zupčanika se u pravilu izvodi injekcijskim prešanjem. Kod injekcijskog prešanja polimer u granulama se zagrijavanjem pretvara u talinu odgovarajuće viskoznosti koja se zatim ubrizgava u temperirani kalup [6]. Za male serije i pojedinačnu proizvodnju koriste se konvencionalni postupci obrade odvajanjem čestica poput odvalnog dubljenja i blanjanja (Maag i Fellows), odvalno glodanje ili kopirno glodanje pločastim glodalom [7], ili pak razne aditivne tehnologije. Aditivna proizvodnja odnosi se na proizvodnju predmeta nanošenjem čestica u vrlo tankim slojevima, a sam proces započinje izradom digitalnog modela, koji se zatim transformira u određen broj horizontalnih poprečnih presjeka koji se nanose sloj po sloj. U postupcima aditivne proizvodnje najpoznatiji procesi su fotopolimerizacija ili stereolitografija (SLA), trodimenzionalno tiskanje (3D Printing), taložno srašćivanje ili odlaganje taline (FDM ili FFF) i selektivno lasersko srašćivanje (SLS). Aditivni proizvodni postupci koriste se nešto više od 30 godina i još uvijek su u razvoju. Kratko vrijeme izrade predmeta, niska cijena, kvaliteta izradaka i prilagodljivost procesa upućuju na sve veću upotrebu i zastupljenost ove tehnologije. U usporedbi s injekcijskim prešanjem postupci aditivne tehnologije ne zahtijevaju velika početna ulaganja, a u odnosu na konvencionalne postupke proizvodnje nema otpadnog materijala, pa je sama proizvodnja energetski učinkovita. U posljednje vrijeme teži se povećanju preciznosti strojeva za aditivnu proizvodnju kako bi se mogli proizvoditi predmeti koji zahtijevaju visoku točnost dimenzija, bez potrebe za

naknadnom završnom obradom [8]. Injekcijskim prešanjem i obradom odvajanjem čestica ostvaruje se veća kvaliteta polimernih zupčanika u odnosu na aditivnu proizvodnju.

Porast cijene energije i materijala predstavlja sve veći problem, pa standardne metalne zupčanike u današnje vrijeme sve više zamjenjuju polimerni zupčanici čija je proizvodnja brža i jeftinija. Polimerni zupčanici zadovoljavaju zahtjeve ekološki podržane proizvodnje i proširuju primjenu zupčanika na mjesta gdje se metalni zupčanici nisu koristili, bilo zbog ekonomskih ili funkcionalnih razloga. Dok su metalni zupčanici poprilično istraženi i razvijeni te ih je moguće projektirati uz veliku pouzdanost, uzimajući u obzir nosivost (opteretivost), trošenje i njihov radni vijek, isto nije primjenjivo na polimerne zupčanike. Zbog velikog broja različitih polimernih materijala koji se koriste za izradu zupčanih prijenosnika te nedostatka iskustvenih parametara i standarda pouzdano projektiranje i konstruiranje polimernih zupčanika predstavlja velik izazov za projektante i proizvođače polimernih zupčanika. Za konstruiranje polimernih zupčanika trenutno je moguće koristiti smjernice odnosno uputstva poput VDI 2736 [9, 10] ili BS 6168 [11], ali one pokrivaju samo nekolicinu polimernih materijala, uglavnom POM, PA 6 i PA 66. Iako se već primjenjuju, zbog nedostatka iskustvenih vrijednosti i standarda i dalje se provode brojna znanstvena istraživanja na polimernim zupčanicima.

Iz svega navedenog uočen je velik potencijal po pitanju primjene polimernih materijala u elementima konstrukcija, konkretno u ovom slučaju zupčanika. Može se zaključiti da odgovarajući polimeri s pripadajućim svojstvima mogu ispuniti zahtjeve zupčanika koji su u radu podvrgnuti dinamičkim opterećenjima i kontaktnim napreznjima. Međutim, da bi se isto ostvarilo te u svrhu osiguranja kvalitete i pouzdanosti potrebna je njihova standardizacija, kao što je to slučaj s metalnim zupčanicima. Radi stjecanja novih znanja i spoznaja nužno je provoditi eksperimentalna ispitivanja na stvarnim polimernim zupčanicima. Svrha ovog znanstvenog istraživanja u okviru izrade doktorskog rada je dobiti uvid u radne značajke polimernih zupčanika proizvedenih FDM procesom aditivne tehnologije pri različitim opterećenjima i brzinama vrtnje pomoću odgovarajućeg uređaja, tj. eksperimentalnog sustava za ispitivanje polimernih zupčanika. S obzirom da su polimerni zupčanici primarno ograničeni radnom temperaturom (uobičajeno oko 100 °C ili 120 °C) potrebno je istražiti moguće koncepte hibridnih zupčanika u svrhu poboljšanja toplinske vodljivosti radi poboljšanja radnih značajki i radnog vijeka zupčanika. Cilj je odrediti potencijal hibridnih zupčanika i razviti nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika te eksperimentalno validirati postojeće konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika, budući da su na istima provedene samo numeričke analize. Krajnji cilj je usporediti radne značajke između polimernih zupčanika, postojećih

izvedbi hibridnih zupčanika i novih izvedbi hibridnih zupčanika gdje su svi navedeni zupčanici proizvedeni istom aditivnom tehnologijom, te da pri tom imaju jednaku geometriju ozubljenja.

U nastavku ovog uvodnog poglavlja dan je sažeti pregled znanstveno-istraživačkih radova iz područja polimernih zupčanika, a iz čije su analize proizašle odgovarajuće hipoteze kao i konkretni očekivani znanstveni doprinosi ovog doktorskog rada.

1.2. Pregled dosadašnjih istraživanja – polimerni zupčanci

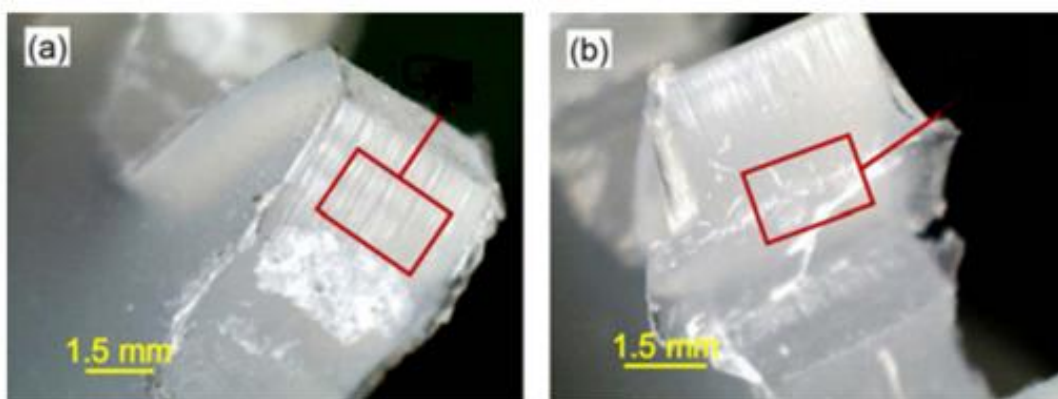
Za prijenos snage ili gibanja danas se najčešće upotrebljavaju zupčani prijenosnici. Ekonomski su povoljni, imaju velik stupanj iskoristivosti te se jednostavno održavaju bez obzira na uvjete rada, a uz to mogu prenositi i velike snage. Opterećenje prenose oblikom pa se osim za prijenos snage, koriste i kao prijenosnici točnog gibanja te kada je potrebno ostvariti velik broj okretaja. Moderno doba prati brz razvoj znanosti, tehnologije i načina proizvodnje pa se proizvođači zupčanih prijenosnika snage i gibanja suočavaju sa sve većim izazovima. Prijenos snage i gibanja uz što veću točnost, pouzdanost i iskoristivost (učinkovitost) uz istovremeno smanjenje troškova i mase, zahtjev je koji se stavlja pred projektante i proizvođače.

Porast cijene energije i materijala predstavlja sve veći problem pa metalne zupčanike u današnje vrijeme sve više zamjenjuju polimerni zupčanci čija je proizvodnja brža i jeftinija. Polimerni zupčanci zadovoljavaju zahtjeve ekološki održive proizvodnje i proširuju primjenu zupčanika na mjesta gdje se metalni zupčanci nisu koristili, bilo zbog ekonomskih ili funkcionalnih razloga. Međutim, iako se već primjenjuju, zbog nedostatka iskustvenih vrijednosti i standarda, i dalje se provode brojna znanstvena istraživanja na polimernim zupčanicima. Dodatno, u odnosu na metalne zupčanike, široka paleta polimernih materijala s različitim svojstvima predstavlja dodatnu prepreku te je potrebno ustanoviti koji su polimeri pogodni za proizvodnju zupčanika, a koji ipak nisu.

1.2.1. Polimerni zupčanci spregnuti s metalnim

Polimerni zupčanci se zbog svoje kompatibilnosti te pogodnih mehaničkih i triboloških svojstava često uparuju s metalnim zupčanicima, a posebno se ističu polimeri polioksimetilen (POM), razni poliamidi (PA) i polieter eter keton (PEEK). Clarke i Allen [12] istražili su utjecaj površinske hrapavosti na trošenje ispitivanjem pomoću testa s iglom i diskom (engl. pin on disc) za polimere POM i PA 6 s dodatkom molibden disulfida (MoS_2), a koji su upareni s čelikom za poboljšavanje. Uzorci su konstantno podmazivani vodom, a ispitivanje je provedeno za različite površinske hrapavosti (Ra od $0,25 \mu\text{m}$ do $1 \mu\text{m}$) rotirajuće čelične igle u odnosu na nepomični polimerni disk. Veća površinska hrapavost čelične igle uzrokuje povećano trošenje kod oba polimerna uzorka. Međutim, veće trošenje uočeno je kod POM uzorka koji nije bio u mogućnosti stvoriti prijelazni polimerni sloj na metalnoj površini, što bi rezultiralo sniženom površinskom hrapavosti. Kod PA 6 s dodatkom MoS_2 trošenje je primarno uzrokovano apsorpcijom vode i bubrenjem uzorka. Evans i Keogh [13] proveli su ispitivanje razvoja temperature između POM polimera i čelika. Ispitivanje je provedeno pomoću testa s dva diska

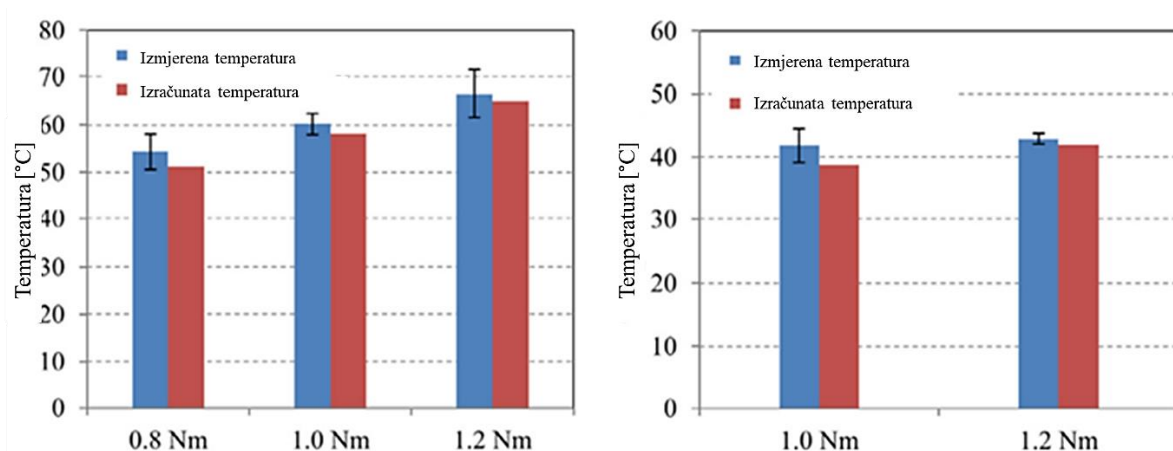
(engl. disc on disc) s radijusima koji odgovaraju radijusima zaobljenja sparenih zupčanika u točki dodira, kako bi se simulirao kontakt između bokova zubi zupčanika, nakon čega je izvršena validacija rezultata ispitivanjem na stvarnim zupčanicima. Također, predstavili su analitički model i simulaciju primjenom metode konačnih elemenata (engl. Finite Element Method – FEM). Između modela, simulacije i provedenih eksperimenata je uočeno sveukupno najveće odstupanje u iznosu od 9 % odnosno $\pm 2,5$ °C. Proizlazi zaključak da je trenutnu temperaturu na boku zuba (T_{flash}) POM uzorka moguće odrediti eksperimentalno, analitički ili numerički. Ipak, objavljeni rezultati prikazuju samo jedan jedini slučaj kada je brzina vrtnje 168 min^{-1} , a okretni moment iznosi 0,85 Nm. Mertens i Senthilvelan [14] proveli su ispitivanje rada čeličnih zupčanika u paru s injekcijski prešanim polipropilenskim (PP) zupčanicom. Čelični zupčanci izrađeni su različitim tehnologijama. Jedan zupčanic je proizveden konvencionalnim postupkom odvalnog glodanja i naknadno brušen, dok je drugi proizveden nekonvencionalnim postupkom elektroerozijske obrade žicom (engl. Wire Electrical Discharge Machining – WEDM). Postupak izrade metalnog zupčanika određuje kvalitetu površine boka zuba, a u ovom slučaju zupčanic proizveden konvencionalnim postupkom odvalnog glodanja posjeduje veću kvalitetu površine. Elektroerozijskom obradom žicom na površini zupčanika često ostaju kapljice rastaljenog metala koje hlađenjem očvrstnu zbog čega je površina grublja. U oba slučaja uočeno je povećano trošenje i zagrijavanje s povećanjem okretnog momenta na PP zupčanicu. Međutim, kada je PP zupčanic spregnut s metalnim zupčanicom izrađenim WEDM postupkom, primijećena je 10 °C do 15 °C veća temperatura. Stanje površine boka zuba PP zupčanika nakon uparivanja s metalnim zupčanicima prikazano je na Slici 1.4.



Slika 1.4 Stanje površine boka zuba PP zupčanika spregnutog s metalnim zupčanicom proizvedenog (a) konvencionalnim i (b) WEDM postupkom [14]

Chernets i dr. [15] dokazali su da kompozitni poliamidi ojačani ugljičnim vlaknima imaju veću otpornost trošenju od kompozitnih polimera ojačanih staklenim vlaknima, u slučaju kada su

spregnuti s metalnim zupčanikom. Općenito, dodatkom vlakana polimernom materijalu smanjuje se trošenje i povećava nosivost. Uočene su razlike u trošenju između zupčanika izrađenog od poliamida s 30 % staklenih (PA 6-GF 30) i poliamida s dodatkom 30 % ugljičnih (PA 6-CF 30) vlakana. PA 6-CF 30 ostvario je 4 puta bolju otpornost na trošenje ispitivanjem testom s dva diska te 8 puta dulji radni vijek prilikom ispitivanja na stvarnim zupčanicima pri brzini vrtnje od 1000 min^{-1} i okretnom momentu od 4 Nm. Sarita i Senthilvelan [16] istražili su utjecaj korištenja sredstva za podmazivanje na zagrijavanje i trošenje injekcijski prešanog PA 66 zupčanika spregnutog s metalnim zupčanikom pri čemu oba zupčanika imaju jednaku geometriju ozubljenja. Zupčanicima su podmazivani uranjanjem i cirkulacijski, a PA 66 zupčanik je prije i nakon ispitivanja sušen kako bi se uklonila vlaga. Za vrijeme ispitivanja temperatura ulja je narasla za svega $10 \text{ }^\circ\text{C}$, a ispitivanjem je potvrđeno da se podmazivanjem odvodi toplina iz zahvata spregnutih zupčanika čime se sprječava pojava oštećenja te produljuje radni vijek. Kod PA 66 zupčanika spregnutih s metalnim zupčanicima koji nisu bili podmazivani uočena su oštećenja na boku zuba zupčanika, a pri višim opterećenjima došlo je i do nastanka pukotine u blizini kinematske kružnice, nepovratnog plastičnog deformiranja zuba ili čak taljenja zuba. Zorko i dr. [17] proveli su istraživanje na PEEK zupčanicima spregnutim s čeličnim zupčanicima od kojih jedan nije naknadno mehanički obrađivan, dok je na drugom proveden postupak fine površinske obrade (engl. Super Finish). Eksperimentalna istraživanja su provedena s i bez sredstva za podmazivanje. U slučaju spreznja PEEK i metalnog zupčanika s naknadnom površinskom obradom koji su uz to i podmazivani ostvaren je 2,54 puta veći broj ciklusa i do $20 \text{ }^\circ\text{C}$ niže temperature u odnosu na nepodmazivane zupčanike. U radu je mjerena temperatura u korijenu zuba PEEK zupčanika pri različitim opterećenjima te je ista uspoređena s rezultatima dobivenih analitičkim izrazima prema VDI 2736-2 [10] (Slika 1.5).



Slika 1.5 Izmjerena (crveno) i izračunata temperatura u korijenu zuba (plavo): bez (lijevo) i sa sredstvom za podmazivanje (desno) [17]

Trenje među dodirnim površinama dominantno utječe na zagrijavanje i trošenje. Bashandeh i dr. [18] su testom s iglom i diskom (engl. pin on disc) odredili koeficijent trenja između poliamida PA 66 i čeličnog diska. U radu su korišteni obični čelični disk te čelični disk koji je premazan aromatičnim termo reaktivnim kopoliesterom (ATSP) koji sadrži politetrafluoretilen (PTFE). Eksperimentalno ispitivanje je provedeno pri temperaturi okoline od 20 °C, 50 °C i 80 °C bez dodatnog sredstva za podmazivanje. Uočen je 70 % do 80 % niži koeficijent trenja kod PA 66 uzorka koji kliže po čeličnom disku s ATSP premazom u odnosu na klizanje PA 66 uzorka po običnom čeličnom disku. Zanimljivo je da je pri temperaturi okoline od 80 °C koeficijent trenja između PA 66 i ATSP-om premazanog diska značajno niži u odnosu na ostale slučajeve. Temperatura od 80 °C je blizu temperature staklastog prijelaza T_g poliamida PA 66, te dolazi do omekšavanja materijala i smanjenja modula elastičnosti što rezultira nižim koeficijentom trenja. Koeficijent trenja opada i s povećanjem opterećenja jer dolaze do izražaja viskoelastična svojstva poliamida PA 66 i ATSP premaza koji sadrži PTFE.

1.2.2. Utjecaj vlage i brzine vrtnje na rad polimernih zupčanika

Određeni polimeri poput poliamida (PA 6, PA 66) sklone su upijanju vlage uslijed čega dolazi do bubrenja zupčanika i promjene njegovih dimenzija [19, 20]. Stoga je važno, ovisno o stvarnim eksploatacijskim (pogonskim) uvjetima, odabrati odgovarajući polimer ili istog kondicionirati. Da bi se poništio utjecaj promjene dimenzija zbog upijanja vlage iz okoline izvodi se kondicioniranje. Kondicioniranje može biti pasivno ili aktivno, a izvodi se prije puštanja u rad i to do iznosa zasićenosti uzorka koji odgovara stvarnim uvjetima u kojima će se primjenjivati. Broj sati potreban za kondicioniranje izratka ovisi o vrsti medija u kojem se nalazi i njegovoj temperaturi, debljini izratka te o stupnju kristalnosti polimera. Domitran [21] je u svom radu istražio utjecaj količine vlage u polimeru i brzine vrtnje na trošenje PA 6 zupčanika. Provedeno je eksperimentalno ispitivanje PA 6 zupčanika koji su zasićeni vlagom u iznosu od 0 %, 50 % te 100 % te je potvrđeno da s povećanjem zasićenosti vlage u polimeru raste i trošenje. Kod PA 6 zupčanika koji su 100 % zasićeni vlagom izmjerena je trenutna temperatura na boku zuba u iznosu od 126 °C. Iako su zupčanici zadovoljili radni vijek od 3 milijuna ciklusa, uočena su značajna oštećenja na boku zuba zbog taljenja materijala kojem je prethodilo povećano trošenje (Slika 1.6). Već je ranije uočeno da trošenje i zagrijavanje zupčanika raste s porastom opterećenja, a isto je potvrđeno i u slučaju povećanja brzine vrtnje. Povećanjem brzine vrtnje zupčanika povećava se učestalost ulaska zuba u zahvat što utječe na zagrijavanje polimernih zupčanika, a samim time i na njihovo trošenje i radni vijek. Toplina koja se generira uzrokovana je trenjem između dodirnih površina bokova zuba i toplinskom histerezom, a uz to

je zbog veće brzine vrtnje smanjeno je vrijeme u kojem se toplina može predati okolini. Histereza predstavlja zaostajanje deformacije za naprezanjem, ali i količinu energije koja se potroši na unutarnje trenje u polimeru te koja se pretvori u toplinu što se manifestira dodatnim zagrijavanjem zupčanika.



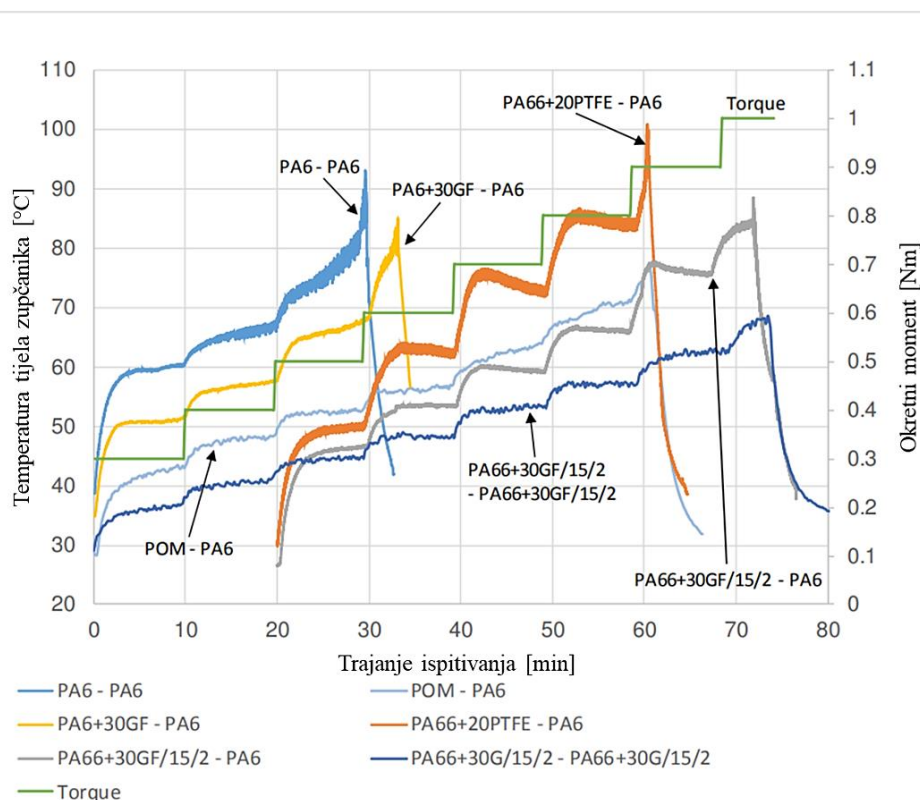
Slika 1.6 Stanje površine boka zuba pogonskog i gonjenog PA 6 zupčanika sa zasićenosti vlagom od 100 % [21]

Senthilvelan i Gnanamoorthy [22] su u svom radu istražili utjecaj brzine vrtnje na poliamidnom PA 6 zupčaniku, te istom zupčaniku s dodatkom 20 % staklenih vlakana (PA 6-GF 20). PA 6 zupčanicu bez dodatka vlakana osjetljiviji su na promjenu brzine vrtnje u odnosu na PA 6-GF 20 zupčanicu. Utjecaj brzine vrtnje na zagrijavanje, trošenje i radni vijek zupčanika izraženiji je pri većim opterećenjima, dok pri malim opterećenjima gotovo da i ne postoji.

1.2.3. Vlaknima ojačani polimerni zupčanicu i podmazivanje

Poboljšanje radnih značajki i povećanje otpornosti trošenju moguće je ostvariti dodatkom ugljičnih (engl. Carbon Fiber – CF) ili staklenih (engl. Glass Fiber – GF) vlakana osnovnom polimernom materijalu. Karthi i Marimuthu [23] proveli su ispitivanje mehaničkih svojstava staklenim vlaknima ojačanog poliamida s dodatkom 20 % i 30 % staklenih vlakana (PA 6-GF 20 i PA 6-GF 30) te su rezultate usporedili sa svojstvima neojačanog PA 6 uzorka. Dodavanjem staklenih vlakana osnovnom PA 6 polimeru smanjila se vlačna čvrstoća jer krta staklena vlakna smanjuju duktilnost poliamida. Međutim, kako je zub zupčanika u radu opterećen na savijanje i svaki ulazak zuba u zahvat predstavlja kratkotrajni udar, savojna čvrstoća i udarna žilavost imaju veći značaj nego vlačna čvrstoća. Eksperimentalnim ispitivanjem je potvrđena veća savojna čvrstoća i žilavost PA 6-GF 30 uzorka u odnosu na oba

druga uzroka, i PA 6 i PA 6-GF 20. Staklena vlakna bolje provode toplinu od osnovnog polimera čime je omogućena veća nosivost i otpornost trošenju zupčanika. Mao i dr. [24] proveli su eksperimentalno ispitivanje trošenja POM zupčanika i POM zupčanika ojačanog s 28 % udjela staklenih vlakana (POM-GF 28). Zupčanici su proizvedeni injekcijskim prešanjem, a ispitivanje je provedeno pri konstantnoj brzini vrtnje. Opterećenje je stupnjevito promjenjivo s korakom 0.5 Nm. Staklenim vlaknima ojačani polimer POM-GF 28 iskazao je čak i do 50 % veću nosivost u odnosu na neojačani POM zupčanik. Također, uočena je veća otpornost trošenju pri višim opterećenjima, dok pri nižim opterećenjima nema razlike između ojačanog i neojačanog zupčanika. Tavčar i dr. [25] su proveli eksperimentalno istraživanje zagrijavanja staklenim vlaknima ojačanih PA 6 i PA 66 zupčanika. Također, istražen je utjecaj aditiva politetrafluoretilena (PTFE) i silikona (SI) koji djeluju kao unutarnji lubrikant. Oni smanjuju koeficijent trenja što ima pozitivan utjecaj na trošenje i zagrijavanje. Također, u svojoj studiji primijenjen je ubrzani postupak ispitivanja životnog vijeka zupčanika sa stupnjevito promjenjivim opterećenjem. U usporedbi s ispitivanjem s konstantnim opterećenjem, smanjeni su vrijeme ispitivanja i troškovi (Slika 1.7).



Slika 1.7 Ubrzani postupak ispitivanja i zagrijavanje ispitivanih zupčanika [25]

Zagrijavanje polimernih zupčanika značajno utječe na postojanost i trošenje pa je za vrijeme ispitivanja mjerena i temperatura tijela zupčanika. Dodatkom staklenih vlakana u osnovni

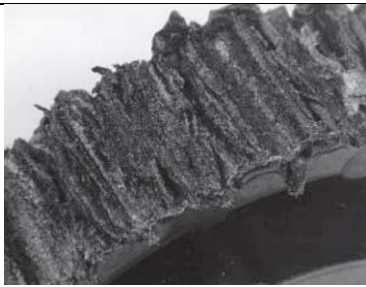

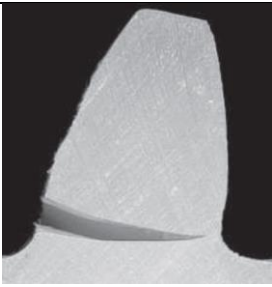
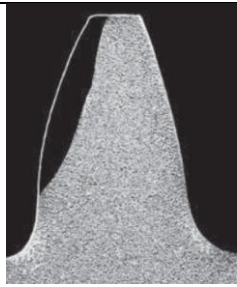
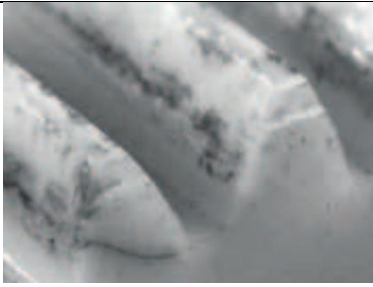

polimerni materijal, PA 6 ili PA 66, smanjuje se zagrijavanje zupčanika zbog bolje toplinske vodljivosti te manjih deformacija zuba čime je smanjeno dodatno zagrijavanje uslijed histereze. Uz dodatak staklenih vlakana, dodavanjem od 20 % do 30 % PTFE polimera i do 2 % silikona (SI) smanjilo se i trenje pa je, očekivano, s gledišta zagrijavanja ostvaren najbolji rezultat. Staklom ojačani zupčanici ostvarili su i veću nosivost u odnosu na neojačane polimere, ali ne nužno i veću otpornost trošenju. Za vrijeme rada može doći do otkidanja vlakana koja zatim ostanu zarobljena u zahvatu te ubrzavaju trošenje boka zuba. Proizlazi zaključak da je kod velikih opterećenja opravdano odabrati staklenim vlaknima ojačane zupčanike, ali pri nižim i srednjim opterećenjima, te kada je zahtjev dug radni vijek, bolje rješenje su ipak neojačani zupčanici. Jia i dr. [26] eksperimentalno su dokazali da se dodavanjem 15 % ugljičnih vlakana polimidu (PI-CF 15) uz dodatak 5 % PTFE, grafita i molibden disulfida (MoS_2) može smanjiti koeficijent trenja i stopa trošenja. Također, kada se tribološki par podmazuje vodom, trenje i trošenje se dodatno smanjuju u odnosu na slučaj bez sredstva za podmazivanje. Među svim navedenim dodacima PI-CF 15 polimeru, s gledišta trošenja i zagrijavanja, PTFE s niskom površinskom energijom i posljedično nižim koeficijentom trenja, iskazao se kao najbolji aditiv. Također, osim dodatkom vlakana i aditiva, otpornost na trošenje boka zuba može se unaprijediti podmazivanjem zupčanika. Lu i dr. [27] istražili su utjecaj podmazivanja na nosivost (opteretivost) i trošenje PEEK zupčanika, a podmazivanje se izvodi prskanjem ulja u zahvat. Rezultati istraživanja ukazuju da trošenje PEEK zupčanika ovisi o opterećenju i podmazivanju. Kod PEEK zupčanika bez sredstva za podmazivanje, pri niskim i srednjim opterećenjima, pojavile su se pukotine na boku zuba zupčanika u području oko kinematskog promjera, a koje mogu dovesti do loma boka zuba. Pri velikim opterećenjima je došlo do pojave otkaza zupčanika zbog loma u korijenu zuba. Pri istim uvjetima ispitivanja kod podmazivanih zupčanika uočeno je tek blago trošenje boka zuba pri niskim i srednjim opterećenjima, odnosno progresivnije trošenje pri većim opterećenjima, ali bez otkaza zupčanika. Iako su većina polimera koji se koriste za izradu zupčanika samopodmazivi, dodatkom sredstva za podmazivanje produljuje se radni vijek zupčanika, a ujedno se smanjuje zagrijavanje i trošenje. Međutim, nekim polimerima u kontaktu s određenim sredstvima za podmazivanje mijenjaju se čvrstoća i tvrdoća, ali i struktura i dimenzije (bubrenje) [28]. Preporuke za korištenje, prikladne kombinacije parova polimera i sredstava za podmazivanje te otpornost različitih polimera prema sredstvima za podmazivanje moguće je pronaći u uputstvima VDI 2736-1 [9]. Osim dodatka vlakana, aditiva ili sredstava za podmazivanje u novije vrijeme se primjenjuje i tehnologija vakumskog taloženja (engl. Physical Vapor Deposition – PVD) gdje se na polimer nanose višeslojni premazi s niskim koeficijentom trenja [29, 30]. Ispitivanje je provedeno na

POM zupčanicima, a korišteni su premazi na bazi aluminijske, kromne i kromovog nitrida. Iako je doprinos u vidu otpornosti prema trošenju bio očekivan, eksperimentalnim istraživanjem potvrđeno je da PVD premazi nemaju značajan efekt na smanjenje trošenja. Naprotiv, pojava ljuštenja premaza za vrijeme rada u konačnici je negativno utjecala na rad zupčanog para te je uzrokovala povećanje trenja kao i druge probleme u zahvatu zupčanika.

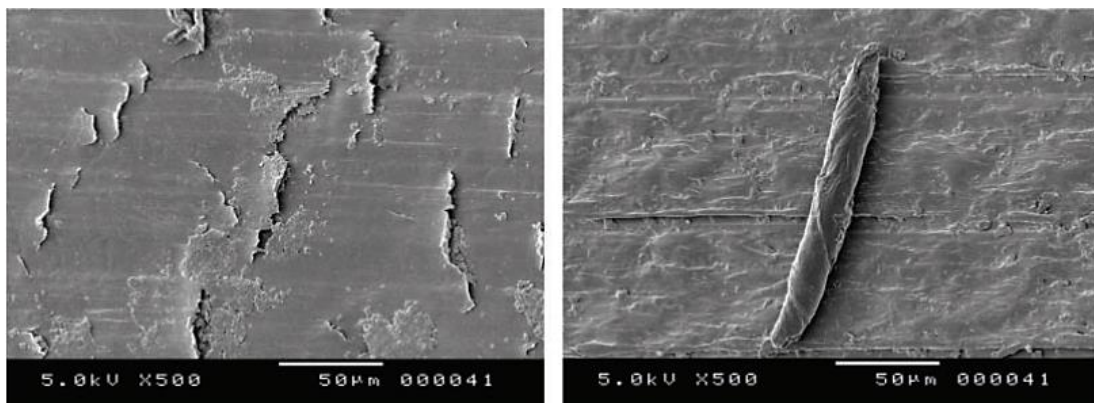
1.2.4. Mehanizmi trošenja polimernih zupčanika

U prethodnim poglavljima već je bilo govora o trošenju zupčanika te oštećenjima uslijed kojih dolazi do otkazivanja zupčanika. U nastavku će detaljno biti objašnjeni tipovi otkaza karakteristični za polimerne zupčanike, kao i mehanizmi trošenja koji mogu ukazivati na odstupanja u izradi zupčanika ili njihovoj ugradnji. Karakteristični tipovi oštećenja polimernih zupčanika uslijed kojih dolazi do otkaza (Tablica 1.1) su taljenje uzrokovano pregrijavanjem boka zuba, lom zuba u korijenu uslijed savojnog naprezanja, lom boka zuba, jamičenje (pitting) uslijed velikog Hertzovog kontaktnog te smičnog naprezanja, trošenja boka zuba i toplinsko preopterećenje koje rezultira trajnim plastičnim deformacijama [9, 31].

Tablica 1.1 Oštećenja polimernih zupčanika [9, 31]

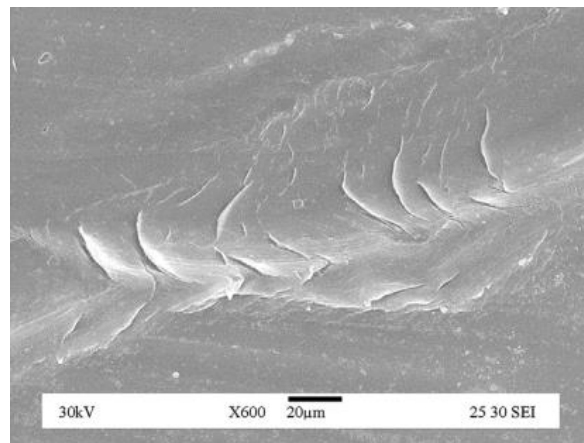
Taljenje zuba		Jamičenje (pitting)	
Lom zuba u korijenu		Trošenje boka zuba	
Lom boka zuba		Plastične deformacije	

Velik broj znanstvenih istraživanja usmjeren je na tipove oštećenja i otkaze, kao i utjecaj raznih čimbenika na mehanizme trošenja polimernih zupčanika, čak i na razini mikrostrukture. Cayer-Barioz i dr. [32] istražili su mikromehanizme trošenja PA 6 vlakana kao i utjecaj molekulne mase i orijentiranosti mikrostrukture na trošenje. Eksperimentalnom analizom na polimernim vlaknima utvrđeno je da molekulna masa ne utječe na trošenje. S druge strane, orijentiranost i uređenost molekula na razini mikrostrukture imaju značajan utjecaj na otpornost prema trošenju. Veća orijentiranost mikrostrukture olakšava nastajanje i širenje mikro šupljina koje nastaju otkidanjem mikrovlakana što dovodi do odvajanja čestica materijala i bržeg trošenja. Trošenje se može podijeliti u dvije faze: prva faza s izraženim abrazijskim trošenjem i druga faza u kojoj dolazi do smanjenja poprečnog presjeka zuba zupčanika, zatim puzanja te konačnog pucanja vlakana. Također, Marcellan i dr. [33] su eksperimentalno istražili utjecaj mikromehanizama trošenja na uzorku od poliamida PA 46 koji je proizveden injekcijskim prešanjem. Usporedbom početnog PA 46 uzorka i uzorka čestica koje su se odvojile od osnovnog materijala uslijed trošenja uočene su promjene u strukturi kao i smanjenje molekulne mase uslijed abrazijskog trošenja, a koje je rezultat zagrijavanja i povećanja napreznja. Mbarek i dr. [34] proveli su eksperimentalno ispitivanje triboloških svojstava PA 66 polimera pomoću testa s dva diska (engl. disc on disc). U radu korišteni diskovi različitih promjera kako bi se simulirao kontakt bokova zuba zupčanika u području ispod i iznad kinematske kružnice. Snimanjem površine pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa (engl. Scanning Electron Microscope – SEM) primijećena je razlika u trošenju u području ispod i iznad kinematske kružnice. U području ispod kinematske kružnice uočene su sitne pukotine i grublja površina uzrokovana različitim smjerovima kotrljanja i klizanja u tom području. Iznad kinematske kružnice kotrljanje i klizanje je u istom smjeru te je površina glatka. Međutim, pronađene su odvojene čestice koje su ostale zarobljene u zahvatu (Slika 1.8).



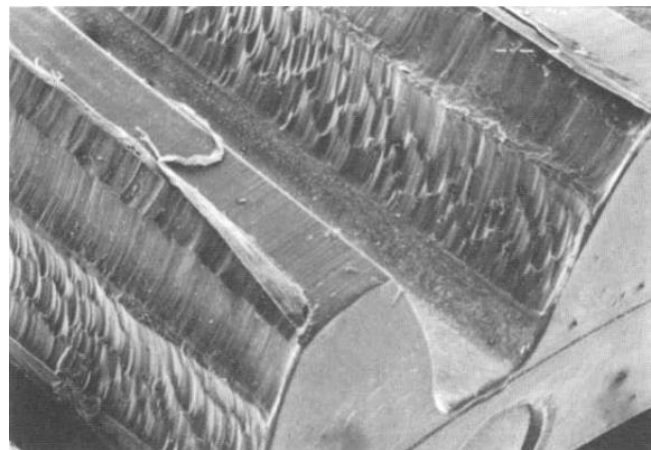
Slika 1.8 Stanje površine boka zuba u području ispod kinematske kružnice (lijevo) i iznad kinematske kružnice (desno) [34]

Evans i Keogh [35] istražili su trošenje površine boka zuba POM zupčanika spregnutog s metalnim zupčanikom. Nakon eksperimentalnog ispitivanja u trajanju od 10^7 ciklusa izvršena je SEM analiza kako bi se provjerilo stanje površine boka zuba i eventualna oštećenja. Analizom na SEM uređaju pri uvećanju od 600 puta uočeni su tragovi trošenja u vidu plastičnih deformacija na površini koje djeluju kao da je površina razmazana (Slika 1.9). Takve plastične deformacije rezultat su relativnog gibanja, odnosno klizanja bokova zubi spregnutih zupčanika. Trodimenzionalnim skeniranjem ispitivanih zupčanika određen je njihov volumen nakon čega je izračunata 77 mg manja masa u odnosu na početnu masu zupčanika.



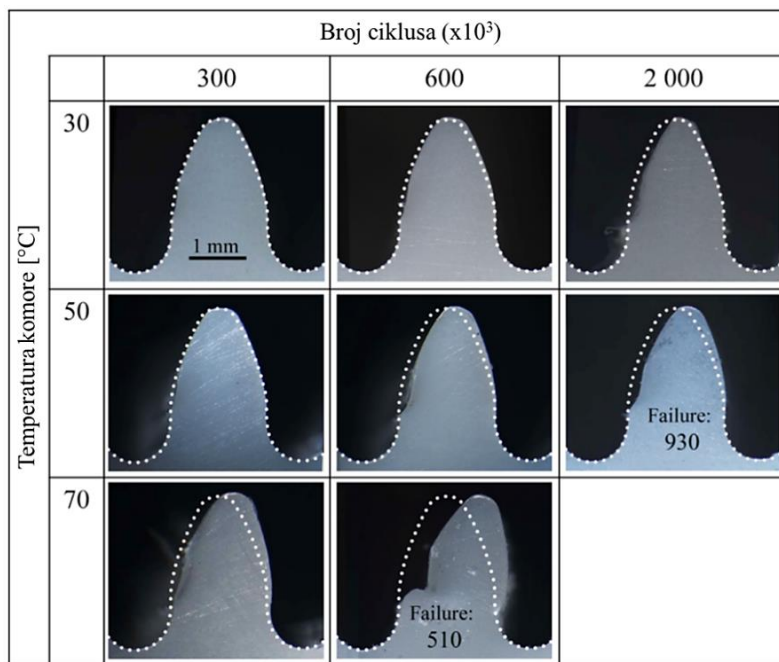
Slika 1.9 Površina boka zuba POM zupčanika nakon 10^7 ciklusa[35]

Breeds i dr. [36] eksperimentalnom su analizom istražili mehanizme trošenja POM i PA 66 para zupčanika proizvedenih postupkom injekcijskog prešanja. Analizom stanja površine boka zuba zupčanika uočeno je različito trošenje površine boka zuba kod pogonskog i gonjenog zupčanika u slučaju i POM i PA 66 zupčanika. Vidljivo je da je površina boka zuba gonjenog zupčanika (Slika 1.10) u području ispod kinematske kružnice značajnije potrošena, dok je u području iznad kinematske kružnice zaglađena, uz manja oštećenja.



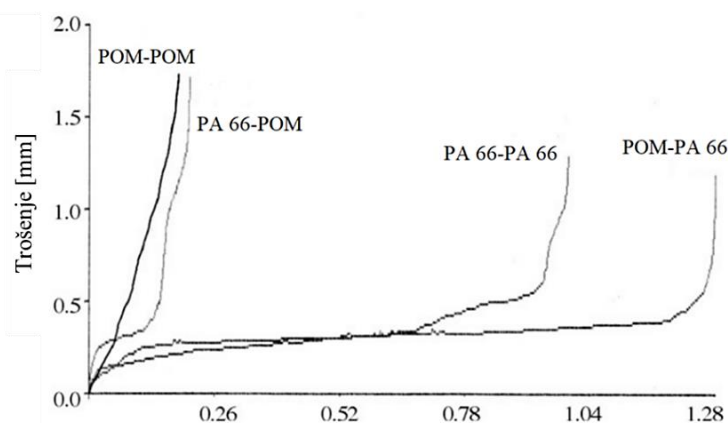
Slika 1.10 Površina boka zuba gonjenog POM zupčanika [36]

Takvo trošenje uzrokovano je različitim smjerovima kotrljanja i klizanja bokova zubi, odnosno promjenom smjera sile trenja za vrijeme odvaljivanja zupčanika, kao što je potvrđeno i ispitivanjem pomoću testa s dva diska [34]. U području oko kinematske kružnice nema klizanja što znači da ne bi trebalo biti ni trošenja, međutim, zbog gomilanja materijala na tom mjestu nastaje greben. Suprotno gonjenom, na pogonskom zupčaniku je u području oko kinematske kružnice nastala udubina. Tragovi nastali klizanjem bokova i stanje površine iznad i ispod kinematske kružnice jednako je kod oba zupčanika. Kalin i Kupec [37] proveli su ispitivanje na POM zupčanicima kako bi istražili utjecaj temperature tijela zupčanika na vijek trajanja i trošenje polimernih zupčanika. Eksperimentalno ispitivanje provedeno je na zupčanicima koji su ispitivani u komori koja omogućava kontrolu temperature na način da se temperatura tijela zupčanika održava konstantnom (30 °C, 50 °C i 70 °C). Ispitivanje se provodi do $2 \cdot 10^6$ ciklusa ili do otkaza zupčanika, što god se prije ostvari. Kada se temperatura tijela zupčanika održava na 30 °C uočeno je manje trošenje boka zuba, a zupčanik je preživio cijeli ciklus ispitivanja ($2 \cdot 10^6$ ciklusa). Pri temperaturi tijela zupčanika od 50 °C do otkaza zupčanika je došlo nakon $9,3 \cdot 10^5$ ciklusa, dok je pri temperaturi od 70 °C zupčanik preživio $5,1 \cdot 10^5$ ciklusa. Povećanje temperature tijela (50 °C i 70 °C) POM zupčanika negativno utječe na mehanička svojstva i krutost što rezultira većim trošenjem, a koje uzorkuje smanjenje debljine zuba te plastične deformacije zuba uslijed savijanja te konačni otkaz zupčanika. Održavanjem temperature tijela na 30 °C moguće je produžiti životni vijek POM zupčanika. Slika 1.11 prikazuje trošenje boka zuba POM zupčanika za različite temperature tijela zupčanika.



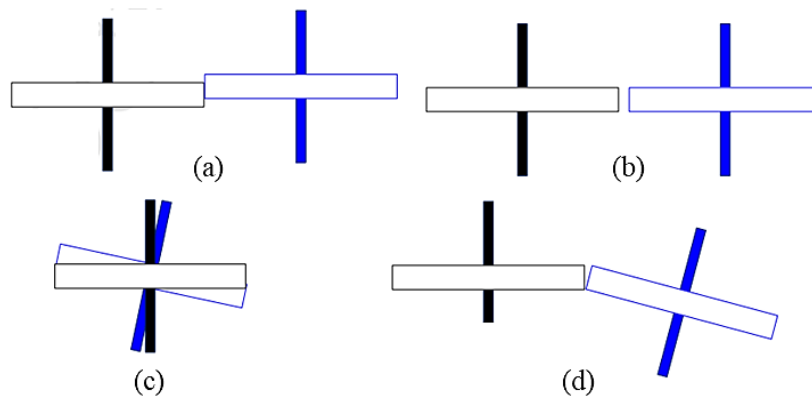
Slika 1.11 Trošenje zuba POM zupčanika pri opterećenju od 1,4 Nm [37]

Zorko i dr. [38] i Ghazali i dr. [39] su u svojim istraživanjima uzeli u razmatranje mogućnost primjene biopolimera. U odnosu na sintetske polimere čija je proizvodnja bazirana na nafti, ugljenu i prirodnom plinu, upotrebom biopolimera poticala bi se održiva i ekološki prihvatljiva proizvodnja s ciljem zaštite i očuvanja okoliša. Uočeni su jednaki tipovi trošenja, oštećenja i otkaza kod biopolimernih i kod sintetskih polimernih zupčanika. Trošenje boka zuba uočeno je pri nižim i srednjim opterećenjima, a do prestanka rada biopolimernih zupčanika dolazi uslijed loma u korijenu zuba zupčanika koji je posljedica preopterećenja. Taljenje zubi zupčanika, lom u korijenu zuba ili čak potpuno otkidanje zuba zupčanika uočeno je i kod zupčanika od polimera koji je mješavina 60 % polikarbonata (PC) i 40 % akrilonitril butadien stirena (ABS) [40]. PC je tvrd materijal postojan na povišenim temperaturama, a ABS je mekši materijal kojeg je lakše obrađivati i oblikovati. Do taljenja površine boka zuba dolazi uslijed povećanja brzine vrtnje zbog čega raste klizanje između bokova zubi što rezultira abrazijskim trošenjem boka zuba. Također, raste učestalost ulaska zuba u zahvat te se smanjuje vrijeme za izmjenu topline sa zupčanika prema okolini. Lom u korijenu zuba i otkidanje zuba zupčanika posljedica su krtosti PC/ABS mješavine polimera. Duži radni vijek i veća otpornost trošenju bi se potencijalno mogli ostvariti promjenom udjela PC i ABS polimera u mješavini. Također, na trošenje značajno utječe efekt pogonskog i gonjenog zupčanika, a posebno je izraženo kod sprezanja zupčanika izrađenih od različitih vrsta polimera [41]. Kombinacije POM – POM i PA 66 – PA 66 su obrađene u ranije spomenutom radu [36], dok su kombinacije sprezanja POM – PA 66 i PA 66 – POM po prvi put istražene u ovom radu. Uočena je velika razlika u trošenju kada je PA 66 pogonski, a POM gonjeni zupčanik, u odnosu na suprotnu situaciju. Kada je PA 66 pogonski zupčanik, zbog prekomjernog zagrijavanja uslijedio je otkaz gonjenog POM zupčanika. Međutim, kada je pogonski POM, a gonjeni PA 66 zupčanik, ostvarena je značajno veća otpornost trošenju u usporedbi sa svim drugim istraženim kombinacijama. (Slika 1.12.).



Slika 1.12 Radni vijek i trošenje POM i PA 66 polimernih zupčanika (ciklusi $\cdot 10^6$) [41]

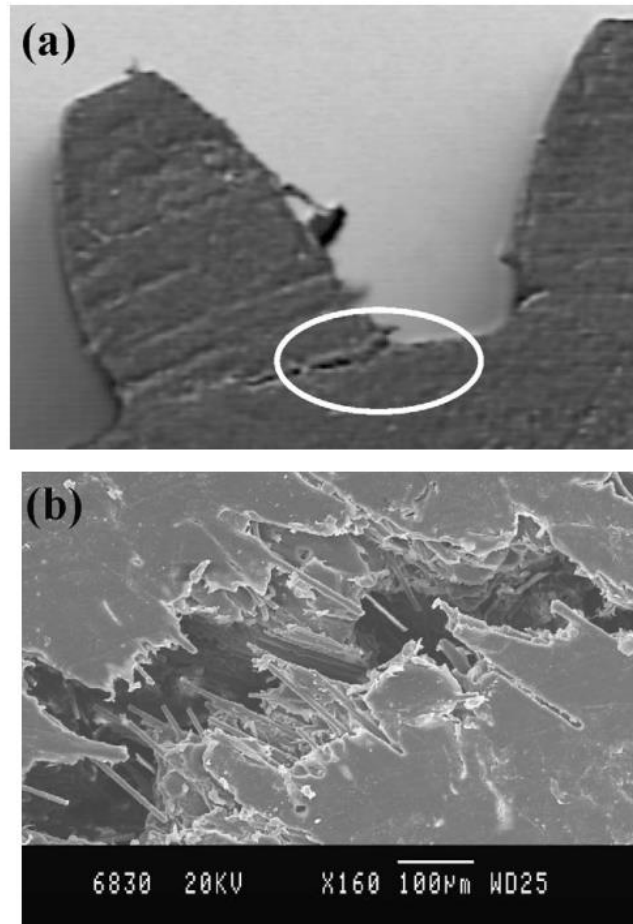
Hu i Mao [42] proveli su istraživanje utjecaja različitih geometrijskih odstupanja, odnosno odstupanja položaja, na trošenje POM zupčanika. Polimerni zupčanici su ispitivani za četiri različita slučaja odstupanja položaja: aksijalno odstupanje (Slika 1.13 (a)), radijalno odstupanje (Slika 1.13 (b)) te odstupanja od paralelnosti osi u dvije međusobno okomite ravnine (Slika 1.13 (c) i (d)). Odstupanja položaja kod zupčanika uzorkuju nepravilnost zahvata što vodi ka većem trošenju i ranijoj pojavi oštećenja. Zanimljivo je da je svako od odstupanja popraćeno karakterističnim oblikom odvojene čestice što se može iskoristiti za detekciju pogrešaka prilikom izrade ili u montaži. Za sve slučajeve odstupanja položaja zabilježene su inicijalna faza trošenja, tj. uhodavanje, zatim prijelazna faza, te faza stabilnog kontinuiranog trošenja do otkaza. POM zupčanici su najosjetljiviji na odstupanje od paralelnosti osi zupčanika, dok aksijalno i radijalno odstupanje manje utječu na trošenje. Radijalno odstupanje definirano osnim razmakom ne bi se smjelo smanjivati jer se eliminira zračnost potrebna za toplinsko širenje zuba polimernog zupčanika, a može doći i do zaglavljivanja zupčanika. Evolventni zupčanici neosjetljivi su na manje promjene osnog razmaka, a malo povećanje koje rezultira većom zračnošću može produljiti vijek trajanja zupčanika. Povećanjem zračnosti omogućava se toplinsko širenje zuba zupčanika te je više zraka zahvaćeno u prostoru između zubi u zahvatu čime se poboljšava prijenos topline sa zuba na okolinu [43].



Slika 1.13 Odstupanja od položaja polimernih zupčanika [42]

Senthilvelan i Gnanamoorthy [44] istražili su oštećenja PA 66 zupčanika s dodatkom 20 % staklenih (PA 66-GF 20) ili 20 % ugljičnih (PA 66-CF 20) vlakana. Dodavanje vlakana u osnovni polimerni materijal, osim mehaničkih i toplinskih svojstva, mijenja prirodu trošenja i oštećenja zupčanika. Razlika u trošenju između PA 66-GF 20 i PA 66-CF 20 zupčanika u odnosu na PA 66 zupčanike izraženija je pri višim opterećenjima kada se javlja otkaz uslijed loma u korijenu zuba zupčanika. PA 66-GF 20 i PA 66-CF 20 zupčanici imaju veću otpornost na lom u korijenu zuba, a pukotina je gruba što je uzrokovano otporom vlakana prema savijanju

zuba i širenju pukotine (Slika 1.14). Osnovni nedostatak vlaknima ojačanih zupčanika je manja otpornost boka zuba na abrazijsko trošenje jer se vlakna mogu odvojiti od osnovnog materijala i ostati zarobljena između bokova zuba te uzrokovati povećano trošenje. Trošenje može biti i progresivnije ako su vlakna usmjerena paralelno sa smjerom klizanja bokova zupčanika, što je izraženo kod proizvodnje polimernih zupčanika injekcijskim prešanjem.

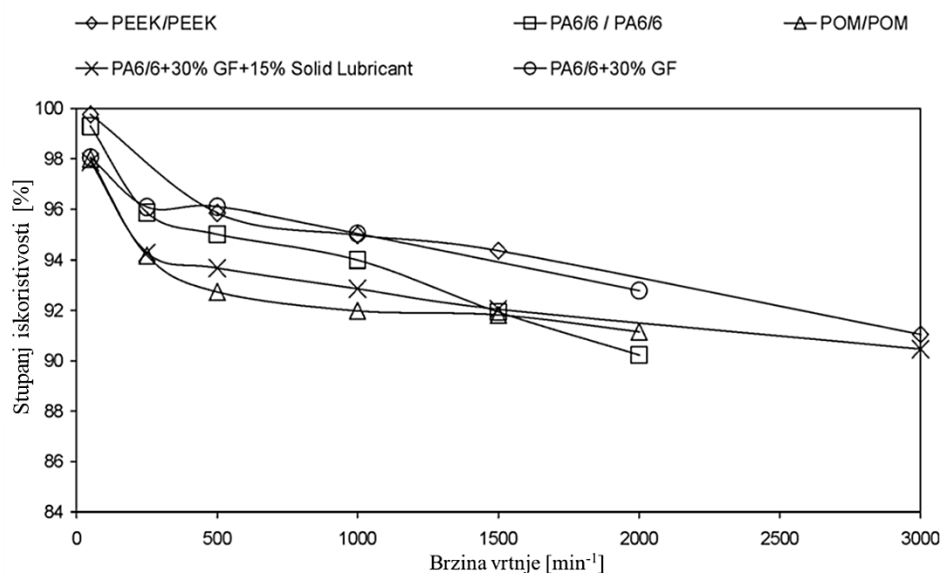


Slika 1.14 (a) Pukotina u korijenu zuba zupčanika i (b) pokidana vlakna unutar osnovnog polimera [44]

1.2.5. Stupanj iskoristivosti polimernih zupčanika i razina buke

Walton i dr. [45, 46] eksperimentalno su odredili iskoristivost zupčanog para na temelju odnosa između izlaznog i ulaznog okretnog momenta umanjениh za gubitke u ležajevima. Istraživanje je provedeno na POM, PA 66, PA 66-GF 30 i PA 66-CF 30 te PEEK polimernim zupčanicima gdje je uočeno da izbor materijala ima velik utjecaj na stupanj iskoristivosti polimernih zupčanih parova. Kod svih ispitivanih zupčanika uočena je ovisnost stupnja iskoristivosti o brzini vrtnje na način da se pri većim brzinama vrtnje stupanj iskoristivosti smanjuje (Slika 1.15). Veća brzina vrtnje uzrokuje veće klizanje između bokova spregnutih zupčanika zbog

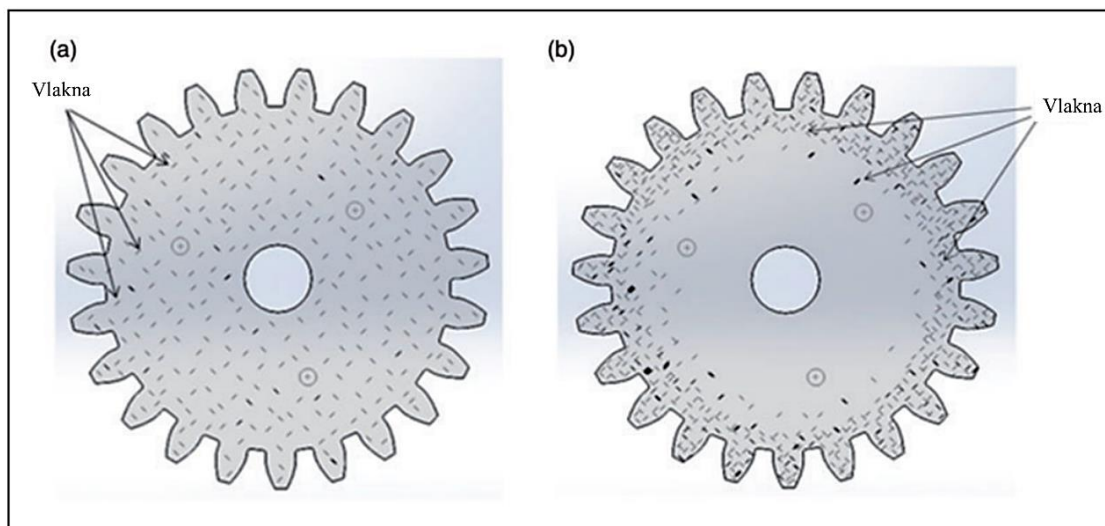
čega se veći dio prenesene snage pretvara u toplinu. Suprotno povećanju brzine vrtnje, porastom opterećenja raste stupanj iskoristivosti. Upotreba krute masti kao sredstva za podmazivanje rezultirala je povećanjem stupnja iskoristivosti zupčanih parova, kao i dodavanje vlakana, neovisno jesu li u pitanju ugljična ili staklena vlakna. PEEK zupčanicu ostvaruju najveći, a POM zupčanicu najmanji stupanj iskoristivosti u svim uvjetima ispitivanja. Stupanj iskoristivosti POM zupčanika raste povećanjem opterećenja i iznosi između 90 % i 96 %, kao i u radu [37], a kod PA 66 zupčanika ne ovisi o promjeni opterećenja. Također, istražen je utjecaj geometrije zupčanika na stupanj iskoristivosti prijenosnika te je uočeno da veći zupčanik (s većim modulom zuba) ima manji stupanj iskoristivosti. Povećanje osnovog razmaka ne utječe na stupanj iskoristivosti, ali se njegovim smanjenjem smanjuje zračnost potrebna za širenje polimernih zupčanika uslijed zagrijavanja što nepovoljno utječe na stupanj iskoristivosti jer dolazi do zaglavljivanja zubi. Ispitani su i polimerni zupčanicu s kosim zubima te je uočen veći stupanj iskoristivosti kod polimernih zupčanika s ravnim u odnosu na one s kosim zubima.



Slika 1.15 Promjena stupnja iskoristivosti s brzinom vrtnje [45]

Dearn i dr. [47] su eksperimentalno istražili iskoristivost nepodmazivanih PEEK zupčanika, kao i istih podmazivanih uranjanjem. Povećanjem brzine vrtnje povećao se stupanj iskoristivosti uljem podmazivanih zupčanika jer se uslijed većeg relativnog gibanja uspostavilo hidrodinamičko podmazivanje među bokovima zubi zupčanika (slično kao kod kliznih ležajeva). Razvijeni uljni film sprječava direktan kontakt površina boka zuba čime se smanjuje trenje i zagrijavanje zupčanika. Porastom opterećenja došlo do probijanja uljnog filma i pojave suhog trenja između bokova zubi. Zbog toga se smanjio se stupanj iskoristivosti. Nakon početne faze uhodavanja, površine bokova zubi nepodmazivanih PEEK zupčanika su se uglašale, što je

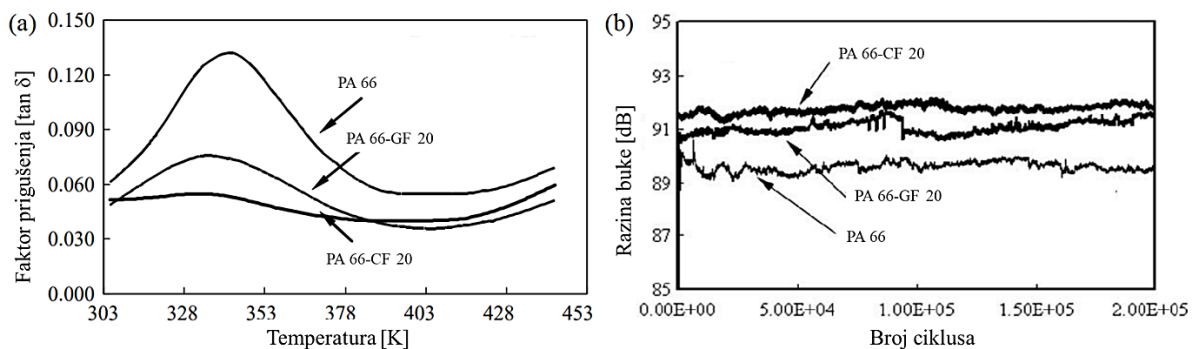
rezultiralo manjim trenjem i većim stupnjem iskoristivosti. Singh i Siddhartha [48] proveli su ispitivanje iskoristivosti PBT, PBT-GF 15 i PBT-GF 30 zupčanika proizvedenih injekcijskim prešanjem. U ovom radu su ispitani staklenim vlaknima ojačani PBT zupčanici s homogenom te funkcionalno stupnjevanom (engl. Functionally Graded Material – FGM) raspodjelom vlakana po presjeku zupčanika (Slika 1.16). Staklena vlakna kod FGM zupčanika imaju veći udio u području zuba zupčanika u odnosu na osnovni PBT materijal, dok im udio opada prema središtu zupčanika. Time je ostvarena veća čvrstoća, tvrdoća, krutost i bolja toplinska vodljivost u području zuba zupčanika gdje je opterećenje i zagrijavanje najveće. Povećanjem udjela staklenih vlakana u osnovnom materijalu porasla je iskoristivost te je najveći stupanj iskoristivosti ostvaren kod PBT-GF 30 zupčanika s funkcionalno stupnjevanom (FGM) raspodjelom vlakana.



Slika 1.16 Shematski prikaz PBT-GF 15 (a) homogenog i (b) FGM zupčanika [48]

U odnosu na metalne zupčanike, polimerne zupčanike karakteriziraju izvrsna prigušna svojstva zbog čega se primjenjuju na mjestima gdje postoji zahtjev za niskom razinom buke (medicinska oprema). Senthilvelan i Gnanamoorthy [49, 50] proveli su istraživanje utjecaja trošenja boka zuba PA 6 zupčanika na promjene u vibracijama i razini buke. Za mjerenje vibracija korišten je piezoelektrični akcelerometar, a uočeno je da se prve veće vibracije pojavljuju već na početku, u fazi uhodavanja zupčanika. Porast vibracija i razine buke slijedi i nakon povećanog trošenja površine boka zuba kada zbog povećanja zračnosti između spregnutih zubi dolazi do nekontinuiranog prijenosa snage te povećanog udarnog opterećenja. Također, istražena su prigušna svojstva PA 66 zupčanika, kao i utjecaj dodatka staklenih (PA 66-GF 20) i ugljičnih (PA 66-CF 20) vlakana na prigušenje materijala. Dinamičko-mehaničkom analizom primijenjenoj na polimerne zupčanike uočeno je povećanje modula elastičnosti i smanjenje

prigušenja kod PA 66-GF 20 i PA 66-CF 20 zupčanika. Kao mjera prigušenja materijala koristi se faktor prigušenja*. Faktor prigušenja ovisan je o temperaturi, a najveće vrijednosti ostvaruje u blizini temperature staklastog prijelaza T_g . Dodavanjem ugljičnih ili staklenih vlakana PA 66 zupčaniku povećava se njegova krutost, a istovremeno se smanjuje viskoelastična značajka poliamida, pa su očekivano najslabija prigušna svojstva i najveća razina buke za vrijeme rada izmjereni kod PA 66-CF 20 zupčanika. Slika 1.17 prikazuje promjenu faktora prigušenja materijala s povećanjem temperature kao i izmjerenu razinu buke PA 66, PA 66-GF 20 i PA 66-CF 20 zupčanika za vrijeme trajanja eksperimenta.



Slika 1.17 (a) Faktor prigušenja i (b) promjena razine buke zupčanika [49]

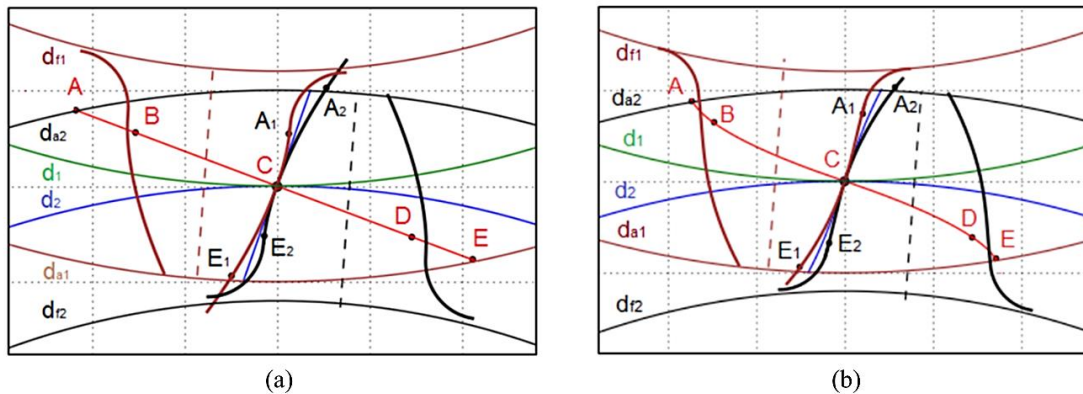
Dearn i Walton [51] proveli su eksperimentalno istraživanje promjene razine buke sprežanjem raznih polimernih zupčanika. Ispitivani zupčanici su postavljeni u zasebnu zvučno izoliranu kutiju obloženu pjenom, kako bi se minimizirao utjecaj buke koju stvaraju pokretni dijelovi eksperimentalnog postolja. Međusobno spregnuti POM zupčanici generiraju najviše buke, dok se sprežanjem POM s PA 66 zupčanicom razina buke snižava. Kombinacija međusobno spregnutih PA 66 zupčanika povoljna je s gledišta generirane buke, a dodatkom PTFE i drugih sredstava za podmazivanje koji sprječavaju direktan kontakt, razina buke se dodatno snižava. Pregledom literature povezane s razinom buke [49-51], proizlazi zaključak da se povećanjem opterećenja, brzine vrtnje i krutosti materijala degradiraju prigušna svojstva, a promjena razine buke i vibracija za vrijeme rada mogu ukazivati na trošenje ili oštećenje zupčanika.

1.2.6. Modifikacija geometrije ozubljenja

Modifikacijom geometrije polimernih zupčanika moguće je utjecati na radne značajke i vijek trajanja zupčanog para. Istraživanje koje su predstavili Zorko i dr. [52], a koje su kasnije proširili Hlebanja i Kulovec [53], usmjereno je na utjecaj promjene geometrije profila boka zuba na zagrijavanje zupčanika. Promjenom geometrije profila boka zuba na način da zahvatna

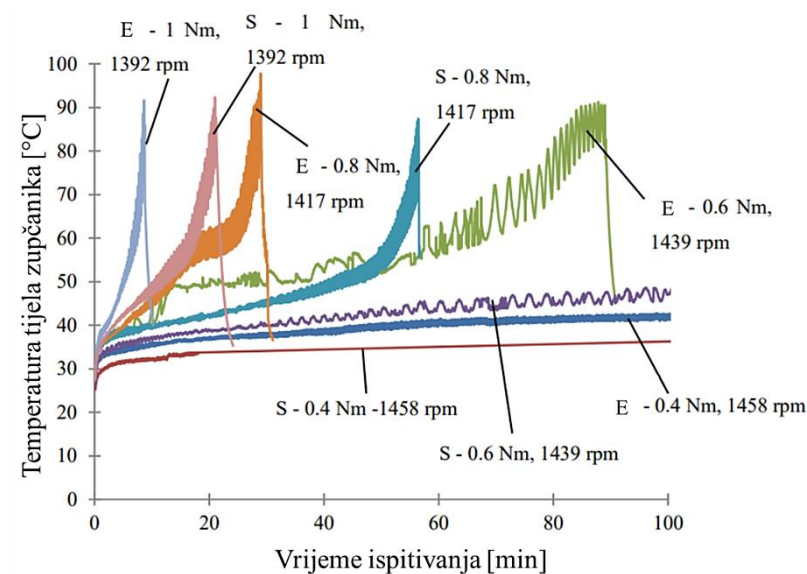
* Faktor prigušenja je mjera sposobnosti materijala da apsorbira vibracije i energiju udara pretvorbom u toplinu.

linija ima oblika slova „S“, a ne da je pravac kao što je to kod zupčanika s evolventnim ozubljenjem, predstavljeni su zupčanici sa S ozubljenjem odnosno S-zupčanici (Slika 1.18).



Slika 1.18 Zahvatna linija (od točke A do E) (a) evolventnog zupčanika i (b) S-zupčanika [52]

Kod S-zupčanika početak i kraj zahvata karakterizira konveksno-konkavni dodir, dok je kod evolventnih zupčanika dodir konveksno-konveksan. Konveksno-konkavni dodir rezultira manjim klizanjem bokova zubi i manjim Hertzovim kontaktnim naprezanjima. Zbog toga se generira manje topline pa je i zagrijavanje manje (Slika 1.19). Srednja snaga koja se potroši uslijed trenja je oko 23 % manja kod S-zupčanika u odnosu na evolventne, a par S-zupčanika preživio je oko 2,5 puta veći broj ciklusa u odnosu na evolvente zupčanike, pri istim uvjetima ispitivanja. Međutim, S-zupčanici su osjetljivi na promjene u osnom razmaku te zahtijevaju veliku točnost izrade koju nije uvijek jednostavno ostvariti s polimernim zupčanicima. Također, određivanje temperature zupčanika prema VDI 2736-2 [10] nije primjenjivo na S-zupčanike.



Slika 1.19 Zagrijavanje S-zupčanika (S) i evolventnog zupčanika (E) pri različitim opterećenjima [52]

Duzcukoglu [54] je proveo istraživanje zupčanicima PA 66-GF 30 ojačanim staklenim vlaknima, kojima je modificirana širina boka zuba u području jednostrukog zahvata (Slika 1.20). Dvostrukim povećanjem širine boka zuba u području jednostrukog zahvata smanjila su se Hertzova kontaktna naprezanja PA 66-GF 30 zupčanika uz zanemarivo povećanje mase proizvoda. Eksperimentalnim ispitivanjem izmjerena je , ovisno o opterećenju, između 15 °C i 20 °C niža temperatura tijela zupčanika s modificiranom geometrijom u odnosu na standardni nemodificirani zupčanik.



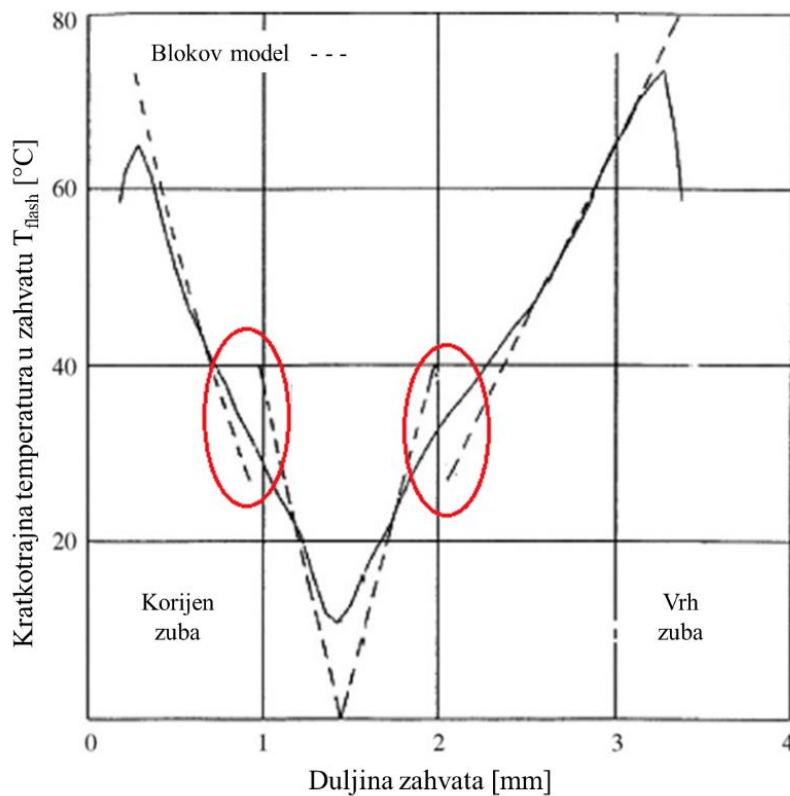
Slika 1.20 Zupčanik s modificiranom širinom boka zuba [54]

Senthilvelan i Gnanamoorthy [55] istražili su kako promjena polumjera zaobljenja prijelazne krivulje u korijenu zuba utječe na nosivost i zagrijavanje PA 66 zupčanika. Povećanjem polumjera zaobljenja prijelazne krivulje u korijenu zuba smanjuje se koncentracija naprezanja što vodi prema ravnomjernijoj raspodjeli naprezanja i usporavanju nastajanja inicijalne pukotine u korijenu zuba zupčanika. Također, PA 66 zupčanicima s većim polumjerom zaobljenja prijelazne krivulje se manje i zagrijavaju jer je veća površina preko koje se toplina konvekcijom može predati okolini.

1.2.7. Zagrijavanje polimernih zupčanika i hibridni zupčanicima

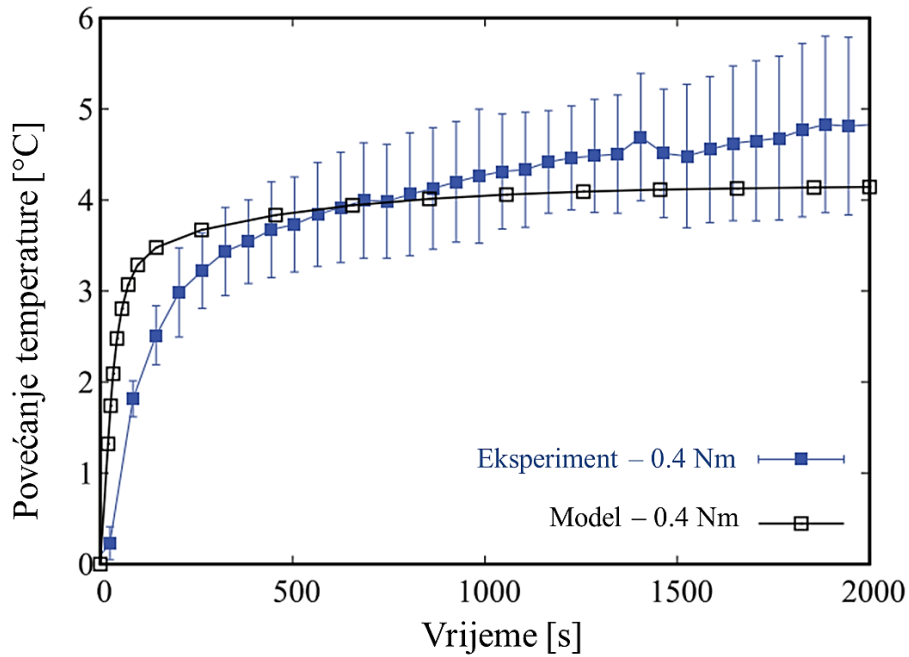
Zagrijavanje polimernih zupčanika, o čemu je već bilo govora u ranijim poglavljima, predstavlja najveće ograničenje po pitanju njihove primjene zbog čega je velik broj znanstveno-istraživačkih radova upravo usmjeren na određivanje analitičkih modela koji bi omogućili određivanje temperature koja se razvije za vrijeme rada zupčanika. Glavni razlozi zbog kojih dolazi do zagrijavanja polimernih zupčanika su trenje između bokova zubi, nemogućnost

dovoljne izmjene topline s okolinom, loša toplinska vodljivost te dodatna toplina koja se razvija u ležajevima, a koja se zatim preko vratila prenosi na zupčanike [43]. Maksimalna temperatura se očekivano razvija na aktivnom boku zuba zupčanika preko kojeg se prenosi okretni moment i gibanje. Maksimalna temperatura površine boka zuba može se rastaviti na kratkotrajnu trenutnu temperaturu u zahvatu T_{flash} koja karakterizira toplinu koja nastaje zbog trenja između bokova spregnutih zupčanika, temperaturu tijela zupčanika T_{bulk} i temperaturu okoline T_{amb} . Temperatura tijela zupčanika T_{bulk} određuje se na mjestu dovoljno udaljenom od površine boka zuba kako bi se izbjegao utjecaj trenutne temperature T_{flash} , pa se najčešće mjeri u korijenu zuba zupčanika. Blok [56] je predložio analitički model za određivanje maksimalne temperature koja nastaje uslijed relativnog gibanja dviju površina. Na kontaktnoj površini dolazi do lokalnog povećanja temperature, a korištene su pretpostavke da je izvor topline koji nastaje zbog trenja između dodirnih površina vremenski nepromjenjiv (stacionaran) i neprekidan. Za razliku od Blokovog modela, Mao [57] je predstavio numerički model za određivanje trenutne temperature u zahvatu T_{flash} uz pretpostavku da je izvor topline vremenski promjenjiv (nestacionaran). Slika 1.21 prikazuje usporedbu Blokovog [56] i Maovog [57] modela gdje je uočena razlika u rezultatima na početku i kraju zahvata uz odstupanje od oko 20 %, kao i odstupanje kod prijelaza iz dvostrukog u jednostruki zahvat zupčanika (označeno crvenom bojom).



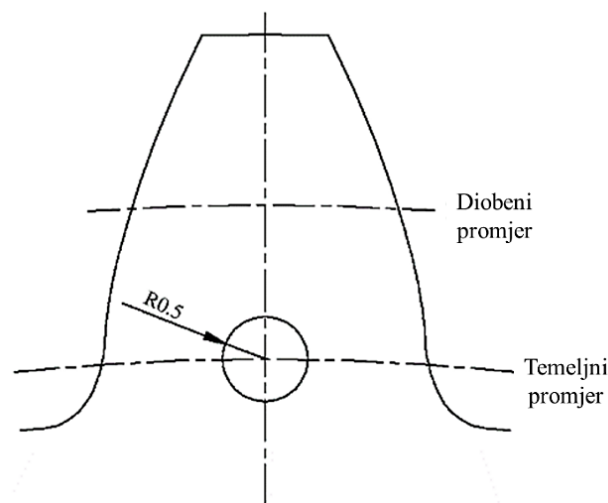
Slika 1.21 Usporedba numeričkog i analitičkog modela [57]

Proizlazi zaključak da se Blok model može koristiti za izračun srednje trenutne temperature u zahvatu T_{flash} , ali za precizno određivanje preporuča se ipak koristiti predloženu numeričku metodu. Kako viskoelastičnost polimera nije uzeta u obzir u numeričkom modelu, isti je prikladan za polimere koji nemaju izražene relaksacijske procese (POM), što ne vrijedi i za poliamide. Mao [58] je proširio istraživanje na POM zupčanicima i predstavio analitički izraz za određivanje trenutne temperature u zahvatu T_{flash} , a rezultate je usporedio s numeričkim i eksperimentalnim rezultatima. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja i numeričke analize pokazuju zadovoljavajuće slaganje s rezultatima predloženog modela za različite geometrije zupčanika i temperature okoline. Međutim, kada se eksperimentalni rezultati usporede sa smjernicama za proračun temperature POM zupčanika prema BS 6168 [59] uočava se velik nesrazmjer. Također, u radu je eksperimentalno potvrđeno da se povećanjem temperature okoline T_{amb} smanjuje nosivost i radni vijek POM zupčanika. Približavanjem temperature okoline temperaturi taljenja POM materijala (oko 175 °C), okretni moment koji se može prenijeti postaje jednak nuli. Fernandes i dr. [60] koristili su numeričku simulaciju i metodu konačnih elemenata za predviđanje temperature tijela T_{bulk} i trenutne temperature u zahvatu T_{flash} POM zupčanika, za slučaj s i bez sredstva za podmazivanje. Simulacija je izvršena uz pretpostavke: deformacije boka zuba isključivo su elastične, materijal je izotropan, brzine klizanja su u smjeru vrtnje zupčanika, u uvjetima podmazivanja zanemaruju se trenje i kompresibilnost fluida. Najveća pogreška između analize metodom konačnih elemenata i eksperimentalnih rezultata drugih istraživanja [57, 58] iznosi oko 6,5 %. Maksimalna temperatura zupčanika iz rezultata dobivenih numeričkom analizom u ovom radu iznosi 187 °C, dok prema Mao [58] ona iznosi 175 °C. Černe i dr. [61, 62] predstavili su termo-mehanički model za predviđanje temperature tijela T_{bulk} POM i PA 66 zupčanika, a kojeg su verificirali mjerenjem temperature pomoću infracrvene termalne kamere. Temperatura je mjerena u korijenu zuba zupčanika radi izbjegavanja utjecaja trenutne temperature u zahvatu T_{flash} . Model je linearno elastičan, a najslabija točka mu je pretpostavka da mehanička svojstva polimera ne ovise o promjeni temperature. U usporedbi s eksperimentalnim rezultatima, model daje zadovoljavajuće rezultate za niska i srednja opterećenja, te kraće vrijeme ispitivanja (Slika 1.22). Međutim, pri većim opterećenjima i dužem mjerenju, kada dolazi do velikih deformacija zuba zupčanika koje vode prema nepravilnom zahvatu i porastu kontaktnih naprezanja, rezultati modela nisu prihvatljivi. Razlika je posebno naglašena kod PA 66 zupčanika s izraženim viskoelastičnim svojstvima. Bolji rezultati ostvareni su kod POM zupčanika. Može se zaključiti da su osnovni nedostaci navedenih analitičkih i numeričkih modela brojna ograničenja i pretpostavke koje rezultiraju netočnim predviđanjima temperature.



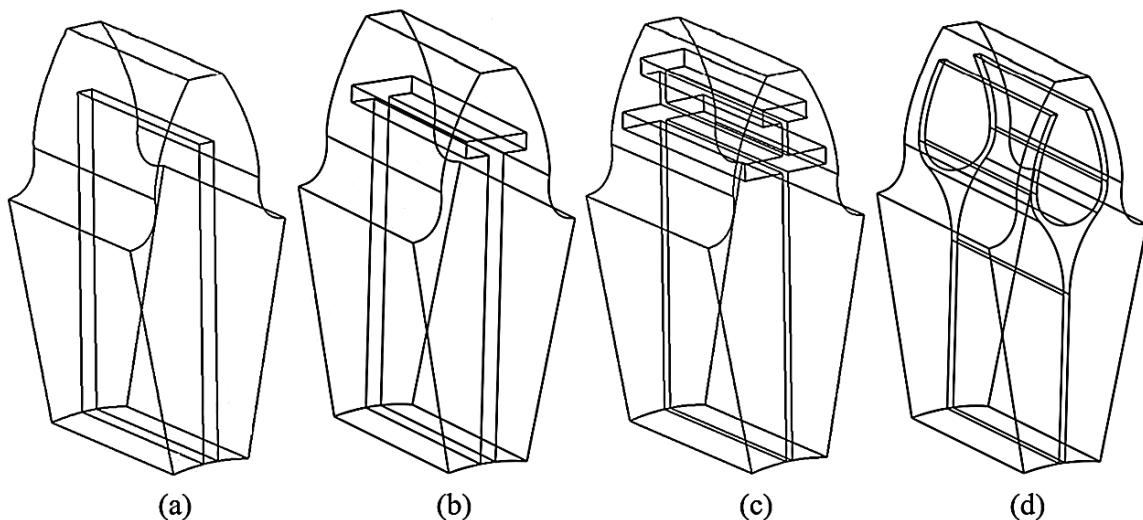
Slika 1.22 Rezultati termo-mehaničkog modela i eksperimentalni rezultati promjene temperature tijela zupčanika T_{bulk} pri srednjim opterećenjima [62]

Kako bi se unaprijedilo provođenje topline kod polimernih zupčanika, predstavljena je i ispitana mogućnost povezivanja osnovne polimerne matrice s metalima s većim koeficijentom toplinske vodljivosti. Hibridna tehnologija polimera i metala kombinira prednosti oba materijala i poboljšava toplinska svojstva zupčanika koja utječu i na njihove radne značajke. Kim i dr. [63] predstavili su konstrukcijsko rješenje gdje su se umetanjem čeličnog zatika u tijelo polimernog zupčanika (Slika 1.23) poboljšale njegove radne značajke. Ispitivanje je provedeno na PA 6 i POM zupčanicima koji su spregnuti s metalnim zupčanicom.



Slika 1.23 Polimerni zupčanik s provrtom u korijenu zuba [63]

Umetanje čeličnog zatika u osnovni PA 6 zupčanik, ovisno o opterećenju, rezultiralo je od 3 °C do 10 °C nižom temperaturom i oko 30 % manjim trošenjem boka zuba, a ostvaren je i oko 4 puta dulji radni vijek. Umetanje čeličnog zatika veće toplinske vodljivosti pospješilo je odvođenje generirane topline te pozitivno utjecalo na cjelokupni rad PA 6 zupčanika. Suprotno PA 6 zupčaniku, dodatkom čeličnog zatika POM zupčaniku povećala se krutost zuba zupčanika, čime je onemogućena deformacija zuba pod opterećenjem pa se trošenje povećalo. Fernandes i drugi [64] predstavili su koncepte hibridnih zupčanika, a prema postojećem numeričkom modelu [60] na istima je provedena analiza metodom konačnih elemenata. Hibridni zupčanici sastavljeni su od POM polimerne matrice te umetaka raznih oblika izrađenih od različitih metala. Dodatkom čeličnih, aluminijskih ili bakrenih umetaka (Slika 1.24) osnovnoj polimernoj matrici slabe toplinske vodljivosti, povećano je odvođenje topline provođenjem (kondukcijom), s ciljem smanjenja temperature tijela zupčanika. Najveća temperatura razvija se na aktivnom boku zuba, a ideja je provođenje generirane topline prema tijelu zupčanika i vratilu. Implementacija metalnog umetka predstavlja izazov s tehnološkog gledišta, ali u ovom radu provedena je samo analiza metodom konačnih elemenata, bez eksperimentalnog ispitivanja. Najbolji rezultati ostvareni su ugradnjom bakrenog umetka, ali uzevši u obzir masu, cijenu i tehnološku izradu umetaka, aluminij predstavlja najbolji izbor.



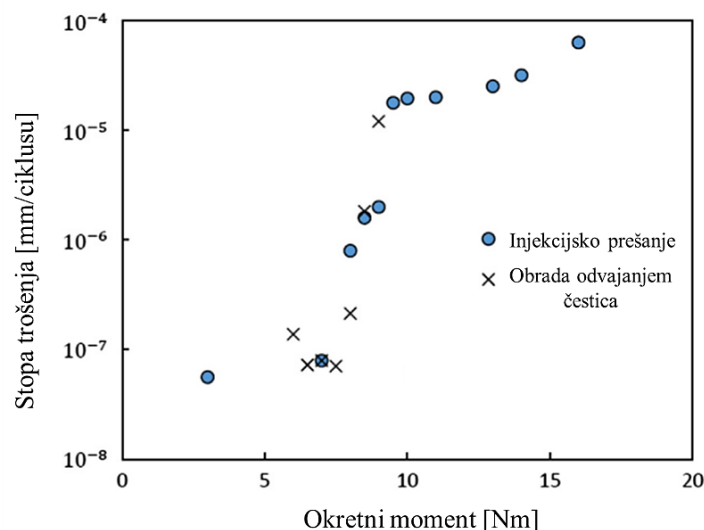
Slika 1.24 Različiti oblici metalnih umetaka s pripadajućom geometrijom: (a) traka, (b) T profil, (c) dvostruki T profil i (d) evolventni profil [64]

Nedostatak hibridnih zupčanika je povećanje koncentracije naprezanja zbog razlika u toplinskom rastezanju između metalnog umetka i polimerne matrice. Najveća koncentracija naprezanja javlja se u području gdje metalni umetak i polimer u neposrednom dodiru, i to na mjestima oštih prijelaza. Hooton i dr. [65] su proveli eksperimentalnu i numeričku analizu na

zubnoj letvi te su istražili kako dodatak aluminijskog i stvrdnutog epoksidnog umetka utječu na zagrijavanje hibridnih zupčanika. Hrapavost površine i veličina preklopa utječu na odvođenje topline provođenjem, a zaključeno je da bi optimalni materijal umetka bio materijal visoke toplinske vodljivosti poput metala, ali s ostalim toplinskim i mehaničkim svojstvima što sličnijim osnovnoj polimernoj matrici. Uvođenje hibridnih zupčanika predstavlja značajan napredak primarno u pogledu zagrijavanja, ali i otpornosti trošenju te sveukupnom vijeku trajanja zupčanika. Međutim, složeniji dizajn polimerne matrice i umetka (Slika 1.24 (b)-(d)) može značajno povećati troškove, posebno kada se radi o pojedinačnoj proizvodnji s konvencionalnim metodama izrade zupčanika.

1.2.8. Aditivna proizvodnja polimernih zupčanika

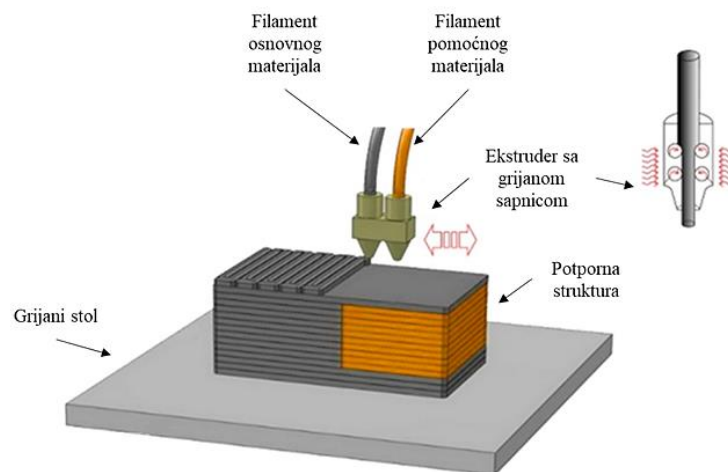
Kao što je već u uvodno/motivacijskom poglavlju navedeno, polimerni zupčanici uglavnom se izrađuju procesima injekcijskog prešanja, obradom odvajanjem čestica ili aditivnom tehnologijom. Injekcijskim prešanjem izrađuju se proizvodi visoke kvalitete i posebno je isplativo za masovnu proizvodnju. Obradom odvajanjem čestica proizvedeni polimerni zupčanici koriste za male serije i pojedinačnu proizvodnju, a izrađuju se konvencionalnim alatima kao i metalni zupčanici. Mao i dr. [66] i Alharbi [67] eksperimentalno su istražili kako način proizvodnje POM i PA 66 polimernih zupčanika utječe na njihovo trošenje, a trošenje je izraženo stopom trošenja*. Slika 1.25 prikazuje stopu trošenja POM zupčanika proizvedenih obradom odvajanjem čestica i postupkom injekcijskog prešanja, pri različitim opterećenjima.



Slika 1.25 Stopa trošenja POM zupčanika proizvedenih različitim tehnologijama [71]

* Stopa trošenja predstavlja linearno trošenje boka zuba tijekom jednog radnog ciklusa opterećenja.

Uočeno je da ne postoji gotovo nikakva razlika u trošenju POM i PA 66 zupčanika proizvedenih postupcima injekcijskog prešanja i obradom odvajanjem čestica [66, 67]. U odnosu na navedene postupke aditivna tehnologija ima određene prednosti. Iako se prvobitno primjenjivala samo za izradu prototipova, aditivna proizvodnja danas predstavlja kvalitetno rješenje za brzu, jednostavnu, jeftinu i učinkovitu proizvodnju, posebno kada su u pitanju pojedinačni proizvodi složene geometrije. Izradom zupčanika obradom odvajanjem čestica, poput odvalnog glodanja ili odvalnog blanjanja, nastaje značajna količina otpadnog materijala, a injekcijsko prešanje iziskuje veliku početnu investiciju za kalupe i postrojenje, što nije slučaj kod aditivne proizvodnje. S obzirom na primijenjenu tehnologiju, jedan od najzastupljenijih postupaka aditivne proizvodnje je taložno srašćivanje ili odlaganje taline (engl. Fused Deposition Modeling – FDM). Postupak se zasniva na taljenju polimernog filameta u obliku žice koji prolazi kroz zagrijanu sapnicu stroja za aditivnu proizvodnju (Slika 1.26). Slojevi se nanose horizontalno te se hlade i otvrdnjavaju na sobnoj temperaturi. U situacijama kada postoje dijelovi koji nisu oslonjeni (prevjesi) potrebno je izraditi potporna struktura kako bi se ostvarila veća kvaliteta konačnog proizvoda.

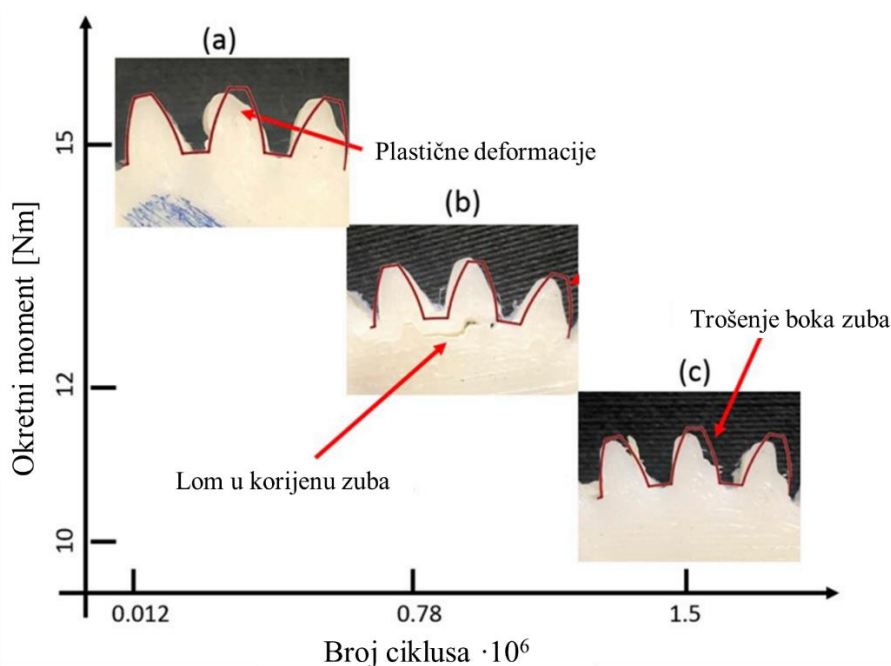


Slika 1.26 Postupak taložnog srašćivanja (FDM) [68]

Calignano i dr. [68] istražili su mehanička svojstva ugljičnim vlaknima ojačanih poliamidnih (PA 612-CF 20) uzoraka proizvedenih FDM tehnologijom, kao i utjecaj smjera nanošenja slojeva i stupnja ispune uzorka na iste. Eksperimentalnim ispitivanjem je potvrđeno da je poželjno da smjer nanošenja slojeva bude prilagođen smjeru djelovanja opterećenja jer se time ostvaruju bolja mehanička svojstva gotovog proizvoda. Povećanje stupnja ispune uzorka utječe na rast čvrstoće, a sama promjena nije linearna kako bi se moglo očekivati. Nanošenjem većeg broja slojeva javlja se veći broj potencijalnih pogrešaka u materijalu. Zbog hlađenja i skupljanja

javljaju se i zaostala naprezanja u materijalu, koja su veća tim više što je stupanj ispune veći. Ciobanu i dr. [69] proveli su istraživanje na zupčanicima proizvedenim dvjema različitim tehnologijama aditivne proizvodnje. Zupčanci od akrilonitril butadien stirena (ABS), poliamida (PA) i polilaktida (PLA) proizvedeni su FDM postupkom, a fotopolimer je korišten kao materijal za izradu postupkom stereolitografije (SLA). SLA postupak se zasniva na fotopolimerizaciji i skrućivanju tekućeg polimera pod ultraljubičastim svjetlom. Eksperimentalnim ispitivanjem utvrđena je značajno veća nosivost i otpornost trošenju FDM polimernih zupčanika u odnosu na fotopolimerne zupčanike proizvedene SLA postupkom aditivne proizvodnje. Za izradu zupčanika FDM tehnologijom najčešće se upotrebljavaju polimeri kao ABS, PA, PEEK ili PLA te je na njima proveden najveći broj istraživanja. Dimić i dr. [70] proveli su istraživanje na ABS i PLA zupčanicima proizvedenim FDM postupkom aditivne tehnologije uz stupanj ispune koji iznosi 95 %. Eksperimentalno ispitivanje provedeno je pri konstantnom okretnom momentu od 20 Nm uz stupnjevito promjenjivu brzinu vrtnje od 200 min⁻¹ do 1400 min⁻¹, s korakom od 200 min⁻¹ svakih 10 minuta. ABS zupčanci preživjeli su 30 minuta nakon čega je uslijedio otkaz zupčanika, a PLA zupčanci preživjeli su cijelo ispitivanje. Također, Tunalioglu i dr. [71] su slične rezultate ostvarili u svom eksperimentalnom istraživanju. Zupčanci proizvedeni sa stupnjem ispune od 100 % i ispitivani su do otkaza, a FDM tehnologijom proizvedeni PLA zupčanci ostvarili su 12 % duži radni vijek u odnosu na ABS zupčanike. Pisula, J. i dr. [72] istražili su kako hrapavost površine boka zuba utječe na trošenje zupčanika od ABS, PEEK i polieter imida (PEI), pri čemu su svi proizvedeni FDM postupkom aditivne tehnologije. Hrapavost površine boka zuba snimljena je prije i nakon ispitivanja pomoću optičkog profilometra. Trošenje zupčanika određeno je mjerenjem debljine zuba zupčanika prije i nakon ispitivanja pomoću pomičnog mjerila s tanjurastim ticalima, a debljina zuba određuje se posredno pomoću mjere preko zubi. Hrapavost površine boka zuba utječe na trošenje zupčanika što ukazuje na važnost debljine sloja koji se nanosi, a koji definira kvalitetu izrade zupčanika. Izmjerena hrapavost površine boka zuba nakon ispitivanja smanjila se zbog uglaćavanja površine boka zuba. Svi ispitivani zupčanci iskazali su zadovoljavajuću otpornost trošenju i preživjeli cijelo ispitivanje, a najmanje trošenje je izmjereno kod PEEK zupčanika. Kuo i dr. [73] usporedili su nosivost PLA zupčanika s ojačanim PLA zupčanicima s 10 % udjela staklenih (PLA-GF 10) ili ugljičnih vlakana (PLA-CF 10). Kao i kod injekcijski prešanih i obradom odvajanjem čestica proizvedenih zupčanika, dodatkom vlakana osnovnom polimeru, u ovom slučaju PLA, povećava se nosivost zupčanika. Harsha i dr. [74] eksperimentalno su ispitali trošenje ABS, PLA i PA zupčanika proizvedenih FDM procesom te je uočeno da ABS ima najmanju, a PA najveću otpornost prema trošenju boka zuba. Kod svih

ispitanih zupčanika primijećeno je povećanje stope trošenja s povećanjem brzine vrtnje, a kada se sve uzme u obzir najbolje rezultate ostvarili su PA zupčanici. Zhang i dr. [75] proveli su istraživanje na PA 618 zupčanicima proizvedenim FDM procesom aditivne proizvodnje uz stupanj ispune zupčanika od 60 %. Rezultati ispitivanja trošenja i oštećenja koja se javljaju kod PA 618 zupčanika uspoređeni su s rezultatima PA 66 zupčanika proizvedenih injekcijskim prešanjem. Uočeno je manje trošenje i dulji radni vijek PA 618 zupčanika pri nižim i srednjim opterećenjima. Međutim, pri većim opterećenjima PA 66 zupčanik pokazao se kao bolji. Trošenje i tipovi otkaza PA 618 ispitivanih zupčanika odgovaraju tipovima otkaza koji se javljaju i kod konvencionalnim postupcima proizvedenih zupčanika. Pri nižim opterećenjima javlja se trošenje boka zuba, za srednja opterećenja karakterističan je otkaz zupčanika uslijed loma u korijenu zuba, dok se pri većim opterećenjima javljaju plastične deformacije zuba (Slika 1.27). Iako je zastupljeno uobičajeno mišljenje da aditivnim tehnologijama proizvedeni polimerni zupčanici nisu u mogućnosti ostvariti radne značajke koje ostvaruju drugim tehnologijama proizvedeni zupčanici, ovaj rad upravo ukazuje da u određenim slučajevima postoji mogućnost. Konkretno u ovom slučaju, to vrijedi za PA 618 zupčanike, pri niskim i srednjim opterećenjima te brzini vrtnje od 1000 min^{-1} .



Slika 1.27 Tipovi otkaza PA 618 zupčanika ovisno o opterećenju [75]

Primjena svakog od navedenih materijala u aditivnoj proizvodnji određena je parametrima aditivne proizvodnje koji utječu na kvalitetu izratka kao i njegova mehanička svojstva. Parametri FDM postupka poput već spomenutog stupnja ispune, brzine proizvodnje,

temperature sapnice ili temperature radnog stola mogu značajno utjecati na čvrstoću i radni vijek zupčanika. Većim stupnjem ispune povećava se masa zupčanika, ali rastu čvrstoća i udarna žilavost. Zhang i dr. [76] odredili su utjecaj svakog od parametara na ukupan proces izrade PA 618 zupčanika. U svrhu smanjenja vremena izrade i uštede materijala provedena je optimizacija procesa iz koje je proizašlo rješenje pri kojem je čvrstoća zupčanika najveća, uz najmanju moguću masu i najkraće vrijeme izrade. PA 618 zupčani par izrađen prema optimiziranim parametrima eksperimentalno je ispitan te je potvrđena 3 puta veća otpornost na trošenje u odnosu na zupčani par izrađen prema parametrima predloženim od strane proizvođača. Naposljetku je utvrđen utjecaj svakog od parametara na ukupan proces izrade zupčanika. Najveća je ovisnost procesa o stupnju ispune (45,3 %), zatim brzini proizvodnje (23,9 %) i temperaturi proizvodnje (22,2 %). Najmanji značaj ima temperatura radnog stola (8,6 %) koja utječe samo na nekoliko prvih slojeva za vrijeme procesa proizvodnje. Optimizacijom navedenih parametara moguće je skratiti vrijeme izrade i potrošnju materijala za izradu zupčanika, a da se pri tom ne ugrozi njihova nosivost. Također, potrebno je voditi računa o smjeru nanošenja slojeva, vrsti ispune i smjeru djelovanja opterećenja.

1.3. Zaključak pregleda dosadašnjih istraživanja

Polimerni zupčanci se mogu sprežati s metalnim zupčanicima, a takvo sprežanje je povoljno zbog bolje toplinske vodljivosti metala u odnosu na polimere što može pozitivno utjecati na radni vijek polimernih zupčanika. Površinska hrapavost boka zuba metalnih zupčanika utječe na trošenje i zagrijavanje polimernih zupčanika, ali se može ublažiti podmazivanjem. Neki polimeri su skloni upijanju vlage što može dovesti do bubrenja i dimenzijske nestabilnosti zbog čega se smanjuje nosivost polimernih zupčanika. Nosivost ili opteretivost polimernih zupčanika primarno je ovisna o opterećenju odnosno okretnom momentu, ali i brzini vrtnje što je posebno izraženo pri većim opterećenjima.

Veću nosivost polimernih zupčanika moguće je ostvariti dodatkom ugljičnih ili staklenih vlakana osnovnom polimernom materijalu. Dodatkom vlakana veće toplinske vodljivosti moguće je usporiti zagrijavanje polimernih zupčanika, uz istovremeno povećanje čvrstoće i udarne žilavosti. Trošenje polimernih zupčanika ojačanih vlaknima je uglavnom manje u odnosu na neojačane zupčanike, ali otkidanje vlakana i zaglavljivanje u zahvatu može negativno utjecati na trošenje. Osim dodatka vlakana, korištenjem aditiva i/ili sredstava za podmazivanje na bazi PTFE, grafita ili MoS₂, moguće je poboljšati radne značajke polimernih zupčanika. Iako je za očekivati da se nanošenjem višeslojnih premaza s niskim koeficijentom trenja na polimerni zupčanik povećaje otpornost trošenju, istraživanjima je potvrđeno suprotno.

Velik broj znanstvenih istraživanja orijentiran je na vrste trošenja i tipove otkaza polimernih zupčanika. Neki tipovi otkaza i trošenja poput taljenja ili plastičnog deformiranja zuba karakteristični su isključivo za polimerne zupčanike, a trošenje i oštećenja većinom su povezana sa zagrijavanjem zupčanika. Trošenje i tip otkaza ovise o vrsti korištenog polimernog materijala i njegovim mehaničkim svojstvima, a na trošenje može utjecati čak i mikrostruktura polimera. Trošenje boka zuba zupčanika razlikuje se u području ispod i iznad kinematske kružnice zbog različitih smjerova kotrljanja i klizanja bokova zubi. Kod sprezanja zupčanika izrađenih od različitih polimernih materijala važno je voditi i računa o tome koji je zupčanik pogonski, a koji gonjeni. Geometrijska odstupanja i netočnosti prilikom ugradnje polimernih zupčanika negativno utječu na njihovo trošenje i radni vijek, a analiza odvojenih čestica nastalih uslijed trošenja može se iskoristiti za detekciju odstupanja i pogrešaka prilikom izrade ili u montaži.

Pogreške u montaži ili prilikom izrade polimernih zupčanika, koje posljedično smanjuju potrebnu zračnost između zubi u zahvatu, ubrzavaju njihovo trošenje. Osim ubrzanog trošenja, na taj način se smanjuje i stupanj iskoristivosti. Iskoristivost zupčanog para ovisna je o opterećenju i brzini vrtnje, a može se povećati dodatkom vlakana osnovnom polimeru ili korištenjem sredstva za podmazivanje. Iako polimerne zupčanike karakteriziraju izvrsna prigušna svojstva, ona se degradiraju povećanjem opterećenja, brzine vrtnje ili krutosti materijala. Promjena razine buke i vibracija za vrijeme rada, slično kao i oblik odvojene čestice, može ukazivati na trošenje ili oštećenje zupčanika.

Veća otpornost trošenju i nosivost (opteretivost) polimernih zupčanika može se ostvariti modifikacijom geometrije ozubljenja zupčanika ili odgovarajućim konstrukcijskim zahvatima. Također, navedene prilagodbe se mogu iskoristiti i za smanjenje zagrijavanja polimernih zupčanika. Određivanje maksimalne radne temperature polimernih zupčanika ključno je za njihovu primjenu jer o njoj ovise mehanička i tribološka svojstva polimera. Iako su za određivanje analitičkih i numeričkih modela za predviđanje temperature uloženi veliki naponi, utvrđeno je da brojna ograničenja i pretpostavke koje se koriste u modelima rezultiraju uglavnom netočnim predviđanjima temperature. Primjenom hibridne tehnologije polimera i metala, koja obuhvaća prednosti oba materijala, moguće je poboljšati radne značajke u odnosu na polimerne zupčanike. Hibridni zupčanici predstavljaju iskorak u pogledu radnih značajki, ali zbog zahtjevnijeg postupka proizvodnje složenije polimerne matrice moguće je povećanje troškova. Također, mjesta neposrednog dodira polimerne matrice i umetka predstavljaju dodatne koncentratore naprezanja.

Iako se injekcijskim prešanjem i obradom odvajanjem čestica proizvode polimerni zupčanci visoke kvalitete, u novije vrijeme za njima ne zaostaju ni aditivne tehnologije. Bržom i jeftinijom aditivnom proizvodnjom mogu se izraditi polimerni zupčanci čija su svojstva jednaka ili bolja od onih proizvedenih injekcijskim prešanjem ili obradom odvajanjem čestica. Kvaliteta i mehanička svojstva polimernih zupčanika proizvedenih aditivnom tehnologijom, najčešće FDM postupkom, dominantno ovise o stupnju ispune, smjeru nanošenja slojeva i brzini proizvodnje, tj. brzini odlaganja taline.

Pregledom znanstveno-istraživačkih radova i druge stručne literature proizlazi zaključak da su polimerni zupčanci, a posebno hibridni zupčanci, još uvijek nedovoljno istraženi, te da i jedni i drugi posjeduju velik potencijal za dodatna istraživanja. Široka paleta različitih polimernih materijala koji se koriste za izradu zupčanih prijenosnika te nedostatak iskustvenih parametara i standarda, predstavljaju velik izazov za njihovo pouzdano konstruiranje. Za konstruiranje polimernih zupčanika trenutno je moguće koristiti uputstva koja pokrivaju svega nekoliko polimernih materijala, uglavnom POM, PA 6 i PA 66, dok za hibridne zupčanike ne postoji niti uputstvo. Iako korištenje uputstava ili numeričkih i analitičkih modela može dati približne rezultate zagrijavanja i trošenja polimernih zupčanika, za precizne rezultate neophodno je provođenje eksperimentalnih ispitivanja na stvarnim zupčanicima, u uvjetima što sličnijim stvarnim (pogonskim). Na temelju provedenih numeričkih simulacija i analiza hibridni zupčanci ostvaruju bolje radne značajke u odnosu na polimerne. Isto je ostvareno i eksperimentalnim ispitivanjem hibridnih zupčanika s PA matricom, ali su u tom slučaju hibridni zupčanci bili spregnuti s metalnim. Zbog svega navedenog potrebno je istraživanje radnih značajki hibridnih zupčanika primjenom eksperimentalnih metoda, uz uvjet da su hibridni zupčanci međusobno spregnuti. U nastavku je dana hipoteza ove disertacije uz konkretno definirane znanstvene doprinose. Ključni pojmovi značajni za ovo istraživanje već su dijelom navedeni kroz pregled znanstveno-istraživačkih radova, a ostatak će biti postavljen u sljedećim potpoglavljima.

1.4. Hipoteza

Analizom dosadašnjih objavljenih istraživačkih radova u kojima su obrađeni polimerni i hibridni zupčanci, prikazanih u prethodnom poglavlju, uočen je prostor za znanstveni doprinos u navedenom području istraživanja. Uvođenjem hibridnih zupčanika omogućeno je poboljšanje radnih značajki u odnosu na polimerne zupčanike, prvenstveno po pitanju njihovog zagrijavanja. Potencijalna zahtjevnost konstrukcijske izvedbe matrice hibridnih zupčanika može predstavljati problem s tehnološkog gledišta, ali primjenom aditivnih tehnologija moguće

je jednostavno i brzo proizvesti složenije izvedbe zupčanika. Također, hibridni zupčanici nisu eksperimentalno ispitani već su provedene samo numeričke simulacije koje koriste termomehaničke modele pomoću kojih nije moguće u potpunosti točno opisati složeno viskoelastično ponašanje polimernih materijala. Prema navedenim saznanjima i uočenom prostoru za znanstveni doprinos slijedi hipoteza ovog doktorskog rada:

Moguće je konstruirati nove hibridne zupčanike, sastavljene od polimerne matrice proizvedene aditivnom tehnologijom i različitih metalnih umetaka, koji će pri eksperimentalnom ispitivanju imati bolje radne značajke u odnosu na polimerne zupčanike proizvedene s istom aditivnom tehnologijom i s jednakom geometrijom ozubljenja.

U kasnijim poglavljima detaljno je objašnjena predložena konstrukcijska izvedba hibridnih zupčanika kojom su poboljšane radne značajke u odnosu na dosad predstavljene izvedbe, a također i u odnosu na polimerne zupčanike. U prethodnim istraživanjima provedena je samo numerička analiza zagrijavanja hibridnih zupčanika, bez eksperimentalne potvrde odnosno validacije.

1.5. Znanstveni doprinosi disertacije

Konkretni izvorni znanstveni doprinosi koje ovaj rad sadrži, sažeto su zapisani u sljedeće tri točke:

1. Karakterizacija radnih značajki polimernih zupčanika, postojećih konstrukcijskih izvedbi hibridnih zupčanika te novih konstrukcijskih izvedbi hibridnih zupčanika primjenom eksperimentalnih metoda.
2. Razvoj i izrada novih konstrukcijskih izvedbi hibridnih zupčanika sastavljenih od polimerne matrice proizvedene aditivnom tehnologijom i različitih metalnih umetaka.
3. Analiza radnih značajki postojećih konstrukcijskih varijanti hibridnih zupčanika i usporedba s novim razvijenim konstrukcijskim izvedbama hibridnih zupčanika.

Detaljna razrada teme i dokaz postojanja ovako definiranih izvornih znanstvenih doprinosa dani su u kasnijim poglavljima disertacije.

1.6. Pregled rada

Rad je podijeljen na ukupno šest poglavlja, uključujući uvod i zaključak. U uvodnom poglavlju opisani su motivacija, svrha i ciljevi istraživanja te je prikazan detaljan pregled dosadašnjih istraživanja iz znanstvenog područja relevantnog za ovaj doktorski rad, a područje su polimerni

i hibridni zupčanici. Također, u ovom poglavlju postavljena je hipoteza uz definirane konkretne znanstvene doprinose.

U drugom poglavlju kratko i sažeto su predstavljeni polimeri i njihova osnovna podjela. Ovo poglavlje sadrži osnovna znanja o strukturi i fizičkim stanjima polimera, zatim njihovoj proizvodnji, razgradnji i uporabi, a navedeni su i najvažniji konstrukcijski polimerni materijali i pripadajuća im mehanička, tribološka i toplinska svojstva. Osnovna znanja o polimerima nužna su za razumijevanje ponašanja polimernih i hibridnih zupčanika.

U trećem poglavlju detaljno je opisana metodologija eksperimentalnog ispitivanja polimernih i hibridnih zupčanika. Opisane su sve komponente eksperimentalnog sustava za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika s mehanički otvorenim tokom snage, kao i pripadajuća mjerna oprema potrebna za određivanje radnih značajki. Također, predstavljeni su geometrija ozubljenja te konstrukcijske izvedbe polimernih i hibridnih zupčanika koji se ispituju u ovom radu, uz detaljan prikaz parametara proizvodnje zupčanika na stroju za aditivnu proizvodnju.

U četvrtom poglavlju prikazani su rezultati eksperimentalnog istraživanja radnih značajki kojima je opisano zagrijavanje, trošenje te iskoristivost polimernih i hibridnih zupčanika. Rezultati obuhvaćaju analizu i usporedbu navedenih radnih značajki polimernih zupčanika proizvedenih u dvije različite rezolucije (kvalitete) te usporedbu između polimernih i hibridnih zupčanika. Također, ovo poglavlje uključuje i validaciju predložene konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika te nove konstrukcije izvedbe s poboljšanim radnim značajkama.

U petom poglavlju prošireno je eksperimentalno istraživanje na hibridnim zupčanicima, konkretno ispitivanje nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika koja je ostvarila najveće poboljšanje radnih značajki. Na temelju plana eksperimenta provedena je statistička obrada te su dobiveni matematički modeli koji opisuju radne značajke nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika, a na istima je izvedena i optimizacija ulaznih parametara ispitivanja.

U posljednjem, šestom poglavlju dan je konačni autorov zaključak cijelog istraživanja čime su objedinjene sve nove činjenice i znanja koja su proizašla iz eksperimentalnog istraživanja polimernih i hibridnih zupčanika, posebno nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika koja je ostvarila najveće poboljšanje radnih značajki.

2. POLIMERI

Riječ polimer je nastala od dvije riječi iz grčkog jezika, riječi *poli* koja znači mnogo i riječi *meros* koja značio dio, a prvi put ju je spomenuo švedski kemičar J. J. Berzelius 1833. godine [77]. Polimeri su sustavi sastavljeni od strukturnih elemenata u obliku dugačkih lanaca molekula koji se zovu makromolekule (polimerne molekule) pa se nazivaju i makromolekulnim spojevima. Makromolekule su molekule u kojoj su atomi organizirani tako da su one sastavljene od velikog broja strukturnih ponavljanih jedinica ili mera [78]. Polimere se mogu pronaći samo u čvrstom i kapljevitom, ali ne i u plinovitom agregatnom stanju, pa se može reći da su oni kondenzirani sustavi makromolekula.

Kroz povijest su doba često nazivana prema materijalima koji su imali najveći utjecaj na razvoj društva pa se može reći da je doba čelika na izmaku, a da nastupa doba plastike. Plastika je naziv za umjetne ili poluumjetne polimerne materijale o čemu će više biti govora u nastavku ovog poglavlja. Primjena polimera datira još iz vremena prije nove ere (narod Maje), ali s proizvodnjom proizvoda izrađenih od prirodnih polimera, uglavnom gumenih, započelo se u 19. stoljeću. Krajem 19. stoljeća i početkom 20. stoljeća počelo je razdoblje sintetskih polimera, a prvi potpuno sintetski proizvedeni polimer je bakelit koji je nazvan po svom otkrivaču Leu Hendriku Baekalandu (1907.), čime je započelo razdoblje polimerske kemije. Početkom 20. stoljeća počinje industrijska proizvodnja i danas često korištenih polimera poput polivinil klorida (PVC), polistirena (PS), polietilena (PE), poliuretanskih pjena (PUR), poliamida (PA), ali i polimernih kompozita. Polimeri se zbog svojih složenih naziva označavaju kraticama.

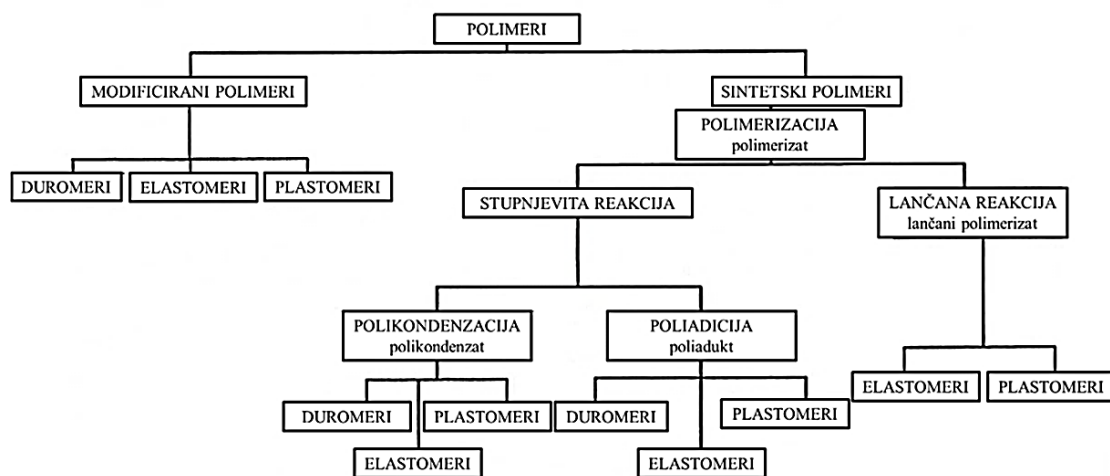
Razvoj novih materijala uvijek je direktno povezan s razvojem i napretkom tehnologije pa isto vrijedi i za polimerne materijale. Mehanička i tribološka svojstva koja posjeduju sintetski polimeri te mogućnost daljnjeg razvoja, razlog su njihove sve učestalije primjene. Polimeri s različitim karakterističnim svojstvima imaju brojne prednosti u odnosu na druge korištene materijale, a zbog široke palete polimera je moguće za određene uvjete rada pronaći polimer odgovarajućih svojstava. Proizvodnja polimera je energetski privlačna pa je tako za proizvodnju energijski najzahtjevnijeg polimera (POM) potrebna jednaka količina energije kao i za proizvodnju čelika (oko 350 kJ/cm^3). Jednostavnija i jeftinija proizvodnja svrstava polimere u povoljniji položaj u odnosu na druge materijale, a uz to su postojani pri niskim temperaturama, imaju malu gustoću, nisu podložni koroziji te izvrsno prigušuju vibracije, a imaju i nizak koeficijent trenja pa su otporniji na trošenje. Nedostatak polimera primarno se očituje u njihovoj (ne)postojanosti pri povišenim temperaturama. U takvim uvjetima mijenja se njihova struktura što primarno utječe na njihova mehanička svojstva i funkcionalnost. Također, imaju niži

koeficijent toplinske vodljivosti i veći koeficijent toplinskog širenja u odnosu na metale pa se više zagrijavaju. Tijekom vremena dolazi do puzanja i nastajanja trajnih plastičnih deformacija kod naprezanja koja su niža od granice tečenja, a neki polimeri su izrazito higroskopni što izaziva dimenzijsku nestabilnost. Međutim, pravilnim izborom polimera i odgovarajućim konstrukcijskim rješenjima njihovi nedostaci se vrlo lako mogu pretvoriti u prednosti. U nastavku će biti ukratko objašnjena teorijska podloga o polimernim materijalima koja je važna za konstruiranje i primjenu polimernih zupčanika te razumijevanje njihovog ponašanja u različitim uvjetima.

2.1. Podjela polimera

Prema podrijetlu polimeri mogu biti prirodni ili sintetski. Prirodni polimeri pretežito se nalaze u prirodi, a najpoznatiji primjer je prirodni kaučuk od kojeg se proizvodi guma. Procesom polimerizacije se iz monomera kemijskom sintezom stvaraju polimerne molekule, a broj ponavljanih jedinica u polimernoj molekuli zove se stupanj polimerizacije. Polimerima se uglavnom nazivaju molekule s visokim stupnjem polimerizacije, dok se molekule s nižim stupnjem polimerizacije nazivaju oligomerima. Polimerizacijom nastaje čisti kemijski spoj polimerizat koji se kao takav rijetko upotrebljava, stoga se isti najčešće prerađuje.

Osnovna podjela sintetskih polimera zasniva se na njihovom ponašanju pri povišenim temperaturama pa se polimeri dijele na elastomere, duromere, plastomere i elastoplastomere. Polikondenzacijom nastaju plastomeri i duromeri, lančanom polimerizacijom elastomeri i neki plastomeri, a stupnjevitom poliadicijom mogu se dobiti elastomeri, duromeri i plastomeri (Slika 2.1). Duromeri i plastomeri se najčešće upotrebljavaju kao konstrukcijski materijali, a zajednički naziv za duromere i plastomere je plastika ili poliplasti.



Slika 2.1 Vrste polimerizacija i polimera [79]

Elastomeri su djelomično umrežene polimerne tvari koji se pri sobnoj temperaturi pronalaze u gumastom stanju. Imaju nizak modul elastičnosti, a njihova klupčasta struktura omogućava im jednostavno istežanje i do dvostruke vlastite duljine, čak i pri sobnim temperaturama. Nakon prestanka djelovanja opterećenja vraćaju se u početni položaj. Toj skupini pripadaju prirodni i sintetski kaučuci, silikoni, poliuretani i drugi.

Duromeri su poliplasti gusto prostorno umrežene strukture koji zagrijavanjem ne omekšavaju i netaljivi su. Pri visokim temperaturama dolazi do kidanja primarnih veza te se razgrađuju, a zbog nedovoljne gibljivosti molekula iznimno su tvrdi, što im omogućava primjenu u konstrukcijama. Najzastupljeniji duromeri izrađeni su od umrežavala i raznih smola, a najpoznatiji duromeri su epoksidne smole.

Plastomeri ili termoplasti su najzastupljenija skupina polimernih materijala. Zagrijavanjem plastomeri omekšavaju, a hlađenjem prelaze u čvrsto stanje. Do temperature taljenja ili omekšavanja plastomeri ne mijenjaju kemijsku strukturu i pri tim se temperaturama mogu oblikovati, a hlađenjem zadržavaju željeni oblik. Zagrijavanje i hlađenje plastomera može se ponavljati neograničeno puta uz uvjet da ne dođe do kemijskih reakcija koje bi izazvale promjenu strukture. Prema stupnju uređenosti strukture polimeri mogu biti amorfni, kristalasti i kristalni. Značajniji predstavnici su polivinil klorid (PVC), polistiren (PS), polipropilen (PP), poliamidi (PA), politetrafluoretilen (PTFE) poznat kao teflon, te mnogi drugi. Zbog izvrsnih mehaničkih, toplinskih i triboloških svojstava ova skupina polimera često se koristi u konstrukcijama. Svojstva i primjena plastomera bit će detaljno opisana u sljedećim potpoglavljima.

Posljednja skupina su elastoplastomeri koji se pri sobnoj temperaturi ponašaju kao elastomeri, a pri povišenim temperaturama kao plastomeri. Prerađuju se konvencionalnim postupcima prerade poput plastomera, a poznati su i pod nazivom termoplastične gume ili termoplastični elastomeri.

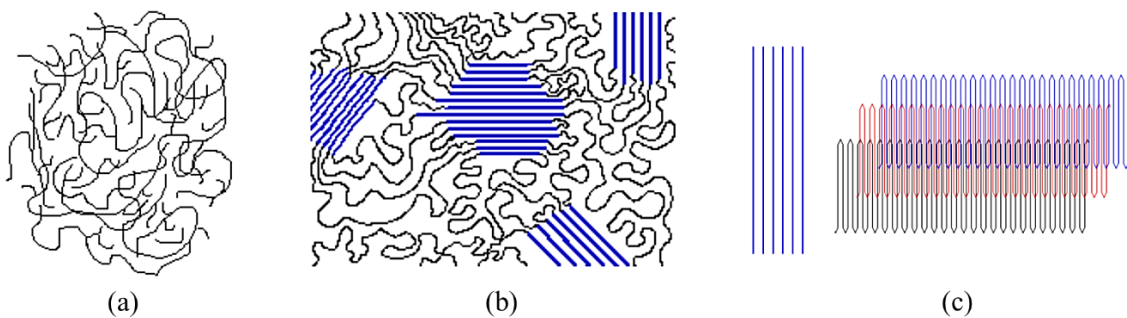
2.2. Nadmolekulna struktura i fizička stanja polimera

Strukturni elementi višeg reda u odnosu na atome u molekularnoj strukturi čine nadmolekulnu strukturu polimera. Nadmolekulna struktura polimera rezultat je prostornog sređivanja molekula zbog privlačnih sila među molekulama. S obzirom na nadmolekulnu strukturnu uređenost polimeri mogu biti amorfni, kristalasti (djelomično kristalni) ili kristalni (Slika 2.2).

Nadmolekulna amorfnost struktura polimera još uvijek nije do kraja razjašnjena. Kod amorfni polimera sustav je uvijek u stanju nereda i ne postoji pravilni prostorni poredak molekula. Čvrsti

amorfni polimeri posjeduju zadovoljavajuću čvrstoću, ali im povećanjem temperature opada krutost. Zbog neuređenosti molekula imaju veći specifični volumen u odnosu na kristalne i kristalaste polimere.

Kristalnu strukturu polimera odlikuje uređenost i prostorna složenost lanaca. Stvaranje kristalnih polimera uvjetovano je postojanjem regularnih makromolekula i prostornih oblika molekula, konformacija te velike geometrijske pravilnosti. Molekule mogu prelaziti iz jedne u drugu konformaciju bez kidanja veza, a nastajanju kristala skloni su brojni polimeri kao polietilen (PE), poliamidi (PA), polioksimetilen (POM) i ostali.



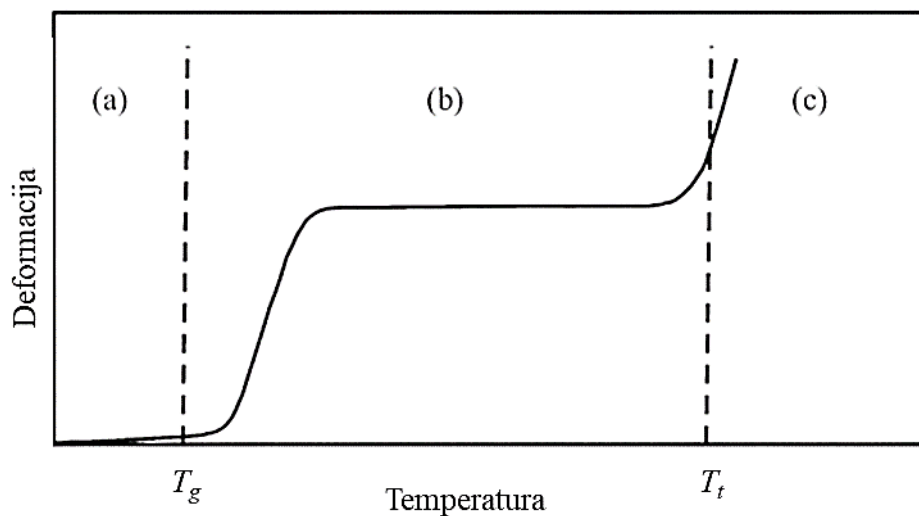
Slika 2.2 Nadmolekulna struktura polimera – (a) amorfna, (b) kristalasta i (c) kristalna [5]

Većina polimera ima kristalastu strukturu koja se sastoji od neuređenih amornih i uređenih kristalnih područja. Može se reći da amorfna faza kod kristalastih polimera predstavlja poremećaje u uređenom kristalnom području. Stupanj kristalnosti predstavlja odnos između amorfne i kristalne faze, a iskazuje se kao maseni ili volumni omjer amorfne i kristalne faze te iznosi od 5 % do 95 %. Polimeri s kristalastom strukturom najčešće su mliječno bijele boje i omekšavaju porastom temperature, a pri sobnoj temperaturi imaju bolja mehanička svojstva nego amorfni. Nadmolekulna struktura polimera prikazana je na Slici 2.3.

	PLASTOMERI				ELASTOMERI		DUROMERI
	amorfni		kristalasti		elasto-plastomeri	umreženi	
Građa makromolekula	linearna	granata	linearna		rahlo umrežena		prostomo umrežena
Shematski prikaz strukture							
Strukturna uređenost	amorfna		djelomice kristalna anizotropna	djelomice kristalna izotropna	amorfna do slabo sredena		amorfna

Slika 2.3 Građa i struktura polimera [80]

U ovisnosti o temperaturi, javljaju se tri različita fizička ili deformacijska stanja polimera: staklasto ili kristalno, gumasto ili viskoelastično te kapljevito ili viskofluidno stanje. Fizička stanja posljedica su pokretljivosti makromolekula s promjenom temperature. Staklasto i gumasto stanje smatraju se čvrstim stanjem, a kapljevito stanje nema nikakav značaj u konstrukcijama. Prijelazi između fizičkih stanja nisu određeni diskretnim temperaturama, već postoje temperaturni intervali od 20 °C do 30 °C, ali koji se ipak prikazuju konvencionalno određenim temperaturama. Slika 2.4 prikazuje ovisnost deformacija o temperaturi, s naznačenim fizičkim stanjima polimera.



Slika 2.4 Fizička stanja polimera: (a)staklasto, (b) gumasto i (c) kapljevito [78]

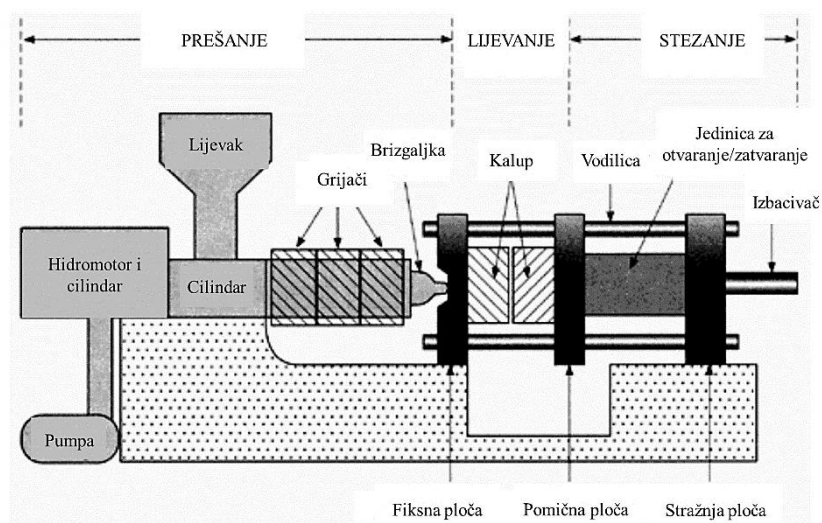
U staklastom se stanju makromolekule nalaze u stanju statičke konformacije*, deformacije su male, elastične i slijede Hookeov zakon. Prijelaz iz staklastog u gumasto stanje karakterizira temperatura staklišta ili temperatura staklastog prijelaza T_g . U gumastom stanju moguće je gibanje segmenata lanaca pa se makromolekule deformiraju u smjeru djelovanja vanjske sile, a deformacije su i dalje elastične. Temperatura tališta T_t karakteristična je za prijelaz iz gumastog u kapljevito stanje. Kapljevito stanje obilježeno je velikom pokretljivošću cijelih makromolekula i lanaca. Deformacije koje nastaju u tom stanju su nepovratne plastične deformacije. Amorfni plastomeri se često primjenjuju u konstrukcijama, a upotrebljivi su do temperature staklišta T_g . Na temperaturama iznad temperature staklišta pogoršavaju im se mehanička svojstva. Iako porastom temperature dolazi do omekšavanja, plastomeri s kristalnom strukturom mogu zadržati postojanost uz zadovoljavajuća mehanička svojstva čak i do temperature taljenja T_t .

* Statička konformacija predstavlja prostorno fiksirani raspored segmenata makromolekularnog lanca.

2.3. Proizvodnja, razgradnja i uporaba polimera

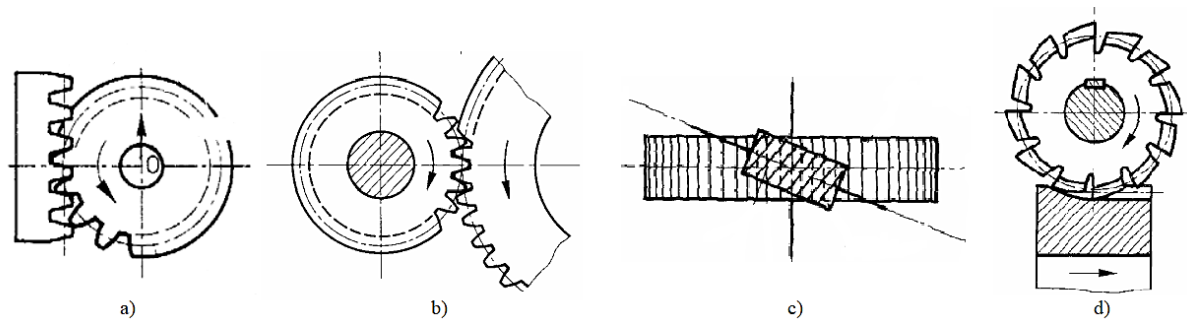
Nafta, ugljen i prirodni plin najčešće su sirovine od kojih se proizvode polimerne tvari i materijali. Proizvodnja polimernih proizvoda i poluproizvoda uglavnom se temelji na istovremenom mehaničkom, reološkom i toplinskom ponašanju polimera, često uz prisutnost kemijskih reakcija. Neovisno o vrsti materijala, prema DIN 8580 [81] postoje sljedeći izradbeni postupci: stvaranje praoblika od bezobličnih tvari, promjena oblika, povezivanje, prevlačenje i promjena svojstava proizvoda. Ekstrudiranje, kalandriranje, lijevanje, injekcijsko prešanje i u današnje vrijeme aditivna proizvodnja, najvažniji su postupci praoblikovanja kojim se od bezobličnih tvari stvaraju proizvodi i poluproizvodi. Proizvodi i poluproizvodi nastali praoblikovanjem mogu zahtijevati naknadno promjenu oblika odnosno preoblikovanje. Ako prilikom preoblikovanja dolazi do smanjenja volumena proizvoda, tada je riječ o rezanju ili odvajanju. Najznačajniji postupci proizvodnje polimernih zupčanika (injekcijsko prešanje, obrada odvajanjem čestica i aditivna tehnologija) spomenuti su u motivacijskom poglavlju, a u nastavku su oni detaljnije objašnjeni.

Injekcijskim prešanjem moguće je prerađivati sve polimere i najvažniji je postupak prerade polimera, a sustav za injekcijsko prešanje sličan je sustavu za tlačno lijevanje metala (Slika 2.5). Polimer u granulama se zagrijavanjem na temperaturu od 150 °C do 425 °C pretvara u talinu odgovarajuće viskoznosti koja se zatim ubrizgava u temperirani kalup, a nakon hlađenja nastaje gotovi proizvod (otpresak). Injekcijskim prešanjem ostvaruje se velika dimenzijska točnost i pogodno je za proizvodnju velikih serija otpresaka sa složenim geometrijskim oblikom. Zbog neravnomjernog hlađenja otpreska po presjeku te zaostalih naprezanja mogu se pojaviti greške u strukturi koje se mogu odraziti i na izgled proizvoda. Za proizvodnju proizvoda visoke kvalitete kalup se zagrijava na više temperature čime se ostvaruje jednoliko hlađenje.



Slika 2.5 Pojednostavljeni prikaz sustava za injekcijsko prešanje [6]

Relativnim gibanjem između alata i obratka dolazi do smanjenja povezanosti među česticama te djelomičnog ili u potpunog odvajanja dijelova materijala s obratka. Postupci obrade odvajanjem čestica, kao što su tokarenje, glodanje, blanjanje ili dubljenje, pogodni su za male serije i pojedinačnu proizvodnju, a konačni proizvod nastaje rezanjem pomoću alata definirane geometrije. Zbog trenja se na obrađivanoj površini razvija velika toplina pa je često potrebna naknadna površinska obrada koja se obavlja postupcima odvajanja s geometrijski neodređenom geometrijom alata poput brušenja ili poliranja. Poput metalnih, polimerni zupčanici se mogu proizvoditi postupcima odvalnog dubljenja i blanjanja (Maag i Fellows), odvalnim glodanjem ili kopirnim glodanjem pločastim glodalom (Slika 2.6).



Slika 2.6 Postupci odvajanja: (a) Maag, (b) Fellows, (c) odvalno glodanje i (d) kopirno glodanje pločastim glodalom [7]

Aditivna proizvodnja odnosi se na proizvodnju predmeta nanošenjem čestica u vrlo tankim slojevima. Proces započinje izradom trodimenzionalnog (3D) modela, uglavnom korištenjem CAD (engl. Computer Aided Design) programa za modeliranje, ili trodimenzionalnim skeniranjem. Trodimenzionalni model se zatim transformira u određen broj horizontalnih poprečnih presjeka koji se nanose sloj po sloj na strojevima za aditivnu proizvodnju. U postupcima aditivne proizvodnje primjenjuju se brojne tehnologije među kojima su najpoznatije fotopolimerizacija ili stereolitografija (SLA), trodimenzionalno tiskanje (3D Printing), odlaganje taline ili taložno srašćivanje (FDM ili FFF) i selektivno lasersko srašćivanje (SLS). Tehnologija se prvenstveno primjenjivala za izradu prototipova, a danas se primjenjuje u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji, medicini, proizvodnji elektroničkih komponenti i sl. Iako su postupci aditivne proizvodnje stari su tek nešto više od 30 godina i još uvijek su u razvoju, zbog kratkog vremena potrebnog za izradu proizvoda, niske cijene, visoke kvalitete izradaka te prilagodljivosti procesa sve se više primjenjuju. Aditivna tehnologija ne zahtijeva velika inicijalna ulaganja kao što je to slučaj s injekcijskim prešanjem, a u odnosu na konvencionalne postupke izrade zupčanika nema otpadnog materijala, što samu aditivnu tehnologiju čini energetski učinkovitim i održivim postupkom proizvodnje. U posljednje vrijeme, glavni fokus je na povećanju preciznosti strojeva

za aditivnu proizvodnju s ciljem proizvodnje dijelova visoke točnosti dimenzija, bez zahtjeva za dodatnom završnom obradom, što upućuje na to da bi ova tehnologija mogla postati budućnost proizvodnje polimernih proizvoda.

Kao posljedica fizičkih ili kemijskih utjecaja mogu nastati promjene u strukturi polimernih materijala, što zatim uzorkuje njihovu razgradnju. Nekontrolirani procesi razgradnje koji su prisutni u uvjetima proizvodnje, prerade i uporabe pogoršavaju uporabna svojstva polimera. Polimeri su za vrijeme njihove proizvodnje i prerade izloženi utjecaju različitih opterećenja i topline, a zatim su u okolini izloženi raznim atmosferskim i kemijskim utjecajima (zrak, vlaga, svjetlost, ultraljubičasto zračenje). Proces nekontrolirane razgradnje nisu poželjni, a moguće ih je usporiti dodavanjem raznih stabilizatora osnovnom polimernom materijalu. Međutim, razgradnja polimera pod utjecajem okoline može se iskoristiti za samostalnu razgradnju polimernog otpada iz okoliša, zbog čega se danas teži proizvodnji biorazgradivih polimera.

Oporabljivost polimera podrazumijeva njihovu energijsku i materijalnu uporabu. Kako su nafta, ugljen i zemni plin osnovne sirovine za proizvodnju polimera, energijskom uporabom polimera oslobađa se velika toplinska energija pa se polimeri zbog velike toplinske vrijednosti (35 MJ/kg) uglavnom spaljuju, čime im se ujedno smanjuje obujam na odlagalištima otpada. Energijska uporaba može se iskoristiti za dobivanje električne energije. Materijalna uporaba može biti mehanička ili kemijska. Mehanička uporaba ili recikliranje podrazumijeva usitnjavanje iskorištenih proizvoda radi stvaranja i proizvodnje novih. Polimeri se ipak ne mogu reciklirati neograničeni broj puta jer se svakim sljedećim recikliranjem izgubi dio svojstava materijala. Postupci pirolize, hidrolize, hidriranja i uporabe otapanjem najčešće su korišteni postupci kemijska uporabe. Primjenom navedenih postupaka polimer se razlaže na početne sastojke, plin ili ulje. Za uporabu polimera je važno napomenuti da kvaliteta oporabljenih polimera može biti potpuno jednaka kvaliteti prvi put proizvedenih polimera, a polimerni izradci se mogu obnavljati tako da im se zadrži oblik i funkcija.

2.4. Konstrukcijski polimerni materijali

Kao što je već u ranijim poglavljima rada spomenuto, zbog svojih mehaničkih, triboloških i toplinskih svojstava u odnosu na druge vrste polimera za izradu elemenata konstrukcija uglavnom se koriste plastomeri. Jednostavnije, jeftinije i brže se obrađuju u odnosu na metale, a ukoliko se pravilno primjenjuju te održavaju mogu imati duži radni vijek. Zbog prikladne udarne žilavosti i dobrih prigušnih svojstava moguće ih je koristiti u slučajevima gdje je proizvod izložen udarnim opterećenjima. Također, mogu se koristiti u korozivnim sredinama,

a kako je većina plastomera samopodmaziva, mogu se koristiti u uvjetima gdje podmazivanje nije dozvoljeno ili primjenjivo. Nedostatak plastomera je loša postojanost pri povišenim temperaturama jer ne podnose dugotrajne radne temperature iznad 100 °C ili 120 °C, zbog čega im je implementacija djelomično ograničena. Imaju oko 200 puta lošiju toplinsku vodljivost i oko 6 do 7 puta veći koeficijent toplinskog širenja u odnosu na konstrukcijske čelike.

U prethodnom poglavlju na Slici 1.3 prikazana je piramida najvažnijih konstrukcijskih (inženjerskih) i funkcionalnih (specijalnih) plastomera. Pregledom dosadašnjih istraživanja izdvojeni su plastomeri od kojih se uglavnom proizvode polimerni zupčanici. To su redom: akrilonitril butadien stiren (ABS), polibutilen tereftalat (PBT), polioksimetilen (POM, poznat i kao poliacetal), razni poliamidi (PA), polipropilen (PP), poliimid (PI), polieter eter keton (PEEK), polikarbonat (PC), polilaktid (PLA) i polieter imid (PEI). Ipak, najveći broj eksperimentalnih istraživanja proveden je na POM i PA zupčanicima. Budući da su oni komercijalno najzastupljeniji, od njih se često izrađuju polimerni zupčanici kao i drugi elementi konstrukcija. POM je energijski zahtjevan pa se koristi za izradu zupčanika postupkom injekcijskog prešanja ili obradom odvajanjem čestica, ali ne i za proizvodnju zupčanika FDM postupkom aditivne tehnologije. S obzirom da su uz injekcijsko prešanje i obradu odvajanjem čestica poliamidi pogodni i za proizvodnju FDM postupkom aditivne tehnologije, oni se izdvajaju kao najpraktičnija skupina konstrukcijskih plastomera za izradu zupčanika.

Poliamidi, trgovačkog naziva najloni, su plastomeri kojima ponavljane jedinice sadrže aromatske ili alifatske segmente povezane amidnim vezama. Aromatski poliamidi ili aramidi nastaju polikondenzacijom kiselinskih klorida i diamina, a od njih se izrađuju aramidna vlakna (Kevlar). Alifatski poliamidi označavaju se prema broju ugljikovih atoma u osnovnom dijelu ponavljajuće jedinice (od 4 do 13 ugljikovih atoma). Promjenom ponavljajuće jedinice (monomera) nastaju poliamidi PA 6, PA 11, PA 12, PA 46, PA 66, PA 610, PA 612, PA 6/66 i drugi. Poliamid na osnovi ϵ kaprolaktana (PA 6) i poliamid na osnovi heksametilendiamin adipinske kiseline (PA 66) se često primjenjuju u proizvodnji polimernih zupčanika injekcijskim prešanjem ili obradom odvajanjem čestica. Razlika između dva navedena poliamida je u njihovoj strukturi, gdje PA 6 ima jedan monomer, a PA 66 ima 2 monomera koji sadrže ugljikove atome. Razlika u strukturi utječe na mehanička svojstva i postojanost na povišenim temperaturama, gdje je PA 66 nešto bolji u odnosu na PA 6. Poliamidi su kristalasti plastomeri sa stupnjem kristalnosti od 10 % do 60 %, a kristalna područja visoke molekularne privlačnosti i pokretljiva amorfna faza rezultiraju visokim talištem te zadovoljavajućom čvrstoćom, žilavosti, tvrdoćom i otpornosti prema trošenju.

Najvažnija mehanička i toplinska svojstva poliamida PA 6 i PA 66 s pripadajućim vrijednostima prikazana su u Tablici 2.1. Kako temperatura i vlažnost okoline značajno utječu na svojstva polimera, svojstva navedena u Tablici 2.1 su određena su pri temperaturi 23 °C i relativnoj vlažnosti od 50 %.

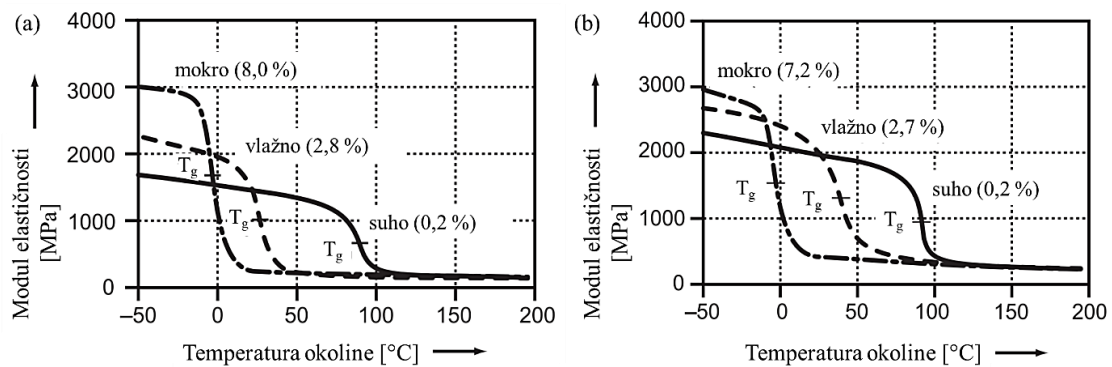
Tablica 2.1 Svojstva poliamida PA 6 i PA 66 [4, 9, 83, 84]

Svojstvo	PA 6	PA 66
Gustoća, [kg/dm ³]	1,13-1,16	1,12-1,15
Stupanj kristalnosti, [%]	30-40	35-45
Temperatura staklišta, [°C]	78	90
Temperatura tališta, [°C]	225-235	225-265
Vlačna čvrstoća, [MPa]	80	85
Tvrdoća (Brinell)	6,25	7,25
Modul elastičnosti, [MPa]	2800	3000
Poissonov koeficijent	0,44	0,46
Koeficijent trenja	0,38-0,45	0,35-0,42
Trošenje, [µm/km]	0,23	0,09
Granična temperatura upotrebe – kratkotrajno, [°C]	140-160	140-170
Granična temperatura upotrebe – dugotrajno, [°C]	100-120	100-120
Toplinska vodljivost, [W/(m·K)]	0,29	0,23
Upijanje vlage, [%]	9,5	8,5

Svi poliamidi skloni su apsorpciji vlage (vode) koja dovodi do dimenzijskih nestabilnosti, odnosno bubrenja. Poliamidi s manjim stupnjem kristalnosti, odnosno većim udjelom amorfne faze, skloniji su upijanju vlage. Vlaga slabi međumolekulne sile i uzrokuje pokretljivost makromolekulnih segmenata u poliamidima. To utječe na njihova mehanička svojstva na način da se porastom udjela vlage čvrstoća i tvrdoća smanjuju, dok udarna žilavost raste [82]. Apsorpcija vlage ovisna je o veličini uzorka, stupnju kristalnosti, vremenu izloženosti i relativnoj vlažnosti okoline. Zbog ovisnosti mehaničkih svojstava o sadržaju vlage PA zupčanike je potrebno kondicionirati, osim ako se izradak ne primjenjuje u okolini s relativnom vlažnošću od 0 %. Kondicioniranje se može izvoditi na okolnom zraku, u vodi ili vodenoj pari temperature do 100 °C, a služi kako bi se zupčanik prisilno navlažio i doveo u ravnotežno stanje s okolinom. Vrijeme potrebno za kondicioniranje zupčanika može trajati i nekoliko tjedana (na okolnom zraku u stvarnim eksploatacijskim uvjetima), a ovisi o njegovoj debljini, temperaturi

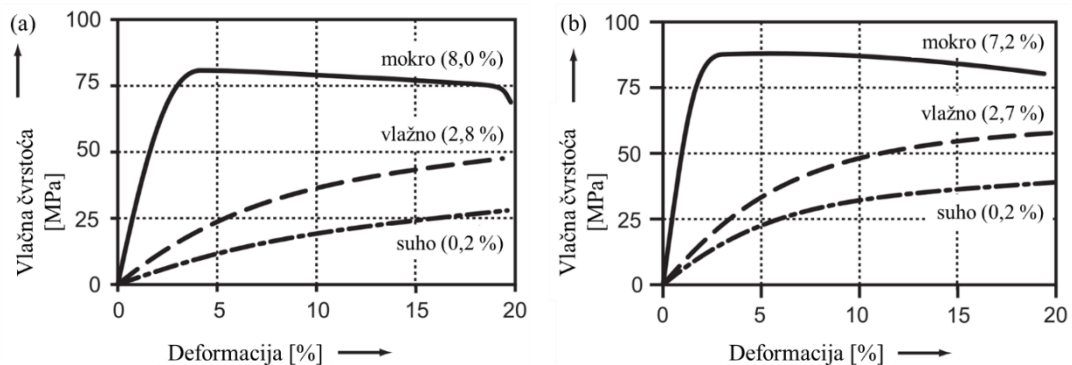
i relativnoj vlažnosti okoline, odnosno temperaturi vode ako se kondicioniranje izvodi u vodi. Kondicioniranje je važno i zbog točnosti dimenzija (bubrenje), a dodaci polimerima u obliku ugljičnih (CF) ili staklenih (GF) vlakana smanjuju apsorpciju vlage. Također, ako se zupčanik proizvodi u uvjetima koji odgovaraju eksploatacijskim, ili je proizvodnja na mjestu gdje se zupčanik primjenjuje, tada kondicioniranje nije potrebno.

Na Slici 2.7 prikazani su dijagrami modula elastičnosti u ovisnosti o temperaturi za poliamide PA 6 i PA 66, s naznačenom temperaturom staklišta T_g , a koja se razlikuje prema zasićenosti poliamida vlagom. PA 6 zupčanici su zasićeni vlagom u iznosu od 0,2 % (suho), 2,8 % (vlažno) i 8,0 % (mokro). PA 66 zupčanici zasićeni vlagom s 0,2 % (suho), 2,7 % (vlažno) i 7,2 % (mokro). Vrijednosti modula elastičnosti u dijagramima (Slika 2.7) dobivene su dinamičko-mehaničkom analizom pa imaju niže vrijednosti nego u Tablici 2.1, jer je modul elastičnosti prema Tablici 2.1 određen ispitivanjem vlačne čvrstoće na kidalici.



Slika 2.7 Modul elastičnosti polimera: (a) PA 6 i (b) PA 66 [9]

Povećanje sadržaja vlage u poliamidu snižava modul elastičnosti, ali i vlačnu čvrstoću (Slika 2.8). Prema dijagramu ovisnosti naprezanja o deformaciji, povećanjem temperature dolazi do rasta deformacije te u konačnici do loma materijala. S obzirom na izgled dijagrama ovisnosti naprezanja o deformaciji poliamidi spadaju u skupinu tvrdih i žilavih plastomera [84].



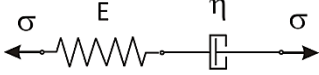
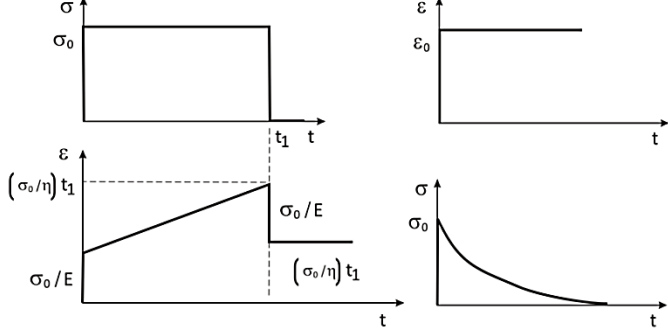
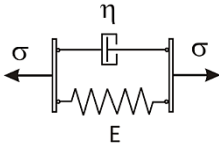
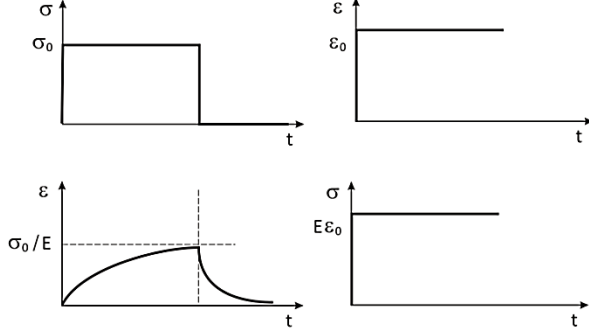
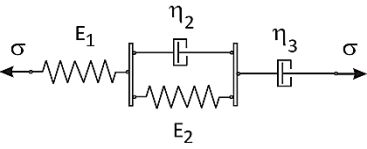
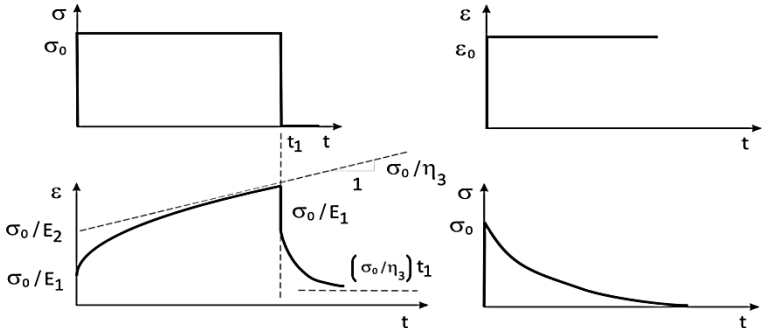
Slika 2.8 Vlačna čvrstoća: (a) PA 6 i (b) PA 66 [9]

Poliamidi su viskoelastični materijali te im naprezanje ne ovisi samo o deformaciji, nego i vremenu, odnosno brzini deformacije. Dok se kod čelika viskoelastičnost javlja pri povišenim temperaturama od oko 300 °C, viskoelastična svojstva polimera uočavaju se već pri sobnoj temperaturi. Podaci o viskoelastičnim materijalima određuju se eksperimentalno pomoću pokusa puzanja i pokusa relaksacije. Pokus puzanja se provodi na način da se u pokusu opterećenje i naprezanje održavaju konstantnim, pri čemu se mjeri promjena deformacije u vremenu. Suprotno pokusu puzanja, u pokusu relaksacije je deformacija konstantna, a mjeri se smanjenje (relaksacija) naprezanja koje se javlja jer se iznos sile potrebne za održavanje konstantne deformacije smanjuje s vremenom. Za opći slučaj, ukupna relativna deformacija (ϵ_u) kod viskoelastičnih materijala sastoji se od 3 komponente: elastične ili energijske deformacije (ϵ_{el}), entropijske ili viskoelastične deformacije (ϵ_{en}) i plastične ili viskofluidne deformacije (ϵ_p). Udio svake komponente u ukupnoj deformaciji ovisi o iznosu opterećenja i trajanju opterećenja, ali i o temperaturi. Elastična deformacija (ϵ_{el}) je povratna deformacija koja se javlja ispod temperature staklišta T_g , ne ovisi o brzini deformacije i odlikuje je linearna ovisnost deformacije i naprezanja. Entropijska deformacija (ϵ_{en}) se javlja iznad temperature staklišta T_g i također je povratna, ali deformacije ovise i o vremenu djelovanja opterećenja uz nelinearnu ovisnost deformacije i naprezanja. Plastična deformacija (ϵ_p) je nepovratna komponenta ukupne deformacije s nelinearnom vezom između deformacije i naprezanja, a nastaje zbog pomicanja makromolekulnih lanaca koji se pregrupiraju pod djelovanjem opterećenja. Pod djelovanjem opterećenja viskoelastični polimeri, poput poliamida, mogu se ponašati elastično (ispod T_g), viskoelastično (iznad T_g) ili viskofluidno (iznad T_f) [78].

Za prikaz ponašanja polimernih materijala pod opterećenjem koriste se reološki modeli, a elementi reoloških viskoelastičnih modela su linearna elastična opruga (E) kojom se opisuje elastično, te viskozni prigušivač (η) kojim se opisuje viskozno tečenje. Povezivanjem jednostavnih modela s linearno elastičnom oprugom (Hookev model) i modela koji se sastoji od prigušnog elementa (Newtonov model), moguće je dobiti složenije modele koji bolje opisuju ponašanje realnih viskoelastičnih materijala [78]. Tablica 2.2 prikazuje reološke modele kojima je moguće preciznije opisati viskoelastičnost materijala. Voigt-Kelvinov model se sastoji od paralelno spojenih opruge i prigušivača, a Maxwellov model je sastavljen od istih elemenata, ali spojenih serijski. Kako Maxwellov model loše opisuje pojavu puzanja, a Voigt-Kelvinovim modelom nije moguće opisati pojavu relaksacije, za složeno viskoelastično ponašanje poliamida pod opterećenjem koristi se četveroparametarski Burgerov model. Burgerov model

je poznat i kao degenerirani tročlani Voigt-Kelvinov model jer se može promatrati kao model sastavljen od 3 serijski povezana Voigt-Kelvinova elementa uz određene uvjete ($\eta_1=0, E_3=0$).

Tablica 2.2 Reološki modeli [85, 86, 87]

Reološki model	Krivulja puzanja i relaksacije
<p style="text-align: center;">Maxwellov model</p> 	
<p style="text-align: center;">Voigt-Kelvinov model</p> 	
<p style="text-align: center;">Burgerov model</p> 	

Modeliranje složenog viskoelastičnog ponašanja poliamida je zahtjevno jer promjena napreznja ne ovisi samo o deformaciji i brzini deformacije, nego i o temperaturi, vlažnosti i drugim čimbenicima koji u konačnici utječu na svojstva i radne značajke polimernih zupčanika. Polimerni zupčanici su u svom radu izloženi dinamičkim opterećenjima uslijed kojih dolazi do zagrijavanja i trošenja te je sveobuhvatna termo-mehanička analiza iznimno složena, pa je većina znanstveno-istraživačkih radova iz područja polimernih zupčanika usmjerena na eksperimentalno ispitivanje. Ako se u razmatranje uključe i hibridni zupčanici sastavljeni od polimerne matrice i metalnih umetaka, izrada modela postaje još zahtjevnija.

3. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE ZUPČANIKA

Zbog nedostatka standarda i iskustvenih vrijednosti za pouzdani proračun i konstruiranje polimernih i hibridnih zupčanika, ovakve zupčanike potrebno je eksperimentalno ispitivati u uvjetima što sličnijim stvarnim eksploatacijskim (pogonskim) uvjetima. Pregledom literature, uočeno je da testovi za ispitivanje triboloških svojstava, poput testa s dva diska (engl. disc on disc) i testa s iglom na disku (engl. pin on disc), ne pružaju točna i precizna predviđanja radnih značajki polimernih i hibridnih zupčanika. Iako takvi testovi simuliraju konveksno konkavni dodir, kao što je to slučaj kod zupčanika, njihovi rezultati se ne podudaraju s ispitivanjima na stvarnim zupčanicima. Također, ista je situacija i s numeričkim analizama i simulacijama. Stoga se u praksi polimerni i hibridni zupčanicima ispituju eksperimentalno, pomoću sustava za ispitivanje polimernih zupčanika s mehanički otvorenim ili zatvorenim tokom snage [88]. Takvi sustavi omogućavaju ispitivanje radnih značajki (zagrijavanje, trošenje, iskoristivost, nosivost, vijek trajanja...) i ponašanja polimernih i hibridnih zupčanika pri različitim opterećenjima i brzinama vrtnje, a koji simuliraju stvarne radne uvjete. Eksperimentalni sustavi za ispitivanje zupčanika s mehanički otvorenim i mehanički zatvorenim tokom snage, te njihove glavne prednosti i nedostaci, opisani su u nastavku.

Eksperimentalni sustav s mehanički zatvorenim tokom snage od ranije je poznat. Razvio ih je Istraživački centar za zupčanike i prijenosnike (njem. Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau – FZG). u Münchenu, Njemačka. Već su dugo u upotrebi i koriste se za ispitivanje sredstava za podmazivanje metalnih zupčanika (ulja i maziva). Primjenjivi su za ispitivanje radnih značajki svih vrsta zupčanika. Imaju velik broj dijelova zbog čega zahtijevaju veće početno ulaganje, a s obzirom da su ispitivani zupčanicima fiksirani u kućištu, nemaju veliku prostornu fleksibilnost pa im nije moguće prilagođavati osni razmak. Također, ne zahtijevaju pogonske strojeve s velikom nazivnom snagom jer se opterećenje na zupčanicima uglavnom ostvaruje dovođenjem okretnog momenta na kućište ili preko jednosmjerne spojke. Na taj je način potrebna nazivna snaga pogonskog stroja manja od ukupne snage koja cirkulira u sustavu. Zbog svega navedenog, eksperimentalne sustave s mehanički zatvorenim tokom snage je ekonomski opravdano primjenjivati za ispitivanje metalnih zupčanika koji se u pravilu koriste za prijenos većih snaga, što nije slučaj kod polimernih i hibridnih zupčanika. Iako mogu raditi s konstantnim i promjenjivim opterećenjem, glavni nedostatak im je što se zupčani parovi puštaju u rad i zaustavljaju pri punom opterećenju. Također, nedostatak su unutrašnje dinamičke sile koje uzrokuju vibracije, kao i održavanje konstantnog momenta zbog trošenja zupčanika koji se može izbjeći izborom odgovarajućeg konstrukcijskog rješenja.

U odnosu na eksperimentalni sustav s mehanički zatvorenim tokom snage, eksperimentalni sustav s mehanički otvorenim tokom snage jednostavniji je i sadrži manje dijelova. Takav sustav sastoji se od pogonskog stroja, ispitivanog prijenosnika snage i/ili gibanja s polimernim ili hibridnim zupčanicima, te gonjenog stroja koji simulira radni stroj. Pogonski stroj je u pravilu regulirani elektromotor, za istosmjernu ili izmjeničnu struju, dok su simulatori radnog stroja najčešće mehaničke, hidrauličke ili elektromagnetne kočnice. U novije vrijeme se kao simulator radnog stroja koristi elektromotor koji radi u generatorskom režimu. Na ulazno i izlazno vratilo ispitivanog prijenosnika ugrađuju se uređaji za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje. U blizini zupčanog para postavljaju se drugi mjerni uređaji poput infracrvene termalne kamere, mjerila razine buke, vibracija i sl. Jednostavnost izvedbe, mogućnost ispitivanja zupčanika različitih dimenzija te jednostavnog prilagodbe osnovnog razmaka, glavne su prednosti eksperimentalnog sustava s mehanički otvorenim tokom snage.

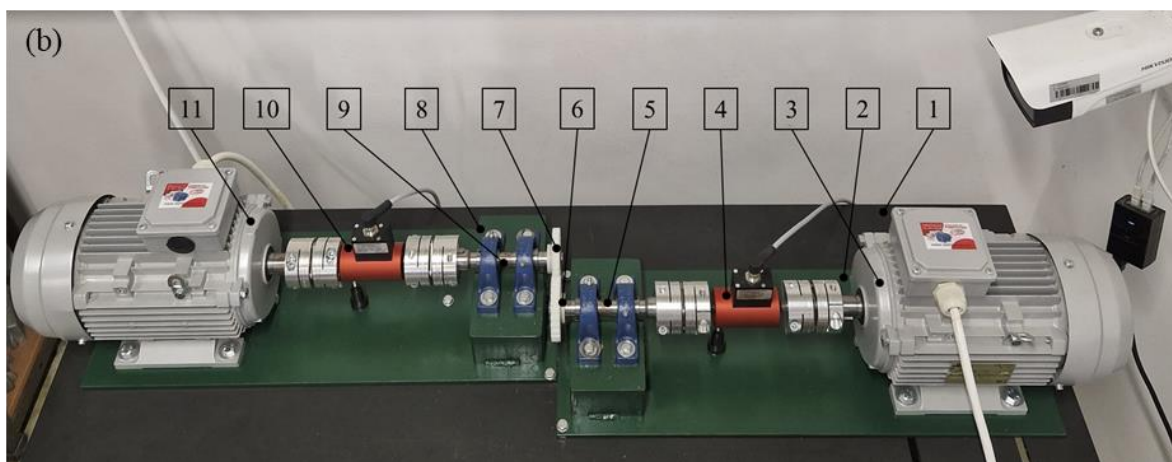
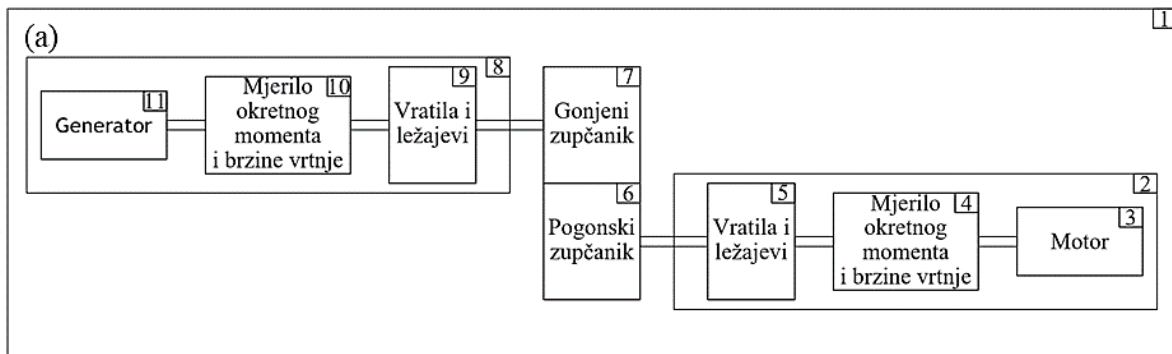
3.1. Eksperimentalno ispitno postolje

3.1.1. Opis ispitnog postolja

S obzirom na sve navedene značajke predstavljenih sustava za ispitivanje zupčanika, a poštujući zahtjeve, područje interesa i željene parametre ispitivanja zupčanika, na Odjelu za stručne studije u Splitu razvijen je, konstruiran i izrađen eksperimentalni sustav za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika s mehanički otvorenim tokom snage (Slika 3.1 (a) i (b)).

Za navedeni eksperimentalni sustav prvobitno je izrađeno postolje na koje se postavljaju elektromotori te ostala pripadajuća oprema. Postolje (1) je projektirano i konstruirano s gledišta krutosti ili deformacija kako bi se izbjegle neželjene vibracije uslijed rada, a koje mogu dovesti do pojave rezonancije. Na postolju (1) su izrađeni utori koji omogućavaju aksijalno pomicanje bloka pogonskog dijela (2) na kojem se nalazi pogonski elektromotor, tj. motor (3) s pripadajućim elementima prijenosa. Isto tako, izrađeni su utori za radijalno pomicanje bloka (8) gonjenog dijela na kojem se nalazi gonjeni elektromotor, tj. generator (11). Utori su precizno izrađeni kako bi se zupčanci mogli ispravno dovesti u zahvat. Općenito, prijenosnik je opterećen onim okretnim momentom kojeg zahtijeva radni stroj (generator), a ne okretnim momentom kojeg pogonski stroj (motor) može predati. Budući da se i za pogonski i za gonjeni stroj koriste trofazni asinkroni elektromotori izmjenične struje, isti mogu raditi u motorskom i generatorskom režimu. U motorskom režimu rada, kada se koristi kao pogonski stroj, asinkroni elektromotor (u nastavku rada motor) pretvara električnu energiju u koristan mehanički rad, a rotor elektromotora se uvijek vrti sporije od sinkrone brzine elektromagnetnog polja, odakle im

i naziv asinkroni. Razlika između sinkrone brzine elektromagnetnog polja i brzine vrtnje rotora naziva se klizanje. Gonjeni asinkroni elektromotor (u nastavku rada generator), predstavlja teret kojim je opterećen prijenosnik, a na njemu se inducira izmjenična struja zbog toga što se rotor okreće većom brzinom vrtnje od sinkrone brzine vrtnje elektromagnetnog polja.



Slika 3.1 Eksperimentalni sustav za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika: (a) shematski prikaz i (b) stvarni sustav [89]

Identični trofazni asinkroni elektromotori izmjenične struje s dva para polova (4 pola) oznake Seipee JM 100LB 4 B3 su odabrani kao motor i generator, a pripadajuće tehničke karakteristike motora i generatora pri frekvenciji mreže od 50 Hz prikazane su u Tablici 3.1.

Tablica 3.1 Tehničke karakteristike odabranog motora i generatora

Seipee JM 100LB 4 B3	
Nazivna snaga, [kW]	3
Nazivni okretni moment, [Nm]	19,7
Nazivna brzina vrtnje, [min^{-1}]	1430
Moment tromosti, [kgm^2]	$9,5 \cdot 10^{-3}$
Masa, [kg]	26,5

Upravljanje brzinom vrtnje motora i generatora izvodi se preko frekventnih pretvarača oznake Schneider Altivar ATV 930, također nazivne snage 3 kW, a isti su namijenjeni za primjenu u industrijskim postrojenjima (Slika 3.2 (a)). S obzirom da se na generatoru, zbog veće brzine vrtnje rotora u odnosu na sinkronu brzinu vrtnje elektromagnetnog polja, inducira izmjenična struja, postoji realna mogućnost da dođe do pregrijavanja generatora i njegovog otkazivanja. Kako bi se izbjegla navedena situacija, a ujedno i ostvarila veća energetska učinkovitost eksperimentalnog sustava za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika s mehanički otvorenim tokom snage, generatoru je pridružena regenerativna jedinica oznake Schneider Altivar ATVRU75N4 (Slika 3.2 (b)). Regenerativna jedinica nazivne snage 7,5 kW posjeduje EMC (engl. Electromagnetic Compatibility) filter kako ona ne bi ometala rad drugih elektroničkih komponenti. Izmjenična struja inducirana na generatoru se koristi za napajanje frekventnog pretvarača koji upravlja generatorom te je na taj način ostvarena veća iskoristivost sustava za ispitivanje zupčanika jer se manja količina struje preuzima iz električne mreže.



Slika 3.2 (a) Frekventni pretvarač i (b) regenerativna jedinica

Ranije spomenuta dva zasebna identična bloka (2, 8) na kojima su postavljeni motor odnosno generator te ostala pripadajuća oprema, a koji se zajedno nalaze na postolju eksperimentalnog sustava za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika, sastavljeni su od čelične ploče debljine 10 mm te čelične kvadratne šipke dimenzija 100 mm x 100 mm x 100 mm. Ploča i kvadratna šipka su međusobno zavareni, a zatim su strojno obrađeni na konačnu mjeru. Bridovi čelične ploče su izrađeni sa strogim zahtjevom za okomitosti kako bi se ispitivanim polimernim i hibridnim zupčanicima omogućio pravilan zahvat, odnosno kako bi se izbjegla poprečna (radijalna), uzdužna (aksijalna) ili kutna odstupanja. Također, blokovi su strojno obrađeni kako

bi vratila i ležajevi (5, 9) te ispitivani zupčanici (6, 7) bili koaksijalni s izlaznim vratilom motora (3) odnosno generatora (11), a izrađeni su i provrti kako bi se sva oprema mogla pričvrstiti na blokove. Ispitivani zupčanici osigurani su pomoću uskočnika, bez obzira što imaju ravne zube pa ne postoji aksijalna komponenta sile u zahvatu koja bi utjecala na njihov aksijalni pomak uzduž rukavca. Između vratila i ležajeva na pogonskom dijelu (5) i motora (3), kao i između vratila i ležajeva na gonjenom dijelu (9) i generatora (11), ugrađeni su uređaji za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje (4, 10) s pripadajućim spojka. Važno je naglasiti da su na svakom pojedinom bloku, bilo pogonskog (2) ili gonjenog (8) dijela, fiksno pozicionirani i pričvršćeni motor (3) i generator (11), vratila s ležajevima (5, 9) i uređaji za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje (4, 10). Oni se ne pomjeraju prilikom izmjene ispitivanih zupčanika (6, 7), čime je osigurana točnost, pouzdanost i ponovljivost eksperimentalnog ispitivanja.

Za uležištenje vratila izrađenih od čelika 42CrMo4 (Č. 4732) korišteni su ležajevi s kućištem oznake SKF SY 20 TF nazivnog promjera 20 mm s dinamičkom nosivosti u iznosu od 12,7 kN, a koji su primjenjivi za brzine vrtnje do 8500 min^{-1} . Vratila su uležištena s po dva para navedenih ležajeva, prema uputama proizvođača uređaja za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje (KTR), a takvo uležištenje služi za zaštitu samog uređaja, ali i motora i generatora.

Ključni dio eksperimentalnog sustava za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika s mehanički otvorenim tokom snage predstavljaju uređaj za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje (dinamički torziometar) te programabilni logički kontroler (engl. Programmable Logic Controller – PLC) zadužen za upravljanje. Kako bi se za vrijeme ispitivanja mogao održavati željeni okretni moment i brzina vrtnje, između motora/generatora i vratila ugrađen je uređaj za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje Dataflex 16/50 s pripadajućim elastičnim spojka Radex NC26 (Slika 3.3). Akumulacijske elastične spojke omogućavaju ublažavanje udarnih opterećenja i kompenzaciju potencijalnih odstupanja nastalih prilikom ugradnje.



Slika 3.3 Uređaj za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje s pripadajućim spojka [90]

Iako je za ispravno i funkcionalno eksperimentalno ispitivanje bio dovoljan samo jedan uređaj za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje, i to na gonjenom dijelu, u svrhu određivanja stupnja iskoristivosti zupčanog para ugrađen je i drugi uređaj na pogonskom dijelu. Iz odnosa okretnih momenata na izlazu i ulazu u prijenosnik moguće je odrediti stupanj iskoristivosti prijenosnika, pri čemu treba uzeti u obzir gubitke u ležajevima. Tehničke karakteristike uređaja za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje proizvođača KTR navedeni su u Tablici 3.2.

Tablica 3.2 Tehničke karakteristike uređaja za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje

KTR Dataflex 16/50 s Radex NC26 spojka	
Mjerno područje okretnog momenta "1", [Nm]	-50 – +50
Mjerno područje okretnog momenta "2", [Nm]	-10 – +10
Maksimalna brzina vrtnje, [min ⁻¹]	10000
Prekidni okretni moment, [Nm]	150
Izlazni napon, [V]	-10 – +10
Maksimalni uzdužni (aksijalni) pomak, [mm]	1,6
Maksimalni poprečni (radijalni) pomak, [mm]	2,7
Maksimalni uzdužni (aksijalni) pomak, [°]	1

Navedeni uređaji za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje mogu raditi u dva mjerna područja okretnog momenta, do 10 Nm i do 50 Nm. S obzirom da se istraživanje polimernih i hibridnih zupčanika izvodi pri okretnim momentima manjim od 10 Nm, za ovaj eksperiment je odabrano mjerno područje okretnog momenta "2", za koje najveće odstupanje iznosi $\pm 0,2\%$.

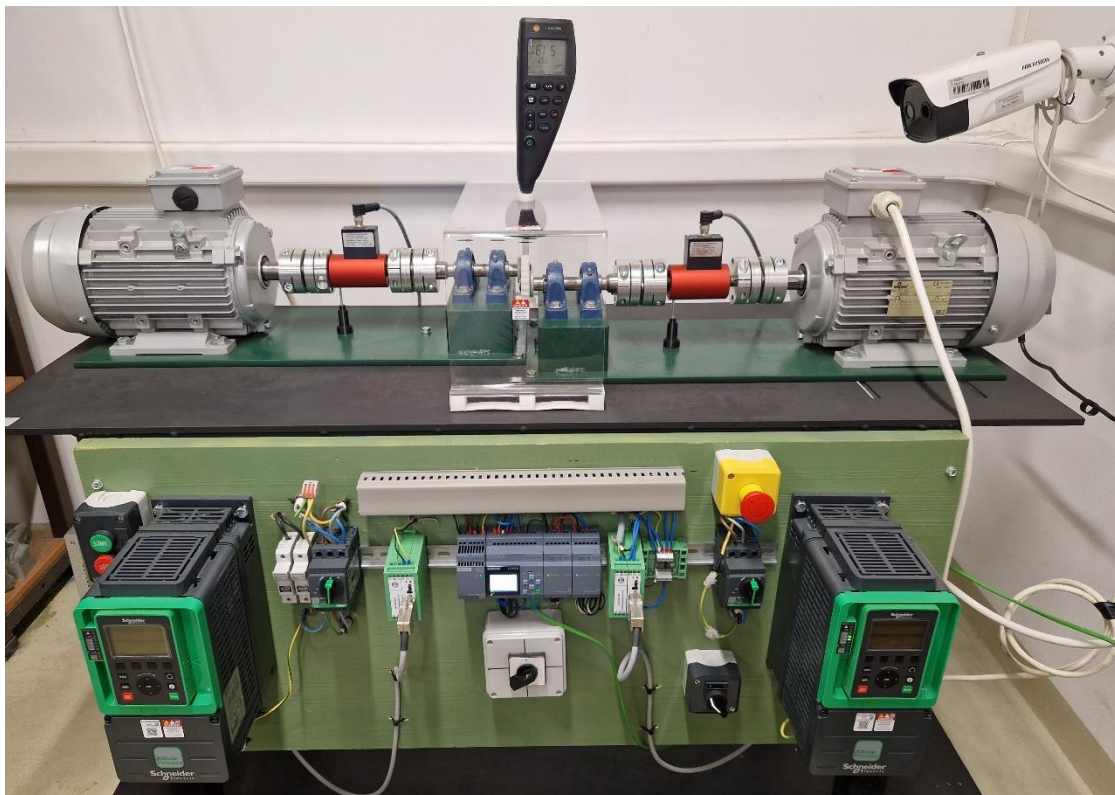
Uređaj za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje na pogonskom dijelu rezultira pozitivnim okretnim momentom i time pozitivnim naponom, dok je na gonjenom dijelu suprotno pa su okretni moment i napon negativni. S obzirom da Siemens LOGO! PLC jedinica zadužena za regulaciju, upravljanje i automatizaciju može primiti samo signale u obliku pozitivnog napona, bilo je neophodno ugraditi pretvarač napona oznake Nord TI 278910320. Siemens LOGO! PLC jedinica sa zaslonom i dodatnim proširenim modulom te napajanjem (24 V/DC) prikazana je na Slici 3.4. Navedena PLC jedinica omogućava jednostavno rukovanje i konfiguraciju uz podršku Siemens LOGO! 8.3 softvera, a pomaže u rješavanju složenih zadataka i automatizaciji procesa. Predefinirani funkcijski blokovi osiguravaju i omogućavaju brzo i učinkovito individualno programiranje, bez prethodnih značajnih vještina programiranja. Rad eksperimentalnog sustava za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika je automatiziran na način da se okretni moment na gonjenoj strani održava konstantnim. Automatizacija se izvodi

pomoću proporcionalne, integralne i diferencijalne (PID) regulacije, a svi parametri mjerenja se pohranjuju na računalo. Također, sustav za ispitivanje zupčanika je programiran tako da se za vrijeme ispitivanja opterećenje povećava za određeni korak nakon zadanog vremenskog intervala, ali iz sigurnosnih razloga postoji mogućnost i ručnog upravljanja.



Slika 3.4 Siemens LOGO! PLC jedinica

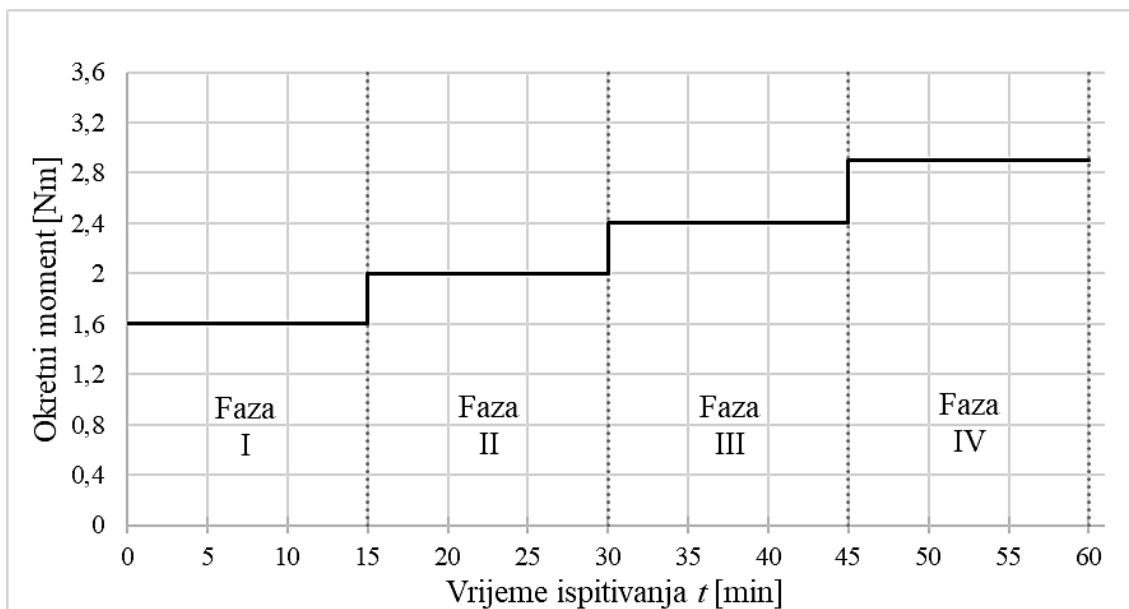
Konačna izvedba eksperimentalnog sustava za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika s mehanički otvorenim tokom snage te pripadajućom mjernom opremom, o kojoj će biti govora u nastavku ovog poglavlja, prikazana je na Slici 3.5.



Slika 3.5 Eksperimentalni sustav za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika s mehanički otvorenim tokom snage

3.1.2. Ubrzani test ispitivanja i kriteriji otkaza zupčanika

Za eksperimentalno ispitivanje radnih značajki polimernih i hibridnih zupčanika primijenjen je ubrzani postupak ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja (po fazama) kojim su optimizirani pouzdanost, broj ispitivanja i potrebno vrijeme ispitivanja. Standardna dugotrajna ispitivanja s konstantnim opterećenjem imaju veću pouzdanost, ali i značajno dulje ukupno vrijeme ispitivanja. Istraživanja su pokazala da čak i ubrzani postupci ispitivanja s fazama koje traju 10 minuta mogu kvalitetno opisati toplinska i tribološka svojstva polimernih zupčanih parova. Ovisno o problemu koji se istražuje, po potrebi se može prilagoditi i produžiti vrijeme trajanja određene faze ispitivanja [25]. Dijagram ubrzanog postupka ispitivanja zupčanika sa stupnjevitom promjenom opterećenja (faze označene u dijagramu), a koji je korišten u ovom istraživanju prikazan je na Slici 3.6.



Slika 3.6 Dijagram ubrzanog postupka ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja

Eksperimentalno ispitivanje u trajanju od ukupno 60 minuta podijeljeno je u četiri faze po 15 minuta, pri čemu svaku fazu karakterizira određeni nivo opterećenja izražen iznosom okretnog momenta (1,6 Nm, 2,0 Nm, 2,4 Nm i 2,9 Nm). Brzina vrtnje je konstantna za vrijeme cijelog ubrzanog postupka i iznosi 1000 min^{-1} . Vrijeme ispitivanja pomnoženo s brzinom vrtnje definira broj ciklusa za određeni nivo opterećenja. Pri navedenoj brzini vrtnje svaka faza predstavlja 15 000 ciklusa pri određenom nivou opterećenja (ukupno 60 000). Prema Tavčar i dr. [25], kod ispitivanja PA 6 para zupčanika primjenom ubrzanog postupka ispitivanja s fazama koje traju 10 minuta nije uslijedila potpuna stabilizacija temperature tijela zupčanika, već je uočen daljnji rast (Slika 1.7). Stoga, radi pouzdanijeg određivanja temperature tijela

zupčanika, trošenja boka zuba i stupnja iskoristivosti, u ovom doktorskom radu je ispitivanje produljeno na način da svaka faza traje 15 minuta, umjesto predloženih 10 minuta. Skok okretnog momenta između faza odabran je u skladu s mogućnostima regulacije promjene nivoa frekvencije na frekventnom pretvaraču zaduženom za upravljanje generatorom. Stoga prva dva skoka okretnog momenta iznose 0,4 Nm, dok je posljednji skok veći i iznosi 0,5 Nm.

Kako bi se izbjeglo iznenadno udarno opterećenje prilikom pokretanja motora i generatora zupčanici su postupno ubrzavani do brzine vrtnje od 1000 min^{-1} tijekom prvih 20 sekundi, nakon čega je narinut odgovarajući okretni moment za prvu fazu ubrzanog postupka ispitivanja. Ubrzani 60-minutni postupak ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja započinje čim se zupčanici optereće prvom razinom opterećenja koja iznosi 1,6 Nm. Ispitivanje zupčanika provodi se kroz četiri faze ubrzanog postupka ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja ili do otkaza zupčanika. Kako je ranije navedeno, cijeli postupak ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja je automatiziran i reguliran preko PLC jedinice, uz dodatnu mogućnost ručnog upravljanja koja služi kao osiguranje.

Kriteriji prema kojima se određuje otkaz ispitivanih polimernih i hibridnih zupčanika definirani su prekidom prijenosa ili naglim porastom okretnog momenta, te porastom ili opadanjem razine buke. Prvi kriterij otkaza zupčanika je prestanak prijenosa ili nagli porast okretnog momenta do kojeg dolazi zbog visokog površinskog tlaka na spoju između vratila i zupčanika, a što rezultira proklizavanjem zupčanika. Također, prekid prijenosa ili porast okretnog momenta može uslijediti i zbog loma u korijenu zuba ili otkaza uslijed plastičnog deformiranja ili taljenja zubi zupčanika. Promjena zahvata zbog nastalih oštećenja koja su karakteristična za polimerne zupčanike može izazvati kratkotrajna udarna opterećenja značajno većeg intenziteta od očekivanih. Prvi kriterij povezan s prijenosom okretnog momenta obuhvaćen je programom konfiguriranim u PLC jedinici koji je generiran preko predefiniраниh funkcijskih blokova unutar Siemens LOGO! 8.3 softvera. Drugi kriterij, a koji se prirodno nastavlja na prvi kriterij, uvjetovan je porastom ili opadanjem razine buke do koje dolazi zbog oštećenja zupčanika ili poremećaja u njihovom zahvatu. Očekivana razina buke kod PA 66 polimernih zupčanika proizvedenih injekcijskim prešanjem pri brzini vrtnje u iznosu od 1000 min^{-1} i okretnom momentu od 2 Nm iznosi između 90 dB i 95 dB [49]. S obzirom na uglavnom nižu kvalitetu aditivnom tehnologijom proizvedenih zupčanika u odnosu na injekcijski prešane, kao drugi kriterij je usvojena gornja razina buke od 105 dB (trajanje više od 30 sekundi) koja je određena preliminarnim ispitivanjima. Zbog svega navedenog, uz eksperimentalni sustav za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika s mehanički otvorenim tokom snage postavljeno je i

Testo 816-1 mjerilo razine buke (Slika 3.7) s mogućnošću mjerenja u području od 30 dB do 130 dB (od 20 Hz do 8 kHz), s rezolucijom od 0,1 dB i točnosti koja iznosi $\pm 1,4$ dB.



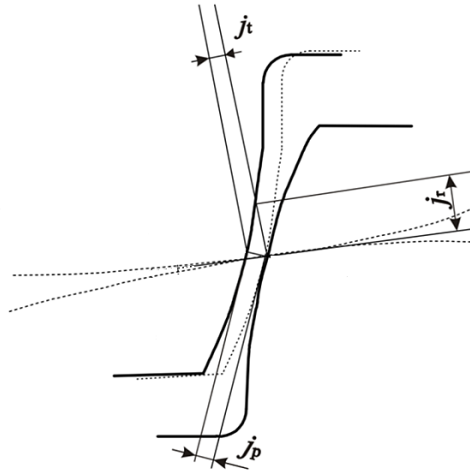
Slika 3.7 Mjerilo razine buke

Uređaj posjeduje integriranu memoriju s mogućnošću pohranjivanja 31 000 očitavanja uz razlučivost od jednog mjerenja u sekundi do čak jednog mjerenja svakih 0,125 sekundi. Svi podaci prikupljeni za vrijeme ispitivanja se pohranjuju na računalo, a iste je moguće analizirati pomoću računalnog softvera Testo 816-1. Kako bi se smanjio utjecaj buke koju generiraju motor, generator i drugi rotirajući dijelovi, mjerilo razine buke smješteno je neposredno u blizini zahvata ispitivanih polimernih i hibridnih zupčanika.

3.1.3. Ispitni zupčanici

Kako bi se eksperimentalno istražila toplinska i tribološka svojstva polimernih i hibridnih zupčanika konstruirani su parovi cilindričnih zupčanika s ravnim zubima i evolventnim ozubljenjem koji mogu ispuniti zahtjeve ispitivanja navedene u prethodnom potpoglavlju. Općenito, prednosti metalnih zupčanika s kosim zubima u odnosu na one s ravnim zubima su mirniji i tiši rad. U odnosu na metalne, polimerni zupčanici imaju izvrsna prigušna svojstva pa im je rad miran i tih. Zbog toga se polimerni zupčanici s kosim zubima rijetko primjenjuju. Trodimenzionalni računalom potpomognuti model (3D CAD) polimernih zupčanika i matrice hibridnih zupčanika konstruiran je pomoću softvera Autodesk Inventor Professional 2025, uz korištenje specijalnog modula za konstruiranje zupčanika (engl. Spur Gear Design). Geometrija ozubljenja definirana je prema osnovnom standardnom profilu zubne letve [91], a zubi polimernih i hibridnih zupčanika konstruirani su bez pomaka profila i drugih modifikacija

profila zuba. S obzirom na veliki koeficijent toplinskog širenja i lošu toplinsku vodljivost polimera, potrebno je osigurati bočnu zračnost da ne bi došlo do zaglavljivanja ili zaribavanja zubi zupčanika (Slika 3.8). Zbog toplinskog širenja, upijanja vlage (bubrenje, dimenzijska nestabilnost) te drugih utjecaja izazvanih radnim uvjetima ili opterećenjem (deformacije zuba, zračnost u ležajevima, graške u montaži), za polimerne zupčanike potrebno je osigurati veće bočne zračnosti u odnosu na metalne zupčanike. Potrebna bočna zračnost u pravilu se ostvaruje smanjenjem debljine zuba, a rjeđe povećanjem osnovog razmaka [83].



Slika 3.8 Bočna zračnost [21]

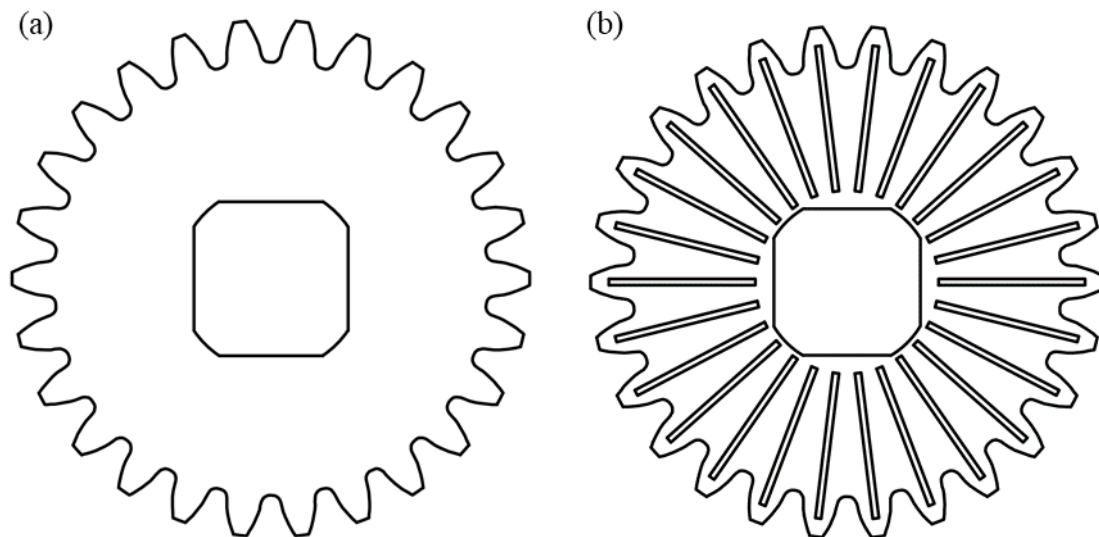
Bočna zračnost može se izraziti kao profilna zračnost (j_p) koja odgovara najkraćem razmaku dvaju položaja evolventnog profila spregnutih zupčanika, kružnom (obodnom) zračnosti (j_t) na obodu kinematskih kružnica ili radijalnom zračnosti (j_r) koja proizlazi iz kružne zračnosti [83]. Radijalna zračnost odgovara vrijednosti za koju treba smanjiti stvarnu mjeru osnovog razmaka da bi se dobio zahvat bez obodne zračnosti, odnosno vrijednosti za koju treba povećati osni razmak u slučaju smanjene zračnosti [92]. Potrebna bočna zračnost za toplinsko širenje zuba polimernih i hibridnih zupčanika ostvaruje se smanjenjem debljine zuba, a prema standardu koji vrijedi za metalne zupčanike, DIN 3967 [93], propisana su određena tolerancijska polja (od a do g) i širine tolerancijskih polja (od 21 do 30). Zorko i dr. [52] su u svom radu za zupčanike proizvedene konvencionalnim postupkom pomoću profilnog pločastog glodala izabrali toleranciju debljine zuba e25. Očekivana kvaliteta polimernih zupčanika proizvedenih aditivnom tehnologijom je niža u odnosu na injekcijskim prešanjem ili konvencionalnim postupkom proizvedene zupčanike, pa je u ovom radu je usvojena tolerancija debljine zuba e28. Dopuštena gornja granica tolerancije debljine iznosi - 0,040 mm, dok donja granica iznosi - 0,020 mm. Za navedenu toleranciju debljine zuba slijedi profilna zračnost j_p u granicama od 0,391 mm do 0,059 mm te radijalna zračnost j_r u granicama od 0,416 mm do 0,063 mm. Također, prema

DIN 3964 [94], usvojen je sustav jedinstvenog osnovnog razmaka [92] uz standardno odstupanje osnovnog razmaka od $\pm 0,023$ mm i tolerancijsko polje Js 8. Iako standard DIN 3964 propisuje mogućnost smanjenja osnovnog razmaka, zbog toplinskog širenja zubi polimernih zupčanika dozvoljeno je samo povećanje osnovnog razmaka (pozitivno odstupanje), a sve kako se ne bi poništila bočna zračnost. Evolventno ozubljenje nije osjetljivo na manje promjene osnovnog razmaka pa njegovo povećanje nema utjecaja na pravilnost zahvata zupčanog para. Naprotiv, blago povećanje osnovnog razmaka i time povećana zračnost mogu značajno produljiti radni vijek polimernih zupčanika. Povećanjem zračnosti zupčani par zahvaća više zraka u praznine između zubi što ima koristan učinak na odvođenje topline iz zahvata zupčanika [43]. Osnovni razmak se provjerava prije svakog ispitivanja pomoću pomičnog mjerila s digitalnim očitanjem Yato YT – 7201 uz točnost mjerenja od $\pm 0,02$ mm. Specifikacija parametara i pripadajuća geometrija ispitivanih polimernih zupčanika i matrice hibridnih zupčanika prikazana je u Tablici 3.3.

Tablica 3.3 Parametri i geometrija ispitivanih zupčanika

Parametar	Pogonski zupčanik	Gonjeni zupčanik
Modul, m [mm]	3	
Broj zubi, z	26	
Kut profila, α_n [°]	20	
Polumjer zaobljenja prijelazne krivulje, ρ_f [mm]	$0,35 \cdot m$	
Diobeni promjer, d [mm]	78	
Tjemeni promjer, d_a [mm]	84	
Podnožni promjer, d_f [mm]	70,5	
Temeljni promjer, d_b [mm]	73,296	
Širina zupčanika, b_z [mm]	12	10
Osnovni razmak, a_0 [mm]	$78 + 0,023$	
Stupanj prekrivanja profila, ε_α	1,621	
Mjera preko zubi, W_4 [mm]	$32,09^{+0,04}_{-0,19}$	
Debljina zuba na diobenoj kružnici, s [mm]	4,161	
Profilna zračnost, j_p [mm]	0,240	
Kružna (obodna) zračnost, j_t [mm]	0,255	
Radijalna zračnost, j_r [mm]	0,351	
Materijal	PA	

Ispitivani PA pogonski i gonjeni polimerni zupčanik (Slika 3.9 (a)) imaju jednaku konstrukcijsku izvedbu i geometriju ozubljenja, a jedina razlika među njima je njihova širina (b_z). Pogonski zupčanik je 2 mm širi kako ne bi došlo do utiskivanja u gonjeni zupčanik, ali i radi jednostavnijeg ostvarivanja zahvata. Isto vrijedi i za polimernu matricu hibridnih zupčanika (Slika 3.9 (b)) čija geometrija odgovara polimernom zupčaniku. Konstrukcijska izvedba tijela hibridnih zupčanika je prilagođena kako bi se mogli ugraditi metalni umeci.



Slika 3.9 Shematski prikaz (a) polimernog zupčanika i (b) polimerne matrice hibridnog zupčanika

Inicijalna veza između zupčanika i vratila je ostvarena preko standardnog pera (DIN 6885), zatim nestandardnog visokog pera i šesterokutnog rukavca. Nazivna mjera svih navedenih oblika spojeva između zupčanika i vratila je 17 mm, a niti jedan oblik nije se pokazao primjerenim za prijenos snage. Za vrijeme preliminarnih ispitivanja, nakon određenog vremena, uslijed zagrijavanja dolazi do omekšavanja polimernog materijala što rezultira popuštanjem veze te proklizavanjem zupčanika u odnosu na vratilo. Konačna izvedba veze zupčanika i vratila postignuta je čvrstim dosjedom preko spoja s poligonim profilnim rukavcem PC4 34 x 5 [95]. Budući da je prethodno konstruirano i izrađeno vratilo sa šesterokutnim rukavcem, na isti je navučena aluminijska čahura s poligonim profilom. U usporedbi s drugim navedenim oblicima rukavaca, poligoni profil omogućava prijenos većih snaga. Kod spoja s poligonim profilnim vratilima nosivost raste kontinuirano, čime je osigurano da zagrijavanje i posljedično omekšavanje polimernog materijala ne utječu na kvalitetu i pouzdanost spoja između zupčanika i vratila. Budući da nema nikakvih utora ili izbočina koncentracija naprezanja je mnogo manja nego kod ostalih spojeva. Dimenzije odabranog poligonog profila prikazane su u Tablici 3.4, a

najveći površinski tlak iznosi 0,49 MPa [96]. Dopušteni površinski tlak se određuje prema mekšem PA materijalu, ali za navedeni polimer taj podatak nije pronađen u literaturi.

Tablica 3.4 Dimenzije poligonih profila [96]

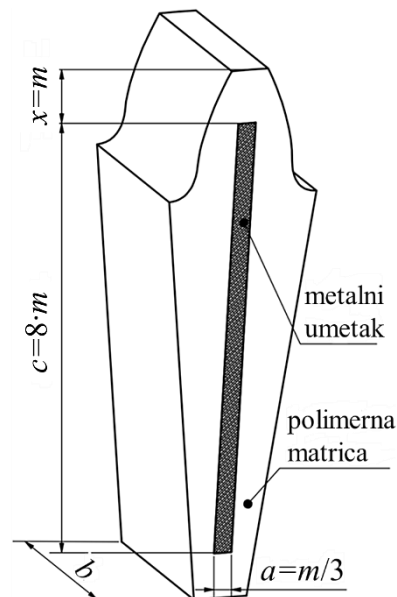
PC4 34 x 5	
Srednji promjer profila, D_{sr} [mm]	34
Ekscentričnost profila, e [mm]	5
Vanjski promjer profila, D_v [mm]	28
Unutarnji promjer profila, D_u [mm]	24

U usporedbi s polimernim zupčanicima jednostavne konstrukcijske izvedbe (Slika 3.9 (a)) i punog tijela zupčanika, polimerna matrica hibridnih zupčanika (Slika 3.9 (b)) je složenija i sadrži radijalne utore koji se pružaju od osi zupčanika prema van. Konstrukcijska izvedba polimerne matrice s utorima omogućuje ugradnju metalnih umetaka, a broj umetaka odgovara broju zubi zupčanika. Polimerna matrica s utorima i metalni umeci, čija geometrija odgovara polimernoj matrici, zajedno sačinjavaju hibridni zupčanik. Uloga metalnih umetaka implementiranih u polimernu matricu je poboljšanje prijenosa topline sa zuba zupčanika na tijelo zupčanika, kao i na okolinu. Uz toplinska svojstva, bolja mehanička svojstva metalnih umetaka u odnosu na polimere mogu povećati čvrstoću i krutost hibridnih zupčanika. Materijali metalnih umetaka prikladni za navedenu primjenu su čelik, aluminij i bakar, a u Tablici 3.5 su prikazana njihova najvažnija svojstva, kao i svojstva PA. S obzirom da se metalni umeci za hibridni zupčanik izrađuju iz lima na stroju za lasersko rezanje, u ovom istraživanju su korišteni samo metalni umeci od aluminija i čelika. Lasersko rezanje bakra za željene debljine limova (1 mm) nije izvedivo zbog tehnoloških razloga pa je bakar isključen iz istraživanja.

Tablica 3.5 Mehanička i toplinska svojstva materijala [64, 65]

Parametar	Čelik	Aluminij	Bakar	PA
Modul elastičnosti, [GPa]	206	69	107	2,3
Poissonov koeficijent	0,3	0,33	0,36	0,39
Gustoća, [kg/m ³]	7870	2702	8933	1140
Koeficijent toplinske vodljivosti, [W/m·K]	41,8	237	401	0,25
Specifični toplinski kapacitet materijala, [J/kg·K]	493	903	385	1590

Metalni umeci ugrađeni u polimernu matricu ostvaruju čvrsti dosjed kako bi se osigurao prijelaz topline s polimerne matrice na metalne umetke, ali i iz praktičnih razloga da se metalni umeci ne bi odvojili i ispali za vrijeme ispitivanja. Slika 3.9 (b) prikazuje najjednostavniju predloženu konstrukcijsku izvedbu hibridnog zupčanika. Konstrukcijska izvedba koju su predstavili Fernandes i dr. [64] konceptualno odgovara konstrukcijskoj izvedbi prikazanoj na Slici 1.24 (a), a istu je potrebno eksperimentalno validirati budući da je na njoj provedena isključivo analiza metodom konačnih elemenata. U odnosu na predloženu konstrukcijsku izvedbu [64], u ovom istraživanju su hibridni zupčanici prilagođeni kapacitetima eksperimentalnog postolja kao i prethodno izrađenim polimernim zupčanicima. Zbog navedenih razloga postoje razlike u dimenzijama utora u polimernoj matrici i pripadajućim metalnim umecima u odnosu na istraživanje [64]. Ipak, konstrukcijske izvedbe su slične da bi se sam koncept mogao eksperimentalno validirati. Slika 3.10 prikazuje jedan zub hibridnog zupčanika s pripadajućom geometrijom utora i odgovarajućeg metalnog umetka. Odabrani materijali metalnih umetaka koji su ugrađeni u ispitivane hibridne zupčanike su čelik (S275JR) i legura aluminija (AlMg3).

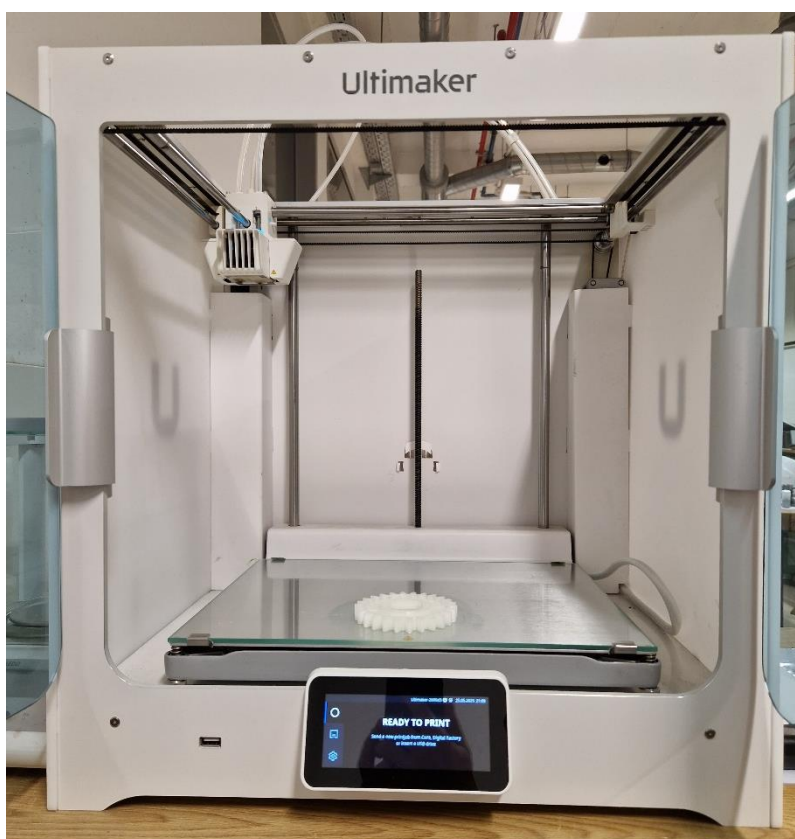


Slika 3.10 Geometrijske karakteristike utora u polimernoj matrici i metalnog umetka

Radijalni utori u polimernoj matrici i pripadajući metalni umeci odgovarajuće geometrije imaju oblik pravokutne trake sa sljedećim parametrima: debljina utora/metalnog umetka a , širina utora/metalnog umetka b , duljina utora/metalnog umetka c i udaljenost utora/metalnog umetka od vrha zuba x . Širina utora/metalnog umetka odgovara širinama pogonskog/gonjenog zupčanika, a svi ostali parametri su prikazani u ovisnosti o modulu, standardnoj mjeri veličine zupčanika (Tablica 3.3). Usvojeni modul zupčanika m iznosi 3 mm, čime je definirana širina utora/metalnog umetka u iznosu od 1 mm, duljina od 24 mm i udaljenost od vrha zuba od 3 mm.

3.1.4. Proizvodnja zupčanika

Proizvodnja polimernih zupčanika i polimerne matrice hibridnog zupčanika prethodno definirane geometrije započinje izradom 3D CAD modela, koji se zatim transformira u odgovarajući format potreban za izradu zupčanika FDM postupkom aditivne proizvodnje (engl. Standard Tessellation Language – .stl). 3D CAD model se transformira u niz horizontalnih presjeka koji se nanose sloj po sloj te tvore željeni model. Korišteni stroj za FDM postupak aditivne proizvodnje je Ultimaker S5 proizvođača Ultimaker (Slika 3.11), a upravljanje i postavke parametara proizvodnje se provode pomoću Ultimaker Cura 5.8.1 softvera.



Slika 3.11 Stroj za aditivnu proizvodnju Ultimaker S5

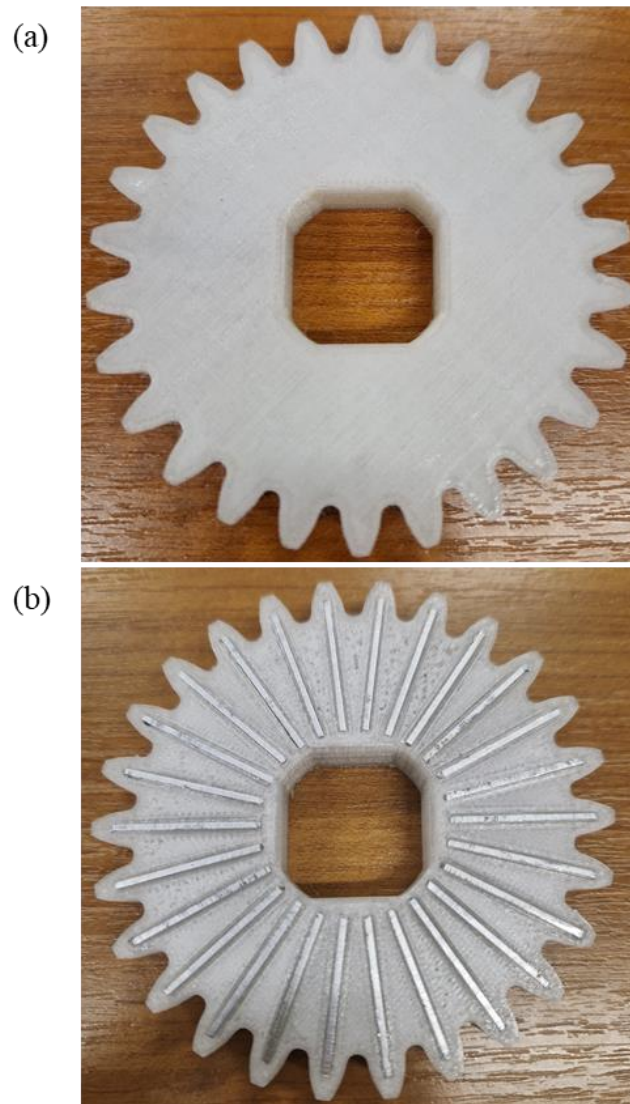
Ultimaker S5 stroj s volumenom izrade od 330 mm x 240 mm x 300 mm posjeduje glavu s dva ekstrudera materijala i grijanim sapnicama (od 180 °C do 280 °C), gdje se jedan ekstruder koristi za osnovni materijal od kojeg se proizvodi izradak. Drugi ekstruder namijenjen je za upotrebu pomoćnog materijala. Pomoćni materijal se uglavnom koristi za izradu potpora u slučaju dijelova izratka koji nisu oslonjeni (prevjesi), a kod nekih strojeva se može koristiti i za istovremeno dvostruko ispisivanje u svrhu brže proizvodnje. Promjeri grijanih sapnica iznose 0,4 mm, a za proizvodnju polimernih zupčanika i polimerne matrice hibridnih zupčanika koristi se PA polimer koji se nalazi u obliku filameta promjera 2,85 mm. Ultimaker S5 stroj

omogućava proizvodnju izradaka od raznih polimera poput ABS, PLA, PC ili PP. Polimer korišten u ovom radu je PA na bazi PA 6/66 kojeg karakterizira čvrstoća, izdržljivost i smanjena apsorpcija vlage u odnosu na PA 6 i PA 66. Kako bi se postigla optimalna ravnoteža između prijanjanja polimernog materijala za podlogu, brzine izrade, adhezije među slojevima te kvalitete PA polimernog zupčanika, kao i PA polimerne matrice hibridnog zupčanika, primijenjeni su parametri proizvodnje koje preporučuje proizvođač Ultimaker. Glavni parametar aditivne proizvodnje je rezolucija proizvodnje (ispisa) koja je ujedno i mjera kvalitete izratka. Rezolucija je određena debljinom nanesenog sloja gdje manja debljina nanesenog sloja rezultira boljom kvalitetom izratka. U slučaju polimernih zupčanika i polimerne matrice hibridnih zupčanika razlika u rezoluciji, a time i kvaliteti, će rezultirati različitom hrapavosti površine boka zuba zupčanika. Ultimaker S5 stroj za aditivnu proizvodnju posjeduje mogućnost izrade proizvoda s četiri različite rezolucije, redom od najveće debljine sloja i time najmanje kvalitete u iznosu od 0,2 mm (engl. Fast), zatim 0,15 mm (engl. Normal) te 0,1 mm (engl. Fine) i 0,06 mm (engl. Extra Fine). Najvažniji parametri proizvodnje FDM postupkom aditivne tehnologije, prema preporuci proizvođača, za PA materijal dani su u Tablici 3.6.

Tablica 3.6 Parametri FDM postupka proizvodnje i svojstva materijala [97]

Parametar	PA
Originalni naziv materijala	Ultimaker Nylon
Temperatura ispisa, [°C]	245
Temperatura radnog stola, [°C]	40
Brzina ispisa, [mm/s]	70
Stupanj ispune, [%]	100
Uzorak ispune	Rešetkasti (engl. Grid)
Modul elastičnosti (ASTM D3039), [MPa]	2331 ± 55
Vlačna čvrstoća (ASTM D3039), [MPa]	63,1 ± 1,1
Savojna čvrstoća (ISO 178), [MPa]	82,9 ± 3,1
Udarna žilavost (pri 23 °C), [kJ/m ²]	13,7 ± 1,2
Tvrdoća (ISO 7619-1)	81 (Shore D)
Temperaturna otpornost (postojanost), [°C]	89
Temperatura staklastog prijelaza (ISO 11357), [°C]	55,1
Gustoća (ISO 1183), [kg/m ³]	1140
Temperatura taljenja (ISO 11357), [°C]	188,4

Primijenjeni materijal PA na bazi PA 6/66 proizvođača Ultimaker dolazi u filamentu i dvije boje, mliječno bijeloj (engl. Transparent) i crnoj (engl. Black), a u ovom istraživanju je odabrana mliječno bijela boja radi boljeg uvida u trošenje površine boka zuba. PA je, uz POM, jedan od najčešće korištenih polimera, neovisno o kojem načinu proizvodnje je riječ, a prema Harsha i dr. [74], PA iskazuje najveću otpornost trošenju u usporedbi s drugim polimerima koji se koriste u aditivnoj tehnologiji (PLA, ABS). POM nije pogodan za aditivnu proizvodnju jer je energetski zahtijevan. Po završetku proizvodnje zupčanika polimerni zupčanici su odmah spremni za ispitivanje. Kod hibridnih zupčanika potrebno je prethodno ugraditi metalne umetke u polimernu matricu. Radi pouzdanosti rezultata proizvodi se po 3 para polimernih i hibridnih zupčanika koji se u nastavku eksperimentalno ispituju. Slika 3.12 prikazuje primjer jednog polimernog zupčanika i jednog hibridnog zupčanika, gdje je konstrukcijska izvedba hibridnog zupčanika izrađena prema Fernandes i dr. [64], s ciljem njene eksperimentalne validacije.



Slika 3.12 (a) Polimerni zupčanik i (b) hibridni zupčanik s aluminijskim umecima

3.2. Mjerna oprema

Ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika izvodi se u uvjetima bez podmazivanja pri temperaturi okoline od $23\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ i relativnoj vlažnosti od $50\% \pm 10\%$. Podaci o uvjetima okoline, temperaturi i relativnoj vlažnosti, prikupljaju se na Testo 175H1 uređaju (Slika 3.13) koji sadrži zapisnik podataka uz mogućnost pohranjivanja do milijun očitavanja, a uz popratni softver moguć je izvoz i pregled rezultata. Područje mjerenja temperature je od -20 °C do 55 °C s točnosti od $\pm 0,4\text{ °C}$, a točnost mjerenja relativne vlažnosti iznosi $\pm 1\%$.



Slika 3.13 Uređaj za mjerenje temperature i relativne vlažnosti Testo 175H1

Budući da se mehanička svojstva svih polimera značajno pogoršavaju s porastom temperature te da su neki polimeri poput PA skloni upijanju vlage, neophodno je uzeti u obzir okolne uvjete ispitivanja. Polimerni zupčanici i polimerna matrica hibridnih zupčanika proizvode se na stroju za aditivnu proizvodnju koji se nalazi u istom laboratoriju kao i eksperimentalni sustav za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika s mehanički otvorenim tokom snage, stoga ispitne zupčanike nije potrebno kondicionirati. U nastavku su navedeni ključni mjerni uređaji za određivanje zagrijavanja, trošenja i iskoristivosti ispitivanih zupčanika.

3.2.1. Zagrijavanje zupčanika

Za mjerenje zagrijavanja zupčanika korištena je dugovalna infracrvena termalna kamera Hikvision DS-2TD2637B-10/P (Slika 3.14) visoke rezolucije koja ima točnost mjerenja $\pm 0,5\text{ °C}$, unutar područja mjerenja od -20 °C do 150 °C . Mjerna infracrvena termalna kamera je kalibrirana i umjerena pomoću druge infracrvene termalne kamere FLIR E6, ali i uz pomoć referentnog kontaktnog termometra Fluke Calibration 1524 s točnosti mjerenja do čak $\pm 0,014\text{ °C}$ (pri temperaturama do 75 °C). Za vrijeme kalibriranja i umjeravanja odstupanja u

temperaturi između svih navedenih mjernih kamera su bila u granicama do 1 °C. Također, preliminarno je izmjerena temperatura zupčanika za vrijeme vrtnje te je uspoređena s temperaturom zupčanika po samom zaustavljanju. Najveća odstupanja rezultata su iznosila svega 0,8 °C. Polimerni i hibridni zupčanici nisu primjereni za temperature više od 120 °C pa se Hikvision DS-2TD2637B-10/P dugovalna infracrvena termalna kamera korištena u ovom radu, kao i uređaji korišteni za umjeravanje i kalibriranje, smatraju prikladnim.



Slika 3.14 Infracrvena termalna kamera Hikvision DS-2TD2637B-10/P

S obzirom na prozirnost atmosfere, kamere koje se danas uglavnom komercijalno koriste su dugovalne (engl. Long – Wave Infrared Radiation – LWIR) kamere kao što su i Hikvision DS-2TD2637B-10/P i FLIR E6, dok se rjeđe koriste srednjevalne (engl. Mid – Wave Infrared Radiation – MWIR) kamere [98]. Dugovalne kamere pokrivaju zračenje valnih duljina od 8 μm do 14 μm , a srednjevalne kamere pokrivaju zračenja od 2 μm do 5 μm .

Za pravilno određivanje temperature potrebno je definirati parametre infracrvene termalne kamere kao što su okolna temperatura, udaljenost između infracrvene termalne kamere i promatranog objekta i emisivnost materijala na kojem se određuje temperatura. Već je ranije spomenut uređaj Testo 175H1 koji pohranjuje podatke o okolnoj temperaturi i relativnoj vlažnosti te je okolna temperatura u kojoj se primjenjuje infracrvena termalna kamera postavljena na 23 °C. Korištena infracrvena termalna kamera je čvrsto pričvršćena na zid na

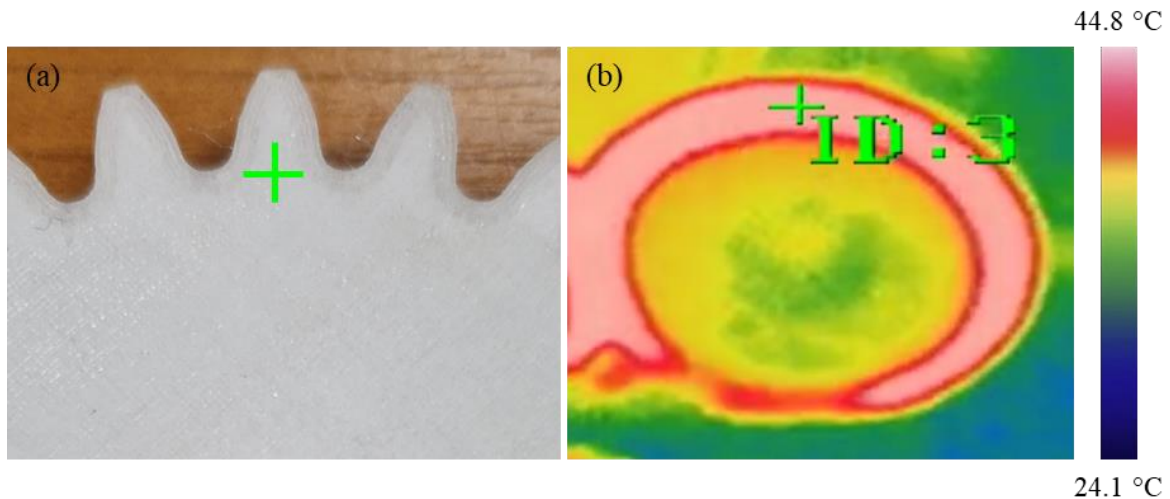
udaljenost od 600 mm u odnosu na promatrani zupčanik, a mrežno je povezana na računalo kako bi se jednostavnije mogli pohranjivati rezultati mjerenja. Udaljenost je bitna zbog utjecaja vlage koja se nalazi u zraku između kamere i promatranog objekta jer čestice vode u vlazi nisu prozirne u infracrvenom spektru pa emitiraju svoju toplinu ovisnu o temperaturi zraka, zbog čega je među parametrima potrebno unijeti i temperaturu okoline [98]. Osim okolne temperature i udaljenosti između infracrvene termalne kamere i promatranog objekta, za ispravno mjerenje temperature potrebno je definirati faktor emisivnosti (ε) materijala. Prema Letzelteru i dr. [43], faktor emisivnosti se može odrediti iz odnosa temperature ispitivanih zupčanika na sobnoj temperaturi, pri čemu je površina jednog zupčanika u svojoj izvornoj mliječno bijeloj boji, a drugi mora biti obojen u mat crnu boju (Slika 3.15). Mat crna boja povećava faktor emisivnosti promatranog tijela na vrijednost blizu 1 [99]. Iz odnosa temperature izmjerene na mliječno bijelom zupčaniku (22,1 °C) i temperature izmjerene na mat crnom zupčaniku (22,5 °C) određen je faktor emisivnosti ε aditivnom tehnologijom proizvedenog zupčanika od PA materijala koji iznosi 0,98. Također, faktor emisivnosti je određen i pomoću izolirajuće trake od polietilena (PE) poznatog faktora emisivnosti koji iznosi 0,95 [98]. S određenom temperaturom izmjerenom na traci mijenja se faktor emisivnosti, i to dok se ne dobije jednaka temperatura na polimernom zupčaniku mliječno bijele boje. Pri tom je važno da su površine jednoliko zagrijane pa je faktor emisivnosti određen na sobnoj temperaturi.



Slika 3.15 Određivanje faktora emisivnosti ε

Zagrijavanje zupčanika se određuje mjerenjem temperature tijela zupčanika T_{bulk} , na mjestu dovoljno udaljenom od zahvata zupčanika gdje se razvija kratkotrajna trenutna temperatura u zahvatu T_{flash} . Kako bi se izbjegao utjecaj trenutne temperature u zahvatu T_{flash} , temperatura tijela zupčanika T_{bulk} se mjeri u korijenu zuba ispitivanog polimernog i hibridnog gonjenog

zupčanika. Slika 3.16 prikazuje točku u korijenu zuba polimernog zupčanika na kojoj se mjeri temperatura tijela zupčanika T_{bulk} (Slika 3.16 (a)), te termalnu sliku gonjenog polimernog zupčanika za vrijeme ispitivanja (Slika 3.16 (b)). Termalna slika je prikazana u paleti duginih boja (engl. Rainbow Shading) kako bi se jasnije razlikovale varijacije u temperaturi.



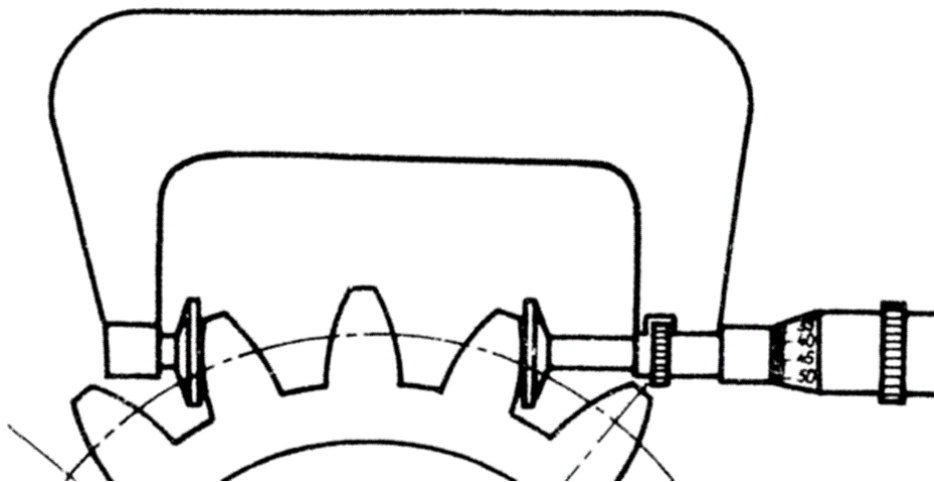
Slika 3.16 (a) Mjerenje temperature tijela zupčanika T_{bulk} i (b) termalna slika zupčanika

Temperatura tijela zupčanika T_{bulk} se mjeri na gonjenom zupčaniku jer je, u usporedbi s pogonskim zupčanikom, gonjeni zupčanik s 2 mm manjom širinom toplinski više izložen i opterećen. Zbog toga ima manju površinu za izmjenu topline konvekcijom s okolinom. Također, manji volumen gonjenog zupčanika vodi ka manjem toplinskom kapacitetu tijela, tj. manjoj količini topline koju tijelo može primiti, što rezultira bržim zagrijavanjem zupčanika. Zbog svega navedenog, infracrvena termalna kamera je pričvršćena na zid i usmjerena samo na gonjeni polimerni ili hibridni zupčanik. Kamera nema mogućnost pomicanja te je tako osigurana točnost i ponovljivost mjerenja. Temperatura tijela zupčanika T_{bulk} se mjeri tri puta u svakoj od četiri faze, odnosno svakih 5 minuta za vrijeme trajanja ubrzanog postupka ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja. Temperatura tijela zupčanika T_{bulk} se mjeri u radu, a kako temperatura varira za vrijeme vrtnje zupčanika, pohranjuje se srednja (prosječna) temperatura u promatranom vremenskom okviru od 5 sekundi.

3.2.2. Trošenje zupčanika

Trošenje boka zuba ispitivanih polimernih i hibridnih zupčanika određeno je mjerom preko zubi te promjenom ili gubitkom mase zupčanika. Određivanje mjere preko zubi i mase zupčanika se provodi prije i nakon ubrzanog postupka ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja te vrijedi za sve polimerne i hibridne zupčanike. Mjera preko zubi (Slika 3.17) predstavlja

posredni način mjerenja i kontroliranja debljine zuba cilindričnih zupčanika s vanjskim ozubljenjem. Mjera preko zubi podrazumijeva mjerenje razmaka bokova preko određenog broja zubi, a u ovom slučaju mjerni broj zubi je četiri (4). Debljina zuba zupčanika ima ključan utjecaj na bočnu zračnost potrebnu za toplinsko širenje zubi uslijed zagrijavanja za vrijeme rada. Usporedbom teorijske vrijednosti mjere preko zubi W_4 (Tablica 3.3) s mjerama prije i nakon ispitivanja određeno je trošenje boka zuba, ali i kvaliteta polimernih zupčanika i polimerne matrice hibridnih zupčanika proizvedenih aditivnom tehnologijom. U primijenjenoj konfiguraciji eksperimentalnog sustava za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika, promatrajući smjer vrtnje ispitivanih zupčanika, zahvat zubi je jednosmjernan. Smjer vrtnje pogonskog zupčanika je u smjeru kazaljke na satu što znači da su uvijek spregnuti samo desni bokovi pogonskog i gonjenog zupčanika, pa se trošenje boka zuba odnosi na desne bokove zubi, odnosno aktivne bokove preko kojih se prenosi okretni moment. Mjera preko zubi se određuje pomoću mikrometra s tanjurićima Mitutoyo 223-102 s mjernim područjem između 25 mm i 50 mm, rezolucijom očitavanja (mjernom skalom) od 0,01 mm i točnosti od $\pm 0,004$ mm.



Slika 3.17 Mjera preko 3 zuba [83]

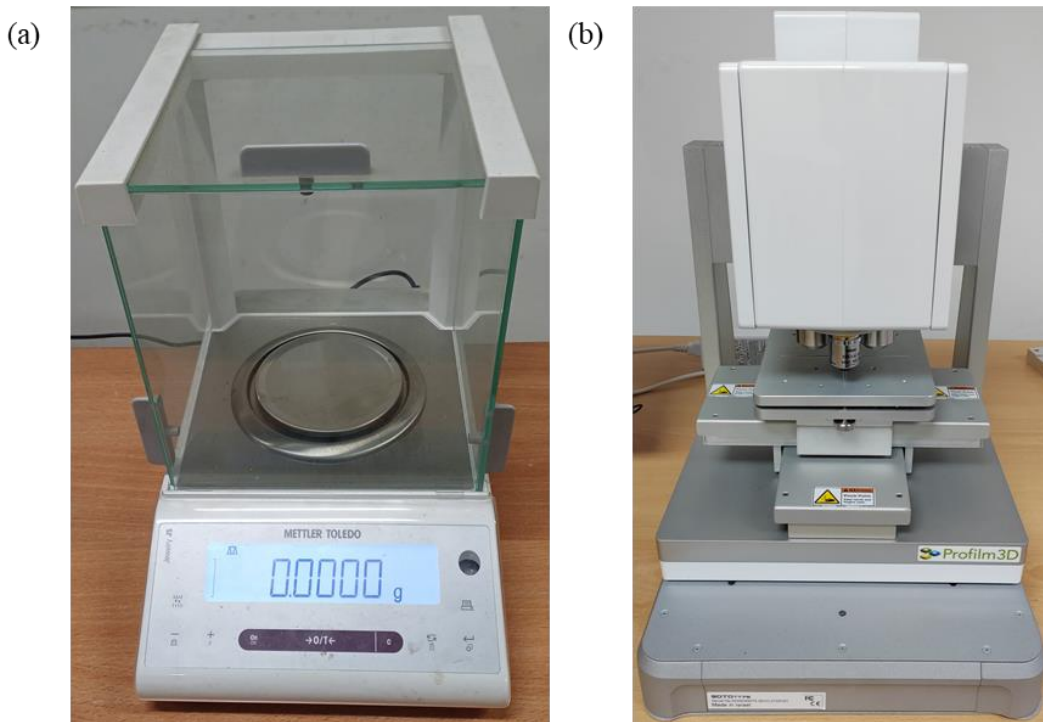
Masa polimernih i hibridnih zupčanika se, kao i mjera preko zubi, određuje prije i poslije svakog ispitivanja pomoću vage visoke preciznosti Mettler Toledo JS1603C s rezolucijom očitavanja od 0,0001 g (Slika 3.18 (a)). Slika 3.18 (b) prikazuje optički 3D profilometar Profilm3D koji se koristi za beskontaktnu trodimenzionalnu profilometrijsku analizu te mjerenje profila i hrapavosti površina bokova zuba. Interferometrija bijele svjetlosti omogućuje mjerenje profila i hrapavosti površina čak do $0,05 \mu\text{m}$, a za mjerenje hrapavosti površina primjenjuju se ISO 4287 [100] i ISO 25178 [101] standardi. Kao referentni parametar unutar mjernog područja upotrebljava se srednje aritmetičko odstupanje profila R_a , što je i uobičajeno u strojarskoj praksi. Također, s obzirom na mogućnosti profilometra određuje se i srednja

aritmetička vrijednost visina točaka referentne površine Sa . Srednje aritmetičko odstupanje profila Ra se mjeri duž referentne dužine (L), srednja aritmetička vrijednost visina točaka Sa određuje se za mjernu površinu (A_{xy}), a računaju se prema izrazima:

$$Ra = \frac{1}{L} \int |Z(x)| dx \quad (3.1)$$

$$Sa = \frac{1}{A_{xy}} \iint |Z(x,y)| dx dy \quad (3.2)$$

Vrijednost ordinate (Z) je visina mjerenog profila u bilo kojoj točki (x, y), a smatra se negativnom ako leži ispod referentne osi, dok se u suprotnom smatra pozitivnom. Mjerno područje je veličine 4 mm x 1,5 mm, a mjerenja se provode okomito na smjer nanošenja slojeva pri FDM procesu aditivne proizvodnje polimernih i hibridnih zupčanika.



Slika 3.18 (a) Precizna vaga i (b) 3D profilometar

3.2.3. Stupanj iskoristivosti zupčanika

Vrijednosti okretnog momenta na ulazu i izlazu iz prijenosnika očitavaju se pomoću uređaja za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje te se pohranjuju u memoriju Siemens LOGO! PLC jedinice. Očitavanje okretnog momenta i brzine vrtnje je tri puta u jednoj minuti, odnosno svakih 20 sekundi. To znači da je jedno očitavanje srednja vrijednost okretnog momenta za vrijeme mjerenja od 20 sekundi. U radu se ispituje zupčani par kod kojeg pogonski i gonjeni zupčanik imaju jednak broj zubi, odnosno prijenosni omjer koji iznosi 1. Zbog takvog prijenosnog omjera

se jednostavno može odrediti stupanj iskoristivosti η_z zupčanog para. Za takav slučaj stupanj iskoristivosti jednak je omjeru okretnog momenta na gonjenom zupčaniku (T_2) i okretnog momenta na pogonskom zupčaniku (T_1). Na temelju izmjerenih vrijednosti moguće je odrediti najveći stupanj iskoristivosti u svakoj od četiri faze, kao i srednju vrijednost te osciliranje stupnja iskoristivosti za vrijeme ubrzanog postupka ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja. Prema Slici 3.1 vidljivo je da su između uređaja za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje ugrađena po dva para ležajeva (prema zahtjevima proizvođača KTR) pa je kod izračuna stupnja iskoristivosti potrebno izuzeti gubitke u ležajevima. Ako se odbiju gubici u ležajevima, moguće je odrediti točan stupanj iskoristivosti ispitivanih polimernih i hibridnih zupčanih parova. Gubici snage u ležaju (P_L) ovise o vrsti ležaja i obliku valjnog tijela, koeficijentu trenja u ležaju (μ_L), radijalnom opterećenju (F_{rL}) i obodnoj brzini ležaja (v_L), a računaju se prema izrazu:

$$P_L = \mu_L \cdot F_{rL} \cdot v_L \quad (3.3)$$

Koeficijent trenja za radijalni kuglični ležaj (μ_L) iznosi 0,0018 [102], dok je obodna brzina ležaja (v_L) pri brzini vrtnje 1000 min^{-1} jednaka 1,5 m/s. Radijalno opterećenje ležaja (F_{rL}) ovisi o okretnom momentu koji se prenosi pa se razlikuje za svaku od četiri faze. Pod pretpostavkom da svaki od ležajeva u paru preuzima jednoliko opterećenje, slijede gubici snage po paru ležajeva (P_L) koja je ista za pogonsku i gonjenu stranu (Tablica 3.7).

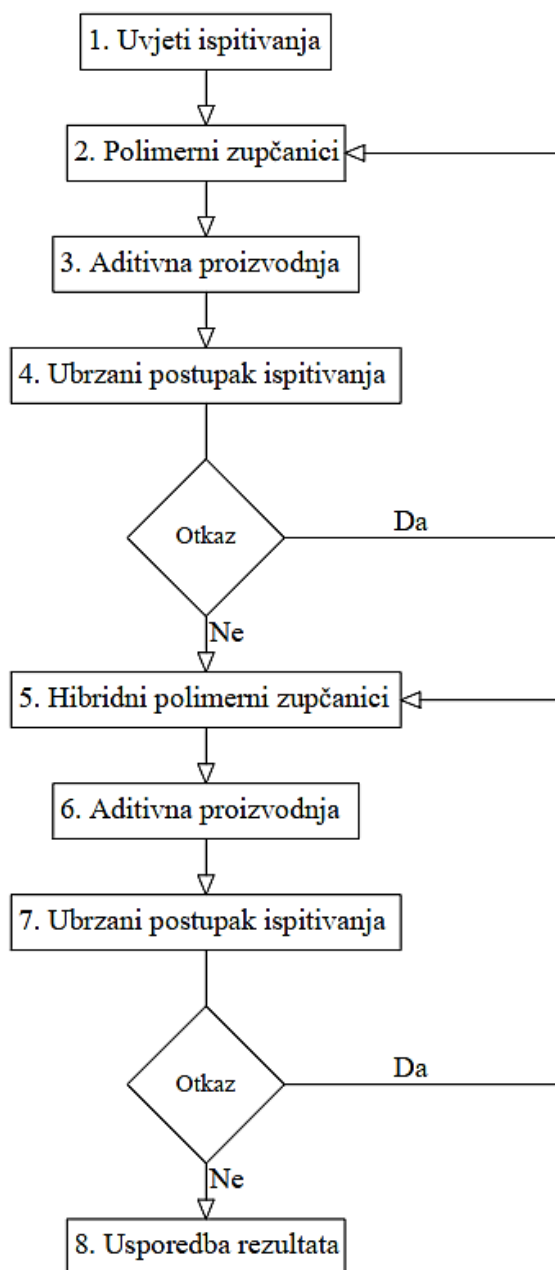
Tablica 3.7 Gubici snage u ležajevima u ovisnosti i opterećenju

Okretni moment [Nm]	Snaga na zupčanom paru [W]	Radijalno opterećenje [N]	Gubici snage u paru ležajeva [W]	Korekcija stupnja iskoristivosti [%]
1,6	167	44	0,24	0,14
2	209	54	0,29	0,14
2,4	251	66	0,36	0,14
2,9	304	79	0,43	0,14

Iz Tablice 3.7 je vidljivo da gubici snage u ležajevima imaju zanemariv udio u odnosu na ukupnu snagu na prijenosniku, a samim time i utjecaj na ukupni stupanj iskoristivosti, pa se oni mogu zanemariti. Prema podacima iz Tablice 3.7 proizlazi stupanj iskoristivosti svakog pojedinog ležaja koji pri prijenosu navedenih snaga iznosi 99,8 %.

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju prezentirani su rezultati eksperimentalnog istraživanja radnih značajki polimernih i hibridnih zupčanih parova koji su ispitivani pri uvjetima opisanim u prethodnom poglavlju. Slika 4.1 prikazuje dijagram toka primijenjene metodologije ispitivanja polimernih i hibridnih zupčanika.



Slika 4.1 Metodologija eksperimentalnog ispitivanja

Određivanje radnih značajki polimernih i hibridnih zupčanika podrazumijeva njihovo ispitivanje pri određenom opterećenju (okretnom momentu) i brzini vrtnje, a isti su definirani u prethodnom poglavlju. U eksperimentalnom istraživanju je primijenjen ubrzani postupak

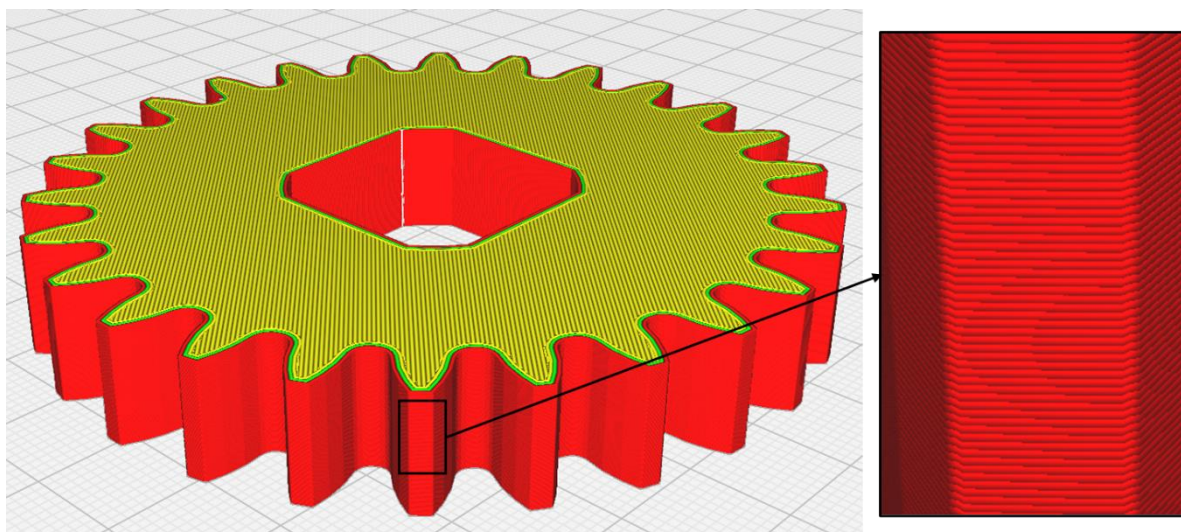
ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja (od 1,6 Nm do 2,9 Nm) pri brzini vrtnje od 1000 min^{-1} u uvjetima bez dodatnog sredstva za podmazivanje (na suho), a detaljan postupak je opisan u potpoglavlju 3.1.2. Prema kapacitetima i mogućnostima eksperimentalnog postolja s mehanički otvorenim tokom snage te iz rezultata preliminarnih ispitivanja prema definiranim opterećenjima i brzini vrtnje, određeni su geometrija i konstrukcijski oblik polimernih zupčanika (potpoglavlje 3.1.3.). Također, određena je inicijalna geometrija ozubljenja proračunom trenutne kratkotrajne temperature u zahvatu T_{flash} prema VDI 2736-2 [10], uz uvjet da ona ne prelazi $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Uz sve navedeno, provedena su preliminarna eksperimentalna ispitivanja na polimernim zupčanicima definirane geometrije ozubljenja. Konstrukcijski oblik polimernih zupčanika je jednostavni zupčanik punog tijela, bez provrta, paoka, rebara i sl., a zupčanici se proizvode FDM postupkom aditivne tehnologije kako je opisano u potpoglavlju 3.1.4. Isti je postupak zatim primijenjen na već postojeće, ali i nove, konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika, a u konačnici su uspoređene radne značajke polimernih i hibridnih zupčanika. Također, eksperimentalno je validirana postojeća konstrukcijska izvedba hibridnih zupčanika, predstavljena u radu [64]. U slučaju otkaza određene konstrukcijske izvedbe hibridnog zupčanika ona nije uzeta u razmatranje.

Kroz sljedeća potpoglavlja ovog rada prikazano je zagrijavanje, trošenje i iskoristivost polimernih i hibridnih zupčanika, pri čemu su polimerni zupčanici proizvedeni s dvije različite rezolucije (kvalitete). Uspoređeni su rezultati navedenih radnih značajki polimernih i hibridnih zupčanika, a za najbolju konstrukcijsku izvedbu hibridnih zupčanika, prema kriterijima najmanjeg zagrijavanja i trošenja, izvršena je statistička obrada eksperimentalnih rezultata s ciljem dobivanja matematičkih modela i optimizacije radnih značajki hibridnih zupčanika.

4.1. Polimerni zupčanici

U ovom potpoglavlju prikazani su rezultati mjerenja temperature tijela zupčanika T_{bulk} , trošenja i stupnja iskoristivosti η_z kod polimernih zupčanika proizvedenih FDM procesom aditivne proizvodnje. Inicijalno su proizvedeni i eksperimentalno ispitani polimerni zupčanici proizvedeni u dvije različite rezolucije ili kvalitete, s ciljem određivanja utjecaja hrapavosti površine boka zuba na radne značajke polimernih zupčanika. Hrapavost površine boka zuba određena je debljinom nanesenog sloja rastaljenog polimernog materijala gdje manja debljina nanesenog sloja podrazumijeva manju hrapavost površine boka zuba i samim time kvalitetniji zupčanik. Prilikom proizvodnje FDM procesom zupčanici se sastoje od niza slojeva nanesenog materijala na način da je smjer slojeva okomit na čeonu ravninu zupčanika. Širina zupčanika

odgovara umnošku broja nanesenih slojeva i debljine svakog pojedinačnog sloja, a razlika u debljini slojeva utječe na hrapavost površine boka zuba (Slika 4.2).



Slika 4.2 Model polimernog zupčanika (Ultimaker Cura)

U ovom radu proizvedeni su i ispitani polimerni zupčanici s dvije rezolucije (kvalitete), polimerni zupčanici veće rezolucije (engl. Extra Fine) s debljinom nanesenog sloja u iznosu od 0,06 mm i polimerni zupčanici manje rezolucije (engl. Fine) s debljinom nanesenog sloja u iznosu od 0,1 mm. Nanošenjem slojeva manje debljine poboljšavaju se mehanička svojstva izratka, u ovom slučaju zupčanika, radi ostvarivanja većeg stupnja polimerizacije, boljih adhezijskih veza i veće gustoće izratka [103]. Međutim, kod zupčanika veće rezolucije potrebno je, za istu debljinu izratka, nanijeti veći broj slojeva (manje debljine) nego što je to slučaj kod zupčanika manje rezolucije, što iziskuje više vremena i energije za proizvodnju. Usporedba broja slojeva i vremena potrebnog za proizvodnju polimernog zupčanika veće i manje rezolucije (kvalitete) prikazana je u Tablici 4.1.

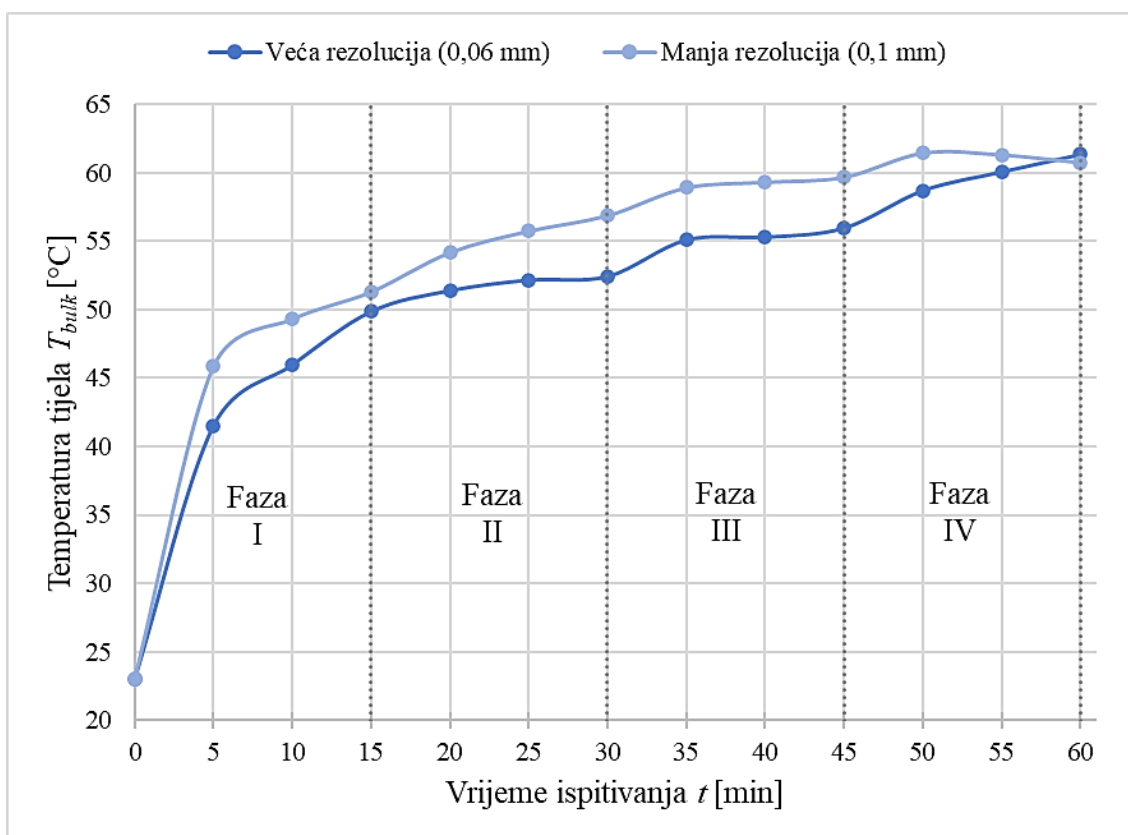
Tablica 4.1 Broj nanesenih slojeva i vrijeme za proizvodnju u ovisnosti o rezoluciji

Polimerni zupčanik	Veća rezolucija (0,06 mm)	Manja rezolucija (0,1 mm)
Pogonski	200 (13 h i 15 min)	120 (7 h i 57 min)
Gonjeni	166 (11 h i 26 min)	100 (6 h i 52 min)

Može se zaključiti da debljina nanesenog sloja utječe na kvalitetu zupčanika odnosno hrapavost površine boka zuba, ali i na vrijeme i količinu energije potrebne za proizvodnju svakog od članova zupčanog para. U nastavku su prikazani rezultati zagrijavanja, trošenja i iskoristivosti polimernih zupčanih parova proizvedenih u dvije različite rezolucije, uz jednaku geometriju ozubljenja i iste parametre FDM procesa aditivne proizvodnje.

4.1.1. Zagrijavanje polimernih zupčanika

Cilj eksperimentalnih ispitivanja provedenih u ovom radu je odrediti temperaturu tijela polimernih zupčanika T_{bulk} za vrijeme rada pri određenim uvjetima ispitivanja. Temperatura tijela zupčanika T_{bulk} koja se mjeri u području korijena zuba zupčanika (Slika 3.16), a koja je određena količinom generirane i odvedene topline, za razliku od kratkotrajne trenutne temperature u zahvatu koju je teško mjeriti, mjerena je za vrijeme cijelog postupka ispitivanja. Temperatura tijela mjeri se na gonjenom zupčaniku koji je, u odnosu na pogonski zupčanik, toplinski izloženiji i opterećeniji budući da ima manju širinu te posljedično manju površinu dostupnu za izmjenu topline s okolinom. Također, zbog manjeg volumena posjeduje i manji toplinski kapacitet što rezultira bržim zagrijavanjem gonjenog zupčanika u odnosu na pogonski. Zagrijavanje polimernih zupčanika ima značajan utjecaj na njihovo trošenje i radni vijek, pa je u nedostatku standarda ili normi te iskustvenih vrijednosti potrebno provoditi eksperimentalno istraživanje u uvjetima što sličnijim stvarnim. Rezultati mjerenja temperature tijela polimernih zupčanika proizvedenih s dvije različite rezolucije prikazani su na Slici 4.3. Srednja temperatura tijela zupčanika T_{bulk} zabilježena je svakih 5 minuta kroz 4 faze ubrzanog postupka ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja.



Slika 4.3 Temperatura tijela T_{bulk} polimernih zupčanika različite rezolucije (kvaliteta)

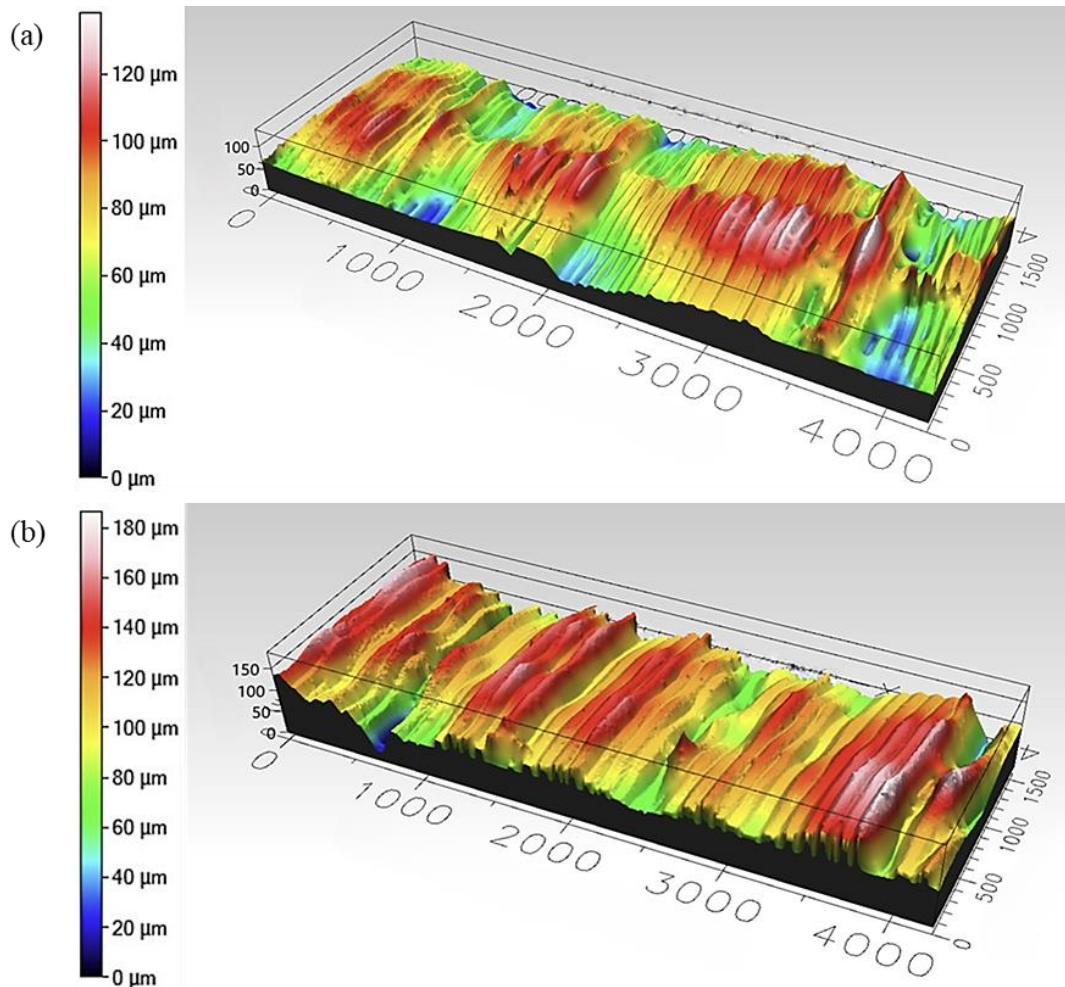
Provedeno eksperimentalno istraživanje potvrdilo je razlike u zagrijavanju i toplinskom ponašanju polimernih zupčanika proizvedenih s dvije različite rezolucije. Početna temperatura je izmjerena temperatura okoline ($23\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$), a kod obje rezolucije izrade polimernih zupčanika uočeno je povećanje temperature s povećanjem narinutog opterećenja odnosno okretnog momenta. Međutim, polimerni zupčanici proizvedeni s manjom rezolucijom brže su se zagrijavali u odnosu na polimerne zupčanike veće rezolucije. Na početku svake od četiri faze primjetan je skok u temperaturi nakon čega gotovo dolazi do stabilizacije temperature zbog uspostavljanja toplinske ravnoteže.

Usporedbom temperature tijela T_{bulk} polimernih zupčanika kroz sve četiri faze postupka ispitivanja zabilježena je od $1,4\text{ °C}$ do $4,4\text{ °C}$ veća temperatura polimernih zupčanika proizvedenih u manjoj rezoluciji. Iznimka je mjerenje temperature tijela na kraju posljednje (četvrte) faze gdje su temperature bile gotovo jednake bez obzira na rezoluciju zupčanika. Temperatura tijela polimernih zupčanika na kraju posljednje faze stabilizirala se na oko 61 °C , a razlog je ugaćavanje površine boka zuba tijekom rada. Prolaskom zuba kroz zahvat bok zuba zupčanika izložen je kontaktnim naprezanjima, a kroz sve točke zahvata (osim kinematskog pola) postoji i relativno gibanje (klizanje) između bokova zubi, zbog čega se površina boka zuba zupčanika troši (abrazijsko trošenje) te dolazi do ugaćavanja. Zbog male tvrdoće polimernog materijala omogućeno je relativno brzo ugaćavanje površine bokova zubi. Unatoč većoj početnoj hrapavosti površine boka zuba polimernog zupčanika manje rezolucije zbog koje se on više zagrijavao, nakon 60 minuta ispitivanja temperatura tijela zupčanika bila je jednaka kao i kod polimernog zupčanika veće rezolucije.

Kako je već ranije objašnjeno, rezolucija (kvaliteta) polimernog zupčanika proizvedenog FDM procesom aditivne tehnologije određena je debljinom nanesenog sloja koji se proteže u smjeru širine zupčanika, što izravno utječe na hrapavost površine boka zuba. U tu svrhu provedeno je mjerenje hrapavosti površine boka zuba pomoću optičkog profilometra Profilm3D. Hrapavost površine boka zuba određena je za polimerne zupčanike proizvedene s obje rezolucije. Također, izmjerena je hrapavost površine boka zuba polimernog zupčanika prije ispitivanja, ali i nakon ispitivanja, a sve kako bi se objasnilo izjednačavanje temperature na kraju posljednje faze koje je posljedica ugaćavanja površine boka zuba.

Slika 4.4 prikazuje razliku u debljini nanesenog sloja između polimernih zupčanika proizvedenih FDM procesom aditivne proizvodnje s dvije različite rezolucije. Prikazani uzorci preuzeti s boka zuba izmjereni su po završetku proizvodnje, a uzorak veličine $4\text{ mm} \times 1,5\text{ mm}$ izmjeren je u području kinematske kružnice. Za tu svrhu zasebno je proizveden samo jedan zub

zupčanika, kako bi se na profilometru mogla odrediti površinska hrapavost zupčanika prije ispitivanja. Evidentna je razlika u debljini nanesenog sloja i broju slojeva između polimernog zupčanika veće rezolucije (Slika 4.4 (a)) i drugog proizvedenog u manjoj rezoluciji (Slika 4.4 (b)). Veći broj nanesenih slojeva manje debljine karakteriziraju zupčanik veće rezolucije, dok je za zupčanik manje rezolucije karakterističan manji broj nanesenih slojeva, ali veće debljine.

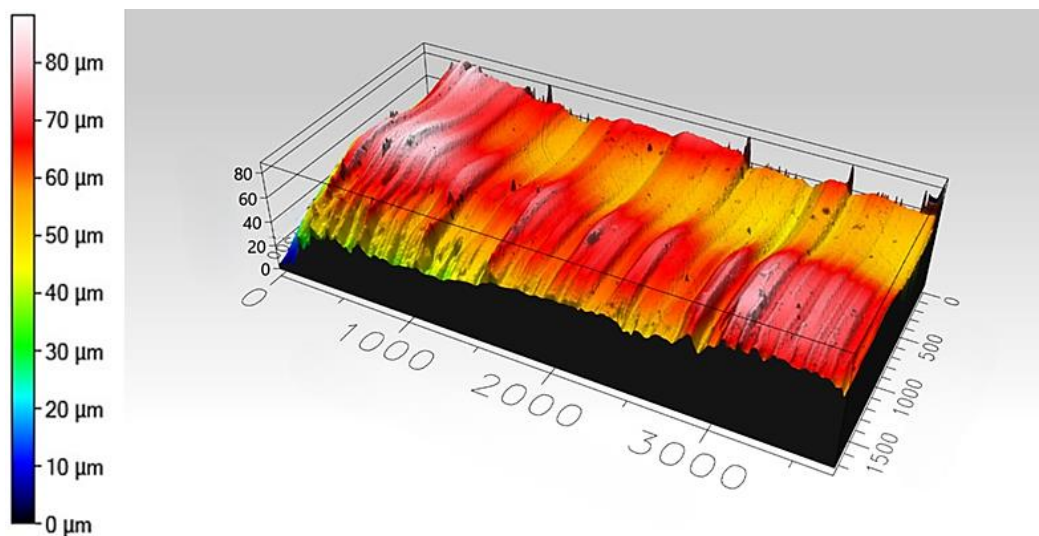


Slika 4.4 Površinska hrapavost boka zuba polimernog zupčanika (a) veće i (b) manje rezolucije prije ispitivanja

Kao referenti parametar hrapavosti površine boka zuba unutar mjernog područja usvojeno je srednje aritmetičko odstupanje profila Ra , a izmjerena je manja hrapavost površine boka zuba polimernog zupčanika veće rezolucije. Srednje aritmetičko odstupanje profila Ra polimernog zupčanika veće rezolucije iznosi 0,81 μm , dok za zupčanik manje rezolucije iznosi 1,35 μm . Iako se ne koristi u općem strojarstvu, isto potvrđuje i srednja aritmetička vrijednost visina točaka referentne površine Sa . Za zupčanik veće rezolucije ona iznosi 18,72 μm , a za polimerni zupčanik manje rezolucije 19,64 μm . Srednje aritmetičko odstupanje profila Ra se mjeri duž linije, a srednja aritmetička vrijednost visina Sa se mjeri unutar površine mjerenja. Svakako,

oba parametra ukazuju da veća hrapavost polimernog zupčanika proizvedenog s manjom rezolucijom uzrokuje veće trenje uslijed klizanja bokova zubi spregnutih zupčanika. Samim time, generira se više topline u zahvatu, što objašnjava brže zagrijavanje i veću temperaturu tijela zupčanika manje rezolucije za vrijeme ispitivanja.

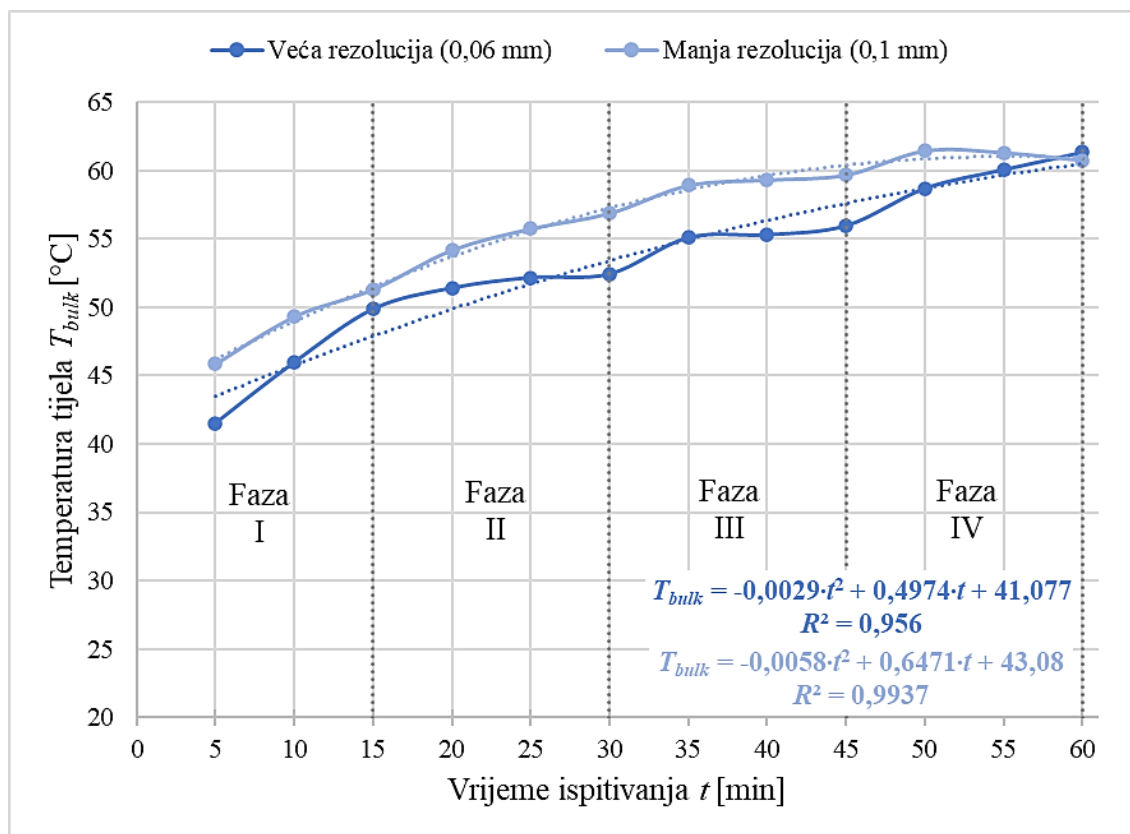
Mjerenjem hrapavosti površine boka zuba nakon ispitivanja pomoću ubrzanog postupka ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja uočeno je smanjenje površinske hrapavosti čime je potvrđeno uglačavanje površine, a koje objašnjava izjednačavanje temperature na kraju posljednje faze. Razlike u srednjem aritmetičkom odstupanju profila Ra između polimernih zupčanika veće i manje rezolucije nakon ispitivanja gotovo su zanemarive. Na zupčaniku veće rezolucije izmjereno srednje aritmetičko odstupanje profila iznosi $0,16 \mu\text{m}$, a na zupčaniku manje rezolucije $0,20 \mu\text{m}$. Izmjerena srednja aritmetička visina Sa iznosi oko $7 \mu\text{m}$ za obje rezolucije zupčanika. Slika 4.5 prikazuje hrapavost površine boka zuba u području oko kinematske kružnice (nakon ispitivanja) s vidljivim tragovima koji odgovaraju smjeru klizanja bokova zubi, a ista pojava je uočena kod zupčanika proizvedenih u obje rezolucije. Kako je nakon ispitivanja bilo potrebno izrezati jedan zub ispitivanih zupčanika, zbog određivanja površinske hrapavosti, zub nije idealno izrezan pa je uzet uzorak veličine $3,5 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm}$.



Slika 4.5 Površinska hrapavost boka zuba polimernog zupčanika veće rezolucije nakon ispitivanja

Rezolucija izrade PA zupčanika FDM procesom aditivne proizvodnje ima značajan utjecaj na zagrijavanje polimernih zupčanika. Iako je na kraju postupka ispitivanja temperatura tijela zupčanika veće i manje rezolucije bila jednaka, kroz gotovo sve četiri faze zabilježeno je veće zagrijavanje polimernog zupčanika manje rezolucije. Izjednačavanje temperature tijela na kraju posljednje faze rezultat je uglačavanja površine boka zuba.

Konačno, Slika 4.6 prikazuje dijagram promjene temperature tijela T_{bulk} polimernih zupčanika veće i manje rezolucije, s naznačenim aproksimacijama, tj. linijama trenda rasta temperature tijela, a na dijagramu su prikazani i polinomni matematički modeli za predviđanje temperature. Kako bi se dobio reprezentativniji i pouzdaniji model, u prikazanom dijagramu isključene su vrijednosti okolne temperature T_{amb} na samom početku mjerenja koja je iznosila 23 °C.



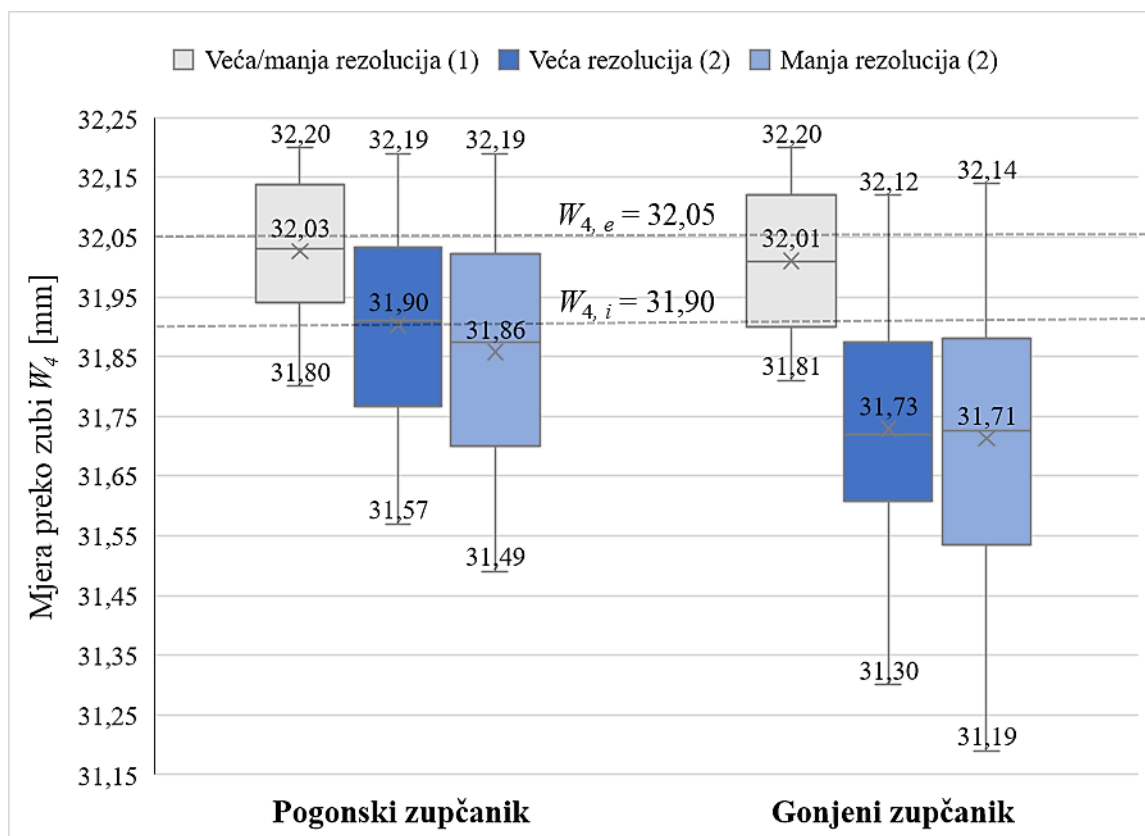
Slika 4.6 Matematički modeli za predviđanje temperature tijela T_{bulk} polimernih zupčanika s naznačenim linijama trenda

Uz regresijske jednadžbe (polinom drugog reda) koje opisuju promjenu temperature tijela T_{bulk} polimernih zupčanika veće i manje rezolucije, priložen je i pripadajući koeficijent determinacije, zbroj kvadrata odstupanja R^2 . Zbroj kvadrata odstupanja R^2 može imati vrijednosti od nula do jedan, a što je on bliži vrijednosti jedan analizirani model se smatra pouzdanijim i reprezentativnijim. Regresijske jednadžbe za predviđanje temperature tijela polimernih zupčanika veće i manje rezolucije imaju visok koeficijent determinacije te se smatraju reprezentativnima.

4.1.2. Trošenje polimernih zupčanika

Trošenje boka zuba određeno je mjerom preko četiri zuba W_4 i promjenom, tj. gubitkom mase polimernih zupčanika Δm . Određivanje mjere preko zubi i mase zupčanika provedeno je za obje

rezolucije zupčanika, prije i nakon ubrzanog postupka ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja. Prema konfiguraciji eksperimentalnog postolja za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika korištenog u ovom radu smjer vrtnje je uvijek isti (u smjeru kazaljke na satu) pa se i trošenje boka zuba odnosi samo na jedan (aktivni) bok zuba, i to desni bok pogonskog i gonjenog zupčanika. Određivanjem mjere preko zubi indirektno se određuje širina zuba o kojoj ovisi veličina bočne zračnosti potrebne za toplinsko širenje zuba uslijed zagrijavanja tijekom rada. Slika 4.7 prikazuje rezultate mjerenja mjere preko četiri zuba pogonskih i gonjenih zupčanika provedenih prije (1) i nakon (2) ispitivanja, s naznačenim minimalnim i maksimalnim odstupanjima, srednjim vrijednostima te medijanom. S obzirom na broj zubi zupčanika, dvadeset šest (26) očitavanja mjere preko zubi je određeno po jednom zupčaniku, i pogonskom i gonjenom.



Slika 4.7 Mjera preko zubi prije (1) i nakon (2) ispitivanja polimernih zupčanika

Iako su zubi zupčanika projektirani (3D model) s potrebnim smanjenjem širine radi ostvarivanja bočne zračnosti (tolerancija e28), zabilježena je neravnomjerna raspodjela odstupanja mjere preko zubi proizvedenih polimernih zupčanika prije ispitivanja (1). Odstupanja su izmjerena kod polimernih zupčanika proizvedenih s obje rezolucije. Negativno odstupanje podrazumijeva povećanje bočne zračnosti, a pozitivno odstupanje smanjenje bočne zračnosti. Potrebno je

izbjegavati smanjenje ili potpuno poništavanje bočne zračnosti koje uzrokuje zadiranje i zaglavljivanje zubi zupčanika, posebno kod polimernih zupčanika s niskim koeficijentom prijelaza topline i velikim koeficijentom toplinskog širenja. Povećanje bočne zračnosti nije kritično budući da se stvara više mjesta za toplinsko širenje zubi, a zbog toga se i više zraka zahvaća u prostor između bokova spregnutih zubi pa se generirana toplina brže predaje okolini.

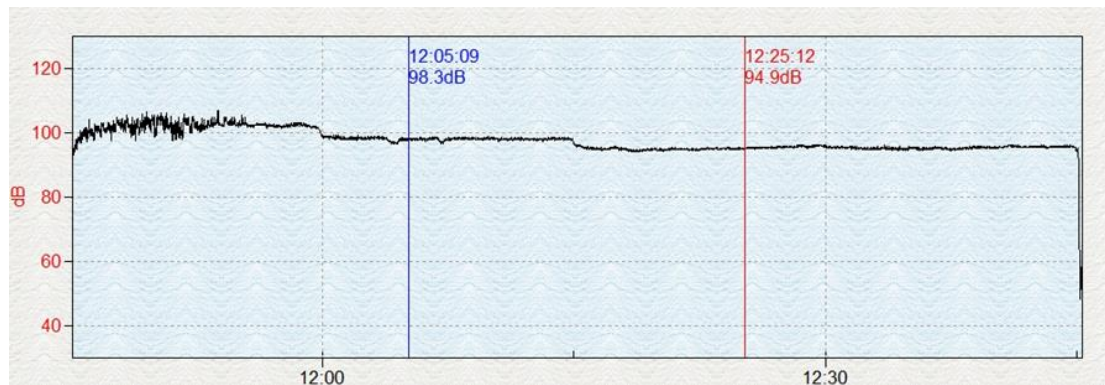
Odstupanje od teorijske gornje ($W_{4, e}$) i donje ($W_{4, i}$) granice mjere preko zubi (Tablica 3.3) uzorkovano je (ne)mogućnostima i točnošću korištenog stroja za aditivnu proizvodnju, ali i nejednolikim stezanjem PA materijala tijekom hlađenja izratka, što utječe na dimenzijsku nestabilnost polimernih zupčanika proizvedenih u obje rezolucije. Na temelju izmjerenih vrijednosti mjere preko zubi prije ispitivanja (1), te s obzirom na odstupanja iznad teorijske gornje ($W_{4, e}$) granice do čak 0,15 mm, bilo je potrebno povećati osni razmak. Kako zupčanici s evolventnim ozubljenjem nisu osjetljivi na manje promjene osnog razmaka, a standardno povećanje osnog razmaka od + 0,023 mm nije dovoljno, osni razmak je povećan za vrijednost radijalne zračnosti (j_r) u iznosu od 0,351 mm. Tako je stvarni osni razmak u odnosu na teorijski (Tablica 3.3) povećan te konačno iznosi 78,35 mm. Prema ISO 1328 [104], i isključivo na temelju izmjerene mjere preko zubi prije ispitivanja, utvrđeno je da proizvedeni pogonski i gonjeni zupčanici ne pripadaju ni u jedan od dvanaest (12) razreda kvalitete zupčanika.

Trošenje boka zuba kod obje rezolucije polimernih zupčanika se može podijeliti u dvije faze, početno trošenje zbog dimenzijskih netočnosti u proizvodnji te progresivno trošenje uslijed zagrijavanja. Početno trošenje polimernih zupčanika proizvedenih u obje rezolucije uzrokovano je dimenzijskim odstupanjima koja su potvrđena određivanjem kontrolne mjere preko zubi prije ispitivanja (1). U početnoj fazi uočene su odvojene čestice (krhotine) igličastog oblika koje su posljedica abrazijskog trošenja boka zuba spregnutih zupčanika uslijed uhodavanja (Slika 4.8).



Slika 4.8 Odvojene čestice (krhotine) u fazi uhodavanja

Također, rad polimernih zupčanika u ranoj fazi ispitivanja kroz prvih 10 minuta popraćen je povećanom razinom buke, a koja se ipak smanjila nakon početne faze uhodavanja. Slika 4.9 prikazuje primjer promjene razine buke za vrijeme ubrzanog postupka ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja, gdje su vidljive veće oscilacije buke već na početku ispitivanja, dok je za nastavak ispitivanja karakterističan mirniji i tiši rad. Mirniji i tiši nastavak ispitivanja dodatno je uzrokovan i smanjenjem krutosti zbog zagrijavanja zupčanika.



Slika 4.9 Promjena razine buke za vrijeme ispitivanja polimernih zupčanika više rezolucije

Nakon početnog uhodavanja, progresivno trošenje u daljnjem tijeku ispitivanja uzrokovano je smanjenjem tvrdoće polimernog materijala i degradacijom profila boka zuba. Klizanje između bokova uz smanjenu tvrdoću, odnosno omekšavanje polimernog materijala, rezultira bržim i većim abrazijskim trošenjem boka zuba. Istodobno, zbog degradacije profila boka zuba pogoršava se zahvat spregnutih zupčanika, što dodatno povećava zagrijavanje i negativno utječe na iskoristivost prijenosa.

Određivanjem mjere preko zubi nakon ispitivanja (2) primjetna je razlika u trošenju između polimernih zupčanika veće i manje rezolucije (Slika 4.7). Trošenje boka zuba i razlika u trošenju su manji na pogonskim zupčanicima, što dokazuje veću toplinsku izloženost i opterećenje gonjenih zupčanika, neovisno o rezoluciji proizvodnje. Upravo zbog toga je u prethodnom potpoglavlju za razmatranje temperature tijela T_{bulk} obuhvaćen samo gonjeni zupčanik, a s ovim je to i potvrđeno. Razlike u maksimalnim vrijednostima mjere preko zubi nakon ispitivanja (2) između svih polimernih zupčanika su male pa se mogu zanemariti. Najmanji iznosi minimalne (31,19 mm) i srednje vrijednosti (31,71 mm) mjere preko zubi izmjereni su kod gonjenih zupčanika manje rezolucije, što predstavlja veće trošenje u odnosu na gonjene zupčaničke veće rezolucije. Budući da nema razlike u mjeri preko zubi prije ispitivanja (1) među zupčanicima veće i manje rezolucije, pretpostavka je da je početno trošenje u fazi uhodavanja jednako, što ukazuje da se razlika pojavila u fazi progresivnog trošenja. Razlika u srednjoj vrijednosti mjere preko zubi ΔW_4 prije (1) i nakon (2) ispitivanja kod

gonjenog zupčanika veće rezolucije iznosi 280 μm , dok za gonjeni zupčanik manje rezolucije iznosi 300 μm . Gonjeni zupčanik veće rezolucije manje se potrošio u usporedbi s gonjenim zupčanikom manje rezolucije, a razlog je njegovo manje zagrijavanje kroz cijeli postupak ispitivanja (Slika 4.3). Takvo ponašanje ukazuje na značajnu vezu između temperature tijela zupčanika T_{bulk} i trošenja boka zuba u progresivnoj fazi trošenja, dok je inicijalno trošenje uvjetovano dimenzijskim odstupanjima. Manje zagrijavanje zupčanika povećava otpornost trošenju zbog veće tvrdoće površine boka zuba, a istodobno smanjeno trošenje boka zuba osigurava pravilan zahvat spregnutih zupčanika zbog čega se oni manje zagrijavaju.

Razlika u trošenju bokova zubi između pogonskih i gonjenih polimernih zupčanika potvrđene su i usporedbom izmjerene mase zupčanika prije (1) i nakon (2) ispitivanja (Tablica 4.2). Toplinski izloženi i opterećeni gonjeni polimerni zupčanik izgubio je veći dio svoje mase u odnosu na pogonski. Međutim, između polimernih zupčanika proizvedenih u većoj ili manjoj rezoluciji ne postoji nikakva razlika. Jednaka promjena mase Δm izmjerena je kod pogonskih zupčanika (0,38 g) kao i kod gonjenih (0,54 g), neovisno o rezoluciji (kvaliteti) proizvodnje.

Tablica 4.2 Masa polimernih zupčanika prije (1) i poslije (2) ispitivanja

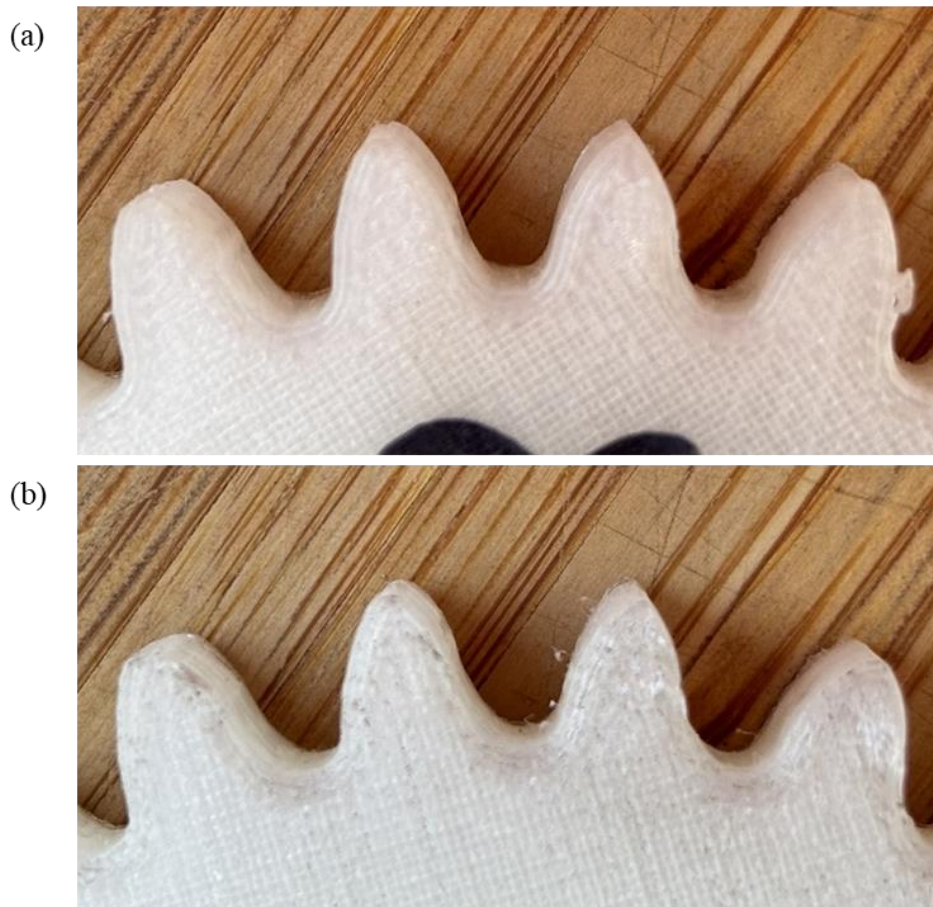
Polimerni zupčanici	Veća rezolucija (0,06 mm) [g]	Manja rezolucija (0,1 mm) [g]
Pogonski (1) / (2)	48,82 / 48,44	45,19 / 44,81
Gonjeni (1) / (2)	39,82 / 39,28	38,17 / 37,63

Kod polimernih zupčanika veće i manje rezolucije nije zabilježena razlika u promjeni, tj. gubitku mase Δm , iako postoji mala razlika u mjeri preko zubi. Razlog je to što u fazi progresivnog trošenja na određenim zubima zupčanika dolazi do pojave gomilanja polimernog materijala uslijed klizanja bokova, uglavnom na vrhu zuba, ali ne i do otkidanja od zuba (Slika 4.10). Masa i mjera preko zubi se mjere neposredno nakon ispitivanja, a položaj tanjurastih ticala prilikom određivanja mjere preko zubi (Slika 3.17) je takav da gomilanja materijala (srhovi) mogu utjecati na konačnu izmjeru, pa se isti odstranjuju. Odstranjivanje nagomilanog materijala nije u potpunosti jednoliko, što opravdava razilaženje rezultata mjerenja mase i mjere preko zubi. Kod ispitivanih PA zupčanika proizvedenih FDM procesom uočeno je trošenje boka zuba, a pri okretnim momentima kojima su podvrgnuti ispitivani zupčanici, neovisno o rezoluciji (kvaliteti) proizvodnje, nisu zabilježena druga karakteristična oštećenja (Tablica 1.1).



Slika 4.10 Gomilanje polimernog materijala na vrhu zuba zupčanika

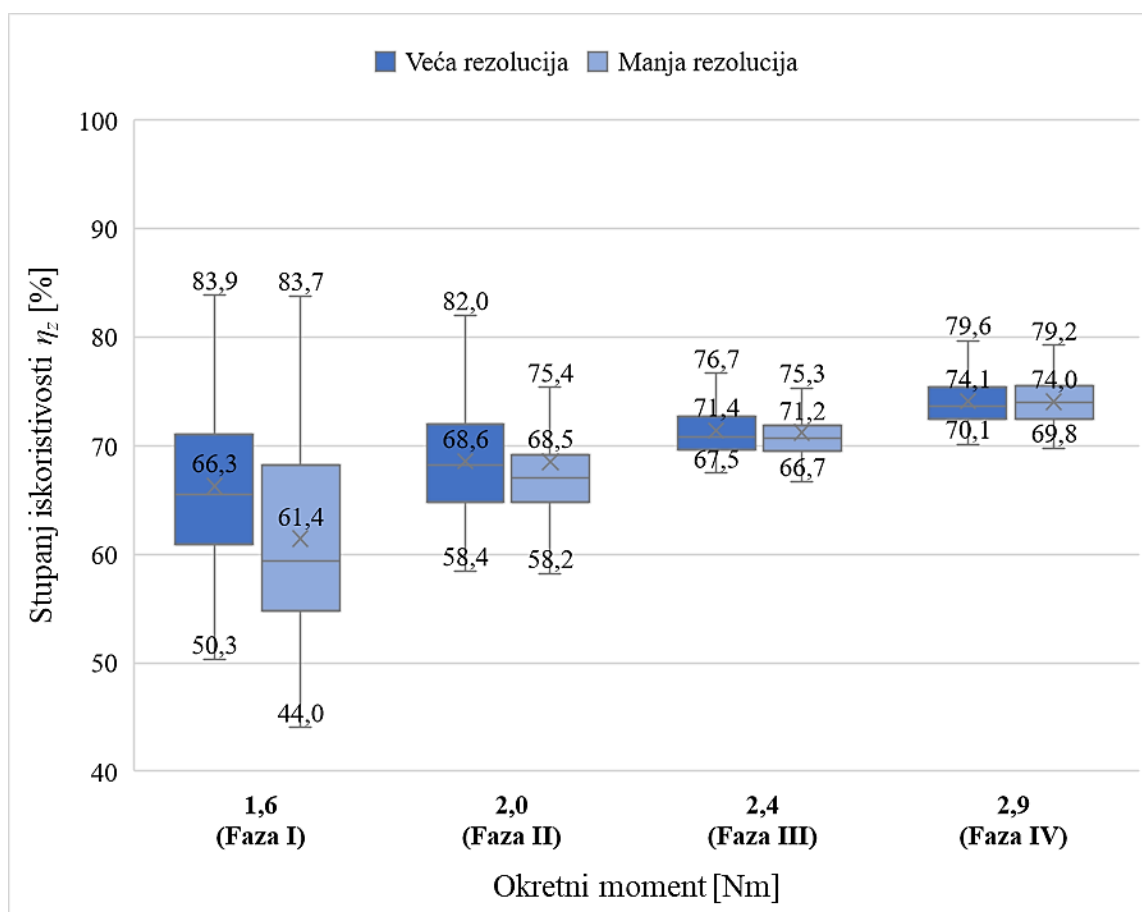
Slika 4.11 prikazuje po četiri zuba gonjenog polimernog zupčanika veće i manje rezolucije s najvećim trošenjem boka zuba (najmanja vrijednost mjere preko zubi). Primjetno je odstupanje u profilu boka zuba u odnosu na polimerne zupčanike prije ispitivanja (1) (Slika 3.12). Uočena je zašiljenost vrha zuba nastala zbog klizanja bokova, a također je i vidljiva razlika u profilu boka zuba između aktivnog (desnog) i neaktivnog (lijevog) boka zuba.



Slika 4.11 Trošenje boka zuba gonjenog polimernog zupčanika (a) veće i (b) manje rezolucije

4.1.3. Stupanj iskoristivosti polimernih zupčanika

Stupanj iskoristivosti η_z para polimernih zupčanika proizvedenih u dvije različite rezolucije određen je odnosom izlaznog i ulaznog okretnog momenta. Općenito, stupanj iskoristivosti zupčanih prijenosnika ovisi o koeficijentu trenja u zahvatu, snazi koja se prenosi te geometriji ozubljenja. U odnosu na metale kod kojih je koeficijent trenja gotovo konstantan te ovisi o površinskoj hrapavosti i vrsti metala, kod polimera dodatno ovisi i o opterećenju, brzini klizanja i temperaturi. Kod plastomera, kao što je i korišteni PA, koeficijent trenja opada s porastom opterećenja [105] i povećanjem brzine klizanja. S povećanjem temperature koeficijent trenja povećava, ali samo do određene vrijednosti nakon koje opada ili ostaje konstantan (ovisno o vrsti plastomera) [106]. Kako je brzina vrtnje za vrijeme ispitivanja konstanta, snaga koja se prenosi ovisi samo o okretnom momentu (Tablica 3.7). Geometrija ozubljenja se ne mijenja i jednaka je za polimerne zupčanike veće i manje kvalitete, pa proizlazi zaključak da stupanj iskoristivosti polimernih zupčanika ovisi o koeficijentu trenja i okretnom momentu. Promjena stupnja iskoristivosti kroz četiri faze ubrzanog postupka ispitivanja polimernih zupčanika proizvedenih u dvije različite rezolucije (kvalitete) prikazana je na Slici 4.12.



Slika 4.12 Stupanj iskoristivosti η_z polimernih zupčanika različitih rezolucija

Stupanj iskoristivosti polimernih zupčanika raste s povećanjem okretnog momenta, neovisno o rezoluciji proizvodnje. U prvoj fazi ubrzanog postupka ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja stupanj iskoristivosti je najmanji, a uočene su i najveće oscilacije u stupnju iskoristivosti. Kako je ranije spomenuto prva faza je faza uhodavanja gdje se polimerni zupčanici međusobno prilagođavaju. U navedenoj fazi je uočena razlika u stupnju iskoristivosti između polimernih zupčanika veće i manje rezolucije, a razlika srednje vrijednosti stupnja iskoristivosti kroz prvu fazu iznosi oko 5 %. Razlog je razlika u površinskoj hrapavosti boka zuba zupčanika koja se odrazila na zagrijavanje i trošenje, a u konačnici i na stupanj iskoristivosti η_z . Nakon prve faze ispitivanja, razlike u stupnju iskoristivosti gotovo i ne postoje jer su se zupčanici uhodali (manje od 0,2 %), što potvrđuju i manje razlike u oscilacijama stupnja iskoristivosti u svakoj od faza. Svaku sljedeću fazu karakterizira povećanje okretnog momenta kojeg prati porast stupnja iskoristivosti. Veći okretni moment rezultira većom tangencijalnom silom zbog čega koeficijent trenja opada što pozitivno utječe na iskoristivost. Daljnjim porastom opterećenja moguć je rast stupnja iskoristivosti, ali do određene granice kada bi uslijed porasta temperature došlo do pregrijavanja i otkaza zupčanika. Konačno, ukupni srednji stupanj iskoristivosti između polimernih zupčanika, kroz cijeli postupak ispitivanja, iznosi 70,3 % za veću rezoluciju proizvodnje, odnosno 69,1 % za manju.

Iako je razlika u stupnju iskoristivosti relativno mala, kada se uzme u obzir temperatura tijela zupčanika T_{bulk} , trošenje i konačno stupanj iskoristivosti, polimerni zupčanici veće rezolucije (kvalitete) ostvaruju bolje rezultate. Proizvodnja polimernih zupčanika manje rezolucije bi smanjila vrijeme izrade te količinu utrošene energije i materijala, ali eksperimentalni rezultati zagrijavanja, trošenja i iskoristivosti idu u prilog polimernim zupčanicima veće rezolucije. Pokazalo se da razlika u rezoluciji proizvodnje polimernih zupčanika ima značajan utjecaj na njihove radne značajke, a rezultati eksperimentalnih istraživanja ukazuju da bi se razlike mogle smanjiti prethodnim uhodavanjem zupčanih parova, ali to nije predmet ovog istraživanja. Zbog svega navedenog, polimerna matrica hibridnih zupčanika proizvodi se isključivo u većoj rezoluciji (kvaliteti), a polimerni zupčanici manje rezolucije neće biti uzeti u razmatranje prilikom usporedbe radnih značajki polimernih i hibridnih zupčanika.

4.2. Hibridni zupčanici

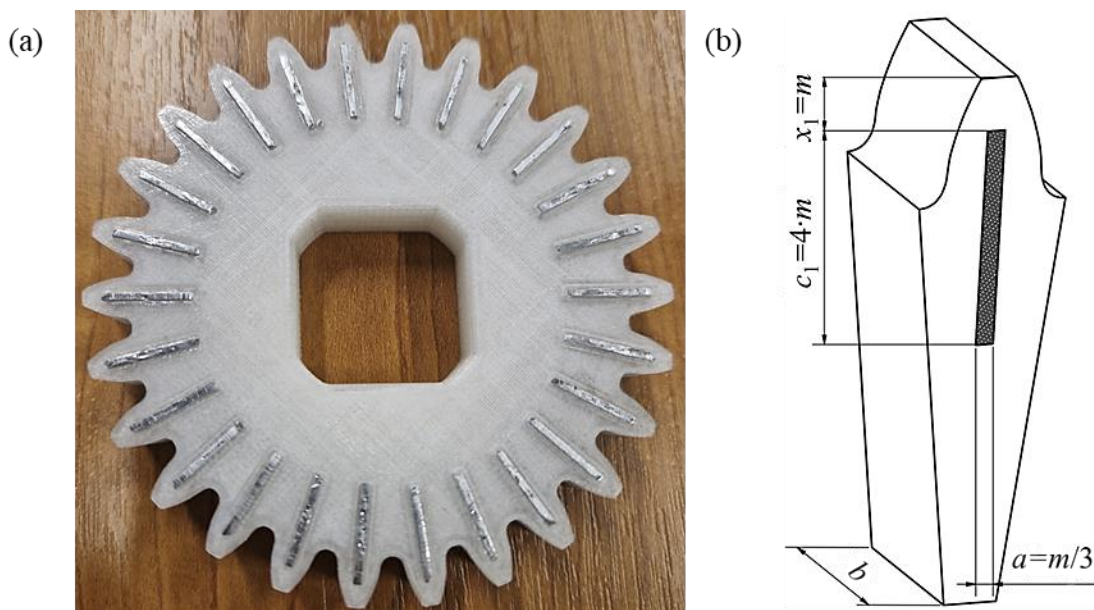
Na temelju radnih značajki polimernih zupčanika i s ciljem njihova poboljšavanja, u ovom potpoglavlju su predstavljeni hibridni zupčanici. Hibridni zupčanici sastavljeni su od polimerne matrice proizvedene FDM procesom aditivne tehnologije te metalnih umetaka. Aluminijski i čelični umeci u obliku pravokutne trake izrađeni su na stroju za lasersko rezanje. Površine

umetaka su ravne, glatke i očišćene od oksida da bi se omogućio kvalitetan kontakt s polimernom matricom. Prilikom ugradnje metalnih umetaka u polimernu matricu postoji određeni preklop kako bi se nakon ugradnje umetaka eliminirale zračnosti između umetaka i polimerne matrice. Zračnosti mogu biti uzrokovane površinskom hrapavosti ili valovitosti dodirnih ploha [65], a mogu utjecati na prijelaz topline s polimerne matrice na metalne umetke. Hibridni zupčanci imaju jednaku geometriju ozubljenja kao i polimerni zupčanci (Tablica 3.3), a polimerna matrica hibridnih zupčanika proizvedena je na istom stroju za aditivnu proizvodnju s istim parametrima proizvodnje (Tablica 3.6) kao i polimerni zupčanci. Kako je u prethodnom potpoglavlju već spomenuto, polimerna matrica hibridnih zupčanika proizvodi se isključivo u većoj rezoluciji. Razlog implementacije metalnih umetaka unutar polimerne matrice je brže provođenje topline sa zuba zupčanika prema tijelu zupčanika ili okolini. Dodatkom metalnih umetaka osnovnoj polimernoj matrici cilj je prvenstveno smanjiti temperaturu tijela zupčanika, a posljedično smanjiti trošenje i povećati iskoristivost zupčanog prijenosa. Eksperimentalno ispitivanje hibridnih zupčanika započinje validacijom postojeće konstrukcijske izvedbe predstavljene u [64], a na kojoj je provedena samo numerička analiza. Konstrukcijska izvedba je blago prilagođena mogućnostima i kapacitetima korištenog eksperimentalnog postolja za ispitivanje polimernih i hibridnih zupčanika s mehanički otvorenim tokom snage, kao i prethodno izrađenim i ispitivanim polimernim zupčanicima.

Prva konstrukcijska izvedba hibridnih zupčanika (Slika 3.12 (b)) i pripadajućom geometrijom (Slika 3.10) zasnovana je na konceptu predloženom od autora Fernandes i dr. [64], a karakterizira je to što se toplina dominantno odvodi provođenjem (kondukcija). Toplina koja se razvija na boku zuba zupčanika prilikom prolaska zuba kroz zahvat se preko metalnih umetaka provođenjem odvodi prema vratilima. Iako je numeričkom analizom ostvaren značajan doprinos u smanjenju zagrijavanja hibridnih zupčanika [64], eksperimentalnim ispitivanjima koja su provedena u ovom radu dokazano je da rezultati numeričke analize ne odgovaraju novim empirijskim podacima. Naprotiv, hibridni zupčanci s predloženom konstrukcijskom izvedbom nisu uspjeli dovršiti cijeli postupak ispitivanja. Za vrijeme ispitivanja došlo je do popuštanja spoja između vratila i polimerne matrice hibridnih zupčanika, a ova pojava uočena je kod svih hibridnih zupčanika neovisno o materijalu umetaka. U slučaju hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima ispitivanje je zaustavljeno sredinom prve faze (nakon 7 minuta), odnosno početkom druge faze (nakon 20 minuta) u slučaju hibridnih zupčanika s čeličnim umecima. Metalni umeci su ubrzali provođenje topline s boka zuba zupčanika prema vratilu, što je uzrokovalo omekšavanje i smanjenje dopuštenog površinskog tlaka PA materijala.

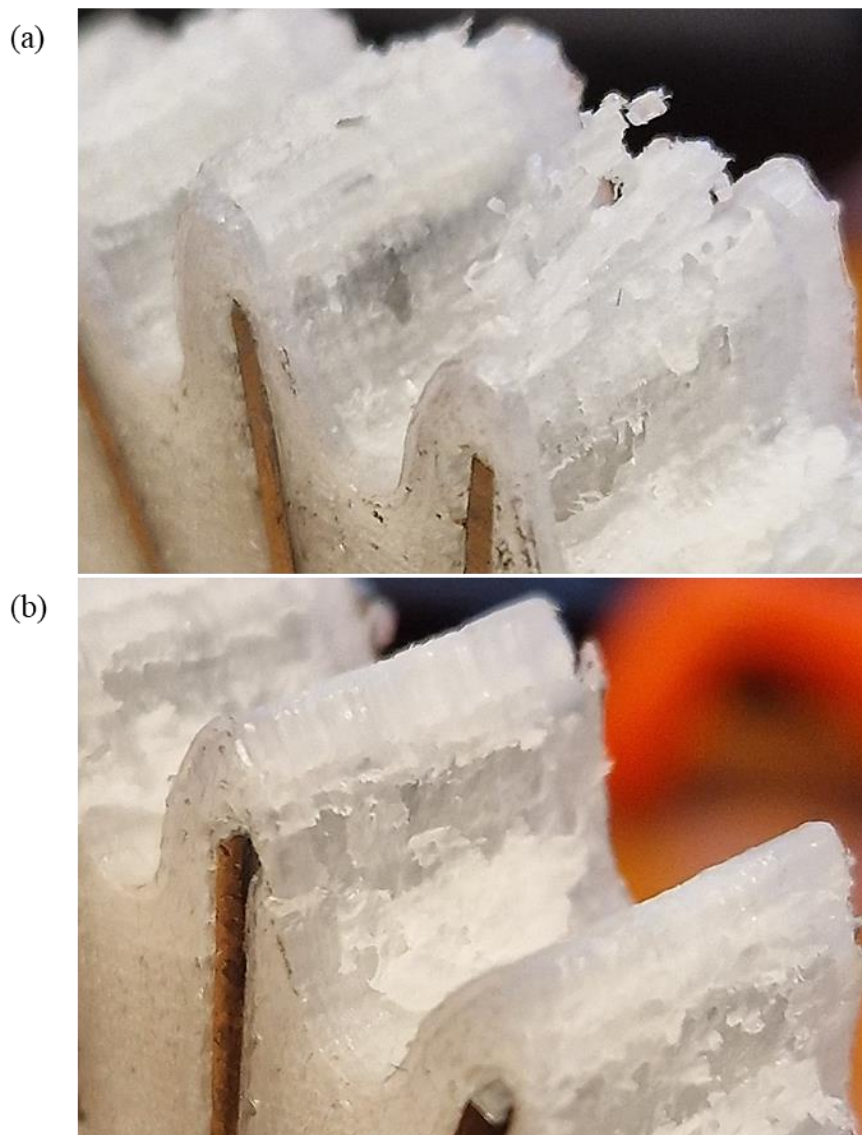
Razlika u vremenu do proklizavanja hibridnih zupčanika s aluminijskim i čeličnim umecima u odnosu na vratilo uzrokovana je različitim koeficijentom toplinske vodljivosti korištenih metala (Tablica 3.5). Aluminij ima veći koeficijent toplinske vodljivosti u odnosu na čelik pa se polimerna matrica hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima brže zagrijala i omekšala u odnosu na matricu u koju su umetnuti čelični umeci. U odnosu na eksperimentalno istraživanje provedeno u ovom doktoratu gdje su ispitivanja provedena pri temperaturi okoline od $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, u radu [64] je pretpostavljeno da temperatura okoline iznosi $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Budući da u simulaciji nije uzeto u obzir vratilo i njegovo zagrijavanje, temperatura tijela na spoju s vratilom odgovara temperaturi okoline. Međutim, za vrijeme eksperimentalnog ispitivanja zagrijavaju se i dijelovi eksperimentalnog postolja (vrtila, ležajevi i elektromotori) pa ispitivanje na stvarnim hibridnim zupčanicima u konačnici nije bilo uspješno. Iako je prije otkazivanja uočeno manje zagrijavanje hibridnih zupčanika u odnosu na polimerne, konstrukcijska izvedba se u praksi pokazala nepotpunom. Predloženi koncept je inovativan i u teoriji učinkovit, međutim eksperimentalnom validacijom je dokazano da u praksi nije primjenjiv.

Na temelju predložene konstrukcijske izvedbe [64], uzevši u obzir nedostatke, predstavljena je prva varijanta nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika (Slika 4.13 (a)). U novoj konstrukcijskoj izvedbi širina b , debljina a i udaljenost metalnog umetka od vrha zuba x_1 nisu mijenjane, ali duljina metalnog umetka jest. Kako bi se spriječilo zagrijavanje polimerne matrice u blizini spoja s vratilom, i posljedično omekšavanje materijala, duljina metalnog umetka c_1 je prepolovljena u odnosu na prethodnu konstrukcijsku izvedbu (Slika 4.13 (b)).



Slika 4.13 (a) Nova konstrukcijska izvedba hibridnih zupčanika s (b) pripadajućom geometrijom

Nova konstrukcijska izvedba hibridnih zupčanika je eksperimentalno ispitana, ali je također zabilježen otkaz zupčanog para. Za vrijeme rada došlo je do značajnog porasta razine buke, vibracija i velikih oscilacija u okretnom momentu te je zabilježeno oštećenje u vidu taljenja zubi hibridnih zupčanika. Implementacija metalnih umetaka u polimernu matricu povećala je krutost zuba zupčanika, čime je onemogućeno deformiranje zuba uslijed opterećenja. Nemogućnost deformacije zuba hibridnog zupčanika i slaba toplinska vodljivost PA polimera doveli su do prekomjernog zagrijavanja i povećanja temperature tijela T_{bulk} hibridnog zupčanika, te konačno i taljenja zuba uslijed pregrijavanja (Slika 4.14).

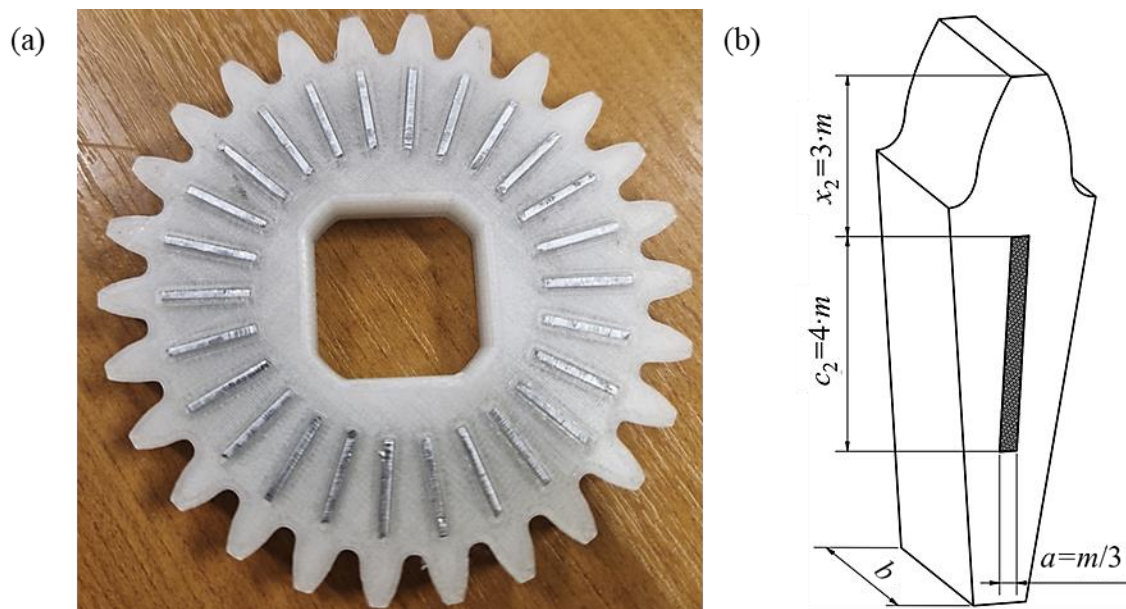


Slika 4.14 Taljenje zuba hibridnog zupčanika s (a) aluminijskim i (b) čeličnim umecima

Eksperimentalno ispitivanje hibridnih zupčanika s čeličnim umecima je zaustavljeno nakon otprilike petnaest (15) minuta, dok je kod hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima ispitivanje prekinuto nakon otprilike pedeset (50) minuta. Razlog duljeg radnog vijeka do

otkaza hibridnog zupčanika s aluminijskim umecima je oko tri puta manji modul elastičnosti i gotovo šest puta veći koeficijent toplinske vodljivosti aluminija u odnosu na čelik. Veći modul elastičnosti čelika u odnosu na aluminij značajno povećava krutost zuba, a kada se tome pridoda sporije provođenje topline razlika u radnom vijeku do otkaza je očekivana. Mehanička i tribološka svojstva polimernog materijala koja su narušena prekomjernim zagrijavanjem nisu dostatna za realizaciju cjelokupnog ubrzanog postupka ispitivanja.

Na temelju prve varijante nove konstrukcijske izvedbe proizašla je druga varijanta, gdje su metalni umeci uklonjeni iz područja zuba zupčanika. Druga varijanta s pripadajućom geometrijom metalnog umetka i odgovarajućim utorom za umetak prikazana je na Slici 4.15. Metalni umetak predstavljen u drugoj varijanti potpuno je jednak umetku iz prve varijante nove konstrukcijske izvedbe, samo je promijenjena udaljenost od vrha zuba zupčanika x_2 .



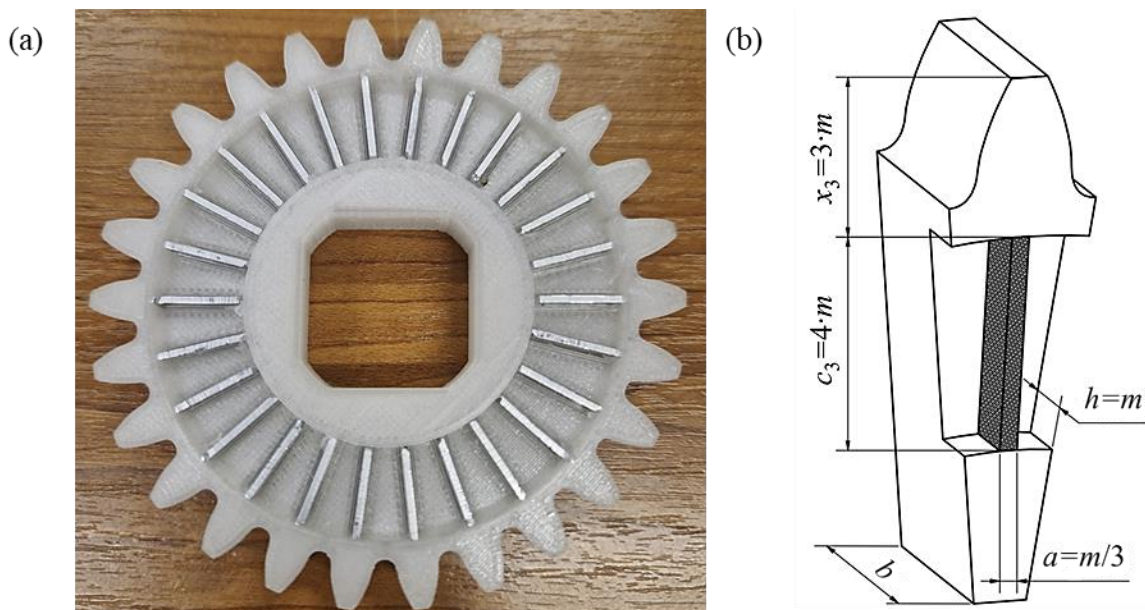
Slika 4.15 (a) Druga varijanta nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika i (b) geometrija metalnog umetka

Metalni umetak je uklonjen iz područja zuba zupčanika da bi se izbjeglo taljenje zuba i popuštanje spoja između vratila i polimerne matrice hibridnih zupčanika. Istovremeno, vrh metalnog umetka je postavljen ispod podnožnog (korijenskog) promjera zupčanika kako bi se spriječilo smanjenje nosivog poprečnog presjeka u korijenu zuba, ali i dodatna koncentracija naprezanja koja bi mogla uzrokovati lom u korijenu zuba. Kako standardna visina zuba bez pomaka profila iznosi 2,25 modula zupčanika, udaljenost od vrha x_2 je postavljena na 3 vrijednosti modula. Na taj način su dozvoljene deformacije zuba koje nastaju zbog opterećenja na zub prilikom prolaska kroz zahvat. Udaljenost dna metalnog umetka od spoja hibridnog

zupčanika s vratilom ostala je dovoljno velika kako spoj ne bi popustio, odnosno kako zupčanik ne bi proklizao u odnosu na vratilo. Usprkos tome što je druga varijanta nove konstrukcijske izvedbe odradila sve četiri faze ubrzanog postupka ispitivanja bez otkaza, nikakav doprinos po pitanju zagrijavanja (hlađenja) nije ostvaren, neovisno jesu li korišteni aluminijski ili čelični umeci. Izuzev bržeg izjednačavanja temperature po presjeku tijela zupčanika, koji nema nikakav značaj, sve radne značajke pokazale su se iste kao i kod polimernih zupčanika.

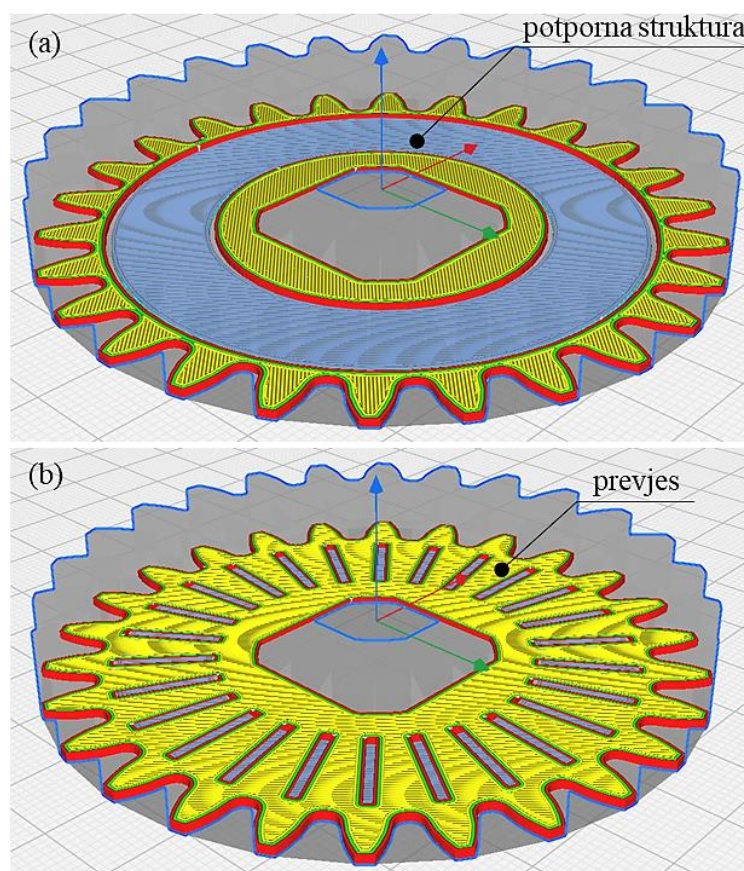
Eksperimentalnim ispitivanjem predložene konstrukcijske izvedbe [64], kao i dvije varijante nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika, uočeno je da nije ostvareno poboljšanje radnih značajki u odnosu na polimerne zupčanike. Naprotiv, predložena konstrukcijska izvedba i prva varijanta nove konstrukcijske izvedbe nisu uspjele završiti sve faze ubrzanog postupka ispitivanja. Kod sva tri slučaja toplina se sa zuba prema tijelu zupčanika dominantno odvodila provođenjem, dok je površina za prijenos topline konvekcijom ili zračenjem bila zanemarivo mala. Ustanovljeno je da navedene konstrukcijske izvedbe kod kojih se toplina primarno odvodi provođenjem nisu primjenjive za hibridne zupčanike sastavljene od PA polimerne matrice i metalnih umetaka od aluminijskog ili čelika.

Treća varijanta nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika primjenjuje identičan metalni umetak kao i druga varijanta, ali je u polimernoj matrici izrađen utor (paok) koji omogućava veću izmjenu generirane topline konvekcijom i zračenjem (Slika 4.16 (a)). Utor (paok) dubine h (Slika 4.16 (b)) jednak je modulu zupčanika, a širina utora odgovara duljini umetka c_3 .



Slika 4.16 (a) Treća varijanta nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika i (b) pripadajuća geometrija metalnog umetka

Polimerna matrica s utorom izrađena je u asimetričnoj izvedbi tako da se cijeli utor nalazi samo s jedne čone plohe hibridnih zupčanika. Glavni razlog za asimetričnu izvedbu polimerne matrice hibridnih zupčanika je proces aditivne tehnologije. U ovoj izvedbi ne postoje dijelovi zupčanika koji imaju prevjese, a koje bi za vrijeme FDM procesa aditivne proizvodnje bilo potrebno osigurati od urušavanja. Urušavanje se sprječava izradom potpornih struktura (engl. Support) kako bi se eventualni prevjesi na modelu mogli na njih osloniti. Po završetku proizvodnje potporne strukture se uklanjaju jer one služe samo kao oslonac za prevjese. Kako u asimetričnoj izvedbi nema prevjesa potporne strukture nisu potrebne, kao što bi to bilo u slučaju simetrične izvedbe (Slika 4.17).



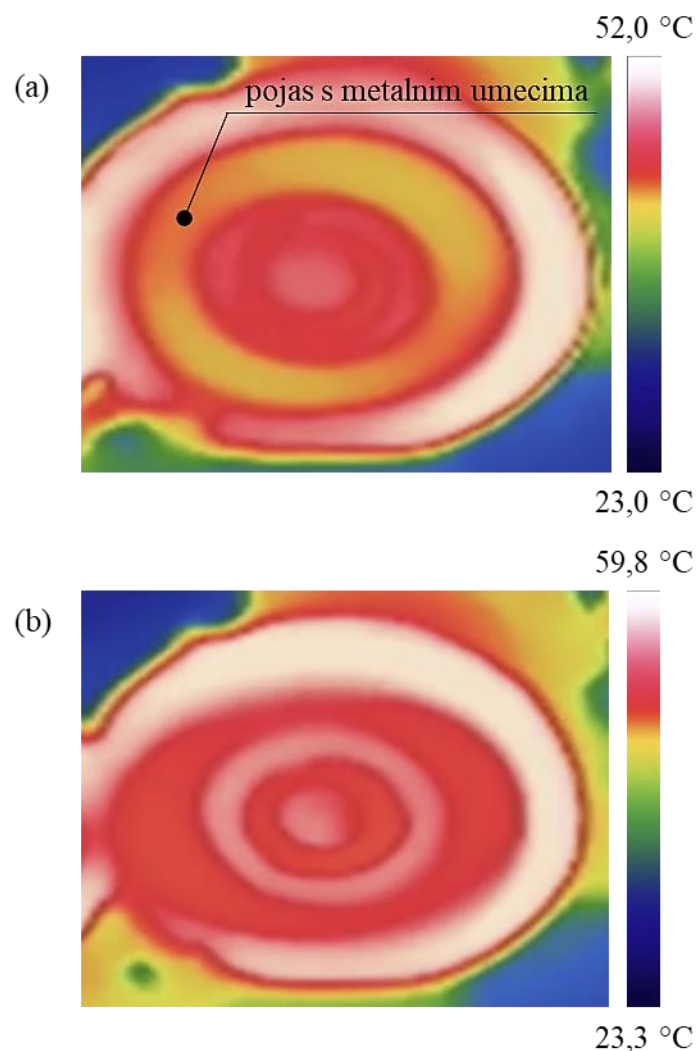
Slika 4.17 (a) Potporna struktura na koju se oslanja (b) prevjes za slučaj simetrične izvedbe polimerne matrice

Također, zbog izrade potpornih struktura simetrična izvedba polimerne matrice bi produžila vrijeme aditivne proizvodnje za oko pet sati uz oko 10 % (oko 5 g) više utroška PA materijala (filamenta). Budući da potporne strukture služe isključivo kao oslonac koji se uklanja nakon izrade, primjenom asimetrične izvedbe isključen je otpadni materijal što čini aditivnu proizvodnju polimerne matrice bržom, jeftinijom i energetski učinkovitijom. Već po početku eksperimentalnog ispitivanja treće varijante nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika

je uočen doprinos u vidu smanjenja temperature tijela zupčanika T_{bulk} . Stoga se u nastavku rada nova konstrukcijska izvedba hibridnih zupčanika s metalnim umecima u obliku trake odnosi na konačnu treću varijantu (Slika 4.16). U nastavku su kroz potpoglavlja prikazane radne značajke nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika s aluminijskim i čeličnim umecima.

4.2.1. Zagrijavanje hibridnih zupčanika

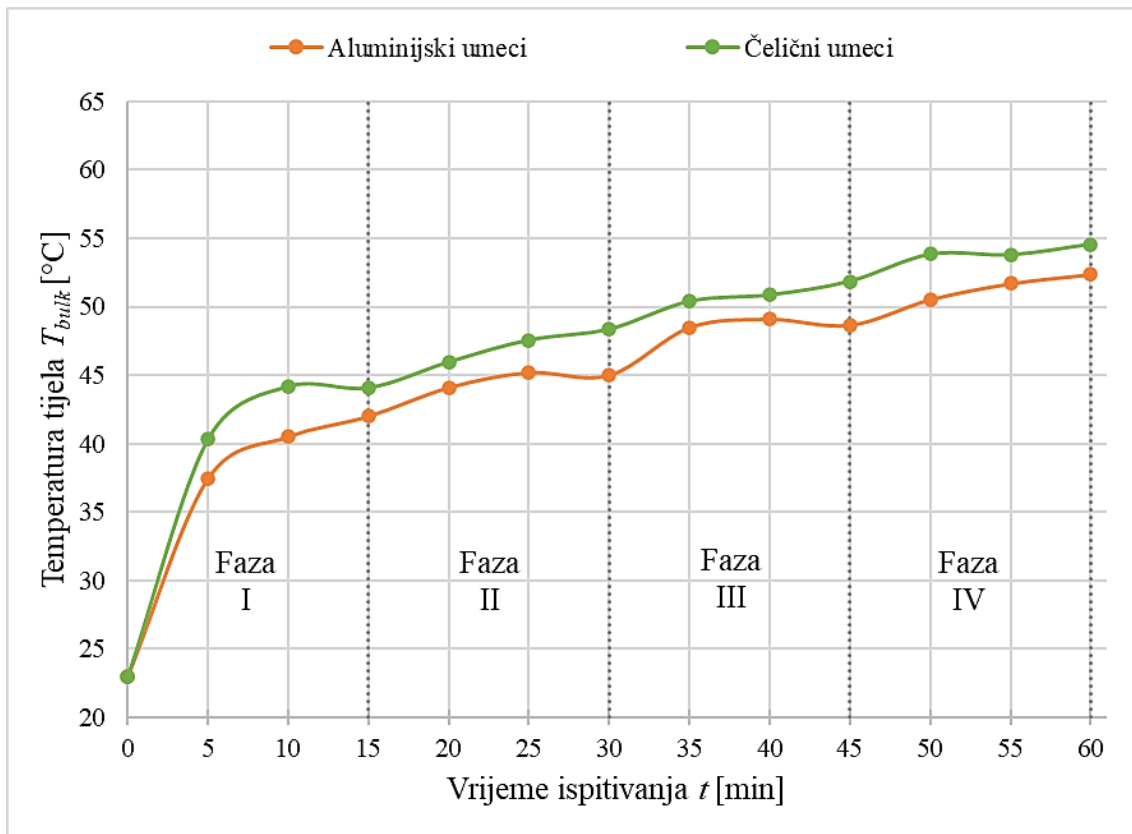
Razlika u zagrijavanju između polimernih zupčanika i hibridnih zupčanika s metalnim umecima u obliku trake uočena je već kroz prvu fazu ubrzanog postupka ispitivanja, a kroz ostale faze ispitivanja razlika je postajala sve izraženija. Naime, praćenjem temperature tijela zupčanika T_{bulk} za vrijeme ubrzanog postupka ispitivanja primijećena je razlika u paleti boja na termografskoj slici zabilježenom pomoću infracrvene termalne kamere (Slika 4.18).



Slika 4.18 Termografska slika (a) hibridnog i (b) polimernog zupčanika nakon 25 minuta ubrzanog postupka ispitivanja (2 Nm)

Na termografskoj slici hibridnog zupčanika jasno je izražen pojas s metalnim umecima (Slika 4.18 (a)), gdje je temperatura tijela zupčanika znatno niža u odnosu na druge dijelove. U tom pojasu se toplina izmjenjuje s okolinom putem konvekcije, i to ne samo slobodne (prirodne, pasivne), već i preko prisilne konvekcije. Zbog utora u polimernoj matrici hibridnog zupčanika (Slika 4.16) na dijelove metalnih umetaka uslijed vrtnje direktno nastružava zrak, što potiče bolji prijenos topline prema okolini. Za razliku od hibridnog zupčanika, termografska slika polimernog zupčanika (Slika 4.18 (b)) prikazuje veću temperaturu po tijelu zupčanika što ukazuje na veće zagrijavanje. Temperatura u pojasu s metalnim umecima hibridnog zupčanika iznosila je približno 40 °C (narančasto na Slici 4.18 (a)). U istom području kod polimernog zupčanika temperatura iznosila je oko 45 °C (crveno na Slici 4.18 (b)). Očekivano, najviše temperature pojavljuju se u području zubi zupčanika gdje se razvija najveća toplina (bijelo na Slici 4.18). Vidljivo je i zagrijavanje u području spoja zupčanika s vratilom zbog kojeg je bilo potrebno koristiti poligoni profil rukavca. Upravo je prilikom validacije predložene konstrukcijske izvedbe [64] ispitivanje bilo zaustavljeno, jer je došlo do popuštanja spoja između zupčanika i vratila. Zagrijano vratilo i dodatna toplina provedena sa zubi preko metalnih umetaka omekšavaju polimernu matricu što uzrokuje popuštanje spoja i proklizavanje.

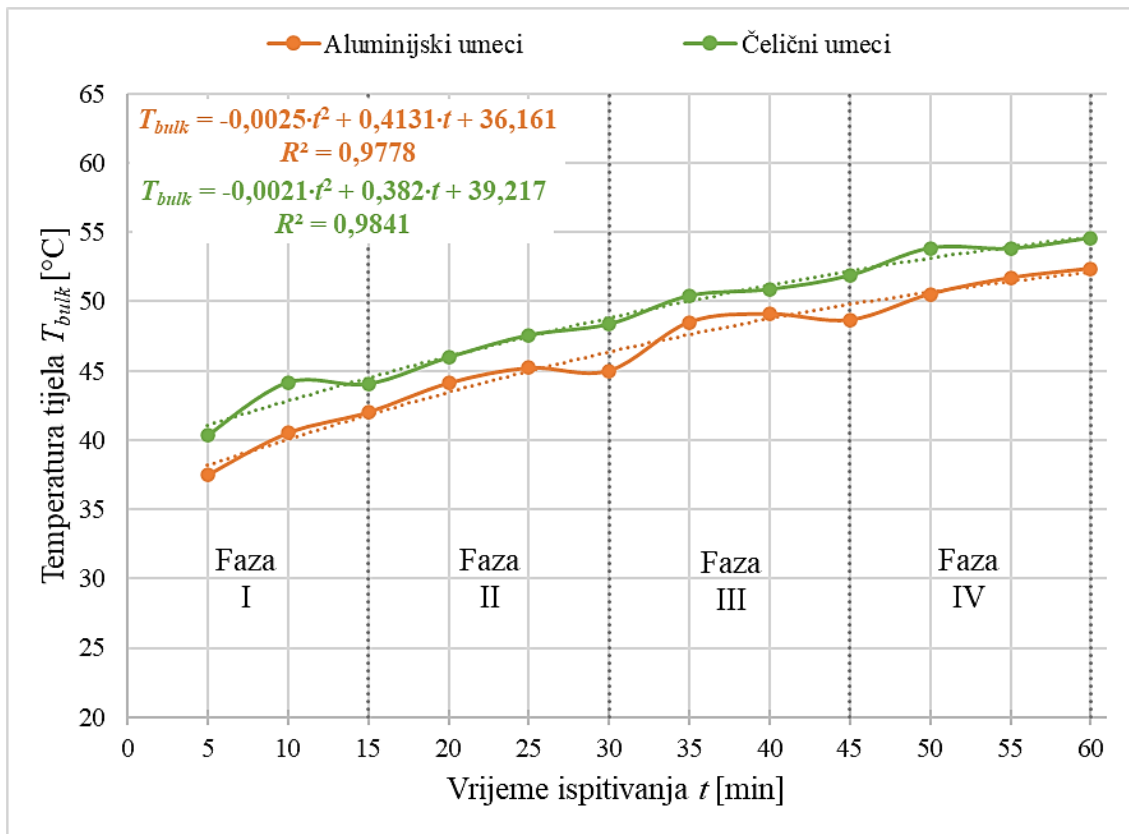
Spomenuta zapažanja potvrđena su mjerenjem temperature tijela T_{bulk} hibridnog zupčanika s aluminijskim i čeličnim umecima. Slika 4.19 prikazuje promjenu temperature tijela hibridnih zupčanika za vrijeme ubrzanog postupka ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja. Uočeno je manje zagrijavanje hibridnog zupčanika s aluminijskim umecima u odnosu na hibridni zupčanik s čeličnim umecima kroz sve četiri faze ubrzanog postupka ispitivanja. Najveća razlika u temperaturi primijećena je u prvoj fazi (do 3,7 °C), pri nižim opterećenjima, a razlog je niža toplinska vodljivost čelika u usporedbi s aluminijem. Čeliku je potrebno više vremena da preuzme toplinu, zagrije se i provede toplinu u odnosu na aluminij. Posljedica je manja temperaturna razlika između čeličnih umetaka i okoline koja rezultira manjom gustoćom toplinskog toka te sporijim prijenosom topline putem konvekcije. Nakon prve faze ubrzanog postupka ispitivanja uspostavljen je toplinski tok pa je razlika u ostalim fazama bila gotovo jednaka i po fazi je prosječno iznosila oko 2,4 °C. Kao i kod polimernih zupčanika, uočen je skok u temperaturi na početku svake od četiri faze kao rezultat povećanja okretnog momenta, nakon čega slijedi stabilizacija temperature zbog uspostavljanja toplinske ravnoteže. Gradijent povećanja temperature tijela hibridnih zupčanika najveći je u prvoj fazi uz oscilacije od oko 4 °C. U kasnijim fazama gradijent povećanja temperature opada, a oscilacije u temperaturi unutar svake od faza su manje.



Slika 4.19 Temperatura tijela T_{bulk} hibridnih zupčanika

Po pitanju zagrijavanja, hibridni zupčanici s aluminijskim umecima pokazali su se kao bolji i praktičniji izbor u odnosu na hibridne zupčanike s čeličnim umecima. Razlika je posebno izražena u prvoj fazi ubrzanog postupka ispitivanja kada su temperature tijela zupčanika niske. Gotovo 6 puta veća toplinska vodljivost aluminija u odnosu na čelik omogućava učinkovitije primanje, a zatim i distribuciju topline dalje od izvora (bok zuba zupčanika), što rezultira manjim zagrijavanjem odnosno boljim hlađenjem hibridnih zupčanika.

Neovisno o materijalu umetaka, hibridni zupčanici ostvarili su značajan doprinos po pitanju zagrijavanja (hlađenja) u odnosu na polimerne zupčanike, o čemu će biti govora u zasebnom potpoglavlju u nastavku ovog rada. Bolji prijenos topline putem konvekcije, zbog kojeg se hibridni zupčanici manje zagrijavaju od polimernih zupčanika, potencijalno može dovesti do povećanja nosivosti (opteretivosti) i duljeg radnog vijeka zupčanog para. Slika 4.20 prikazuje dijagram promjene temperature tijela T_{bulk} hibridnih zupčanika s aluminijskim i čeličnim umecima u obliku trake, a naznačene su i linije trenda rasta temperature tijela zupčanika. Na dijagramu su prikazani i matematički modeli za predviđanje temperature. Kao i kod polimernih zupčanika, isključene su vrijednosti okolne temperature T_{amb} na početku mjerenja koja je iznosila 23 °C.



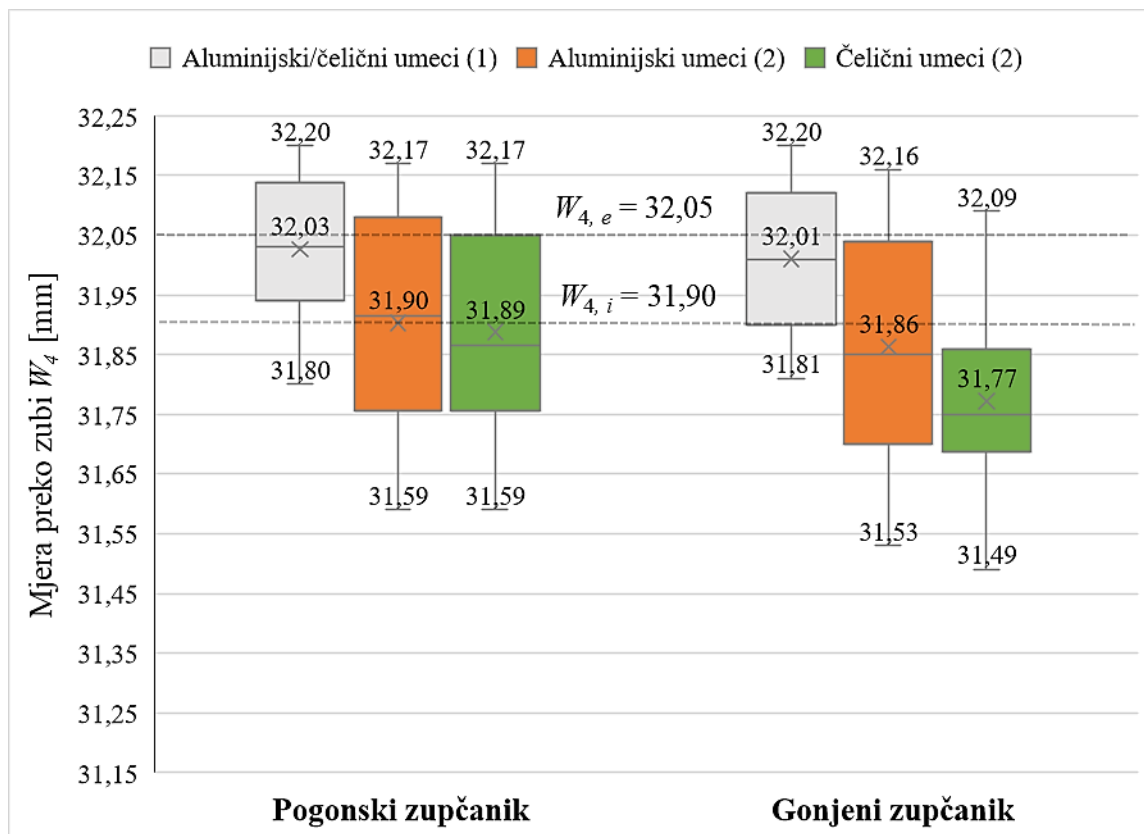
Slika 4.20 Matematički modeli za predviđanje temperature tijela T_{bulk} hibridnih zupčanika s naznačenim linijama trenda

4.2.2. Trošenje hibridnih zupčanika

Kao i kod polimernih zupčanika, trošenje boka zuba određeno je mjerom preko četiri zuba W_4 i promjenom mase Δm zupčanika prije (1) i nakon (2) ispitivanja. Budući da je polimerna matrica hibridnih zupčanika proizvedena u većoj rezoluciji, kod hibridnih zupčanika prije (1) ispitivanja vrijede ista zapažanja kao i kod polimernih zupčanika veće rezolucije prije (1) ispitivanja. Bokovi zubi se troše abrazijski, a trošenje boka zuba odnosi samo na desni bok pogonskih i gonjenih zupčanika. Zabilježena je neravnomjerna raspodjela odstupanja mjere preko zubi hibridnih zupčanika prije (1) ispitivanja. Trošenje pogonskih zupčanika je manje u odnosu na gonjene, a trošenje se može podijeliti u dvije faze: početno i progresivno trošenje.

Slika 4.21 prikazuje rezultate mjerenja mjere preko zubi pogonskog i gonjenog hibridnog zupčanika određene prije (1) i nakon (2) ispitivanja, a naznačena su minimalna i maksimalna odstupanja, kao i srednje vrijednosti te medijan. Određivanjem mjere preko zubi poslije ispitivanja (2) uočena je razlika u trošenju između hibridnih zupčanika s aluminijskim i čeličnim umecima. Niži iznos srednje vrijednosti (31,77 mm), kao i minimalni iznos (31,49 mm) mjere preko zubi, zabilježen je kod hibridnih zupčanika s čeličnim umecima.

Razlika u srednjoj vrijednosti mjere preko zubi ΔW_4 prije (1) i nakon (2) ispitivanja kod toplinski izloženijih gonjenih hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima iznosi $150 \mu\text{m}$, a za gonjene hibridne zupčanike s čeličnim umecima $240 \mu\text{m}$. Kao i kod polimernih zupčanika, pogonski zupčanici se manje troše, a razlika između pogonskih hibridnih zupčanika s aluminijskim ili čeličnim umecima je iznimno mala, svega $10 \mu\text{m}$. Hibridni zupčanici s aluminijskim umecima iskazali su veću otpornost trošenju, a ona je povezana s njihovim manjim zagrijavanjem (Slika 4.19). Zbog manjeg zagrijavanja tvrdoća bokova je veća pa se i bokovi zubi hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima manje troše.



Slika 4.21 Mjera preko zubi prije (1) i nakon (2) ispitivanja hibridnih zupčanika s umecima u obliku trake

Usporedbom promjene mase zupčanika Δm prije (1) i poslije (2) ispitivanja potvrđena je razlika u trošenju hibridnih zupčanika s aluminijskim i čeličnim umecima, a rezultati su prikazani u Tablici 4.3. Kao i kod polimernih zupčanika, toplinski izloženiji i opterećeniji gonjeni hibridni zupčanici izgubili su veći dio mase u odnosu na pogonske. Kod hibridnih zupčanika s čeličnim umecima pogonski zupčanici su izgubili $0,10 \text{ g}$, a gonjeni $0,15 \text{ g}$. Manji gubitak mase uočen je kod hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima gdje su pogonski zupčanici izgubili svega $0,05 \text{ g}$, a gonjeni $0,10 \text{ g}$. Kada se uzme u obzir ukupna masa zupčanika, dodatak čeličnih

umetaka polimernoj matrici rezultirao je oko 17 g težim pogonskim i oko 15 g težim gonjenim zupčanicima nego što je to slučaj kod hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima.

Tablica 4.3 Masa hibridnih zupčanika prije (1) i poslije (2) ispitivanja

Hibridni zupčanici	Aluminijski umeci [g]	Čelični umeci [g]
Pogonski (1) / (2)	49,57 / 49,52	66,91 / 66,81
Gonjeni (1) / (2)	40,42 / 40,32	55,25 / 55,10

Kod hibridnih zupčanika nije uočeno značajnije gomilanje polimernog materijala na vrhu zuba, kao što je slučaj kod polimernih zupčanika, a osim trošenja boka zuba nije zabilježen niti jedan drugi karakterističan tip otkaza. Na Slici 4.22 prikazana su po četiri zuba gonjenog hibridnog zupčanika s najmanjom očitom mjerom preko zubi, a razlike u trošenju su ipak izražene.

(a)



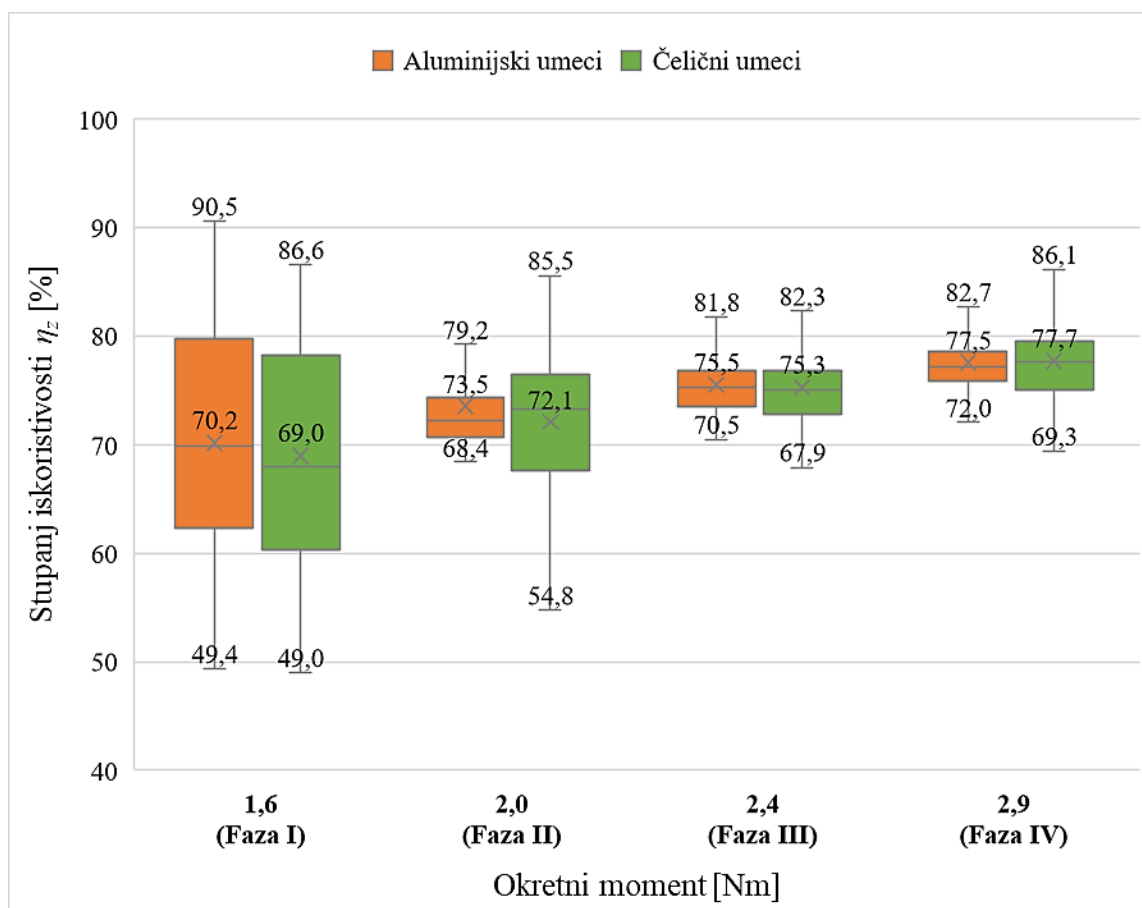
(b)



Slika 4.22 Trošenje boka zuba gonjenog hibridnog zupčanika s (a) aluminijskim i (b) čeličnim umecima

4.2.3. Stupanj iskoristivosti hibridnih zupčanika

Stupanj iskoristivosti η_z hibridnih zupčanika određuje se na isti način kao i kod polimernih pa vrijede i iste pretpostavke i zapažanja. Stupanj iskoristivosti primarno ovisi o koeficijentu trenja u zahvatu sparenih zupčanika te o okretnom momentu, budući da je brzina vrtnje pri kojoj se ispituju zupčanici konstantna i iznosi 1000 min^{-1} . Promjena stupnja iskoristivosti hibridnih zupčanika po fazama ubrzanog postupka ispitivanja prikazana je na Slici 4.23.



Slika 4.23 Stupanj iskoristivosti η_z hibridnih zupčanika s umecima u obliku trake

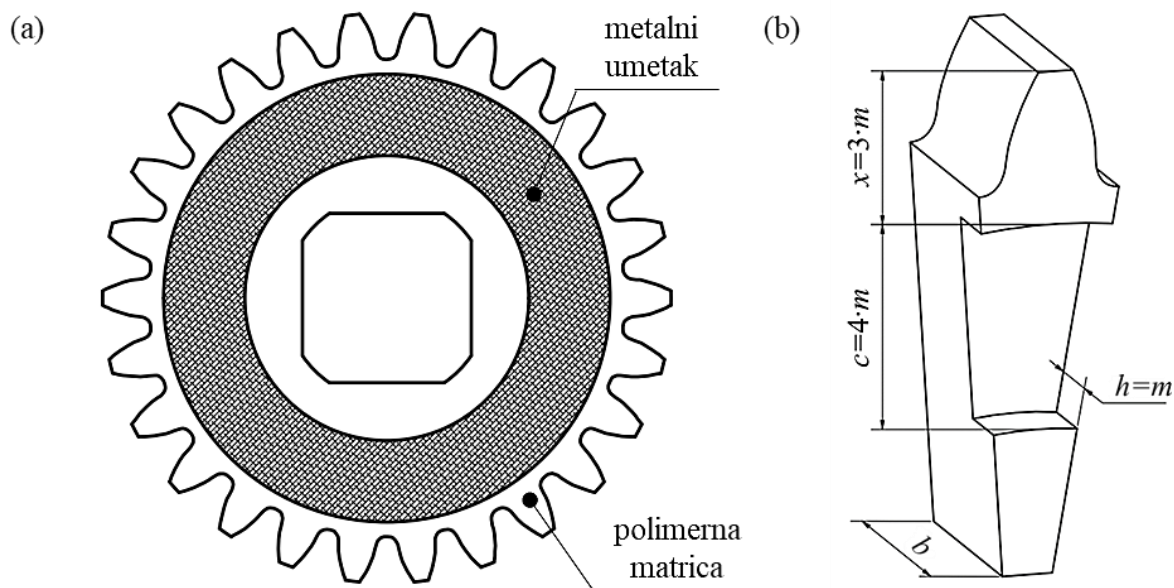
Stupanj iskoristivosti hibridnih zupčanika raste s povećanjem okretnog momenta, neovisno o tome jesu li primijenjeni aluminijski ili čelični umeci. Kroz prvu fazu ubrzanog postupka ispitivanja stupanj iskoristivosti je najniži, uz najveća odstupanja i oscilacije od srednje vrijednosti. S obzirom da je riječ o početnoj fazi uhodavanja rezultati su očekivani. Također, veće oscilacije oko srednje vrijednosti i u drugoj fazi ispitivanja uočene su kod hibridnih zupčanika s čeličnim umecima. To je rezultat oko šest puta manjeg koeficijenta toplinske vodljivosti čelika u odnosu na aluminij, pa se hibridni zupčanik s čeličnim umecima i u drugoj fazi ponaša sličnije polimernim zupčanicima. U prvoj i drugoj fazi ubrzanog postupka ispitivanja uočena je razlika u stupnju iskoristivosti između hibridnih zupčanika s aluminijskim

i čeličnim dodacima, a razlika iznosi oko 1 %. U trećoj i četvrtoj fazi srednje vrijednosti su gotovo identične uz odstupanje od 0,2 %, što je rezultat prilagođavanja i uhodanosti zupčanih parova. Ukupni srednji stupanj iskoristivosti kroz sve četiri faze ubrzanog postupka ispitivanja kod hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima iznosi 74,4 %. Kod hibridnih zupčanika s čeličnim umecima ukupni srednji stupanj iskoristivosti iznosi 73,7 %.

Iako nisu velike, razlike u radnim značajkama između hibridnih zupčanika s aluminijskim i čeličnim umecima postoje. Uzevši u obzir temperaturu tijela zupčanika T_{bulk} , mjeru preko zubi W_4 i promjenu mase Δm kao mjere trošenja, te stupanj iskoristivosti η_z , hibridni zupčanici s aluminijskim umecima u obliku trake pokazali su se kao bolje rješenje. Posebno je bitno naglasiti ukupnu masu hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima koja je gotovo jednaka kao kod ispitivanih polimernih zupčanika veće rezolucije. Razlika u masi između navedenih vrsta zupčanika iznosi manje od 1 g. Na taj način je zadržana jedna od osnovnih prednosti polimernih zupčanika u odnosu na metalne, a to je mala gustoća. Stoga se na sljedeće nove konstrukcijske izvedbe predstavljene u nastavku rada primjenjuju isključivo aluminijski umeci.

4.3. Alternativne konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika

Na temelju nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake osmišljene su još dvije nove konstrukcijske izvedbe. Kod obje nove konstrukcijske izvedbe, o kojima će biti govora u nastavku, generirana toplina se putem konvekcije predaje okolini. Hibridna tehnologija polimera i metala kod koje se toplina odvodi provođenjem pokazala se nedostatnom, stoga je bitno metalni dio izložiti nestrujavanju fluida, u ovom slučaju zraka. Kada su metalni dijelovi s velikim koeficijentom toplinske vodljivosti izloženi strujanju zraka ostvareni su značajni doprinosi u smanjenju zagrijavanja, povećanju otpornosti trošenju i povećanju iskoristivosti para hibridnih zupčanika. Slika 4.24 (a) prikazuje hibridni zupčanik s aluminijskim umetkom u obliku diska, a Slika 4.24 (b) pripadajuću geometriju polimerne matrice koja je jednaka za obje nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika. Polimerna matrica je asimetrična s utorom (paokom) samo s jedne čeone plohe zupčanika, kao i kod konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake. Polimerna matrica sadrži utor (paok) koji je jednak utoru na polimernoj matrici hibridnog zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake, uz izuzetak što ne postoje radijalni utori kroz zupčanik namijenjeni za ostvarivanje čvrste veze između aluminijskih umetaka u obliku trake i polimerne matrice. U ovom slučaju se koriste aluminijski umeci u obliku diska vanjskoj promjera 66 mm te unutarnjeg promjera 42 mm. Promjeri se mogu izraziti i u ovisnosti o modulu zupčanika pa vanjski promjer iznosi 22 vrijednosti modula, a unutarnji 14 vrijednosti modula.

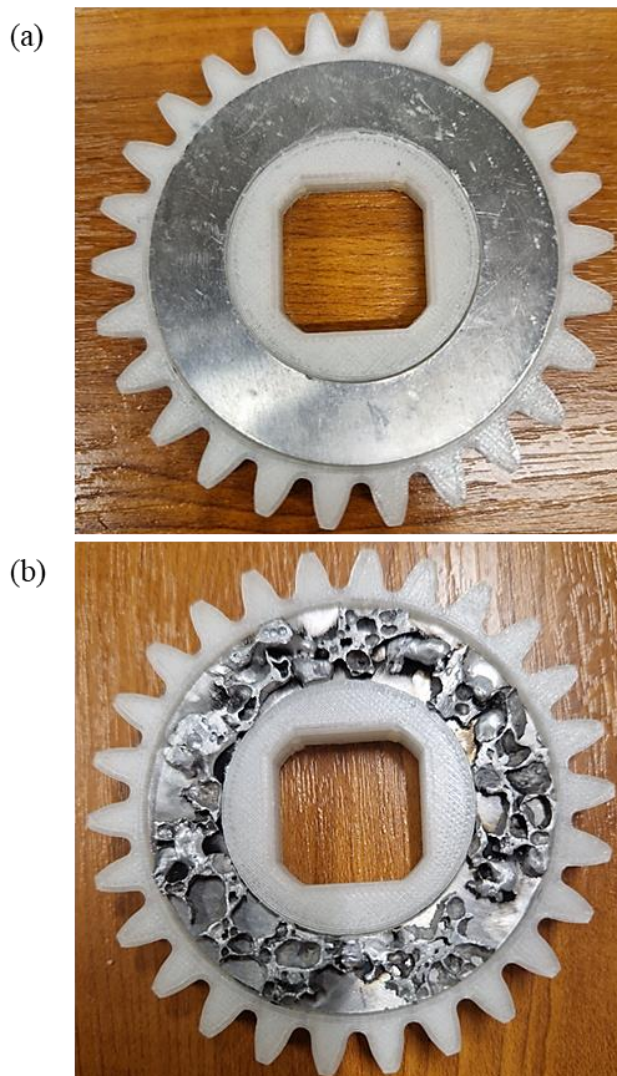


Slika 4.24 (a) Nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika s (b) pripadajućom geometrijom polimerne matrice

Druge dvije nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika sadržavaju metalne umetke u obliku diskova izrađenih od aluminijske legure. Glavna ideja je primijeniti aluminijski umetak sa što većom površinom izloženom nastujavanju zraka, a sve kako bi se toplina odvela konvekcijom. U prvoj od dvije nove izvedbe korišten je jednostavni od aluminijske legure (AlMg3) s navedenim promjerima i ukupnom debljinom koja odgovara modulu zupčanika (3 mm). Disk je izrađen na stroju za lasersko rezanje te je implementiran u polimernu matricu (Slika 4.25 (a)).

Druga izvedba sadržava aluminijski disk kojem je baza također jednostavni disk od legure aluminijske (AlMg3) debljine 1 mm na kojeg je pričvršćena aluminijska pjena proizvedena od otpadnih strugotina aluminijske legure A380 (EN AC AlSi9Cu3(Fe)) [107]. Proizvedena aluminijska pjena ima oblik kvadra s dimenzijama 60 mm x 25 mm x 25 mm (Slika 4.26), a iz takvog sirovca se izrezuju tanke trake debljine 2 mm koje se pričvršćuju na jednostavni aluminijski disk debljine 1 mm. Aluminijska pjena je nova struktura budući da ona nastaje recikliranjem strugotina koje su nastale kao otpadni materijal u drugim procesima strojne obrade. Korištena aluminijska legura A380 primjenjuje se u automobilske industriji i tehnologiji lijevanja pod tlakom [108], a pjena od navedene aluminijske legure proizvedena je na Katedri za tehnologije Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB). Reciklirani aluminij u obliku pjene karakterizira mala gustoća te poroznost zbog koje posjeduje veliku površinu preko koje se može izmijeniti toplina s okolinom. Ipak, zbog velike poroznosti aluminijske pjene dodirna površina između nje i polimerne matrice je smanjena zbog čega se metalna pjena pričvršćuje na jednostavni aluminijski disk debljine 1 mm. Za povezivanje su

korišteni sitni zavari te dvokomponentno ljepilo Loctite EA 3455 koje se uspješno koristi za popravak aluminijskih dijelova. Ljepilo Loctite EA 3455 je pouzdano, ima veliku čvrstoću, visoku viskoznost, a što je najvažnije kvalitetno provodi toplinu. Slika 4.25 (b) prikazuje hibridni zupčanik na kojeg je pričvršćen aluminijski disk s aluminijskom pjenom.



Slika 4.25 Hibridni zupčanik s (a) aluminijskim diskom i (b) aluminijskim diskom s pjenom

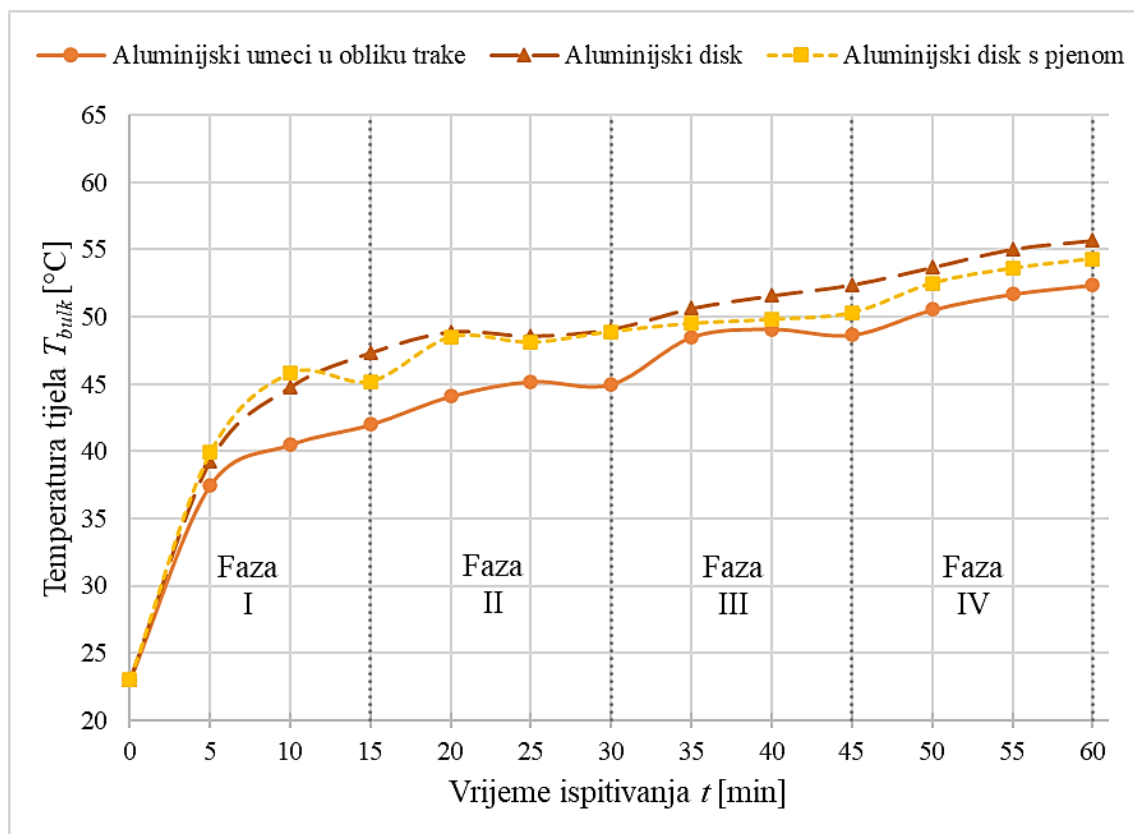


Slika 4.26 Proizvedena aluminijska pjena

Ukupna debljina metalnog umetka kod obje nove konstrukcijske izvedbe je jednaka te odgovara debljini utora (paoka) u polimernoj matrici i iznosi jedan modul zupčanika, odnosno 3 mm. Dodatno, kod obje nove konstrukcijske izvedbe između diska i polimerne matrice namazana je termovodljiva pasta AG Silver, kako bi se osigurao prijenos topline provođenjem s polimerne matrice na aluminijske diskove. U nastavku rada uspoređene su radne značajke za sve tri nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika (aluminijski umeci u obliku trake, aluminijski disk, aluminijski disk s pjenom).

4.3.1. Zagrijavanje hibridnih zupčanika

Uspoređene su temperature tijela T_{bulk} hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake, hibridnih zupčanika s aluminijskim diskom te hibridnih zupčanika s aluminijskim diskom s pjenom. Eksperimentalnim ispitivanjem uočene su razlike u zagrijavanju između navedenih novih konstrukcijskih izvedbi hibridnih zupčanika, a promjena temperature tijela hibridnih zupčanika kroz četiri faze ispitivanja prikazana je na Slici 4.27.



Slika 4.27 Temperatura tijela T_{bulk} hibridnih zupčanika s različitim aluminijskim umecima

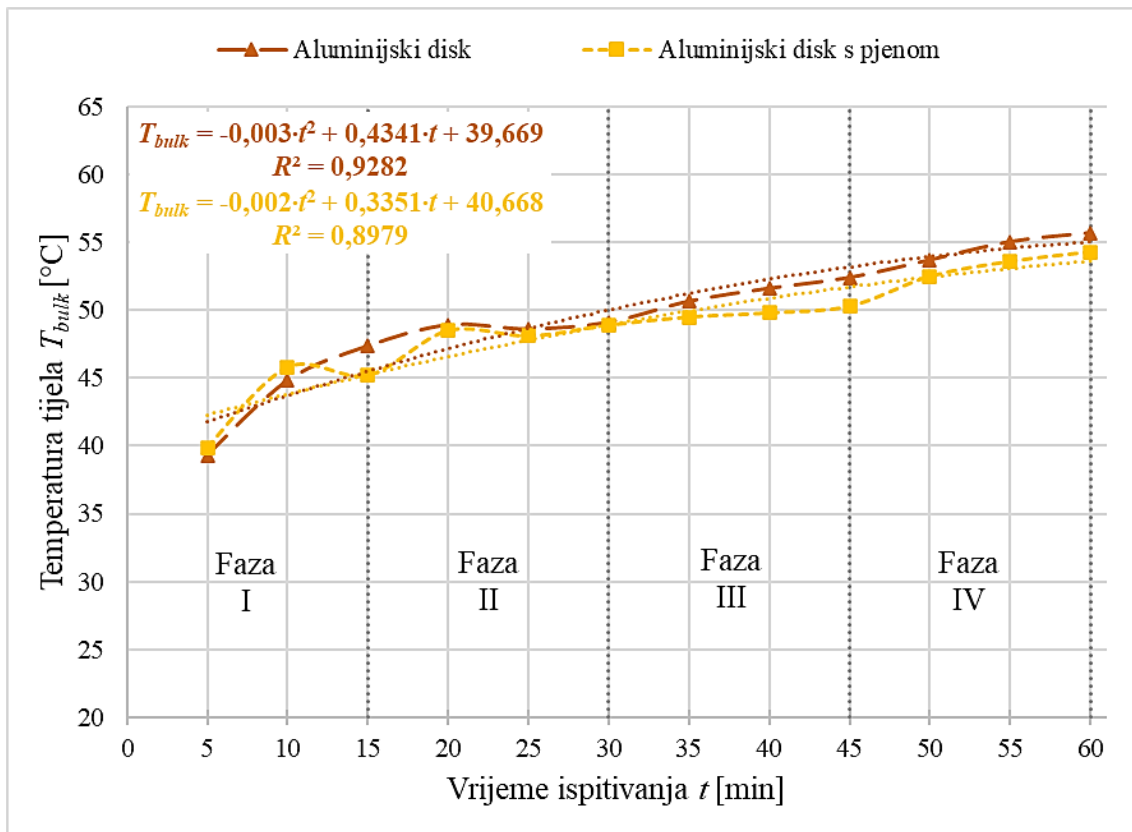
Kao najbolje konstrukcijsko rješenje pokazala se izvedba s aluminijskim umecima u obliku trake. Kroz sve četiri faze ubrzanog postupka ispitivanja navedena konstrukcijska izvedba ostvarila je najmanje zagrijavanje. Kod hibridnih zupčanika s aluminijskim diskom i hibridnih

zupčanika u koje je umetnut aluminijski disk s pjenom, izmjerene su slične temperature tijela kroz prve dvije faze ispitivanja. U trećoj i četvrtoj fazi zabilježeno je blago niža temperatura tijela kod hibridnih zupčanika s aluminijskim diskom s pjenom. Konstrukcijska izvedba hibridnih zupčanika kod koje se koriste aluminijski umeci u obliku trake karakterizira prisilna konvekcija. Prilikom vrtnje zupčanika zrak direktno nastrojava na aluminijske umetke zbog čega se uspješno odvodi toplina i hladi polimerna matrica. Iako je za prisilnu konvekciju potreban ventilator, kao što je to slučaj u sustavima grijanja i hlađenja, kod hlađenja računala, u hladnjaku automobila i sl., u ovom slučaju je konstrukcijski oblik hibridnih zupčanika, odnosno položaj aluminijskih umetaka u obliku trake, uzrokovao strujanje zraka. Takav oblik nastrojavanja fluida na aluminijske umetke u obliku trake usporediv je s rotacijskim kolom ventilatora (lopaticice ventilatora), ali sa značajno primitivnijom geometrijom. Uostalom, u praksi postoje slučajevi kada se na vratila postavljaju rotacijska kola ventilatora kako bi se pospješilo strujanje zraka i time hlađenje, a klasičan primjer su kavezni asinkroni elektromotori.

Kod druge dvije nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika, s aluminijskim diskom te aluminijskim diskom s pjenom, nije uspostavljen značajan oblik prisilne konvekcije, već se toplina uglavnom predaje okolini putem slobodne konvekcije. U tom je slučaju strujanje fluida rezultat razlike u temperaturi, a koje se nije pokazalo jednako učinkovito kao i nastrojavanje fluida na aluminijske umetke u obliku trake. Kod hibridnih zupčanika s aluminijskim diskom prilikom vrtnje zupčanika zrak samo oplahuje površinu aluminijskog diska, a kod hibridnih zupčanika s aluminijskim diskom s pjenom zrak direktno nastrojava samo na male dijelove aluminijske pjene. Ipak, čak i mali udio prisilne konvekcije rezultirao je od 0,4 °C do 1,7 °C nižom srednjom temperaturom tijela hibridnih zupčanika u kojeg je umetnut aluminijski disk s pjenom u odnosu na hibridne zupčanike s aluminijskim diskom. Iznimka je početna faza gdje im je srednja temperatura tijela kroz cijelu prvu fazu bila gotovo jednaka.

Iako aluminijski disk s pjenom posjeduje veliku površinu za izmjenu topline s okolinom, a aluminijski disk veliki toplinski kapacitet, izostanak dovoljno velike površine na koju zrak direktno nastrojava i uslijed čega se toplina prisilno odvodi konvekcijom, rezultira najnižom izmjerenom temperaturom tijela T_{bulk} kod hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake. Kroz cijeli ubrzani postupak ispitivanja izmjerena je od 0,7 °C do 5,4 °C niža temperatura tijela hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake u odnosu na druge dvije nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika. Kroz prve dvije faze ispitivanja razlika je veća (od 1,8 °C do 5,4 °C), dok se porastom opterećenja i stabilizacijom temperature duž tijela zupčanika razlika djelomično smanjila (od 0,7 °C do 3,7 °C).

S gledišta zagrijavanja, konstrukcijska izvedba hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake pokazala se kao najbolje rješenje. Međutim, sve tri nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika ostvarile su doprinos po pitanju zagrijavanja u odnosu na polimerne zupčanike. Na Slici 4.28 prikazan je dijagram promjene temperature tijela T_{bulk} hibridnih zupčanika s aluminijskim diskom i s aluminijskim diskom s pjenom. Na dijagramu su naznačene linije trenda rasta i matematički modeli za predviđanje temperature tijela.

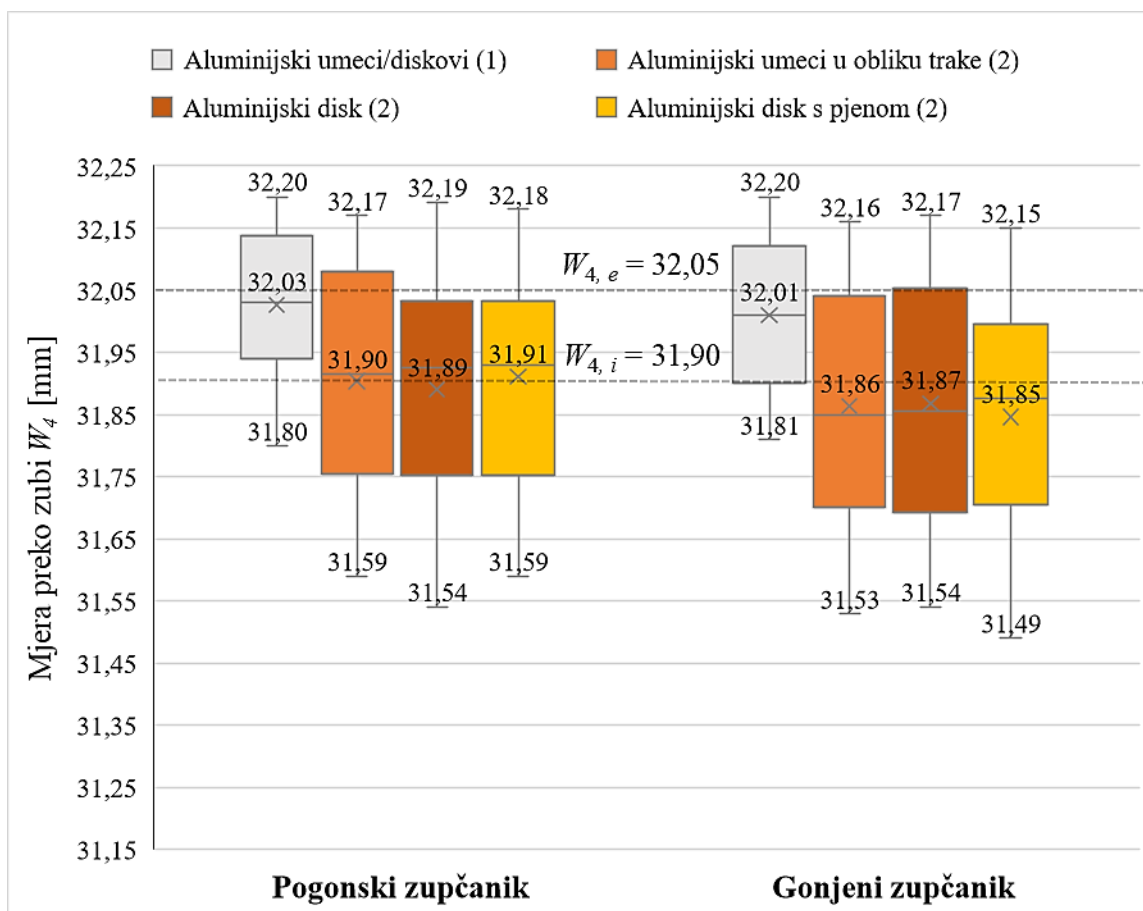


Slika 4.28 Matematički modeli za predviđanje temperature tijela T_{bulk} hibridnih zupčanika s aluminijskim diskom i diskom s aluminijskom pjenom

4.3.2. Trošenje hibridnih zupčanika

Na Slici 4.29 prikazani su rezultati mjere preko četiri zuba W_4 pogonskih i gonjenih hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake, aluminijskim diskom te aluminijskim diskom s pjenom. Prikazani su iznosi minimalnih i maksimalnih odstupanja od srednje vrijednosti, srednja vrijednost te medijan. Kao i kod prethodnih analiza trošenja, uočeno je veće trošenje toplinski izloženijih gonjenih zupčanika u odnosu na pogonske, a trošenje je posljedica abrazije. Mjerenjem mjere preko zubi nakon ispitivanja (2) zaključeno je da ne postoji značajna razlika u trošenju između tri nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika. Razlike u

srednjim vrijednostima mjere preko zubi ΔW_4 između svih novih konstrukcijskih izvedbi hibridnih zupčanika su male i iznose od 10 μm do 20 μm .



Slika 4.29 Mjera preko zubi prije (1) i nakon (2) ispitivanja hibridnih zupčanika s različitim aluminijским umecima

Usporedbom promjene mase Δm hibridnih zupčanika prije (1) i poslije (2) ispitivanja uočene su male razlike, na što ukazuje i mjera preko zubi, a rezultati mjerenja dani su u Tablici 4.4.

Tablica 4.4 Masa hibridnih zupčanika s aluminijским umecima/diskom prije (1) i poslije (2) ispitivanja

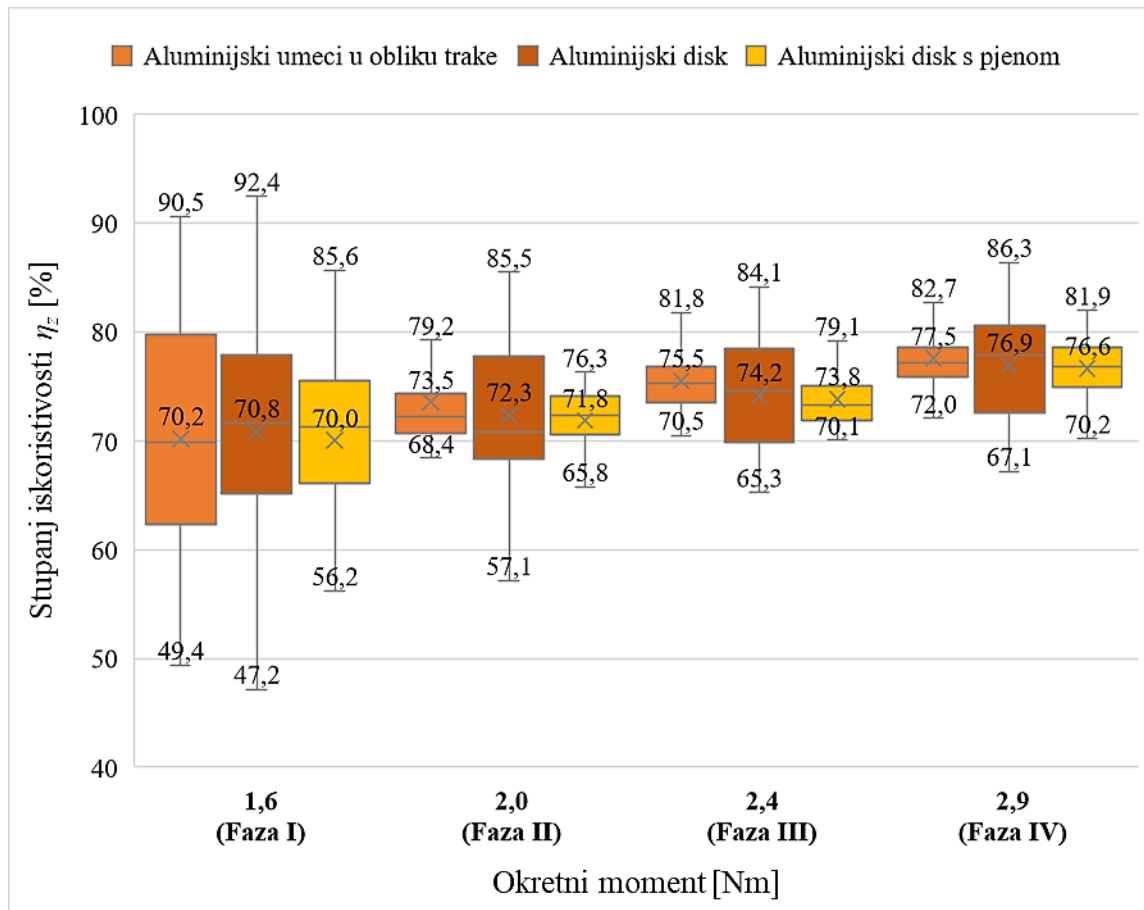
Hibridni zupčanici s aluminijским umecima/diskom	Aluminijски umeci u obliku trake [g]	Aluminijски disk [g]	Aluminijски disk s pjenom [g]
Pogonski (1) / (2)	49,57 / 49,52	55,35 / 55,24	48,35 / 48,26
Gonjeni (1) / (2)	40,42 / 40,32	47,36 / 47,24	41,82 / 41,68

Veća promjena mase Δm zabilježena je kod svih gonjenih zupčanika u odnosu na pogonske, a najmanje trošenje zabilježeno je kod hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake. Kod hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake pogonski zupčanik je poslije (2) ispitivanja bilo lakši za 0,05 g, a gonjeni za 0,10 g. Iako je razlika relativno mala, manje trošenje boka zuba izmjereno je kod hibridnih zupčanika s aluminijskim diskom u odnosu na hibridne zupčanike s aluminijskim diskom s pjenom. Razlika u masi prije (1) i nakon (2) ispitivanja kod hibridnih zupčanika s aluminijskim diskom iznosi 0,11 g za pogonske, odnosno 0,12 g za gonjene zupčanike. Kod hibridnih zupčanika s aluminijskim diskom s pjenom pogonski su zupčanici bili lakši za 0,09 g, a gonjeni za 0,14 g. Po pitanju ukupne mase, dodatak aluminijskog diska najviše je povećao masu zupčanika. Razlika između hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake ili s aluminijskim diskom s pjenom relativno je mala (oko 1 g). Potrebno je napomenuti da masa aluminijskog diska s pjenom može varirati jer pjena nije homogena te nije moguće precizno kontrolirati njenu gustoću prilikom izrade.

Uzevši u obzir mjeru preko zubi W_4 i promjenu mase Δm hibridnih zupčanika sve tri nove konstrukcijske izvedbe pokazale su se zadovoljavajuće, uz male razlike u trošenju. U odnosu na polimerne zupčanike ostvarena je veća otpornost prema trošenju boka zuba.

4.3.3. Stupanj iskoristivosti hibridnih zupčanika

Promjena stupnja iskoristivosti η_z za tri nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika za vrijeme ubranog postupka ispitivanja prikazana je na Slici 4.30. Izmjerene su zanemarivo male razlike među ispitivanim hibridnim zupčanicima u prvoj fazi, a u ostale tri faze razlike u srednjoj vrijednosti stupnja iskoristivosti odstupale su od 0,9 % do 1,7 %. Hibridni zupčanici u koje je umetnut aluminijski disk s pjenom ostvarili su najniži stupanj iskoristivosti kroz sve četiri faze ubranog postupka ispitivanja uz ukupni srednji stupanj iskoristivosti od 73 %. Samo blago veći ukupni srednji stupanj iskoristivosti u iznosu od 73,5 % izmjeren je kod hibridnih zupčanika s aluminijskim diskom. Kod hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake ukupni srednji stupanj iskoristivosti iznosi 74,4 %. Iako razlike u stupnju iskoristivosti nisu velike, hibridni zupčanici s aluminijskim umecima u obliku trake iskazali su se kao nova konstrukcijska izvedba hibridnih zupčanika s najvećom iskoristivosti zupčanog para. Ako se tome pridoda da su isti ostvarili i najveći doprinos po pitanju zagrijavanja (hlađenja) te otpornosti trošenju, proizlazi zaključak da su hibridni zupčanici s aluminijskim umecima u obliku trake najbolje konstrukcijsko rješenje među novim predloženim izvedbama hibridnih zupčanika.



Slika 4.30 Stupanj iskoristivosti η_z hibridnih zupčanika s različitim aluminijskim umecima

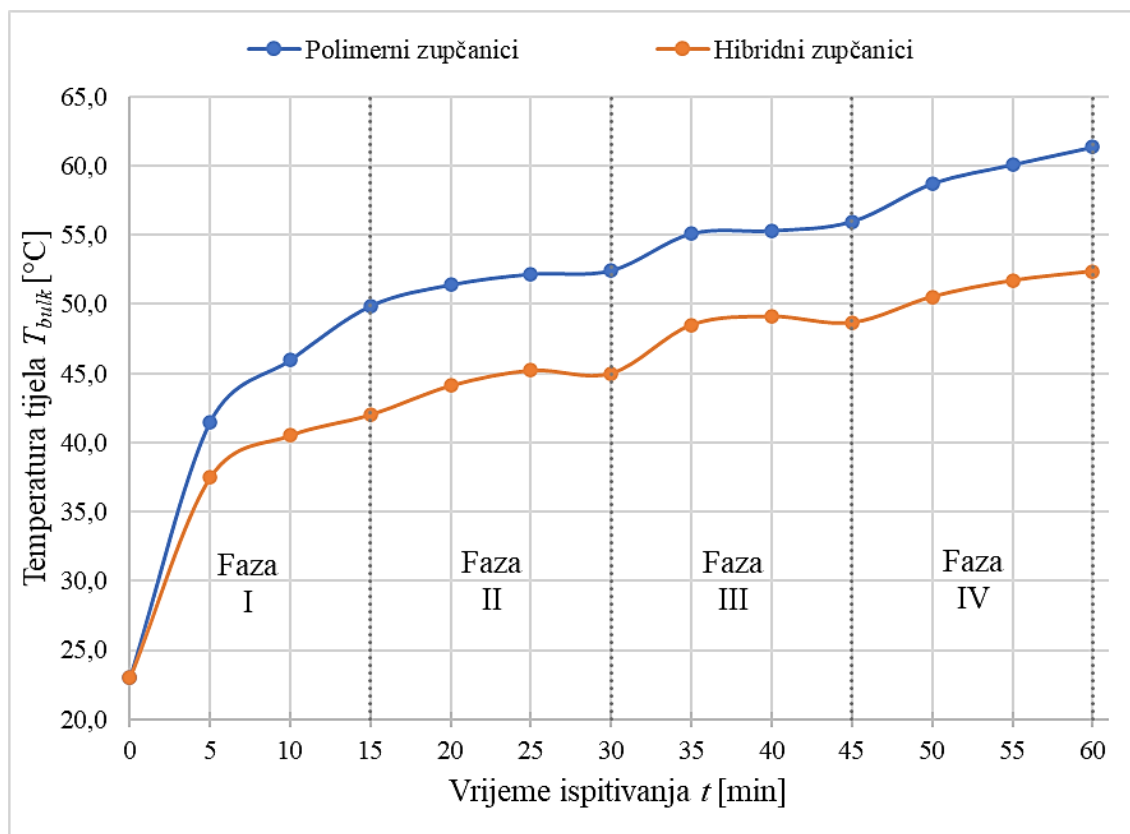
Kod sve tri nove predložene konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika uočeno je poboljšanje svih radnih značajki u odnosu na polimerne zupčanike: temperature tijela T_{bulk} zupčanika, mjere preko zubi W_4 i promjene mase Δm kao mjera trošenja, te stupnja iskoristivosti η_z . Međutim, na temelju navedenih radnih značajki, hibridni zupčanici s aluminijskim umecima u obliku trake pokazali su se kao najbolje konstrukcijsko rješenje u odnosu na sve izvedbe koje su analizirane u ovome i prethodno objavljenim istraživanjima. U nastavku rada prikazana je usporedba radnih značajki hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake i polimernih zupčanika.

4.4. Usporedba radnih značajki polimernih i hibridnih zupčanika

Kako bi se istaknulo i naglasilo ukupno poboljšanje radnih značajki usporedno su prikazani eksperimentalni rezultati koje su ostvarili hibridni i polimerni zupčanici. Uspoređene su radne značajke izmjerene kod polimernih zupčanika veće rezolucije s radnim značajkama najbolje nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika. Kao najbolje konstrukcijsko rješenje u ovom istraživanju usvojeni su hibridni zupčanici s aluminijskim umecima u obliku trake, a u nastavku rada se naziv hibridni zupčanici odnosi upravo na ovu najbolju novu konstrukcijsku izvedbu.

4.4.1. Zagrijavanje polimernih i hibridnih zupčanika

Razlika u zagrijavanju između polimernih zupčanika proizvedenih u većoj rezoluciji i hibridnih zupčanika potvrđena je mjerenjem temperature tijela T_{bulk} zupčanika (Slika 4.31). Za vrijeme cijelog ubrzanog postupka ispitivanja ostvareni su bolji rezultati te je izmjerena niža temperatura tijela kod hibridnih zupčanika u odnosu na polimerne.



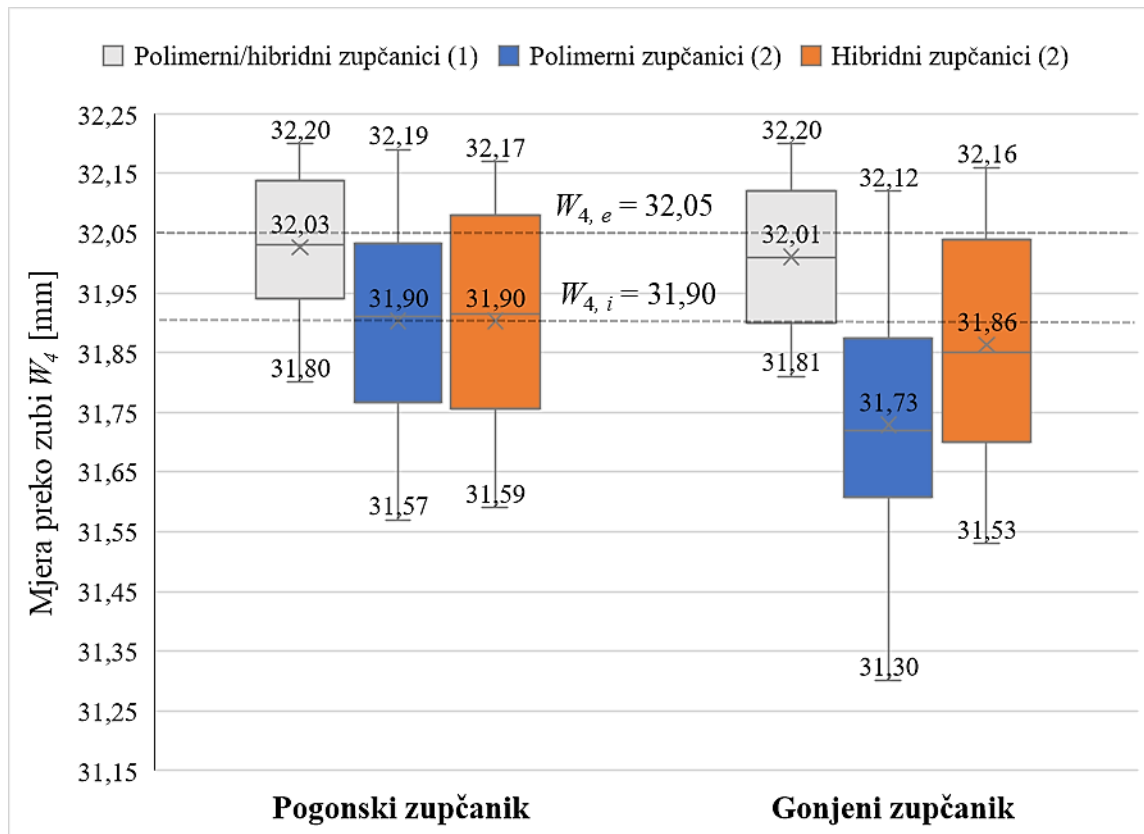
Slika 4.31 Usporedba temperature tijela T_{bulk} polimernih i hibridnih zupčanika

Razlika u temperaturi tijela između polimernih i hibridnih zupčanika raste s povećanjem okretnog momenta, a najveća razlika je zabilježena u posljednjoj, četvrtoj, fazi ubrzanog postupka ispitivanja. Na kraju posljednje faze, pri okretnom momentu od 2,9 Nm, izmjerena je gotovo 9 °C niža temperatura tijela hibridnih zupčanika u odnosu na polimerne zupčanike, a takva razlika u zagrijavanju ukazuje na oko 17 % manje zagrijavanje hibridnih zupčanika. Srednja razlika kroz četvrtu fazu ubrzanog ispitivanja iznosi 8,5 °C. Kroz prvu fazu (1,6 Nm) zabilježena je srednja razlika u temperaturi u iznosu od 5,8 °C. U drugoj fazi pri okretnom momentu od 2,0 Nm srednja razlika je iznosila 7,2 °C. U trećoj fazi ubrzanog postupka ispitivanja (2,4 Nm) izmjerena je srednja razlika u temperaturi u iznosu od 6,7 °C, malo manja nego što je zabilježeno u drugoj fazi. Ukupna srednja razlika u temperaturi tijela između polimernih i hibridnih zupčanika iznosi 7 °C.

Prema eksperimentalnim rezultatima temperature tijela T_{bulk} kroz sve četiri faze ubrzanog postupka ispitivanja, posebno u posljednjoj fazi, do izražaja je došla glavna značajka hibridnih zupčanika, a to je značajno bolja toplinska vodljivost. Kod hibridnih zupčanika izmjerena je čak do 17 % niža temperatura tijela T_{bulk} u odnosu na polimerne zupčanike, a razlog je bolji prijenos topline kojem je doprinijela implementacija aluminijskih umetaka u polimernu matricu zupčanika.

4.4.2. Trošenje polimernih i hibridnih zupčanika

Usporedbom trošenja boka zuba između polimernih i hibridnih zupčanika uočena je poveznica između zagrijavanja i trošenja. Određivanjem mjere preko četiri zuba W_4 i promjene mase Δm prije (1) i poslije (2) ispitivanja, zabilježene su razlike između polimernih zupčanika i hibridnih zupčanika, a rezultati su prikazani na Slici 4.32.



Slika 4.32 Mjera preko zubi prije (1) i nakon (2) ispitivanja polimernih i hibridnih zupčanika

Razlika u trošenju zubi prema očitanim vrijednostima mjere preko zubi kod pogonskih polimernih i hibridnih zupčanika ne postoji te se srednje vrijednosti podudaraju, a značajne razlike nema ni u maksimalnim i minimalnim iznosima. Međutim, na gonjenim zupčanicima koji su toplinski izloženiji i opterećeniji uočena je značajna disproporcija. Srednja vrijednost razlike mjere preko zubi ΔW_4 kod polimernih zupčanika poslije ispitivanja (2) je 130 μm manja

u odnosu na hibridne zupčanike, što predstavlja značajno trošenje. Kada se tome pridoda i veća promjena mase Δm polimernih zupčanika u odnosu na hibridne (Tablica 4.5), veća otpornost trošenju hibridnih zupčanika u odnosu na polimerne predstavlja značajan doprinos. Na pogonskim polimernim zupčanicima izmjerena je promjena mase od 0,38 g, dok kod hibridnih ta promjena iznosi 0,05 g. Gonjeni polimerni zupčanci izgubili su 0,54 g, a kod hibridnih promjena mase iznosi samo 0,10 g. Razlika u trošenju boka zuba opterećenijih gonjenih polimernih i hibridnih zupčanika kod kojih je izmjerena najmanja mjera preko zubi prikazana je na Slici 4.33.

Tablica 4.5 Masa polimernih i hibridnih zupčanika prije (1) i poslije (2) ispitivanja

Zupčanici	Polimerni [g]	Hibridni [g]
Pogonski (1) / (2)	48,82 / 48,44	49,57 / 49,52
Gonjeni (1) / (2)	39,82 / 39,28	40,42 / 40,32

(a)



(b)

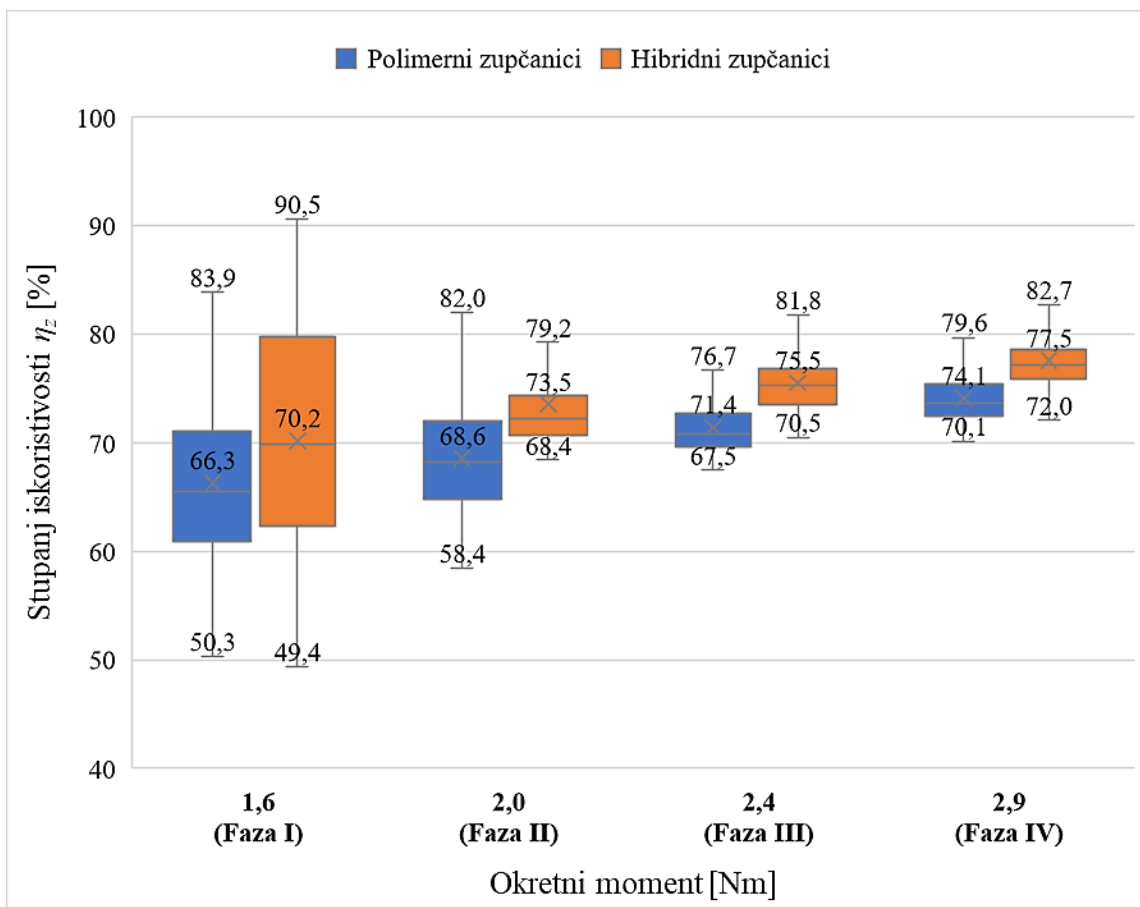


Slika 4.33 Trošenje boka zuba gonjenog (a) polimernog i (b) hibridnog zupčanika

Značajna promjena mase među pogonskim zupčanicima ne podudara se sa srednjim vrijednostima mjere preko zubi, koja jednaka za polimerne i hibridne zupčanike. Razlog je odstranjivanje nagomilanog materijala (srhova) koji nastaje uslijed klizanja bokova kod polimernih zupčanika (Slika 4.10), a koji nije u značajnoj mjeri zabilježen kod hibridnih zupčanika. Kod polimernih zupčanika odstranjen je nagomilani materijal koji se pojavio kako ne bi utjecao na kontrolnu mjeru preko zubi, ali ne sasvim jednoliko pa postoje određena odstupanja. U ovom slučaju to svakako nije presudno budući da je u fokusu toplinski izloženiji i opterećeniji gonjeni zupčanik. Također, povećanje otpornosti trošenju hibridnih zupčanika nije utjecalo na njihovu gustoću, koja je općenito jedno od najvažnijih prednosti polimera u odnosu na metale. Promatrajući ukupnu masu polimernih i hibridnih zupčanika, bilo pogonskih ili gonjenih, razlika je manja od 1 g, odnosno manja od 2 %.

4.4.3. Stupanj iskoristivosti polimernih i hibridnih zupčanika

Manje zagrijavanje i veća otpornost trošenju hibridnih zupčanika u odnosu na polimerne odrazila se i na vrijednosti stupnja iskoristivosti η_z (Slika 4.34).

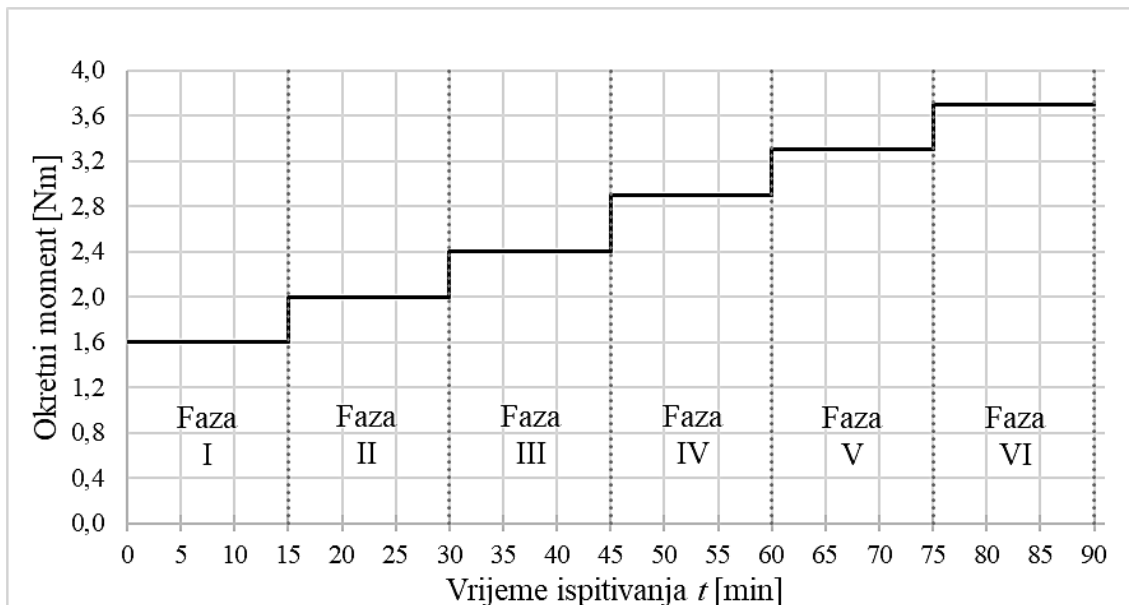


Slika 4.34 Stupanj iskoristivosti η_z polimernih i hibridnih zupčanika

U prvoj fazi ubrzanog postupka ispitivanja, gdje i polimerni i hibridni zupčanici imaju najnižu iskoristivost, zabilježena je razlika u srednjoj vrijednosti stupnja iskoristivosti u iznosu od 3,9 %. Najveća razlika zabilježena je u drugoj fazi (4,9 %), dok se u trećoj (4,1 %) i četvrtoj (3,4 %) fazi razlika postupno smanjivala. I kod polimernih i kod hibridnih zupčanika stupanj iskoristivosti raste s porastom okretnog momenta. Međutim, zbog manjeg trošenja, i time pravilnijeg spreznja prilikom prolaska zuba kroz zahvat, zabilježen je veći stupanj iskoristivosti hibridnih zupčanika. Ukupni srednji stupanj iskoristivosti kroz cijeli ubrzani postupak ispitivanja kod polimernih zupčanika iznosi 70,3 %, a kod hibridnih 74,4 %, što predstavlja ukupno poboljšanje te radne značajke od čak 4,1 %.

4.4.4. Granice nosivosti polimernih i hibridnih zupčanika

U nastavku istraživanja određene su granice nosivosti ili opteretivosti polimernih i hibridnih zupčanika proizvedenih FDM postupkom aditivne tehnologije. Također, određene su kritične temperature tijela T_{bulk} pri kojima dolazi do otkaza ispitivanih zupčanika. Kako bi se odredile granice nosivosti neophodno je proširiti ubrzani postupak ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja (Slika 3.6), budući da za vrijeme tog ispitivanja nije došlo do otkaza polimernih ili hibridnih zupčanika. Stoga je postupak ispitivanja proširen (Slika 4.35) pa je u petoj fazi dodatno povećan okretni moment na iznos od 3,3 Nm te u šestoj fazi na 3,7 Nm. Vrijeme trajanja pete i šeste faze odgovara svim prethodnim fazama i iznosi 15 minuta.

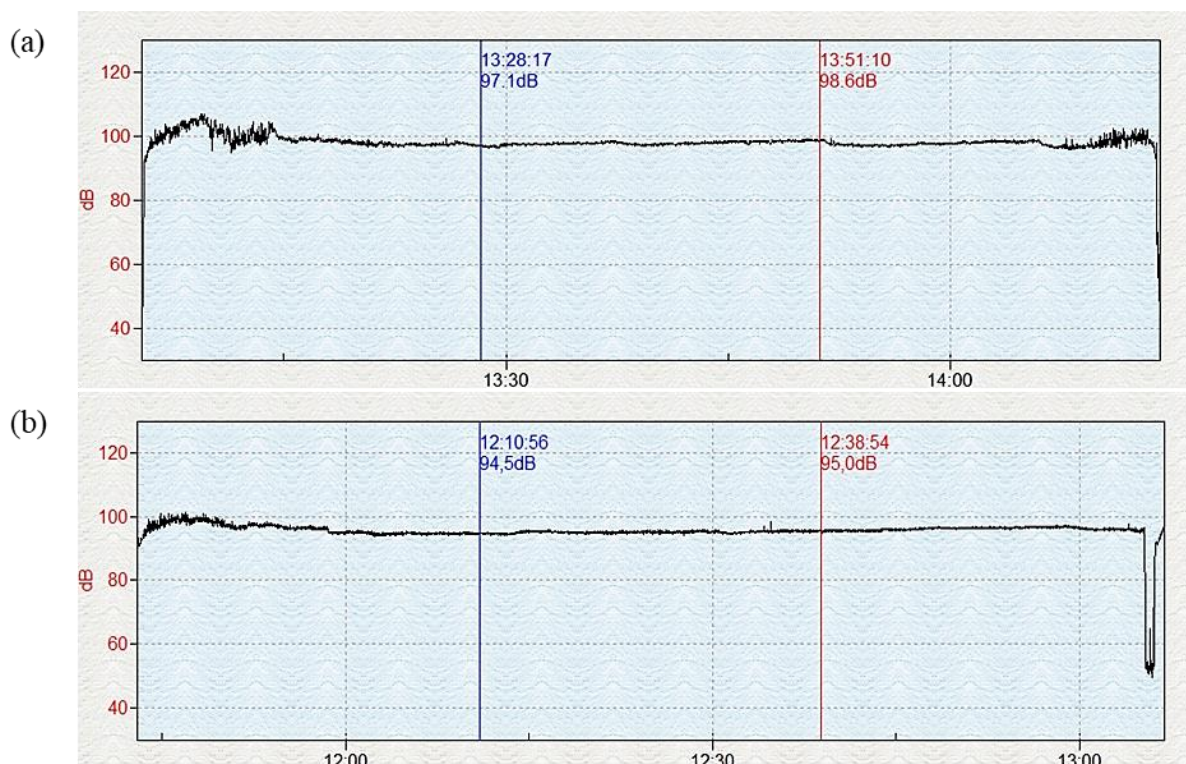


Slika 4.35 Prošireni ubrzani postupak ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja

Polimerni i hibridni zupčanici su ispitivani do otkaza, prema definiranim kriterijima u potpoglavlju 3.1.2. Vrijeme do otkaza zupčanika obično se izražava brojem ciklusa stoga je

potrebno pomnožiti vrijeme ispitivanja s brzinom vrtnje. S obzirom da brzina vrtnje za vrijeme ispitivanja iznosi 1000 min^{-1} , broj ciklusa je jednostavno odrediti. Jedna minuta ubrzanog postupka ispitivanja odgovara 1000 ciklusa, stoga svaka faza predstavlja 15000 ciklusa pri određenom nivou opterećenja.

Kriteriji za otkaz ispitivanih polimernih i hibridnih zupčanika su prekid prijenosa ili nagli porast okretnog momenta te porast ili opadanje razine buke. Prekid prijenosa, ili nagli porast okretnog momenta, reguliran je preko PLC jedinice, dok se razina buke kontinuirano prati za vrijeme ubrzanog postupka ispitivanja. Određena gornja granična vrijednost razine buke u iznosu od 105 dB mora biti postojana duže od trideset (30) sekundi, u protivnom se ispitivanje ne prekida. Razlog je to što kroz početni period uhodavanja zupčanika, o kojem je bilo govora ranije, razina buke može biti i veća, ali samo kratkotrajno. Slika 4.36 prikazuje promjenu razine buke, kao jednog od kriterija, za vrijeme ispitivanja polimernih i hibridnih zupčanika u svrhu određivanja granica nosivosti ili opteretivosti.

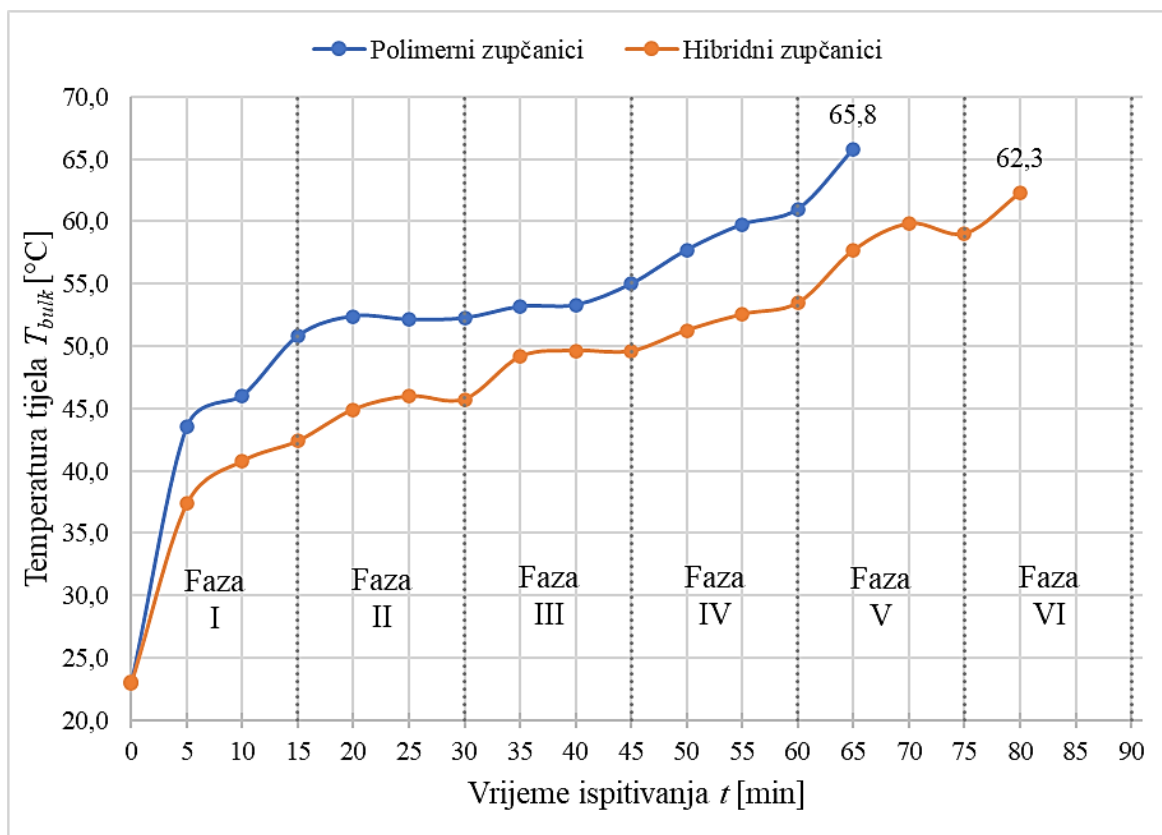


Slika 4.36 Promjena razine buke za vrijeme ispitivanja (a) polimernih i (b) hibridnih zupčanika

Neposredno prije otkaza polimernih zupčanika zabilježene su veće oscilacije i porast razine buke (Slika 4.36 (a)). S druge strane, kod hibridnih zupčanika takva pojava nije zabilježena (Slika 4.36 (b)). Općenito, u početnoj fazi uhodavanja zabilježena je veća razina buke i kod polimernih i kod hibridnih zupčanika, ali je uočen tiši i mirniji rad kod hibridnih zupčanika za

vrijeme cijelog postupka ispitivanja. Navedeno zapažanje odgovara manjem trošenju i posljedično pravilnijem i postojanijem zahvatu hibridnih zupčanika u odnosu na polimerne, a koji se odrazio na zagrijavanje i stupanj iskoristivosti.

Slika 4.37 prikazuje promjenu temperature tijela T_{bulk} do trenutka otkaza polimernih i hibridnih zupčanika, a u dijagramu su naznačene dodatne dvije faze ispitivanja. Otkaz polimernih zupčanika uslijedio je nakon šezdeset osam (68) minuta ispitivanja u petoj fazi ubrzanog postupka pri okretnom momentu od 3,3 Nm. Hibridni zupčanici izdržali su cijelu petu fazu, a otkaz je uslijedio u šestoj fazi, nakon 84 minute, pri okretnom momentu od 3,7 Nm. Prema rezultatima ispitivanja ukupni radni vijek polimernih zupčanika je 68000 ciklusa, a hibridnih 84000 ciklusa. Kako se temperatura tijela bilježi svakih pet minuta, posljednja zabilježena temperatura tijela polimernih zupčanika u petoj minuti pete faze iznosila je 65,8 °C, dok je kod hibridnih zupčanika posljednja izmjerena temperatura tijela iznosila 62,3 °C, i to u petoj minuti šeste faze. Usporedbom broja ciklusa do otkaza ostvaren je 24 % dulji radni vijek hibridnih zupčanika u odnosu na polimerne, uz važnu napomenu da je riječ o rezultatima dobivenim ubrzanim postupkom ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja.



Slika 4.37 Usporedba temperature tijela T_{bulk} polimernih i hibridnih zupčanika prilikom određivanja granica nosivosti

Konačno, za polimerne zupčanike usvaja se granica nosivosti ili opteretivosti u iznosu od 2,9 Nm, a za hibridne 3,3 Nm, čime je ostvarena 14 % veća nosivost hibridnih zupčanika u odnosu na polimerne. Mjera preko zubi W_4 i promjena, točnije gubitak, mase Δm zupčanika, kao mjere trošenja boka zuba, nisu uzete u obzir kod određivanja granica nosivosti, budući da su zupčanici u potpunosti otkazali pri ispitivanju. Otkaz zupčanika je posljedica preopterećenja i pregrijavanja koje je dovelo do taljenja zuba zupčanika. Iznimno je za hibridne zupčanike određena srednja vrijednost stupnja iskoristivosti η_z u iznosu od 77,3 % kroz petu fazu ispitivanja, ukazujući da je iskoristivost ostala gotovo jednaka kao i u četvrtoj fazi. Kod obje vrste zupčanika zabilježen je značajan pad stupnja iskoristivosti neposredno prije otkaza zupčanika zbog poremećaja u zahvatu prilikom sprezanja bokova zubi.

Zaključno, hibridna tehnologija polimera i metala koja objedinjuje prednosti oba materijala, doprinijela je poboljšanju radnih značajki hibridnih zupčanika u odnosu na polimerne, pri čemu su PA polimerni zupčanici i PA polimerna matrica hibridnih zupčanika proizvedeni istim FDM postupkom aditivne tehnologije, uz jednaku geometriju ozubljenja. Bolje provođenje topline hibridnih zupčanika, a posebno nove konstrukcijske izvedbe s aluminijskim umecima u obliku trake gdje se toplina dominantno provodi konvekcijom, rezultiralo je manjim zagrijavanjem (do 9 °C ili 17 %), većom otpornošću trošenju određenom mjerom preko zubi (razlika 130 μm) i promjenom mase (razlika 0,44 g na gonjenim zupčanicima), većim stupnjem iskoristivosti (prosječno 4,1 %), duljim radnim vijekom (24 %) i većom nosivosti (14 %) u odnosu na polimerne zupčanike. Jako je važno naglasiti da pri tom nije značajno povećana ukupna masa hibridnih zupčanika u odnosu na polimerne (manje od 1 g ili 2 %), s obzirom da je mala gustoća jedno od najvažnijih prednosti polimera u odnosu na metale. Poboljšanje radnih značajki, temperature tijela T_{bulk} kao mjere zagrijavanja, mjere preko zubi W_4 i promjene mase Δm kao mjera trošenja, stupnja iskoristivosti η_z , ali i povećanje radnog vijeka i nosivosti, predstavljaju nove relevantne eksperimentalne mjerne rezultate koji direktno dokazuju hipotezu ovog doktorskog rada.

5. STATISTIČKA OBRADA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA, MODELIRANJE RADNIH ZNAČAJKI I OPTIMIZACIJA ULAZNIH PARAMETARA ISPITIVANJA NOVE KONSTRUKCIJSKE IZVEDBE HIBRIDNIH ZUPČANIKA

U ovom poglavlju prošireno je eksperimentalno istraživanje na novoj konstrukcijskoj izvedbi hibridnih zupčanika s PA polimernom matricom i aluminijskim umecima u obliku trake, a koji su ostvarili najveće poboljšanje radnih značajki. Provedeno je eksperimentalno ispitivanje utjecaja ulaznih parametara ili faktora koji utječu na radne značajke hibridnih zupčanika, a to su okretni moment (opterećenje), brzina vrtnje i vrijeme ispitivanja. Cilj je određivanje matematičkih modela kojima se opisuje utjecaj navedenih ulaznih parametara na radne značajke (zagrijavanje, trošenje i iskoristivost), kao i njihova optimizacija. Iako je utjecaj okretnog momenta na radne značajke proveden kroz ubrzani postupak ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja, zbog validacije rezultata u nastavku su provedena ispitivanja s konstantnim opterećenjem. U tu svrhu, kao jedan od ulaznih parametara odabrano je vrijeme ispitivanja, kako bi se validirala primijenjena stupnjevita promjena opterećenja unutar ubranog postupka. U ubranom postupku okretni moment se povećavao svakih petnaest (15) minuta pa je cilj odrediti minimalno potrebno vrijeme pri određenom okretnom momentu, za koje bi rezultati bili relevantni i pouzdani, a sve u svrhu povećanja učinkovitosti ubranog postupka ispitivanja. Također, istražen je utjecaj brzine vrtnje na radne značajke hibridnih zupčanika, budući da je ubrzani postupak ispitivanja proveden pri konstantnoj brzini vrtnje od 1000 min^{-1} .

5.1. Planiranje i parametri eksperimenta

Planiranje (koncipiranje) eksperimenta ili pokusa bitan je pristup u istraživanju kojim je moguće odrediti utjecaj velikog broja parametara na određene procese uz statistički pristup pojavama. U ovom radu promatran je utjecaj ulaznih parametara na radne značajke hibridnih zupčanika. Plan eksperimenta temelji se na određenim ograničenjima, a u ovom slučaju su to tehnička ograničenja eksperimentalnog sustava za ispitivanje zupčanika, kao i granice nosivosti ili opteretivosti hibridnih zupčanika. Na temelju navedenih ograničenja i utjecajnih ulaznih parametara odabran je centralno kompozitni plan (engl. Central Composite Design – CCD).

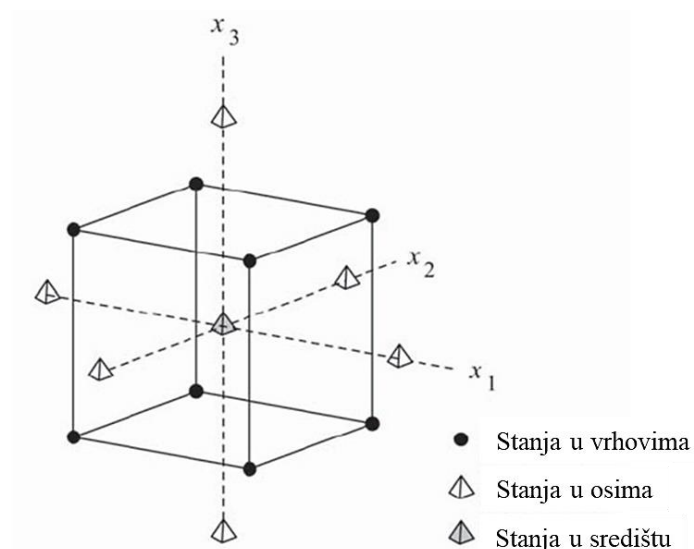
Centralno kompozitni plan se često upotrebljava za modeliranje i upravljanje procesima s velikim brojem utjecajnih parametara, a ubraja se u vrstu eksperimenata višeg reda, tzv. metodu odzivne površine (engl. Response Surface Methodology – RSM), koja obuhvaća skup statističkih i matematičkih metoda koje služe za razvoj, poboljšanje i optimiranje procesa [109],

u ovom slučaju radnih značajki hibridnih zupčanika. Mjerljiva veličina kvalitete procesa zove se odziv ili izlaz, a svrha plana eksperimenta je statistička obrada rezultata i generiranje jednadžbe (uglavnom polinom drugog stupnja), tj. matematičkog modela koji opisuje proces. Odzivna površina, tj. polinomni matematički model drugog stupnja, ima opći oblik [109]:

$$Y=b_0+b_1 \cdot x_1+\dots+b_k \cdot x_k+b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2+b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3+\dots+b_{k-1} \cdot x_{k-1} \cdot x_k+b_{11} \cdot x_{11}^2+\dots+b_{kk} \cdot x_k^2, \quad (5.1)$$

gdje je k broj parametara ili faktora u eksperimentu, a to je u ovom slučaju tri (3). Polinom drugog reda aproksimira određeni problem, a njegovo rješavanje se svodi na određivanje koeficijenata modela b_0, \dots, b_k pomoću metode minimalnog zbroja kvadrata odstupanja računskih vrijednosti od stvarnih izmjerenih eksperimentalnih vrijednosti.

Poznavanje odzivne površine daje bolji uvid u cijeli proces te dopušta predviđanje rezultata unutar područja analiziranih parametara, uz dovoljnu preciznost, točnost i pouzdanost [110]. Za tri ulazna parametra varirana na pet razina, prema centralno kompozitnom planu, plan eksperimenta se sastoji od ukupno dvadeset (20) eksperimenata. To uključuje šest (6) ponavljanja u središnjoj točki ili dodatnih stanja, te po jedno stanje u vrhovima (8) i osima (6) (Slika 5.1). Ponavljanja u središnjoj točki služe da bi se vrijednosti mjerenja zavisne varijable u središtu eksperimenta mogle usporediti s aritmetičkom sredinom za ostatak eksperimenta [109], a broj ponavljanja u središnjim točkama bitno utječe na distribuciju procijenjene varijance unutar mjernog područja. Stanja u osima služe za određivanje zakrivljenosti odzivnih površina unutar mjernog područja. Kako bi se osigurala pouzdanost i vjerodostojnost eksperimenta, sva navedena stanja moraju se izvoditi u istim uvjetima ispitivanja: temperatura i vlažnost zraka, osni razmak, parametri aditivne proizvodnje i sl.



Slika 5.1 Centralno kompozitni plan za tri parametra [109]

Plan eksperimenta osmišljen je pomoću softverskog programa Design Expert 25.0.1 s modulom za analizu varijance formiranih modela ANOVA (engl. Analysis of Variance), a pomoću istog je provedena statistička obrada eksperimentalnih rezultata radnih značajki nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika. Ulazni parametri koji utječu na radne značajke hibridnih zupčanika su sljedeći: okretni moment *A*, brzina vrtnje *B* i vrijeme ispitivanja *C*. Prema centralno kompozitnom planu, unutar granica mjernog područja, određeni su ulazni parametri i njihove razine ili kodirane vrijednosti (Tablica 5.1).

Tablica 5.1 Ulazni parametri s pripadajućim razinama

Razina	A Okretni moment [Nm]	B Brzina vrtnje [min ⁻¹]	C Vrijeme ispitivanja [min]
1,682	3,2	1336	30,1
1	2,9	1200	25,0
0	2,4	1000	17,5
-1	2,0	800	10,0
-1,682	1,6	664	4,9

Ponavljanja u središnjim točkama (razina 0) služe za provjeru ponovljivosti i pouzdanosti. Ako su rezultati u središnjim točkama različiti, model nije pouzdan, bez obzira na rezultate u ostalim stanjima. Stanja u vrhovima (razine -1 i 1) predstavljaju donje i gornje granice očekivanog radnog područja, a služe za određivanje utjecaja i interakcije među ulaznim parametrima. Stanja u osima (razine -1,682 i 1,682) izlaze izvan granica radnog područja (Slika 5.1), a definirana su preko udaljenosti stanja u osima od središnje točke (α). Stanja u osima predstavljaju ekstremne vrijednosti za svaki pojedinačni ulazni parametar, i nalaze se izvan granica očekivanog radnog područja. To omogućava pouzdanije predviđanje rezultata, kao i bolje pronalaženje optimalnih rješenja unutar područja ispitivanja.

Tablica 5.2 prikazuje plan eksperimenta s ulaznim utjecajnim parametrima te njihovim pripadajućim razinama i stvarnim vrijednostima koje je potrebno simulirati za svaki ispitivani par hibridnih zupčanika. U planu eksperimenta postoji šest (6) ponavljanja u središnjoj točki (redni broj eksperimenta 6, 8, 9, 14, 15 i 20), zatim osam (8) stanja u vrhovima (redni broj eksperimenta 1, 4, 7, 11, 12, 16, 17 i 19), te konačno šest (6) stanja u osima (redni broj

eksperimenta 2, 3, 5, 10, 13 i 18). To rezultira s ukupno dvadeset (20) stanja ili kombinacija eksperimenta.

Tablica 5.2 Plan eksperimenta i utjecajni parametri

Redni broj izvođenja eksperimenta	A Okretni moment [Nm]		B Brzina vrtnje [min ⁻¹]		C Vrijeme ispitivanja [min]	
	Razina	Stvarna vrijednost	Razina	Stvarna vrijednost	Razina	Stvarna vrijednost
1	1	2,9	-1	800	-1	10,0
2	1,682	3,2	0	1000	0	17,5
3	0	2,4	-1,682	664	0	17,5
4	-1	2,0	-1	800	1	25,0
5	0	2,4	0	1000	1,682	30,1
6	0	2,4	0	1000	0	17,5
7	-1	2,0	-1	800	-1	10,0
8	0	2,4	0	1000	0	17,5
9	0	2,4	0	1000	0	17,5
10	-1,682	1,6	0	1000	0	17,5
11	-1	2,0	1	1200	-1	10,0
12	1	2,9	1	1200	-1	10,0
13	0	2,4	0	1000	-1,682	4,9
14	0	2,4	0	1000	0	17,5
15	0	2,4	0	1000	0	17,5
16	1	2,9	1	1200	1	25,0
17	1	2,9	-1	800	1	25,0
18	0	2,4	1,682	1336	0	17,5
19	-1	2,0	1	1200	1	25,0
20	0	2,4	0	1000	0	17,5

Na temelju rezultata radnih značajki prema planu eksperimenta izrađuju se matematički modeli kojima su određene funkcijske veze između zavisno i nezavisno promjenjivih veličina. Među različitim metodama za dobivanje matematičkih modela najčešće se koristi regresijska analiza.

Za sve generirane matematičke modele potrebno je ispitati njihovu prikladnost, a to se određuje pomoću F -testa, statističkog testa kojim se uspoređuju varijance. F -testom se određuje značajnost matematičkih modela i pojedinih članova jednadžbe, kao i odstupanje od modela. F -vrijednost predstavlja omjer procijenjene varijance modela i procijenjene varijance ostataka. Za veće iznose F -vrijednosti vrijedi da je varijanca dobro objašnjena, dok manje vrijednosti ukazuju na odstupanja uslijed šumova. Uz F -vrijednost, određuje se i varijabla p -vrijednost ($Prob > F$) koja ukazuje na značajnost ili signifikantnost regresijskog modela, te predstavlja rizik odbacivanja nulte statističke hipoteze H_0 . Iznosi p -vrijednosti manji od 0,001 ukazuju na veliki značaj pojedinog ulaznog parametra, odnosno izvora varijabilnosti. Ako je iznos p -vrijednosti manji od 0,05 članovi modela su značajni, a ako je veći od 0,1 članovi nisu značajni i može se provesti redukcija članova modela. Redukcija se izvodi tako da se članovi koji nisu značajni isključe iz matematičkog modela. Međutim, neki članovi mogu biti beznačajni, imaju p -vrijednost veću od 0,05, ali su svejedno zadržani u matematičkom modelu jer utječu na povećanje točnosti matematičkog modela. Također, odstupanje od modela (engl. Lack of Fit) ne smije biti značajno.

Udjel varijabilnosti modela u regresijskoj analizi interpretira se koeficijentom determinacije, zbrojem kvadrata odstupanja R^2 . On predstavlja omjer protumačenog i ukupnog zbroja kvadrata odstupanja vrijednosti od prosjeka. Zbroj kvadrata odstupanja R^2 najvažniji je pokazatelj značajnosti i reprezentativnosti regresijske analize, a može poprimiti vrijednosti između nula i jedan. Što je bliži vrijednosti jedan matematički model se smatra pouzdanijim i reprezentativnijim [111]. Prilagođeni koeficijent determinacije R^2_{adj} pokazuje koliko je utjecajnih parametara uzeto u obzir. Smanjuje se dodavanjem neutjecajnih parametara, a nikad nije veći od R^2 . Matematički model je značajan ako je vrijednost prilagođenog koeficijenta determinacije R^2_{adj} veća od 0,75 [112]. Predviđajući koeficijent determinacije R^2_{pred} pokazuje koliko je rezultata dobivenih eksperimentom moguće objasniti modelom, a razlika između prilagođenog koeficijenta determinacije R^2_{adj} i predviđajućeg koeficijenta determinacije R^2_{pred} ne smije biti veća od 0,2 [113]. U regresijskoj analizi, za vrednovanje modela se koristi i adekvatna preciznost. Adekvatna preciznost je mjera predviđenog odziva u odnosu na njegovu grešku, a poželjno je da bude veća od četiri.

U nastavku poglavlja prikazani su matematički modeli za predviđanje radnih značajki hibridnih zupčanika u ovisnosti o ulaznim parametrima. Određuju se modeli za sljedeće radne značajke: temperatura tijela T_{bulk} kao mjera zagrijavanja, razlika mjere preko četiri zuba ΔW_4 i promjena mase Δm kao mjera trošenja i stupanj iskoristivosti zupčanog para η_z .

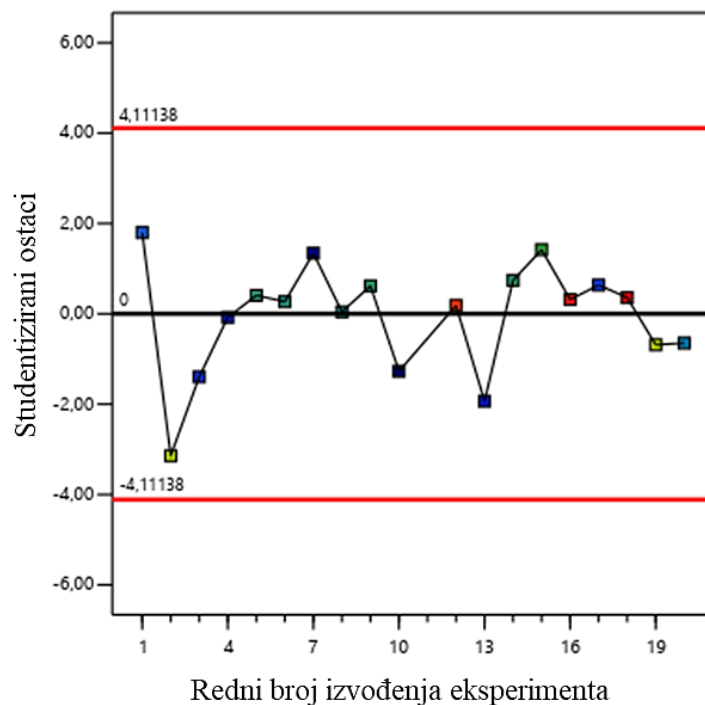
5.2. Matematički model za određivanje zagrijavanja hibridnih zupčanika

Prema planu eksperimenta prikazanom u Tablici 5.2 simulirana su različita stanja eksperimenta pri kojima su provedena ispitivanja na hibridnim zupčanicima. Svi rezultati odnose se na gonjeni zupčanik koji je toplinski izloženiji i opterećeniji. Eksperimentalni rezultati temperature tijela T_{bulk} hibridnih zupčanika prikazani su u Tablici 5.3.

Tablica 5.3 Eksperimentalni rezultati temperature tijela T_{bulk}

Redni broj izvođenja eksperimenta	A Okretni moment [Nm]	B Brzina vrtnje [min ⁻¹]	C Vrijeme ispitivanja [min]	Temperatura tijela T_{bulk} [°C]
1	2,9	800	10,0	48,7
2	3,2	1000	17,5	54,8
3	2,4	664	17,5	46,8
4	2,0	800	25,0	45,5
5	2,4	1000	30,1	50,6
6	2,4	1000	17,5	50,3
7	2,0	800	10,0	43,8
8	2,4	1000	17,5	50,1
9	2,4	1000	17,5	50,6
10	1,6	1000	17,5	42,9
11	2,0	1200	10,0	54,0
12	2,9	1200	<u>8,0</u>	62,4
13	2,4	1000	4,9	45,3
14	2,4	1000	17,5	50,7
15	2,4	1000	17,5	51,2
16	2,9	1200	<u>11,0</u>	63,6
17	2,9	800	25,0	47,6
18	2,4	1336	<u>8,0</u>	64,2
19	2,0	1200	25,0	55,1
20	2,4	1000	17,5	49,5

U odnosu na izvorni centralno kompozitni plan (Tablica 5.2), u Tablici 5.3 prikazan je korigirani plan eksperimenta. Naime, zbog otkazivanja hibridnih zupčanika, za određena stanja eksperimenta prilagođeno je vrijeme ispitivanja C (redni broj eksperimenta 12, 16 i 18). Umjesto vrijednosti vremena ispitivanja prema centralno kompozitnom planu unesen je trenutak prestanka ispitivanja (podcrtano u Tablici 5.3), odnosno vrijeme kada je uslijedilo otkazivanje zupčanika. Prikazani rezultati temperature tijela za navedena stanja eksperimenta zabilježeni su neposredno nakon otkazivanja zupčanika. Također, u Tablici 5.3 je izuzeta vrijednost jednog mjerenja temperature tijela zbog većeg odstupanja od granica vjerojatnosti (redni broj eksperimenta 11). Kako je izuzeta samo jedna vrijednost (precrtano u Tablici 5.3), mala je vjerojatnost da ona može utjecati na ishod eksperimenta, a njenim izuzimanjem ostvaren je značajno relevantniji i pouzdaniji matematički model. Slika 5.2 prikazuje obrađene rezultate koji su uključeni u opisivanje modela (unutar crvenih linija), a nepravilna struktura dijagrama ukazuje na ostvarenu nasumičnost tijekom provedbe eksperimenta. Za opis nasumičnosti se koriste studentizirani ostaci ili reziduali koji omogućavaju usporedbu razlika između opaženih i predviđenih ciljnih vrijednosti u regresijskom modelu.



Slika 5.2 Graf ostataka u ovisnosti o rednom broju eksperimenta (T_{bulk})

Analizom varijance eksperimentalnih rezultata određen je utjecaj svakog pojedinog člana matematičkog modela za predviđanje temperature tijela T_{bulk} (Tablica 5.4). Iz Tablice 5.4, na temelju F -vrijednosti koja iznosi 101,59, može se zaključiti da je model značajan, a vjerojatnost

pojave tako velike vrijednosti koju bi mogao prouzročiti šum iznosi 0,01 %. Provedena je redukcija modela te su isključeni članovi čiji je iznos p -vrijednosti ($Prob>F$) veći od 0,1, pa su u Tablici 5.4 sadržani značajni članovi modela. Odstupanje od modela s pripadajućom F -vrijednosti u iznosu od 4,54 ukazuje da vjerojatnost pojave tako velike vrijednosti iznosi 5,9 %. Odstupanje od modela nije značajno te je model reprezentativan i prihvaćen za daljnju analizu.

Tablica 5.4 Analiza varijance temperature tijela T_{bulk}

Izvor varijabilnosti	Zbroj kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F -vrijednost	p -vrijednost ($Prob>F$)
<i>Model</i>	700,89	7	100,13	101,59	< 0,0001
<i>A</i>	147,69	1	147,69	149,84	< 0,0001
<i>B</i>	365,48	1	365,48	370,81	< 0,0001
<i>C</i>	17,81	1	17,81	18,07	0,0014
<i>AB</i>	26,87	1	26,87	27,26	0,0003
<i>BC</i>	6,15	1	6,15	6,24	0,0296
<i>B²</i>	86,97	1	86,97	88,23	< 0,0001
<i>C²</i>	5,23	1	5,23	5,31	0,0418
<i>Ostatak</i>	10,84	11	0,9856		
<i>Odstupanje od modela</i>	9,16	6	1,53	4,54	0,0589
<i>Čista pogreška</i>	1,68	5	0,3360		
<i>Ukupno</i>	711,73	18			

Tablica 5.5 prikazuje rezultate regresijske analize temperature tijela T_{bulk} hibridnih zupčanika, a koeficijent determinacije R^2 koji iznosi 0,9848 ukazuje na reprezentativnost modela. Razlika između prilagođenog koeficijenta determinacije R^2_{adj} i predviđajućeg koeficijenta determinacije R^2_{pred} manja je od 0,2, a adekvatna preciznost iznosi 32,3537 (potrebni minimum je četiri).

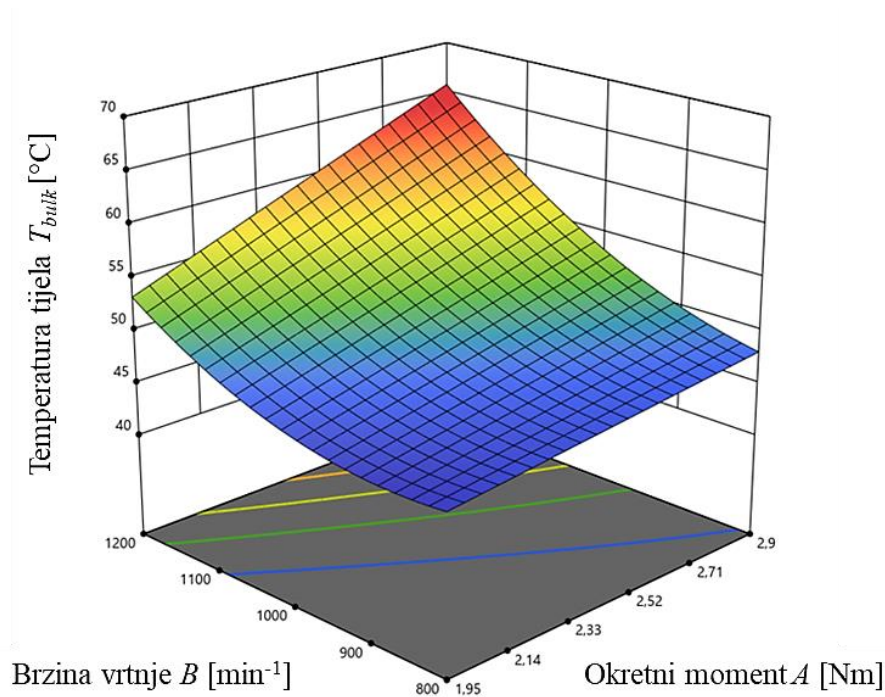
Tablica 5.5 Rezultati regresijske analize (T_{bulk})

Koeficijent determinacije R^2	0,9848
Prilagođeni koeficijent determinacije R^2_{adj}	0,9751
Predviđajući koeficijent determinacije R^2_{pred}	0,9445
Adekvatna preciznost	32,3537

Prema primijenjenom planu eksperimenta s tri utjecajna ulazna parametra slijedi matematički model za određivanje temperature tijela T_{bulk} hibridnih zupčanika:

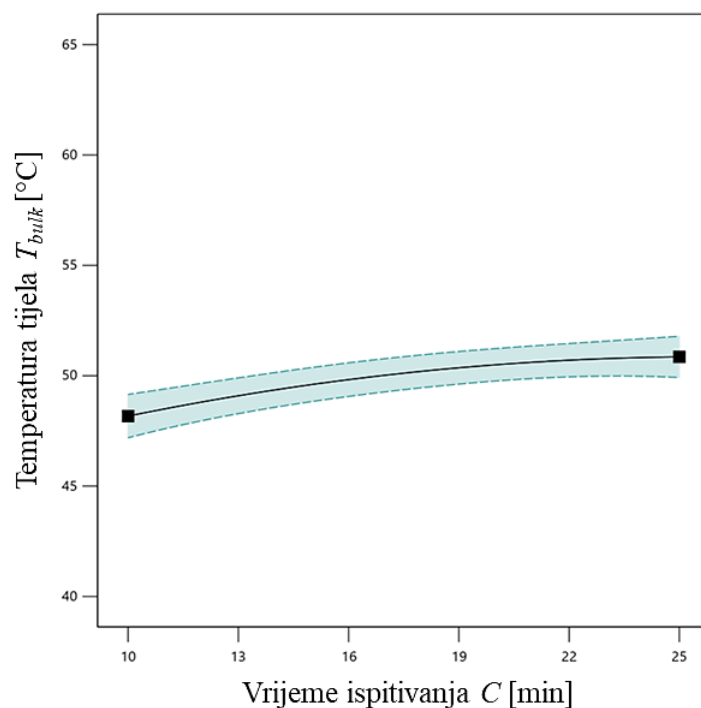
$$T_{bulk}=137,6-16,7\cdot A-0,1872\cdot B-0,15\cdot C+0,025\cdot AB+0,0007\cdot BC+0,00007\cdot B^2-0,011\cdot C^2, \quad (5.2)$$

gdje je A okretni moment, B brzina vrtnje i C vrijeme ispitivanja. Svi navedeni članovi matematičkog modela u izrazu (5.2) imaju utjecaj na temperaturu tijela jer im je p -vrijednost ($Prob>F$) manja od 0,1. Ipak, iz matematičkog modela može se uočiti značajno velik utjecaj članova (A , B , B^2) na zagrijavanje hibridnih zupčanika, dok član vrijeme ispitivanja (C) i interaktivni članovi (AB i BC) manje utječu. Slika 5.3 prikazuje prostorni ili 3D dijagram koji pokazuje promjenu i trend porasta temperature tijela, a iz kojeg proizlazi zaključak da se porastom okretnog momenta A i brzine vrtnje B zupčanici više zagrijavaju.



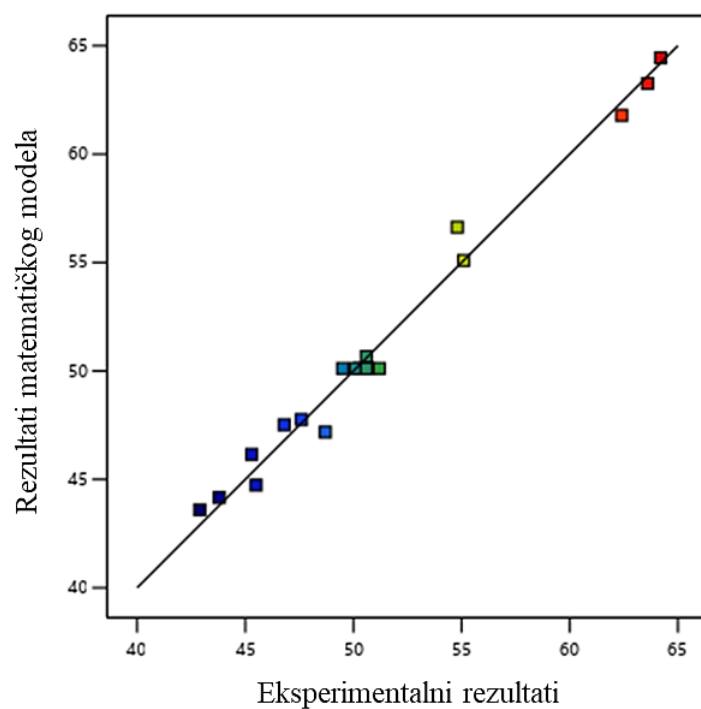
Slika 5.3 Temperatura tijela T_{bulk} u ovisnosti o okretnom momentu i brzini vrtnje

Iz Slike 5.4 vidljivo je da vrijeme ispitivanja C malo utječe na zagrijavanje zupčanika. Povećanjem vremena ispitivanja temperatura tijela T_{bulk} značajno ne raste. Najveća razlika u temperaturi tijela za različita vremena trajanja ispitivanja C iznosi 2,8 °C, i gotovo da ne ovisi pri kojem se okretnom momentu A i brzini vrtnje B odvija ispitivanje. Razlog je to što za vrijeme ispitivanja, nakon određenog vremena, dolazi do uspostave toplinske ravnoteže između zupčanika i okoline, te gotovo potpune stabilizacije temperature tijela T_{bulk} hibridnih zupčanika.



Slika 5.4 Temperatura tijela T_{bulk} u ovisnosti o vremenu ispitivanja

Na Slici 5.5 prikazana je usporedba eksperimentalnih rezultata i rezultata određenih matematičkim modelom, a koji je generiran pomoću Design Expert softvera. Vidljiv je visok stupanj adekvatnosti ili podudarnosti te pouzdanosti unutar područja istraživanja.

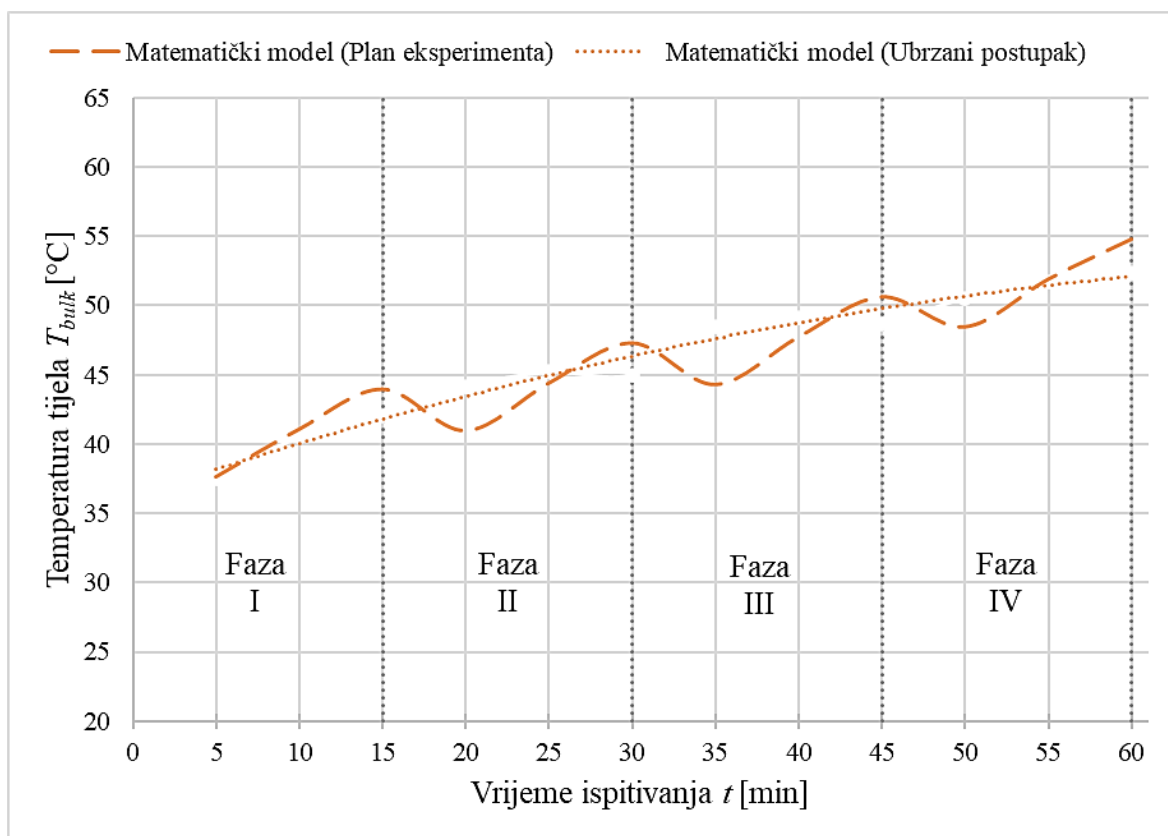


Slika 5.5 Usporedba eksperimentalnih rezultata i predviđanja matematičkog modela (T_{bulk})

Rezultati predviđanja temperature tijela T_{bulk} iz matematičkog modela, a koji je proizašao iz plana eksperimenta (izraz (5.2)), mogu se usporediti s rezultatima predviđanja matematičkog modela generiranog iz ubrzanog postupka ispitivanja (Slika 4.20) koji ima oblik:

$$T_{bulk} = -0,0025 \cdot t^2 + 0,4131 \cdot t + 36,161 \quad (5.3)$$

Navedeni izraz (5.3) opisuje promjenu temperature tijela u ovisnosti o ukupnom vremenu ispitivanja t u ubrzanom postupku ispitivanja, uz uvjet da okretni moment raste svakih 15 minuta, kako je objašnjeno u potpoglavlju 3.1.2. (Slika 3.6). Uz poznavanje okretnog momenta A i brzine vrtnje B , moguće je iz izraza (5.2) odrediti temperaturu tijela u ovisnosti o vremenu ispitivanja C . Kako je u ubrzanom postupku ispitivanja brzina vrtnje konstantna i iznosi 1000 min^{-1} , uz trajanje svakog ciklusa po 15 minuta, u izrazu (5.2) mijenja se samo okretni moment A , prema prikazanom na Slici 3.6. Uvrštavanjem navedenih ulaznih parametara (A , B , C) u izraz (5.2), dobiveni su rezultati koji proizlaze iz matematičkog modela generiranog pomoću softvera Design Expert. Oni su usporedivi s rezultatima matematičkog modela dobivenog iz ubrzanog postupka ispitivanja, korištenjem regresijske analize u Excelu. Usporedni rezultati prikazani su na Slici 5.6, iz čega se zaključuje da se matematički model dobiven iz ubrzanog postupka ispitivanja približno podudara s modelom generiranim pomoću softvera Design Expert.



Slika 5.6 Predviđanje temperature tijela T_{bulk} prema različitim matematičkim modelima

Odstupanje između dva matematička modela nalazi se u granicama od 0,5 °C do 3,3 °C (od 1,1 % do 6,9 %), uz srednje odstupanje od 1,5 °C (3,3 %), što ukazuje na mogućnost primjene ubrzanog postupka ispitivanja u istraživanju zagrijavanja hibridnih zupčanika. Trajanje svake faze u iznosu od 15 minuta smatra se primjerenim, što potvrđuje i dijagram promjene temperature tijela T_{bulk} u ovisnosti o vremenu ispitivanja (Slika 5.4). Razlike između dva modela moguće je objasniti time što se kod ubrzanog postupka ispitivanja zupčanici podvrgavaju okretnom momentu koji raste svakih 15 minuta, te postoji povijest zagrijavanja uslijed prethodnih opterećenja. To nije bio slučaj kod ispitivanja prema planu eksperimenta jer su u tom slučaju hibridni zupčanici odmah podvrgnuti opterećenju pri kojem se ispituju. Također, u ispitivanjima prema planu eksperimenta naravno opterećenje je konstanto i ne mijenja se za vrijeme cijelog ispitivanja. Upravo zato postoji razlika na početku svake od faza, gdje je temperatura tijela predviđena matematičkim modelom prema planu eksperimenta (Design Expert) niža u odnosu na rezultate predviđanja matematičkog modela proizašlog iz ubrzanog postupka ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja. Iznimka je početak prve faze gdje su temperature tijela gotovo identične jer ne postoji povijest zagrijavanja.

5.3. Matematički modeli za određivanje trošenja hibridnih zupčanika

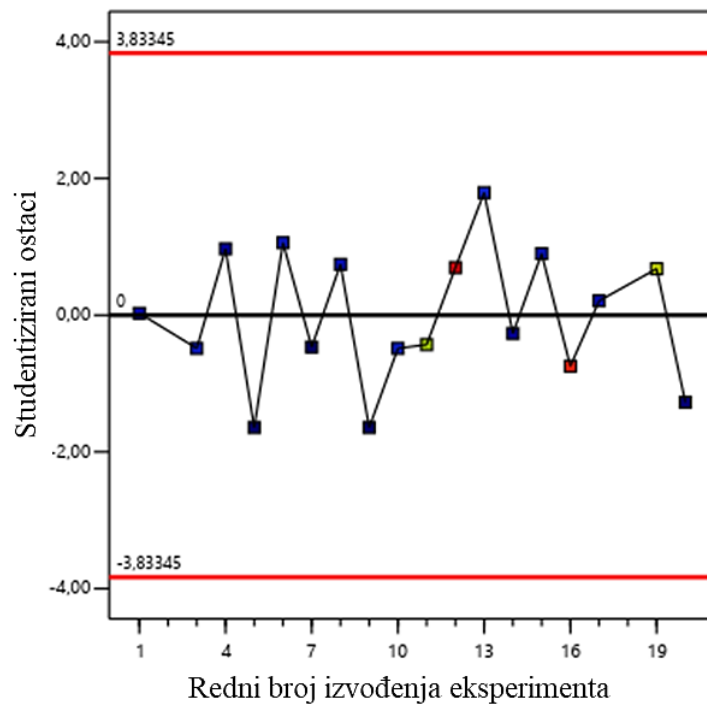
U Tablici 5.6 prikazani su eksperimentalni rezultati trošenja hibridnih zupčanika, a kao mjere trošenja koriste se srednja razlika mjere preko četiri zuba ΔW_4 i promjena ili gubitak mase Δm , a koji se određuju prije i poslije svakog od dvadeset (20) stanja eksperimenta. U odnosu na izvorna stanja eksperimenta prema centralno kompozitnom planu (Tablica 5.2), u Tablici 5.6 je, kao i u Tablici 5.3, prikazan korigirani plan eksperimenta. Razlog prilagođavanja vremena ispitivanja C kao utjecajnog ulaznog parametra je otkazivanje hibridnih zupčanika uslijed preopterećenja i posljedično taljenje zubi (podcrtano u Tablici 5.6). Prikazani rezultati razlike mjere preko zubi prije i poslije ispitivanja, a koji su zabilježeni kod hibridnih zupčanika koji su otkazali (redni broj eksperimenta 12, 16 i 18), određeni su na onim zubima na kojima nije došlo do pojave oštećenja uslijed taljenja. Na zubima koji su rastaljeni nije bilo moguće pravilno postaviti pomično mjerilo s tanjurićima i ispravno očitati vrijednosti mjere preko zubi. Također, na zubima koji su se rastalili bilo je nužno ukloniti rastaljeni materijal s boka zuba radi određivanja promjene mase prije i nakon ispitivanja. Zbog većeg odstupanja od granica vjerojatnosti, u Tablici 5.6 su izuzete vrijednosti dva mjerenja razlike mjere preko zubi (redni broj eksperimenta 2 i 18), kao i dvije vrijednosti promjene mase (redni broj eksperimenta 12 i 16). S obzirom da su kod oba parametra koji se koriste kao mjere trošenja izuzete samo po dvije vrijednosti mala je vjerojatnost da one mogu utjecati na ishod eksperimenta, a njihovim

izuzimanjem generirani su reprezentativniji matematički modeli. U Tablici 5.6, vrijednosti koje su izuzete su precrtane.

Tablica 5.6 Eksperimentalni rezultati trošenja

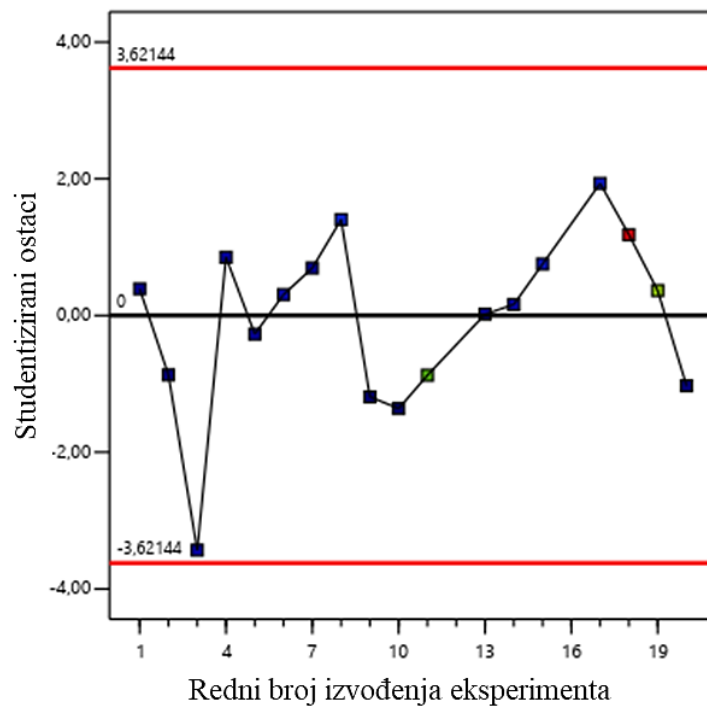
Redni broj izvođenja eksperimenta	A Okretni moment [Nm]	B Brzina vrtnje [min ⁻¹]	C Vrijeme ispitivanja [min]	Razlika mjere preko zubi ΔW_4 [μm]	Promjena mase Δm [g]
1	2,9	800	10,0	96	0,16
2	3,2	1000	17,5	62	0,14
3	2,4	664	17,5	106	0,2
4	2,0	800	25,0	87	0,19
5	2,4	1000	30,1	70	0,18
6	2,4	1000	17,5	105	0,22
7	2,0	800	10,0	70	0,18
8	2,4	1000	17,5	101	0,29
9	2,4	1000	17,5	70	0,12
10	1,6	1000	17,5	109	0,11
11	2,0	1200	10,0	220	0,61
12	2,9	1200	<u>8,0</u>	351	1,28
13	2,4	1000	4,9	113	0,2
14	2,4	1000	17,5	87	0,21
15	2,4	1000	17,5	103	0,25
16	2,9	1200	<u>11,0</u>	336	3,08
17	2,9	800	25,0	98	0,25
18	2,4	1336	<u>8,0</u>	342	1,26
19	2,0	1200	25,0	232	0,69
20	2,4	1000	17,5	74	0,13

Obrađeni rezultati razlike mjere preko zubi koji su uključeni u opisivanje matematičkog modela nalaze se unutar crvenih linija, a nepravilna struktura dijagrama i studentizirani ostaci ukazuju na ostvarenu nasumičnost tijekom provedbe istraživanja (Slika 5.7).



Slika 5.7 Graf ostataka u ovisnosti o rednom broju eksperimenta (ΔW_4)

Isti zaključak proizlazi iz statističke obrade eksperimentalnih rezultata promjene mase hibridnih zupčanika. Slika 5.8 prikazuje analizirane rezultate uključene u opisivanje modela za predviđanje promjene mase hibridnih zupčanika, a svi rezultati se nalaze unutar crvenih linija što upućuje na ostvarenu nasumičnost tijekom provedbe eksperimenta.



Slika 5.8 Graf ostataka u ovisnosti o rednom broju eksperimenta (Δm)

Analizom varijance eksperimentalnih rezultata određen je utjecaj svakog pojedinog člana matematičkog modela za predviđanje razlike mjere preko zubi ΔW_4 . Ona je jedna od dvije korištene mjere, a ukazuje na trošenje boka zuba hibridnih zupčanika (Tablica 5.7). Prema F -vrijednosti u iznosu od 125,41 zaključuje se da je model značajan, uz 0,01 % vjerojatnosti da je tako velika vrijednost uzrokovana šumom. Redukcijom modela sadržani su samo značajni članovi modela, dok su članovi čija je p -vrijednost ($Prob > F$) veća od 0,1 isključeni. Na temelju F -vrijednosti odstupanja od modela iznosa 0,7937 model se smatra reprezentativnim te je prihvaćen za daljnju analizu.

Tablica 5.7 Analiza varijance razlike mjere preko zubi ΔW_4

Izvor varijabilnosti	Zbroj kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F -vrijednost	p -vrijednost ($Prob > F$)
<i>Model</i>	$1,302 \cdot 10^5$	5	26034,92	125,41	< 0,0001
<i>A</i>	10672,48	1	10672,48	51,41	< 0,0001
<i>B</i>	86959,36	1	86959,36	418,88	< 0,0001
<i>AB</i>	4900,50	1	4900,50	23,61	0,0004
<i>A²</i>	6067,90	1	6067,90	29,23	0,0002
<i>B²</i>	32409,47	1	32409,47	156,11	< 0,0001
<i>Ostatak</i>	2491,20	12	207,60		
<i>Odstupanje od modela</i>	1311,20	7	187,31	0,7937	0,6239
<i>Čista pogreška</i>	1180,00	5	236,00		
<i>Ukupno</i>	$1,327 \cdot 10^5$	17			

Tablica 5.8 prikazuje rezultate regresijske analize razlike mjere preko zubi ΔW_4 hibridnih zupčanika, a prema koeficijentu determinacije R^2 koji iznosi 0,9812, model se smatra reprezentativnim i pouzdanim.

Tablica 5.8 Rezultati regresijske analize (ΔW_4)

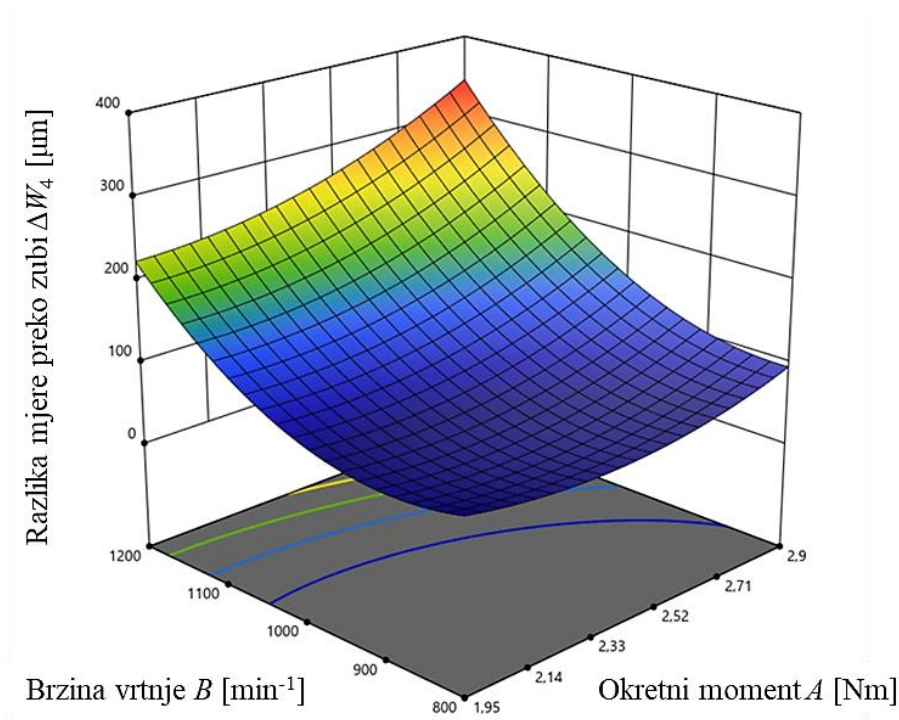
Koeficijent determinacije R^2	0,9812
Prilagođeni koeficijent determinacije R^2_{adj}	0,9734
Predviđajući koeficijent determinacije R^2_{pred}	0,9680
Adekvatna preciznost	32,2316

Uvjet da je razlika između prilagođenog koeficijenta determinacije R^2_{adj} i predviđajućeg koeficijenta determinacije R^2_{pred} manja od 0,2 je ispunjen, a adekvatna preciznost iznosi 32,2316 (potrebni minimum je četiri).

Matematički model za predviđanje razlike mjere preko zubi ΔW_4 ima sljedeći oblik:

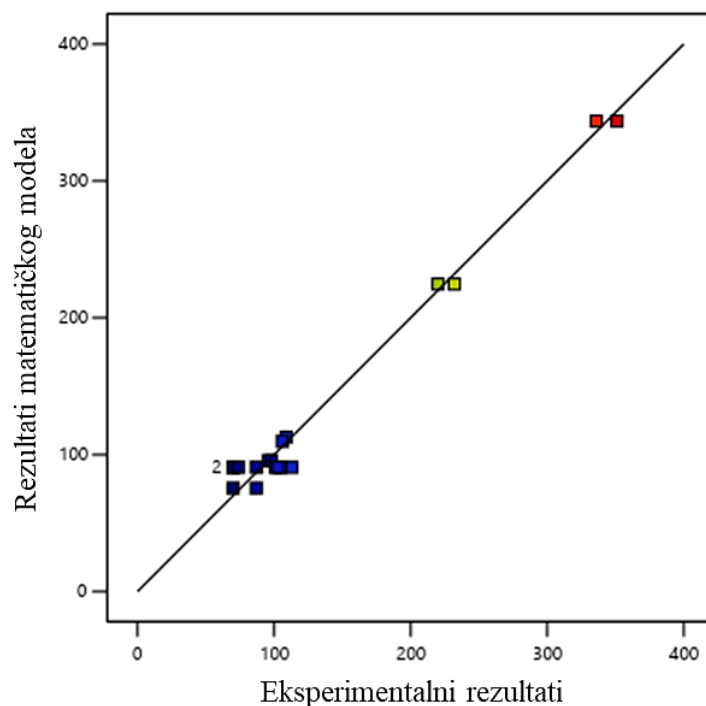
$$\Delta W_4 = 2433,25 - 798,7 \cdot A - 3,4221 \cdot B + 0,2605 \cdot AB + 126,1 \cdot A^2 + 0,001643 \cdot B^2 \quad (5.4)$$

U izrazu (5.4) utjecajni parametri su okretni moment (A) i brzina vrtnje (B). Svi članovi matematičkog modela u izrazu (5.4) imaju značajan utjecaj na predviđanje razlike mjere preko zubi jer im je p -vrijednost ($Prob > F$) manja od 0,1. Vrijeme ispitivanja C nema nikakav utjecaj, a prema p -vrijednosti ($Prob > F$) članovi (A , B , B^2) imaju posebno značajan utjecaj na razliku mjere preko zubi. Razlika mjere preko zubi u ovisnosti o okretnom momentu i brzini vrtnje prikazana je prostornim dijagramom koji ukazuje na trend povećanja razlike s porastom oba navedena utjecajna ulazna parametra (Slika 5.9). Ipak, iz dijagrama je vidljivo da brzina vrtnje B ima izraženiji utjecaj u odnosu na okretni moment A .



Slika 5.9 Razlika mjere preko zubi ΔW_4 u ovisnosti o okretnom momentu i brzini vrtnje

Usporedba eksperimentalnih rezultata i rezultata određenih prema matematičkom modelu dobivenom iz plana eksperimenta prikazana je na Slici 5.10. Može se primijetiti visok stupanj adekvatnosti i pouzdanosti unutar područja istraživanja.



Slika 5.10 Usporedba eksperimentalnih rezultata i predviđanja primjenom matematičkog modela (ΔW_4)

Druga kontrolna mjera kojom se određuje trošenje hibridnih zupčanika je promjena mase Δm , a analizom varijance eksperimentalnih rezultata prema planu eksperimenta određeni su utjecajni članovi matematičkog modela za predviđanje promjene mase (Tablica 5.9).

Tablica 5.9 Analiza varijance promjene mase Δm

Izvor varijabilnosti	Zbroj kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F-vrijednost	p-vrijednost (Prob>F)
Model	1,32	2	0,6596	134,09	< 0,0001
B	0,8076	1	0,8076	164,18	< 0,0001
B ²	0,5828	1	0,5828	118,49	< 0,0001
Ostatak	0,0738	15	0,0049		
Odstupanje od modela	0,0514	10	0,0051	1,15	0,4652
Čista pogreška	0,0223	5	0,0045		
Ukupno	1,39	17			

F-vrijednost modela iznosa 134,09 ukazuje na značajnost modela, uz 0,01 % vjerojatnosti da tako velika vrijednost može biti uzrokovana šumom. Redukcijom članova modela zadržani su

samo značajni članovi, tj. članovi čija je p -vrijednost ($Prob>F$) manja od 0,1. Odstupanje od modela s pripadajućom F -vrijednosti koja iznosi 1,15 ukazuje da je model reprezentativan. Rezultati regresijske analize promjene mase prikazani su u Tablici 5.10, a prema koeficijentu determinacije R^2 iznosa 0,9470, model se smatra reprezentativnim. Razlika između prilagođenog koeficijenta determinacije R^2_{adj} i predviđajućeg koeficijenta determinacije R^2_{pred} manja je od 0,2, uz adekvatnu preciznost od 37,7733 (potrebni minimum je četiri).

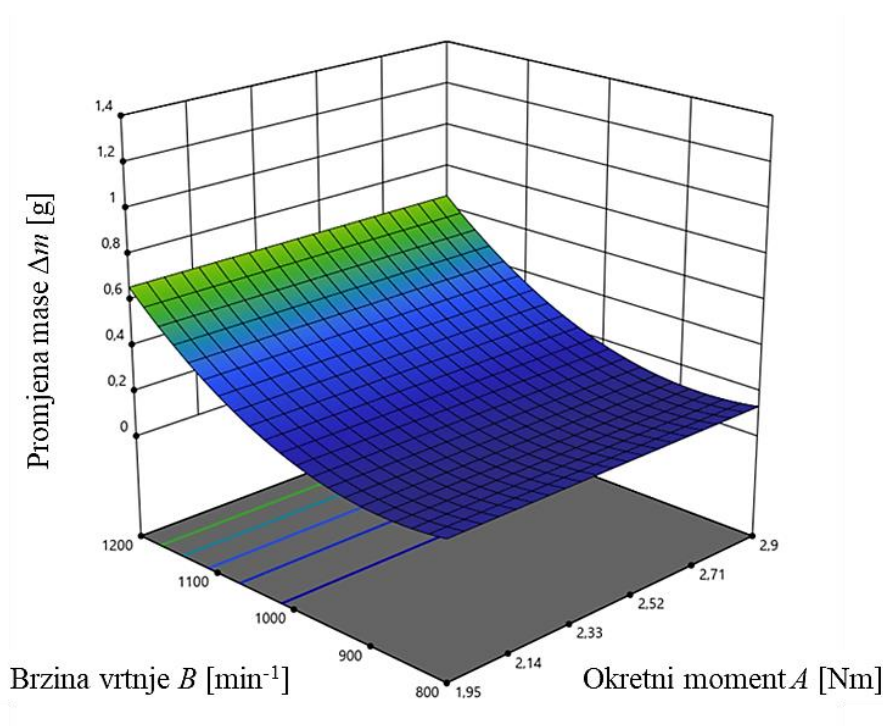
Tablica 5.10 Rezultati regresijske analize (Δm)

Koeficijent determinacije R^2	0,9470
Prilagođeni koeficijent determinacije R^2_{adj}	0,9400
Predviđajući koeficijent determinacije R^2_{pred}	0,8755
Adekvatna preciznost	37,7733

Iz primijenjenog plana eksperimenta s tri utjecajna ulazna parametra generiran je matematički model za određivanje promjene mase Δm :

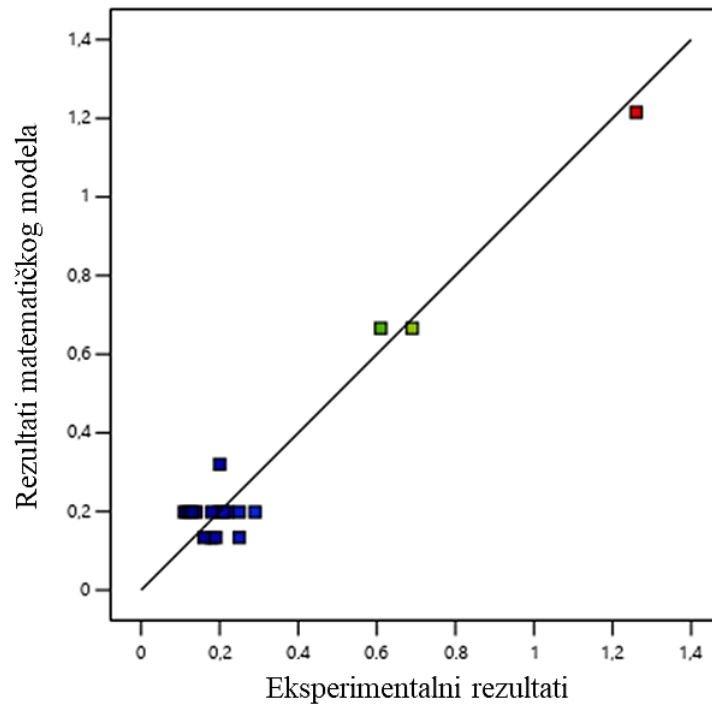
$$\Delta m = 3,9 - 0,00873 \cdot B + 5,028 \cdot 10^{-6} \cdot B^2 \quad (5.5)$$

U izrazu (5.5) B je brzina vrtnje, a značajni članovi modela (B , B^2) ukazuju da promjena, tj. gubitak mase, isključivo ovisi o brzini vrtnje. Na Slici 5.11 prikazan je prostorni dijagram koji potvrđuje ovisnost promjene mase o okretnom momentu A i brzini vrtnje B .



Slika 5.11 Promjena mase Δm u ovisnosti o okretnom momentu i brzini vrtnje

Usporedba eksperimentalnih rezultata i rezultata matematičkog modela prikazana je na Slici 5.12, a može se uočiti visok stupanj adekvatnosti i pouzdanosti unutar područja istraživanja.



Slika 5.12 Usporedba eksperimentalnih rezultata i predviđanja matematičkog modela (Δm)

Analizom dvije kontrolne mjere koje ukazuju na trošenje hibridnih zupčanika, mjere preko zubi ΔW_4 i promjene mase Δm , uočena je ovisnost trošenja o okretnom momentu i brzini vrtnje i njihovima interaktivnim i kvadratnim članovima (A , A^2 , AB , B i B^2). Isto potvrđuje i činjenica da su ispitivani zupčanici, a koji su otkazali (redni broj eksperimenta 12, 16 i 18), bili ispitivani upravo pri najvećim brzinama vrtnje (1200 min^{-1} i 1336 min^{-1}) i većim okretnim momentima ($2,4 \text{ Nm}$ i $2,9 \text{ Nm}$). Ipak, brzina vrtnje s članovima B i B^2 u izrazu (5.4) iskazala se kao dominantnija među dvama utjecajnim ulaznim parametrima, a prema izrazu (5.5) brzina vrtnje je jedini utjecajni parametar. Brzina vrtnje utječe na brzine klizanja između bokova zubi spregnutih zupčanika, a povećanjem brzina klizanja raste abrazijsko trošenje bokova zubi. Ako se rezultati istraživanja hibridnih zupčanika prema planu eksperimenta usporede s rezultatima ubrzanog postupka ispitivanja može se zaključiti da se rezultati trošenja u potpunosti ne podudaraju. Naime, postupno povećanje okretnog momenta u ubrzanom postupku ispitivanja pozitivno utječe na otpornost trošenju jer se njime omogućava uhadavanje i prilagođavanje hibridnih zupčanika. Najveći dio trošenja je upravo u fazi početnog uhadavanja, gdje je za zupčanike povoljnije da su podvrgnuti nižem opterećenju. Niže opterećenje smanjuje zagrijavanje pa zubi zadržavaju veću postojanost i tvrdoću, a samim time i otpornost trošenju.

5.4. Matematički model za određivanje iskoristivosti hibridnih zupčanika

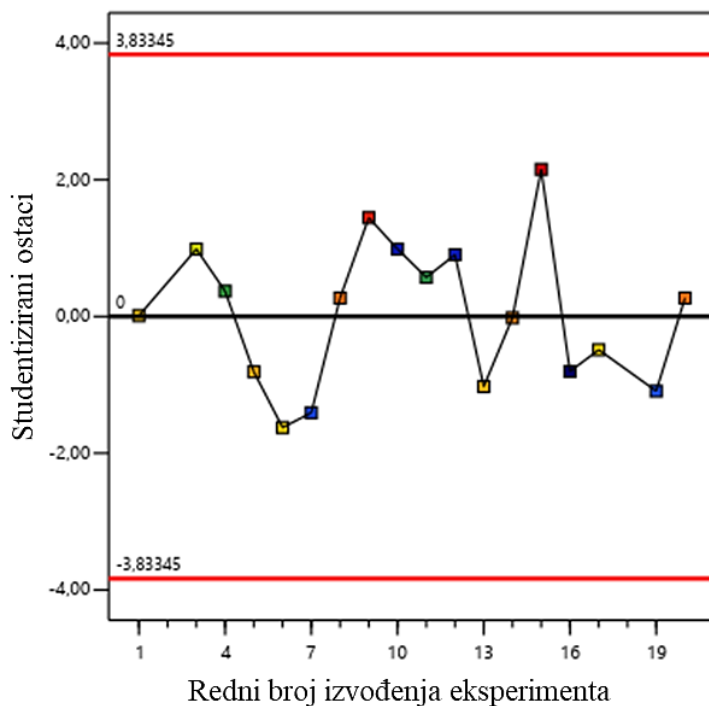
Eksperimentalni rezultati stupnja iskoristivosti η_z prema planu eksperimenta za dvadeset različitih simuliranih stanja eksperimenta prikazan i su u Tablici 5.11. Kao i u prethodnim slučajevima, plan eksperimenta je korigiran u odnosu na izvorni centralno kompozitni plan, a koji je prikazan u Tablici 5.2.

Tablica 5.11 Eksperimentalni rezultati stupnja iskoristivosti η_z

Redni broj izvođenja eksperimenta	A Okretni moment [Nm]	B Brzina vrtnje [min ⁻¹]	C Vrijeme ispitivanja [min]	Stupanj iskoristivosti η_z [%]
1	2,9	800	10,0	74,9
2	3,2	1000	17,5	78,6
3	2,4	664	17,5	73,8
4	2,0	800	25,0	71,8
5	2,4	1000	30,1	75,2
6	2,4	1000	17,5	74,5
7	2,0	800	10,0	70,3
8	2,4	1000	17,5	76,3
9	2,4	1000	17,5	77,4
10	1,6	1000	17,5	69,1
11	2,0	1200	10,0	71,7
12	2,9	1200	<u>8,0</u>	69,2
13	2,4	1000	4,9	75
14	2,4	1000	17,5	76
15	2,4	1000	17,5	77,9
16	2,9	1200	<u>11,0</u>	67,9
17	2,9	800	25,0	74,5
18	2,4	1336	<u>8,0</u>	60,3
19	2,0	1200	25,0	70,4
20	2,4	1000	17,5	76,3

Za tri stanja eksperimenta (redni broj eksperimenta 12, 16 i 18) promijenjen je utjecajni ulazni parametar vrijeme ispitivanja C jer je u navedenim stanjima uslijedio otkaz zupčanika (podcrtano u Tablici 5.11). Zbog toga je umjesto izvornih vremena ispitivanja uneseno vrijeme kada je ispitivanje zaustavljeno, kada je uslijedio otkaz hibridnih zupčanika. Prikazani rezultati stupnja iskoristivosti (Tablica 5.11) predstavljaju srednji stupanj iskoristivosti od trenutka kada su zupčanici opterećeni odgovarajućim okretnim momentom, što uključuje i fazu početnog uhodavanja, do samog kraja ispitivanja. Za navedena tri stanja kod kojih je uslijedio otkaz zupčanika prikazan je srednji stupanj iskoristivosti izmjeren do trenutka otkazivanja. U Tablici 5.11 izuzete su vrijednosti dva mjerenja stupnja iskoristivosti (redni broj eksperimenta 2 i 18) jer su u većoj mjeri odstupala od granica vjerojatnosti. Budući da su izuzete samo dvije vrijednosti, postoji mala vjerojatnost da one mogu utjecati na ishod eksperimenta, a njihovim izuzimanjem generirani su reprezentativniji i pouzdaniji matematički modeli koji opisuju promjenu stupnja iskoristivosti η_z .

Slika 5.13 prikazuje obrađene rezultate uključene u opisivanje modela za predviđanje stupnja iskoristivosti, a nepravilna struktura dijagrama studentiziranih ostataka u ovisnosti o rednom broj eksperimenta ukazuje na ostvarenu nasumičnost tijekom provedbe eksperimenta. Za opis nasumičnosti tijekom provedbe eksperimenta koriste se studentizirani ostaci, a obrađeni rezultati nalaze se u području unutar crvenih linija.



Slika 5.13 Graf ostataka u ovisnosti o rednom broju eksperimenta (η_z)

Analizom varijance eksperimentalnih rezultata prema planu eksperimenta određen je utjecaj svakog pojedinog člana modela za predviđanje stupnja iskoristivosti η_z hibridnih zupčanika, a rezultati su prikazani u Tablici 5.12.

Tablica 5.12 Analiza varijance stupnja iskoristivosti η_z

Izvor varijabilnosti	Zbroj kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja	F-vrijednost	p-vrijednost (Prob>F)
Model	147,25	5	29,45	25,99	< 0,0001
A	0,2672	1	0,2672	0,2358	0,6360
B	24,05	1	24,05	21,23	0,0006
AB	18,91	1	18,91	16,69	0,0015
A ²	48,15	1	48,15	42,50	< 0,0001
B ²	28,73	1	28,73	25,36	0,0003
Ostatak	13,60	12	1,13		
Odstupanje od modela	6,56	7	0,9365	0,6651	0,6995
Čista pogreška	7,04	5	1,41		
Ukupno	160,84	17			

F-vrijednost modela iznosa 25,99 ukazuje na značajnost modela, a vjerojatnost da je tako velika vrijednost uzrokovana šumom iznosi 0,01 %. Provedena je redukcija modela i isključeni su članovi čiji je iznos p-vrijednosti (Prob>F) veći od 0,1, pa su u Tablici 5.12 zadržani značajni članovi. Iznimka je član okretni moment A čija je p-vrijednost (Prob>F) veća od 0,1. Spomenuti član je zadržan radi održavanja hijerarhije, što u korištenom softveru (Design Expert) znači da je program automatski uključio članove u model. Na taj način program je osigurao da su članovi višeg reda, poput interakcija ili kvadratnih članova, popraćeni svojim komponentama nižeg reda. Primjera radi, članovi interakcije AB neće postojati ako članovi A i B već nisu sadržani pa se isti dodaju radi održavanja hijerarhije, što je izrazito važno za pouzdanost modela. F-vrijednost odstupanja od modela iznosi 0,6651, a odstupanje od modela nije značajno pa je model reprezentativan i pogodan za daljnju analizu.

U Tablici 5.13 prikazani su rezultati regresijske analize stupnja iskoristivosti η_z hibridnih zupčanika. Koeficijent determinacije R^2 koji iznosi 0,9155 ukazuje na reprezentativnost modela, a ispunjen je uvjet da je razlika između prilagođenog koeficijenta determinacije R^2_{adj} i

predviđajućeg koeficijenta determinacije R^2_{pred} manja od 0,2, uz adekvatnu preciznost u iznosu od 12,2130 (potrebni minimum je četiri).

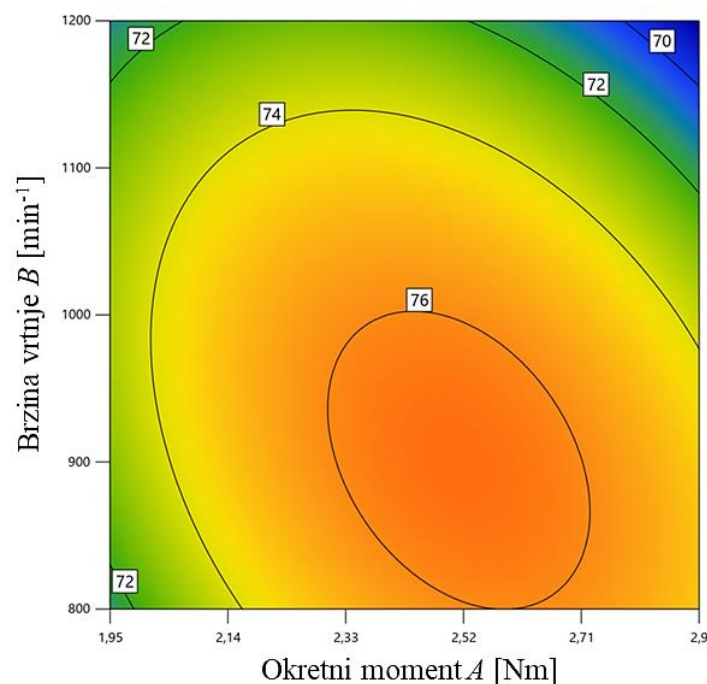
Tablica 5.13 Rezultati regresijske analize (η_z)

Koeficijent determinacije R^2	0,9155
Prilagođeni koeficijent determinacije R^2_{adj}	0,8803
Predviđajući koeficijent determinacije R^2_{pred}	0,8047
Adekvatna preciznost	12,2130

Prema primijenjenom planu eksperimenta s tri utjecajna ulazna parametra matematički model za određivanje stupnja iskoristivosti η_z hibridnih zupčanika je sljedeći:

$$\eta_z = -70,83 + 71 \cdot A + 0,129 \cdot B - 0,0162 \cdot AB - 11,23 \cdot A^2 - 0,000049 \cdot B^2 \quad (5.6)$$

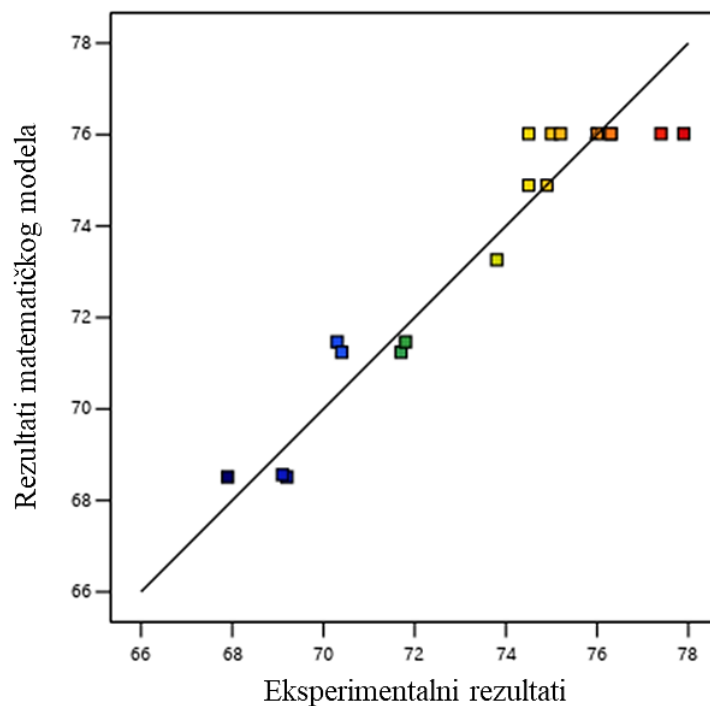
U izrazu (5.6) A je okretni moment, B je brzina vrtnje, a vrijeme ispitivanja C nema nikakvog utjecaja. Svi članovi izraza (5.6) imaju značajan utjecaj na predviđanje stupnja iskoristivosti, osim člana (A) koji je zadržan radi održavanja hijerarhije. Ipak, posebno značajan je kvadratni član (A^2) s p -vrijednosti ($Prob > F$) manjom od 0,0001. Promjena stupnja iskoristivosti u ovisnosti o okretnom momentu A i brzini vrtnje B prikazana je na Slici 5.14. U odnosu na prostorni dijagram, za ovaj slučaj prikladniji je konturni dijagram jer daje bolji uvid u ovisnost stupnja iskoristivosti o okretnom momentu A i brzini vrtnje B .



Slika 5.14 Stupanj iskoristivosti η_z u ovisnosti o okretnom momentu i brzini vrtnje

Prema priloženom dijagramu na Slici 5.14 može se zaključiti da se unutar područja istraživanja najveći stupanj iskoristivosti postiže pri srednjim okretnim momentima (od 2,3 Nm do 2,7 Nm) te nižim i srednjim brzinama vrtnje (od 800 min^{-1} do 1000 min^{-1}). Povećanje okretnog momenta i brzine vrtnje pozitivno utječe na povećanje stupnja iskoristivosti hibridnih zupčanika, ali samo do određene granice nakon koje počinje opadati. Razlog je trošenje boka zuba koje narušava pravilan zahvat spregnutih hibridnih zupčanika. Usporedbom rezultata istraživanja prema planu eksperimenta s rezultatima ubranog postupka ispitivanja uočene su manje razlike. Kao i u prethodnim slučajevima određivanja zagrijavanja i trošenja, postupno narinuti okretni moment u ubranom postupku ispitivanja omogućava uhodavanje hibridnih zupčanika, što u konačnici pozitivno utječe na stupanj iskoristivosti. Ispitivanje prema planu eksperimenta uključuje niže vrijednosti stupnja iskoristivosti u ukupnom srednjem stupnju iskoristivosti, a niže vrijednosti karakteristične su za fazu početnog uhodavanja. U ubranom postupku ispitivanja niže vrijednosti stupnja iskoristivosti utječu samo na stupanj iskoristivosti u prvoj fazi. U kasnijim fazama ispitivanja, pri višim okretnim momentima, te vrijednosti nemaju nikakav utjecaj i nisu uključene.

Usporedba eksperimentalnih rezultata i rezultata matematičkog modela prema planu eksperimenta prikazana je na Slici 5.15, a vidljiv je visok stupanj adekvatnosti i pouzdanosti unutar područja istraživanja.



Slika 5.15 Usporedba eksperimentalnih rezultata i predviđanja matematičkog modela (η_z)

5.5. Optimizacija radnih značajki hibridnih zupčanika

Radi određivanja optimalnih radnih značajki hibridnih zupčanika provedena je optimizacija utjecajnih ulaznih parametara. Na temelju eksperimentalnog istraživanja prema planu eksperimenta, kao i iz ubrzanog postupka ispitivanja, uočena je veza između zagrijavanja, trošenja i iskoristivosti hibridnih zupčanika. Povećanjem zagrijavanja hibridnih zupčanika dolazi do omekšavanja materijala te povećanog trošenja boka zuba uslijed relativnog gibanja i klizanja bokova spregnutih zupčanika, a to se odražava na iskoristivost zupčanog para.

Uz pomoć Design Expert softvera provedena je višeciljna numerička optimizacija prema kojoj je moguće postaviti kriterije za svaki utjecajni ulazni parametar (okretni moment A , brzina vrtnje B , vrijeme ispitivanja C), te cilj za svaki od odzivnih ili izlaznih veličina, što su u ovom slučaju sljedeće radne značajke: temperatura tijela T_{bulk} , razlika mjere preko četiri zuba ΔW_4 , promjena ili gubitak mase Δm i stupanj iskoristivosti η_z . Mogući kriteriji su postavljanje raspona i postavljanje točno određene vrijednosti, a mogući ciljevi su maksimalizacija/minimalizacija odzivnih veličina. Postavljanjem raspona utjecajnih ulaznih parametara određuju se minimalna i maksimalna razina koju oni mogu doseći, što omogućava isključivanje područja eksperimentalnog istraživanja za koje nisu postignute ciljane vrijednosti odziva. Također, svakom odzivu se može dodijeliti i težinski utjecaj kako bi se prilagodio oblik njegove određene funkcije poželjnosti (engl. Desirability Function), a funkcija poželjnosti može poprimiti vrijednosti između nula (potpuno nepoželjno) i jedan (potpuno poželjno). Na taj se način može promijeniti važnost jednog odziva u odnosu na ostale, a prema početnim zadanim postavkama svi odzivi imaju jednaku važnost. Ciljevi odzivnih veličina stvaraju ukupnu funkciju poželjnosti koju program nastoji maksimalizirati/minimizirati.

Na temelju matematičkih modela za predviđanje radnih značajki hibridnih zupčanika (izrazi (5.2), (5.4), (5.5), (5.6)) izvedena je višeciljna numerička optimizacija sa sljedećim ograničenjima za utjecajne ulazne parametre: okretni moment je u rasponu od 2,0 Nm do 2,9 Nm, brzina vrtnje je u rasponu od 800 min⁻¹ do 1200 min⁻¹ i vrijeme ispitivanja je od 10 minuta do 25 minuta. Ciljevi odzivnih veličina, tj. radnih značajki, su minimalna temperatura tijela T_{bulk} , minimalna razlika mjere preko zubi ΔW_4 i promjena mase Δm , te maksimalan stupanj iskoristivosti zupčanog para η_z . Postizanje navedenih ciljeva odzivnih veličina je važno jer se smanjenjem zagrijavanja povećava otpornost trošenju i stupanj iskoristivosti. Za sve odzivne veličine postavljena je jednaka važnost, odnosno sve odzivne veličine imaju jednak težinski utjecaj.

U Tablici 5.14 prikazane su optimalne vrijednosti utjecajnih ulaznih parametara i očekivani rezultati odzivnih veličina koji proizlaze iz dobivenih matematičkih modela za predviđanje zagrijavanja, trošenja i iskoristivosti hibridnih zupčanika.

Tablica 5.14 Optimalne vrijednosti utjecajnih ulaznih parametara i predviđeni rezultati odzivnih veličina

Utjecajni ulazni parametri	
Okretni moment, [Nm]	2,4
Brzina vrtnje, [min ⁻¹]	872
Vrijeme ispitivanja, [min]	10
Odzivne veličine	
Temperatura tijela T_{bulk} , [°C]	45,9
Razlika mjere preko zubi ΔW_4 , [μm]	54
Promjena mase Δm , [g]	0,11
Stupanj iskoristivosti η_z , [%]	76,3

Za utjecajne ulazne parametre i odzivne veličine koje su navedene u Tablici 5.14 vrijednost poželjnosti iznosi 0,921, što ukazuje na visok stupanj poželjnosti, ali ne i savršen. Skup eksperimentalnih rezultata je vrlo blizu postizanja svih definiranih ciljeva za više odzivnih veličina istovremeno, a u kontekstu analize prema planu eksperimenta ishod je potpuno prihvatljiv. Optimalne vrijednosti utjecajnih ulaznih parametara prikazane u Tablici 5.14 su uglavnom u skladu s očekivanjima. Prema planu eksperimenta i prethodno prikazanim rezultatima istraživanja zaključeno je da se s povećanjem okretnog momenta A povećava zagrijavanje i trošenje hibridnih zupčanika. Ipak, kako je najveći stupanj iskoristivosti zabilježen pri srednjim okretnim momentima, očekivano je da se optimalni okretni moment A nalazi u tim okvirima. Vrijeme ispitivanja C ima minimalan utjecaj na zagrijavanje, a uopće nije utjecalo na trošenje i iskoristivost, pa optimalno vrijeme ispitivanja odgovara najmanjem vremenu ispitivanja unutar područja istraživanja tog ulaznog parametra. Također, iako nije došlo do potpune stabilizacije temperature, optimalno vrijeme ispitivanja u trajanju od 10 minuta odgovara istraživanju u kojem je primijenjen ubrzani postupak ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja u kojem svaka faze traje upravo 10 minuta [25]. Iznimka među utjecajnim ulaznim parametrima je brzina vrtnje B . Naime, prema generiranim matematičkim modelima zaključeno je da povećanje brzine vrtnje B ima negativan utjecaj na zagrijavanje, trošenje i iskoristivost hibridnih zupčanika. Iako bi bilo očekivano da optimalna

brzina vrtnje odgovara minimalnoj brzini vrtnje unutar područja istraživanja (800 min^{-1}), manja brzina vrtnje uzrokuje manju količinu generirane topline, ali sporiju izmjenu topline s okolinom putem konvekcije. Nastrujavanje fluida, u ovom slučaju zraka, na aluminijske umetke u obliku trake implementirane u polimernu matricu proizvedenu FDM postupkom aditivne proizvodnje, a koji zajedno čine hibridni zupčanik, ključno je za njihovo zagrijavanje, tj. hlađenje.

Na temelju definiranih optimalnih vrijednosti utjecajnih ulaznih parametara potrebno je validirati rezultate, tj. optimalne odzivne veličine, kako bi se odredila valjanost i pouzdanost generiranih matematičkih modela. Validacija optimalnih rezultata podrazumijeva usporedbu eksperimentalnih rezultata s rezultatima predviđanja matematičkih modela pri zadanim optimalnim ulaznim parametrima. Kako prema planu eksperimenta, među dvadeset (20) različitih stanja, ne postoji niti jedno stanje eksperimenta s ulaznim parametrima koji odgovaraju optimalnim, potrebno je provesti još jedan dodatni ciklus eksperimenata. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja odzivnih veličina, tj. radnih značajki, pri optimalnim vrijednostima ulaznih parametara, prikazani su u Tablici 5.15.

Tablica 5.15 Eksperimentalni rezultati odzivnih veličina pri optimalnim vrijednostima utjecajnih ulaznih parametara

Odzivne veličine	
Temperatura tijela T_{bulk} , [°C]	46,2
Razlika mjere preko zubi ΔW_4 , [μm]	60
Promjena mase Δm , [g]	0,12
Stupanj iskoristivosti η_z , [%]	74,1

Usporedbom predviđenih i eksperimentalnih rezultata radnih značajki hibridnih zupčanika, za optimalne ulazne parametre, potvrđeno je dobro podudaranje. Odstupanja između matematičkim modelom predviđenih i eksperimentalnih rezultata prikazana su u Tablici 5.16.

Tablica 5.16 Odstupanja predviđenih i eksperimentalnih rezultata odzivnih veličina pri optimalnim vrijednostima utjecajnih ulaznih parametara

Odzivne veličine	Odstupanje rezultata
Temperatura tijela T_{bulk} , [°C]	0,3
Razlika mjere preko zubi ΔW_4 , [μm]	6
Promjena mase Δm , [g]	0,01
Stupanj iskoristivosti η_z , [%]	2,2

Relativno odstupanje, izraženo u postotcima temperature tijela T_{bulk} iznosi 0,7 %, dok odstupanje stupnja iskoristivosti η_z iznosi 3 %, čime je potvrđena velika pouzdanost i reprezentativnost matematičkih modela za predviđanje temperature tijela T_{bulk} i stupnja iskoristivosti η_z . Relativno odstupanje razlike mjere preko zubi ΔW_4 iznosi 10 %, a odstupanje promjene, tj. gubitka mase Δm , iznosi 8 %. Pouzdanost matematičkih modela za predviđanje trošenja je malo manja, ali kako se radi o razlici u mjerenjima prije i nakon ispitivanja, a ne ukupnim vrijednostima, ista je zadovoljavajuća.

6. ZAKLJUČAK

Široka paleta polimernih materijala različitih mehaničkih, toplinskih i triboloških svojstava kao i velik broj tehnologija za izradu polimernih zupčanika, za čije konstruiranje ne postoje standardi već samo smjernice, predstavljaju poprilično veliko područje za znanstveno istraživanje. Zbog nedostatka iskustvenih vrijednosti koje bi vodile prema standardizaciji polimernih zupčanika, potrebno je provoditi eksperimentalna istraživanja na stvarnim zupčanicima, u uvjetima što sličnijim stvarnim eksploatacijskim. Kako su polimerni zupčanci ograničeni radnom temperaturom, moguće je primijeniti hibridnu tehnologiju polimera i metala koja bi objedinila prednosti oba materijala. Hibridni zupčanci sastavljeni su od polimerne matrice i metalnih umetaka, a takva kombinacija može doprinijeti poboljšanju toplinske vodljivosti i radnih značajki hibridnih zupčanika u odnosu na polimerne.

U svrhu prikupljanja relevantnih mjernih rezultata, u ovom radu je razvijen, konstruiran i izrađen eksperimentalni sustav za ispitivanje zupčanika s mehanički otvorenim tokom snage, a koji omogućava određivanje radnih značajki polimernih i hibridnih zupčanika za vrijeme rada. Radne značajke koje se određuju su zagrijavanje, trošenje i iskoristivost. U eksperimentalnom istraživanju je primijenjen ubrzani postupak ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja koji pouzdano zamjenjuje standardna dugotrajna ispitivanja s konstantnim opterećenjem.

Glavni ciljevi ovog rada su karakterizacija i usporedba radnih značajki između polimernih i hibridnih zupčanika, pri čemu su polimerni zupčanci i polimerna matrica hibridnih zupčanika proizvedeni aditivnom tehnologijom, postupkom taložnog srašćivanja (FDM). Polimerni zupčanci i polimerna matrica hibridnih zupčanika proizvedeni su od poliamida (PA), a korišteni metalni umeci za hibridne zupčaničke izrađeni su od aluminijske legure i čelika.

Cilj ovog rada je eksperimentalno odrediti te usporediti radne značajke polimernih i hibridnih zupčanika što je iskazano temeljnom hipotezom:

Moguće je konstruirati nove hibridne zupčaničke, sastavljene od polimerne matrice proizvedene aditivnom tehnologijom i različitih metalnih umetaka, koji će pri eksperimentalnom ispitivanju imati bolje radne značajke u odnosu na polimerne zupčaničke proizvedene s istom aditivnom tehnologijom i s jednakom geometrijom ozubljenja.

Stoga je u ovom radu inicijalno provedeno eksperimentalno istraživanje na PA polimernim zupčanicima koji su proizvedeni u dvije različite rezolucije (kvalitete). Također, provedeno je eksperimentalno istraživanje već postojeće konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika, a budući da je na postojećoj izvedbi hibridnih zupčanika provedena isključivo numerička analiza,

ovim istraživanjem je izvedena eksperimentalna validacija predloženog konstrukcijskog rješenja iz prethodno objavljenih istraživanja.

Na temelju rezultata istraživanja, u konačnici su razvijene nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika s poboljšanim radnim značajkama u odnosu na polimerne zupčanike, ali i u odnosu na postojeću konstrukcijsku izvedbu hibridnih zupčanika. Nakon provedenog eksperimentalnog istraživanja na polimernim i hibridnim zupčanicima, dobiveni su glavni zaključci istraživanja koji mogu biti podloga za buduća istraživanja u ovom znanstvenom području:

- Radne značajke PA polimernih zupčanika ovise o hrapavosti površine boka zuba, a koja je određena rezolucijom (kvalitetom) proizvodnje polimernih zupčanika. Polimerni zupčanicima veće rezolucije ostvarili su bolje radne značajke kroz cijeli postupak ispitivanja, s iznimkom temperature na kraju posljednje faze koje je bila jednaka za obje rezolucije, a koja je posljedica ugaćavanja površina boka zuba tijekom rada. Shodno tome se polimerna matrica hibridnih zupčanika proizvodi isključivo u većoj rezoluciji.
- Eksperimentalnom validacijom postojeće konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika, koja je otkazala za vrijeme ispitivanja, zaključeno je da niti jedna od varijanti hibridnih zupčanika kod kojih se toplina primarno odvodila provođenjem nije primjenjiva, barem kada su isti sastavljeni od PA polimerne matrice i aluminijskih ili čeličnih umetaka.
- Među novim konstrukcijskim izvedbama hibridnih zupčanika, kod kojih se toplina primarno odvodi konvekcijom, hibridni zupčanicima s aluminijskim umecima ostvarili su bolje radne značajke u odnosu na hibridne zupčanike s čeličnim umecima, a razlog su bolja toplinska svojstva aluminija.
- Na temelju nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika koja je proizašla iz postojeće, konstruirane su i druge konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika s različitim aluminijskim umecima. Iako su sve izvedbe ostvarile značajno bolje radne značajke u odnosu na polimerne zupčanike, nova konstrukcijska izvedba hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake, kod koje je izraženo odvođenje topline prisilnom konvekcijom, pokazala se kao najbolje konstrukcijsko rješenje.
- Poboljšano provođenje topline nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake rezultiralo je do 9 °C ili 17 % nižom temperaturom tijela T_{bulk} , većom otpornošću trošenju određenom razlikom mjere preko zubi ΔW_4 (razlika 130 μm) i promjenom, tj. gubitkom mase Δm (razlika 0,44 g na gonjenim zupčanicima), prosječno 4,1 % većim stupnjem iskoristivosti η_z , 24 % duljim

radnim vijekom i 14 % većom nosivosti ili opteretivosti u odnosu na polimerne zupčanike, a da je pri tom ukupna masa zupčanika povećana manje od 1 g ili 2 %.

- Eksperimentalnim istraživanjem polimernih i hibridnih zupčanika uočene su dvije faze trošenja, faza početnog uhodavanja i faza progresivnog trošenja. Faza početnog uhodavanja jednaka je i kod polimernih i hibridnih zupčanika, a rezultat je dimenzijskih netočnosti uzrokovanih ograničenjima korištenog stroja za aditivnu proizvodnju, dok je faza progresivnog trošenja izraženija kod polimernih zupčanika.
- Eksperimentalnim ispitivanjem potvrđena je veza između zagrijavanja, trošenja i iskoristivosti kod obje vrste zupčanika. Klizanje između bokova zubi uzrokuje zagrijavanje koje dovodi do omekšavanja polimernog materijala, a koje rezultira većim abrazijskim trošenjem boka zuba. Istodobno, degradacija profila boka zuba pogoršava zahvat spregnutih zupčanika što negativno utječe na iskoristivost prijenosa.
- Proširenim eksperimentalnim ispitivanjem nove konstrukcijske izvedbe hibridnih zupčanika s aluminijskim umecima u obliku trake, prema centralno kompozitnom planu eksperimenta, regresijskom analizom dobiveni su matematički modeli za predviđanje zagrijavanja, trošenja i iskoristivosti. Rezultati statističke obrade eksperimentalnih rezultata odgovaraju rezultatima eksperimentalnih istraživanja primjenom ubrzanog postupka ispitivanja, unutar granica mjernog područja.
- Optimizacijom procesa zaključeno je da se optimalne radne značajke ostvaruju pri srednjim okretnim momentima i brzinama vrtnje dok vrijeme ispitivanja nema gotovo nikakav utjecaj. Validacijom optimalnog rješenja potvrđena je pouzdanost i reprezentativnost dobivenih matematičkih modela.

Na temelju izloženih zaključnih točaka može se zaključiti da je hipoteza ovog doktorskog rada potvrđena, te da su očekivani znanstveni doprinosi disertacije ostvareni. Otkriveni potencijal hibridnih zupčanika ukazuje na važnost njihovog daljnjeg razvoja, a primjenom korištenog eksperimentalnog sustava moguće je proširiti istraživanje na hibridne zupčanike čija je matrica izrađena od drugih polimernih materijala pogodnih za aditivnu proizvodnju FDM postupkom (ABS, PA-CF, PC, PLA, PP). Istraživanje se može proširiti na promjenu geometrije aluminijskih umetaka u obliku trake, ali i optimizaciju njihove geometrije. Također, posebno zanimljivo istraživanje odnosi se na potencijalno uhodavanje polimernih i hibridnih zupčanika proizvedenih FDM postupkom, s ciljem dodatnog poboljšanja radnih značajki.

LITERATURA

- [1] Barić, G.; Pehnac-Pavlović, G.: “Production and Processing of Polymers in the World, in Europe and in Croatia”, Polymeric materials and additives Conference, Zagreb – Croatia, 2005.
- [2] Švob, A.: “Što povezuje protokol iz Kyota i plastiku?“, Polimeri, Vol. 26, pp. 27 – 29, 2005.
- [3] Da Silva, D. J.; Wiebeck, H.: “Current Options for Characterizing, Sorting, and Recycling Polymeric Waste”, Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology, Vol. 36, No. 4, 2020.
- [4] ANSI/AGMA 920-A01, “Materials for Plastic Gears”, Alexandria, Virginia, 2000.
- [5] Andričić, B.: “Prirodni polimerni materijali”, Sveučilište u Splitu, Split, 2008.
- [6] Siminiati, D.; Pomenić, L.; Oršić, F.: “Određivanje osnovnih parametara za injekcijsko prešanje plastike”, Engineering Review, Vol. 28, No. 1, pp. 119 – 127, 2008.
- [7] Jelaska, D.: “Elementi strojeva”, Sveučilište u Splitu, Split, 2005.
- [8] Wong, K.V.; Hernandez, A.: “A Review of Additive Manufacturing”, ISRN Mechanical Engineering, Vol. 2012, 2012.
- [9] VDI 2736 – 1, “Thermoplastic gear wheels: Materials, material selection, production methods, production tolerances, form design”, Dusseldorf, 2016.
- [10] VDI 2736 – 2, “Thermoplastic gear wheels: Cylindrical gears – Calculation of the load-carrying capacity”, Dusseldorf, 2014.
- [11] BS 6168, “Specification for Non-metallic Spur Gears”, London, 1987.
- [12] Clarke, C. G.; Allen, C.: “The Water Lubricated, Sliding Wear Behaviour of Polymeric Materials Against Steel”, Tribology International, Vol. 24, No. 2, pp. 109 – 118, 1991.
- [13] Evans, S. M.; Keogh, P. S.: “Efficiency and Running Temperature of a Polymer – Steel Spur Gear Pair from Slip/Roll Ratio Fundamentals”, Tribology International, Vol. 97, pp. 379 – 389, 2016.
- [14] Mertens, A. J.; Senthilvelan, S.: “Durability of Polymer Gear-Paired with Steel Gear Manufactured by Wire Cut Electric Discharge Machining and Hobbing”, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 17, No. 2, pp. 181 – 188, 2016.

- [15] Chernets, M. V. i dr.: “Wear Resistance of Glass- and Carbon-Filled Polyamide Composites for Metal-Polymer Gears”, *Journal of Friction and Wear*, Vol. 39, No. 5, pp. 361 – 364, 2018.
- [16] Sarita, B.; Senthilvelan, S.: “Effects of Lubricant on the Surface Durability of an Injection Molded Polyamide 66 Spur Gear Paired with a Steel Gear”, *Tribology International*, Vol. 137, pp. 193 – 211, 2019.
- [17] Zorko, D. i dr.: “Durability and Design Parameters of a Steel/PEEK Gear Pair”, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 140, pp. 825 – 846, 2019.
- [18] Bashandeh, K.; Lan, P.; Polycarpou, A. A.: “Tribological Performance Improvement of Polyamide against Steel Using Polymer Coating”, *Tribology Transactions*, Vol. 62, No. 6, pp. 1051 – 1062, 2019.
- [19] Energizing Chemistry LanXESS: “Moisture absorption in Durethan Polyamide Parts”, https://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/PIB_Durethan_Moisture_Absorption.pdf?docId=76987, 21. siječnja 2025.
- [20] Energizing Chemistry LanXESS: “Conditioning of Parts made from Durethan Polyamide Resin”, https://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/PIB_Durethan_Conditioning_of_Parts.pdf?docId=76990, 21. siječnja 2025.
- [21] Domitran, Z.: “Utjecaj odstupanja dimenzija na životni vijek polimernih zupčanika”, doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [22] Senthilvelan, S.; Gnanamoorthy, R.: “Effect of Rotational Speed on the Performance of Unreinforced and Glass Fiber Reinforced Nylon 6 Spur Gears”, *Materials and Design*, Vol. 28, No. 3, pp. 765 – 772, 2007.
- [23] Karthi, V.; Marimuthu, K.: “Experimental Investigations of Nylon 6 Polymer Matrix Composites Material (70:30) for Wear Reduction in Gears”, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, Vol. 26, pp. 226 – 234, 2019.
- [24] Mao, K. i dr.: “The Wear Resistance Improvement of Fibre Reinforced Polymer Composite Gears”, *Wear*, Vol. 426-427, pp. 1033 – 1039, 2019.
- [25] Tavčar, J.; Grkman, G.; Duhovnik, J.: “Accelerated Lifetime Testing of Reinforced Polymer Gears”, *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, Vol. 12, No. 1, 2018.

- [26] Jia, J. i dr.: “A Comparative Investigation of the Friction and Wear Behavior of Polyimide Composites Under Dry Sliding and Water-lubricated Condition”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 356, No. 1-2, pp. 48 – 53, 2003.
- [27] Lu, Z. i dr.: “Identification of Failure Modes of a PEEK-Steel Gear Pair Under Lubrication”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 125, pp. 342 – 348, 2019.
- [28] Baena, L.; Zuleta, E.; Calderon, J.: “Evaluation of the Stability of Polymeric Materials Exposed to Palm Biodiesel and Biodiesel-organic Acid Blends”, *Polymers*, Vol. 10, No. 5, 511, 2018.
- [29] Polanec, B. i dr.: “Experimental investigation of the wear behaviour of coated polymer gears“, *Polymers*, Vol. 13, 2021.
- [30] Polanec, B.; Glodež, S.; Belšak, A.: “Noise evaluation of coated polymer gears“, *Polymers*, Vol. 15, 2023.
- [31] Singh, A. K.; Siddhartha; Singh, P. K.: “Polymer Spur Gears Behaviors Under Different Loading Conditions: A Review“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 232, pp. 210 – 228, 2018.
- [32] Cayer-Barrioz, J. i dr.: “Abrasive Wear Micromechanisms of Oriented Polymers”, *Polymer*, Vol. 45, No. 8, pp. 2729 – 2736, 2004.
- [33] Marcellan, A. i dr.: “Third Body Effects in the Wear of Polyamide: Micro-mechanisms and Wear Particles Analysis”, *Wear*, Vol. 266, No. 9-10, pp. 1013 – 1020, 2009.
- [34] Mbarek, M. i dr.: “Experimental Simulation of the Friction, Temperature, and Wear Distributions for Polyamide – Steel Gear Contact Using Twin-disc Setup”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 230, No. 9, pp. 1127 – 1138, 2016.
- [35] Evans, S. M.; Keogh, P. S.: “Wear Mechanisms in Polyoxymethylene Spur Gears”, *Wear*, Vol. 428, No. 2, pp. 356 – 365, 2019.
- [36] Breeds, A. R. i dr.: “Wear Behaviour of Acetal Gear Pairs”, *Wear*, Vol. 166, No. 1, pp. 85 – 91, 1993.
- [37] Kalin, M.; Kupec, A.: “The dominant effect of temperature on the fatigue behaviour of polymer gears”, *Wear*, Vol. 376-377, pp. 1339 – 1346, 2017.
- [38] Zorko, D.; Demšar, I.; Tavčar, J.: “An Investigation on the Potential of Bio-based Polymers for Use in Polymer Gear Transmissions”, *Polymer Testing*, Vol. 93, 106994, 2021.

- [39] Ghazali, W. B. M. i dr.: “Investigation on Wear Characteristic of Biopolymer Gear”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 257, No. 1, 2017.
- [40] Yakut, R.; Duzcukoglu, H.; Demirci, M. T.: “The Load Capacity of PC/ABS Spur Gears and Investigation of Gear Damage”, Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 40, No. 1, pp. 41 – 46, 2009.
- [41] Mao, K. i dr.: “Friction and Wear Behaviour of Acetal and Nylon Gears”, Wear, Vol. 267, No. 1-4, pp. 639 – 645, 2009.
- [42] Hu, Z.; Mao, K.: “An Investigation of Misalignment Effects on the Performance of Acetal Gears”, Tribology International, Vol. 116, pp. 394 – 402, 2017.
- [43] Letzelter, E. i dr.: “A New Experimental Approach for Measuring Thermal Behaviour in the Case of Nylon 6/6 Cylindrical Gears”, Polymer Testing, Vol. 29, pp. 1041 – 1051, 2010.
- [44] Senthilvelan, S.; Gnanamoorthy, R.: “Damage Mechanisms in Injection Molded Unreinforced, Glass and Carbon Reinforced Nylon 66 Spur Gears”, Applied Composite Materials, Vol. 11, No. 6, pp. 377 – 397, 2004.
- [45] Walton, D. i dr.: “The Efficiency and Friction of Plastic Cylindrical Gears Part 1: Influence of Materials”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part J: Journal of Engineering Tribology, Vol. 216, No. 2, pp. 75 – 92, 2002.
- [46] Walton, D. i dr.: “The Efficiency and Friction of Plastic Cylindrical Gears Part 2: Influence of Tooth Geometry”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part J: Journal of Engineering Tribology, Vol. 216, No. 2, pp. 93 – 104, 2002.
- [47] Dearn, K. i dr.: “Lubrication Regimes in High-Performance Polymer Spur Gears”, Advances in Tribology, Vol. 2013, 2013.
- [48] Singh, A. K.; Siddartha, “Development and Investigation on Transmission Efficiency of Functionally Graded Material-Based Polybutylene Terephthalate Spur Gears”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019.
- [49] Senthilvelan, S.; Gnanamoorthy, R.: “Condition Monitoring Of Nylon And Glass Filled Nylon Gears”, Applied Composite Materials, Vol. 11, pp. 377 – 397, 2004.
- [50] Senthilvelan, S.; Gnanamoorthy, R.: “Damping Characteristics of Unreinforced, Glass and Carbon Fiber Reinforced Nylon 6/6 Spur Gears”, Polymer Testing, Vol. 25, No. 1, pp. 56 – 62, 2006.

- [51] Dearn, K. D.; Walton, D.: “Acoustic Emissions from Polymeric Gears”, Proceedings of the World Congress on Engineering 2009, Vol. 2, London – UK, 2009.
- [52] Zorko, D. i dr.: “Different Teeth Profile Shapes of Polymer Gears and Comparison of Their Performance”, Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, Vol. 11, No. 6, 2017.
- [53] Hlebanja, G.; Kulovec, S.: “Thermal Properties of S-gears in Comparison with Involute Gears”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 393, 2018.
- [54] Duzcukoglu, H.: “PA 66 Spur Gear Durability Improvement with Tooth Width Modification”, Materials and Design, Vol. 30, No. 4, pp. 1060 – 1067, 2009.
- [55] Senthilvelan, S.; Gnanamoorthy, R.: “Effect of Gear Tooth Fillet Radius on the Performance of Injection Molded Nylon 6/6 Gears”, Materials and Design, Vol. 27, No. 8, pp. 632 – 639, 2006.
- [56] Blok, H.: “The Flash Temperature Concept”, Wear, Vol. 6, No. 6, pp. 463 – 494, 1963.
- [57] Mao, K.: “A Numerical Method for Polymer Composite Gear Flash Temperature Prediction”, Wear, Vol. 262, No. 11-12, pp. 1321 – 1329, 2007.
- [58] Mao, K.: “A New Approach for Polymer Composite Gear Design”, Wear, Vol. 262, No. 3-4, pp. 432 – 441, 2007.
- [59] BS 6168, “Specification for Non-metallic Spur Gears”, London, 1987.
- [60] Fernandes C. M. C. G. i dr.: “Finite Element Method Model to Predict Bulk and Flash Temperatures on Polymer Gears”, Tribology International, Vol. 120, pp. 255 – 268, 2018.
- [61] Černe, B.; Duhovnik, J.; Tavčar, J.: “Semi-analytical Flash Temperature Model for Thermoplastic Polymer Spur Gears with Consideration of Linear Thermo-mechanical Material Characteristics”, Journal of Computational Design and Engineering, Vol. 6, pp. 617 – 628, 2019.
- [62] Černe, B. i dr.: “Thermo-mechanical Modeling of Polymer Spur Gears with Experimental Validation Using High-Speed Infrared Thermography”, Mechanism and Machine Theory, Vol. 146, 103734, 2019.
- [63] Kim, C. H.: “Durability Improvement Method for Plastic Spur Gears”, Tribology International, Vol. 39, No. 11, pp. 1454 – 1461, 2006.
- [64] Fernandes C. M. C. G. i dr.: “Hybrid Polymer Gear Concepts to Improve Thermal Behaviour”, Journal of Tribology, Vol. 141, No. 3, 2019.

- [65] Hooton, J. D. S. i dr.: “Experiments and Finite Element Analysis on a Hybrid Polymer Gear Rack”, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 186, 2023.
- [66] Mao, K. i dr.: “The Wear and Thermal Mechanical Contact Behaviour of Machine Cut Polymer Gears”, *Wear*, Vol. 332-333, pp. 822 – 826, 2015.
- [67] Alharbi, K. A. M.: “Wear and Mechanical Contact Behavior of Polymer Gears”, *Journal of Tribology*, Vol. 141, No. 1, 011101, 2018.
- [68] Calignano, F. i dr.: “Investigation of the Mechanical Properties of a Carbon Fibre-reinforced Nylon Filament for 3D Printing”, *Machines*, Vol. 8, No. 3, 52, 2020.
- [69] Ciobanu, R. i dr.: “Surface Durability of 3D-Printed Polymer Gears”, *Applied Sciences*, Vol. 14, 2024.
- [70] Dimić, A. i dr.: “The Influence of Material on the Operational Characteristics of Spur Gears Manufactured by the 3D Printing Technology”, *Strojnicki časopis – Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 68, No. 3, pp. 261 – 270, 2018.
- [71] Tunalioglu, M. S.; Agca, B. V.: “Wear and Service Life of 3-D Printed Polymeric Gears”, *Polymers*, Vol. 14, 2022.
- [72] Pisula, J. i dr.: “An Analysis of Polymer Gear Wear in a Spur Gear Train Made Using FDM and FFF Methods Based on Tooth Surface Topography Assessment”, *Polymers*, Vol. 13, 2021.
- [73] Kuo, C. C. i dr.: “Characterizations of Polymer Gears Fabricated by Differential Pressure Vacuum Casting and Fused Deposition Modeling”, *Polymers*, Vol. 13, 2021.
- [74] Harsha, K. M.; Seetharama Rao, Y.; Jagannadha Rao, D.: “ Comparison of wear behaviour of polymer spur gears using FDM process“, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021.
- [75] Zhang, Y. i dr.: “A Physical Investigation of Wear and Thermal Characteristics of 3D Printed Nylon Spur Gears”, *Tribology International*, Vol. 141, 105953, 2020.
- [76] Zhang, Y. i dr.: “A Parametric Study of 3D Printed Polymer Gears”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 107, No. 1-4, pp. 4481 – 4492, 2020.
- [77] Jensen, W. B.: “The Origin of the Polymer Concept”, *Journal of Chemical Education*. Vol. 88, No. 5, pp. 624 – 625, 2008.
- [78] Kovačić T.: “Struktura i svojstva polimera”, Sveučilište u Splitu, Split, 2010.
- [79] Rogić, A.; Čatić, I.; Godec, D.: “Polimeri i polimerne tvorevine”, Denona d.o.o., Zagreb, 2008.

- [80] Brizić, M. i dr.: “Polimerni materijali” - Tehnička enciklopedija, Jugoslavenski leksikografski zavod “Miroslav Krleža”, Zagreb, 1986.
- [81] DIN 8580, “Manufacturing processes – Terms and definitions, division”, Berlin, 2003.
- [82] Vlahović, D.: “Termoplasti u strojogradnji”, Željezara Sisak, Zagreb, 1972.
- [83] Oberšmit, E.: “Ozubljenja i zupčanici”, Sveučilišna naklada d.o.o., Zagreb, 1990.
- [84] McKeen, L. W.: “The effect of temperature and other factors on plastics and elastomers”, William Andrew Inc., Norwich, New York, 2008.
- [85] Alfrević, I.: “Mehanika kontinuuma”, Golden marketing, Zagreb, 2003.
- [86] Čatić, I.: “Proizvodnja polimernih tvorevina”, Denona d.o.o., Zagreb, 2006.
- [87] Pustaić, D., Cukor, I.: “Teorija plastičnosti i viskoelastičnosti“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2009.
- [88] Opalić, M.: “Prijenosnici snage i gibanja”, HDESK, Zagreb, 1998.
- [89] Šuljić, I. i dr.: “Experimental Analysis on Hybrid Polymer Gears Produced with Fused Deposition Modeling Method: Thermal Behavior and Wear“, Applied Sciences, Vol. 14, 11509, 2024.
- [90] Šuljić, I. i dr.: “Design of Experimental Test Rig for Polymer Gears“, Contemporary Issues in Economy and Technology – CIET 2024, Split – Croatia, 2024.
- [91] ISO 53, “Cylindrical Gears for General and Heavy Engineering – Standard Basic Rack Tooth Profile”, Geneva, 1998.
- [92] Jelaska, D., Podrug, S., Radica, D.: “Cilindrični zupčanici – uputstvo za proračun“, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2010.
- [93] DIN 3967, “System of Gear Fits: Backlash, Tooth Thickness Allowances, Tooth Thickness Tolerances – Principles”, Berlin, 1978.
- [94] DIN 3964, “Deviations of Shaft Centre Distances and Shaft Position Tolerances of Casings for Cylindrical Gears”, Berlin, 1980.
- [95] DIN 32712 – 2, “Shaft to Collar Connection: Polygon Profile P4C – Part 2 – Calculation and Dimensioning”, Berlin, 2012.
- [96] Decker, K. H.: “Elementi strojeva“, Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb, 2006.
- [97] Ultimaker: “Ultimaker Nylon Technical Data Sheet ”, s Interneta, <https://um-support-files.ultimaker.com/materials/2.85mm/tds/NYLON/Ultimaker-Nylon-TDS-v5.00.pdf>, 22. svibnja 2025.

- [98] Krstulović – Opara, L., Garma, T.: “Infracrvena termografija u tehnici“, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2024.
- [99] Schlosser, P.: “Influence of Thermal and Mechanical Aspects on Deformation Behaviour of Niti Alloys“, doktorska disertacija, University of Grenoble, Grenoble, 2008.
- [100] ISO 4287, “Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Profile Method – Terms, Definitions and Surface Texture Parameters”, Geneva, 1997.
- [101] ISO 25178 – 2, “Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Areal – Part 2: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters”, Geneva, 2012.
- [102] Jelaska, D.: “Zupčanici i zupčani prijenosi”, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu, Split, 2011.
- [103] AlRumaih, H. S., Gad, M. M.: “The Effect of 3D Printing Layer Thickness and Post-Polymerization Time on the Flexural Strength and Hardness of Denture Base Resins“, Prosthesis, Vol 6, pp. 970 – 978, 2024.
- [104] ISO 1328 – 1, “Cylindrical Gears. ISO System of Flank Tolerance Classification – Part 1: Definitions and Allowable Values of Deviations Relevant to Flanks of Gear Teeth”, Geneva, 2013.
- [105] Archard, J. F.: “Elastic Deformation and the Laws of Friction“, Proceedings of the Royal Society of London, Vol 243, pp. 190 – 205, 1957.
- [106] Wang, R. i dr.: “Polymer Matrix Composites and Technology“, Woodhead Publishing, Peking, 2011.
- [107] Krolo, J. i dr.: “Production of Closed-Cell Foams Out of Aluminum Chip Waste: Mathematical Modeling and Optimization“, Metals, Vol. 12, 2022.
- [108] Dumanić, I. i dr.: “Thermomechanical Treatment of A380 Aluminum Alloy for Globular Thixo Feedstock“, Materwiss Werksttech, Vol. 51, pp. 1047 – 1057, 2020.
- [109] Cajner, H.: “Uvod u planiranje i analizu pokusa“, s Interneta, https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/web/sites/poslijediplomski_studij/content/materijali/Nedeljko%20Stefanic_2014_PLANOV%20POKUSA%20OBJEDINJENO.pdf, 8. rujna 2025.
- [110] Runjić-Sokele, M.: “Utjecaj parametara razvlačnog puhanja na svojstva PET boca“, Polimeri, Vol. 4, pp. 213 – 292, 2007.
- [111] Rozga, A.: “Statistika za ekonomiste“, Sveučilište u Splitu, Split, 2006.
- [112] Bauer, B.: “Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje“, doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.

[113] Pavlić, I.: "Statistička teorija i primjena", Tehnička knjiga, Zagreb, 1970.

ŽIVOTOPIS

Igor Šuljić

Igor Šuljić rođen je 23.12.1992. godine u Splitu. U Splitu je pohađao i završio osnovnu i srednju školu, a 2011. godine upisao je sveučilišni prijediplomski studij strojarstva na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu. U rujnu 2014. godine je obranio završni rad pod naslovom “Proračun stupnja djelovanja reduktora“ čime je stekao zvanje sveučilišni prvostupnik inženjer strojarstva. U rujnu 2016. godine obranivši diplomski rad naslova “Proračun i konstrukcija diferencijalnog prijenosnika za plug-in hibridni automobil“ stekao je zvanje magistar inženjer iz područja tehničkih znanosti, znanstveno polje strojarstvo, grana opće strojarstvo (konstrukcije). Za vrijeme studiranja primao je stipendiju za deficitarna zanimanja.

Nakon završenog sveučilišnog diplomskog studija, u travnju 2017. godine zapošljava se kao asistent na Odsjeku za strojarstvo na Sveučilišnom odjelu za stručne studije Sveučilišta u Splitu, a u listopadu 2017. godine upisuje poslijediplomski doktorski studij strojarstva na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu pod mentorstvom prof. dr. sc. Srdjana Podruga. Na stručnom prijediplomskom studiju Konstrukcijsko strojarstvo sudjeluje u nastavnim aktivnostima izvodeći laboratorijske vježbe iz kolegija Tehničko crtanje i CAD, CAD I i CAD II te konstrukcijske vježbe iz kolegija Elementi strojeva I i Elementi strojeva II. U veljači 2023. godine izabran je u zvanje predavač te od tada sudjeluje u izvođenju predavanja iz kolegija Elementi strojeva I i Elementi strojeva II, laboratorijskih vježbi iz kolegija CAD I i CAD II te konstrukcijskih vježbi iz kolegija Elementi strojeva I i Elementi strojeva II, a koji se izvode na stručnom prijediplomskom studiju Konstrukcijsko strojarstvo. Također, sudjeluje u izvođenju predavanja i auditornih vježbi iz kolegija Prijenosnici koji se izvodi na stručnom diplomskom studiju Strojstvo.

Do sada je kao glavni autor ili koautor objavio jedan (1) znanstveni rad u znanstvenom časopisu (A kategorija), dva (2) znanstvena rada u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom (C kategorija) te četiri (4) stručna rada. Aktivno se služi engleskim jezikom i ima osnovno znanje njemačkog jezika.

CURRICULUM VITAE

Igor Šuljić

Igor Šuljić was born on December 23, 1992 in Split. He attended and completed primary and secondary school in Split, and in 2011 he enrolled in the undergraduate university study of Mechanical Engineering at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture in Split. In September 2014, he defended his undergraduate thesis entitled “Calculation of the gearbox efficiency“, obtaining the title of Bachelor of Science in Mechanical Engineering. In September 2016, after defending his dissertation for graduate level entitled “Calculation and design of a differential transmission for a plug-in hybrid car“, he obtained the title of Master of Mechanical Engineering in the field of technical sciences, scientific field of mechanical engineering, branch of general mechanical engineering (constructions). During studies he received a student scholarship for deficitary professions.

After graduating, in April 2017 he was employed as an assistant at the Department of Mechanical Engineering at the University Department of Professional Studies, University of Split, and in October 2017 he enrolled in the postgraduate doctoral study of mechanical engineering at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture in Split under the mentorship of Professor PhD. Srdjan Podrug. At the professional undergraduate study program in Mechanical Engineering, he has been participating in teaching activities by performing laboratory exercises from the courses Technical Drawing and CAD, CAD I and CAD II, and construction exercises from the courses Elements of Machines I and Elements of Machines II. In February 2023, he was elected to the position of lecturer and since then he has been participating in performing lectures from the courses Machine Elements I and Machine Elements II, laboratory exercises from the courses CAD I and CAD II, and construction exercises from the courses Elements of Machines I and Elements of Machines II, which are performed at the professional undergraduate study program in Mechanical Engineering. He has also been participating in performing lectures and auditory exercises from the course Power Transmissions, which is performed at the professional graduate study program Mechanical Engineering.

So far, he has published one (1) scientific paper in a scientific journal (A category), two (2) scientific papers in conference proceedings with international peer review (C category), and four (4) professional papers as the main author or co-author. He is fluent in English and has basic understanding of German.