

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

Ivan Karlo Cingesar

**Istraživanje i razvoj protočnog separatora izrađenog 3D-ispisom**

Zagreb, 2019.

*Ovaj rad izrađen je u Zavodu za termodinamiku, strojarstvo i energetiku pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Domagoja Vrsaljka i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2018./2019.*

## POPIS KRATICA

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
3D	Trodimenzionalno
CAD	(engl. <i>Computer Aided Design</i> )
IUPAC	(engl. <i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i> )
ABS	Akrilonitril/butadien/stiren
SAN	Kopolimer stirena i akrilonitrila
PA	Poliamid
PAK	Poliakrilat
ASTM	(engl. <i>American Society for Testing and Materials</i> )
AP	Aditivna proizvodnja
STL	(engl. <i>Stereolithography</i> )
OBJ	(engl. <i>Object</i> )
VRML	(engl. <i>Virtual Reality Modeling Language</i> )
AMF	(engl. <i>Additive Manufacturing File</i> )
FFF	proizvodnja rastaljenim filamentom (engl. <i>Fused Filament Fabrication</i> )
FDM	taložno očvršćivanje (engl. <i>Fused Deposition Modeling</i> )
SLA	stereolitografija (engl. <i>Stereolithography</i> )
SLS	selektivno lasersko sinteriranje (engl. <i>Selective Laser Sintering</i> )
PJM	PolyJet postupak (engl. <i>PolyJet Modeling</i> )
PVAL	Poli(vinil-alkohol)
PLA	Polilaktid

PC	Polikarbonat
HIPS	Polistiren visoke žilavosti (engl. <i>High Impact Polystyrene</i> )
PP	Polipropilen
UV	ultraljubičasto (engl. <i>Ultra Violet</i> )
LED	(engl. <i>Light Emitting Diode</i> )
PTFE	Politetrafluoretilen

# Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. OPĆI DIO .....	3
2.1. Separacijski procesi .....	3
2.1.1. Podjela separacijskih procesa .....	3
2.1.2. Separacija dvofazne smjese kapljevina/kapljevina .....	6
2.2 Polimeri.....	9
2.2.1. Podjela polimera .....	10
2.2.2. Polimeri i 3D-ispis .....	12
2.2.2.1. Akrlonitril/butadien/stiren (ABS).....	12
2.2.2.2. Poliamid (PA) .....	13
2.2.2.3. Poliakrilat (PAK).....	14
2.3. Aditivna proizvodnja .....	15
2.3.1. Proizvodnja rastaljenim filamentom (FFF).....	16
2.3.2. Stereolitografija (SLA) .....	17
2.3.3. Selektivno lasersko sinteriranje (SLS).....	18
3. MATERIJALI I METODE.....	20
3.1. Korišteni polimerni materijali.....	20
3.2. Uređaji.....	22
3.2.1. FFF pisač.....	22
3.2.2. SLA pisač.....	23
3.2.3. UV komora.....	25
3.3. Računalni programi.....	26
3.3.1. Blender .....	26
3.3.2. Z-SUITE .....	27
3.3.3. PreForm.....	27
3.4. Separatori .....	29
4. REZULTATI I RASPRAVA .....	33
4.1. Ispis modela separatora.....	33
4.2. Efikasnost separacije.....	36
4.2.1. Separator #1 .....	37

4.2.2. Separator #2 .....	44
4.2.3. Separator #3 .....	51
4.2.4. Separator SiO <sub>2</sub> -Teflon.....	58
5. ZAKLJUČCI.....	66
6. ZAHVALE.....	67
7. POPIS LITERATURE .....	68
8. SAŽETAK .....	71
9. SUMMARY .....	72
10. ŽIVOTOPIS .....	73

# 1. UVOD

U prošlom stoljeću otkrivena je i proizvedena nova grupa polimernih inženjerskih materijala, koji osim što su postali konkurenti tradicionalnim materijalima su omogućili napredak i razvoj novih proizvoda i tehnologija proizvodnje.<sup>1</sup>

Aditivna proizvodnja može se definirati kao dio proizvodnog strojarstva koji se bavi izradom predmeta sloj po sloj, a početak procesa započinjemo 3D modeliranjem željenog predmeta u obliku CAD (engl. *Computer Aided Design*) modela. Upotrebom tehnologije 3D-ispisa možemo izraditi modele gotovo bilo kojeg oblika i kompleksnosti korištenjem materijala u obliku krutine, praha i kapljevine. Tehnologija omogućava dizajnerima i inženjerima jeftin i brz način dobivanja ispisanog 3D modela.<sup>2</sup>

Danas aditivnu tehnologiju najčešće primjenjujemo u proizvodnji različitih prototipova i kalupa, elektroničkoj industriji, medicini i stomatologiji, zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, građevini itd.<sup>2,3</sup>

U praksi se sve više koriste polimeri kao tehnički materijali zbog svojih vrlo dobrih karakteristika kao npr. lako oblikovanje, niska električna provodnost, relativno niska gustoća, korozijska stabilnost i zaštita te dobra zvučna zaštita. Radi svoje široke upotrebe s klasičnim materijalima, polimeri su postali materijali korišteni za razne svrhe.<sup>4</sup>

Minijaturizacija kemijskih procesa pruža nam čitav niz prednosti te se sve više povećavaju kemijski procesi u takvim uređajima. Veliki specifični volumen omogućava brzi prijenos tvari i topline što omogućava uklanjanje lokalnog pregrijavanja u egzotermnim reakcijama.<sup>5</sup> Vrlo često dobivenu smjesu produkata potrebno je razdvojiti na pojedine komponente. Separacijski procesi dijele se na mehaničke, ravnotežne i one uvjetovane brzinom prijenosa.<sup>6</sup> Za provedbu separacije na makro razini u kemijskom inženjerstvu najčešće se koriste dekanteri, ekstraktori i destilacijske kolone.

Cilj ovog rada je aditivnom tehnologijom izraditi funkcionalni prototip protočnog separatora dvofaznog nemješljivog sustava dviju kapljevina. Također, želi se i ukazati na mogućnost brzog optimiranja dizajna i izrade novog prototipa.

Hipoteze istraživanja su: Prototip protočnog separatora će dvofaznu smjesu kapljevina/kapljevina mehanički separirati. Razdvajanje faza u izrađenom separatoru temelji se na adhezijskoj sili koja će utjecati na smjer gibanja faza kroz separator i koalescenciji istovrsnih kapljica čime se postiže okrupnjavanje faze i formiranje toka kapljevine.



## 2. OPĆI DIO

### 2.1. Separacijski procesi

Separacijski procesi razvijali su se s razvojem ljudske civilizacije. Služili su nam za izdvajanje metala iz ruda, mirisnih ulja iz cvijeća, boje iz biljaka, dobivanje soli iz morske vode, destilaciju alkohola itd. Ljudsko tijelo ne bi funkcioniralo da nemamo bubreg, organ koji sadrži membrane i odvaja vodu i produkte metabolizma iz krvi.<sup>7</sup>

Nakon reakcijske faze, u kemijskoj procesnoj industriji provodimo operacije separacije i pročišćavanja produkata. U tu svrhu koristimo raznovrsnu opremu koju svrstavamo u standardiziranu i nestandardiziranu opremu. Ukoliko odaberemo standardnu opremu smanjit ćemo početne investicijske troškove, no odabir opreme temelji se najviše na karakterističnim parametrima procesa i svojstvima materijala.<sup>8</sup>

U kemijskom inženjerstvu razdvajanje temeljeno na fizikalnim svojstvima nazivamo separacija. Separacija može biti potpuna ili djelomična. U jednofaznim sustavima čvrsto/čvrsto, mehanički procesi separacije razdvajaju čestice prema gustoći (sortiranje) i veličini čestica (klasiranje). U dvofaznim sustavima procesi se načelo dijele na one u kojima su čvrste čestice relativno pokretljive (npr. gravitacijska sedimentacija) te procese u kojima su dispergirane čestice ograničene pokretljivosti (npr. vakuum filtracija).<sup>6</sup>

Separacijske procese dijelimo na: mehaničke separacijske procese, ravnotežne separacijske procese (sušenje, destilacija, ekstrakcija, apsorpcija, isparavanje, flotacija, kristalizacija, gel-filtracija, ionska izmjena) i procese uvjetovane brzinom prijenosa tvari.<sup>6</sup>

#### 2.1.1. Podjela separacijskih procesa

Separacijske procese možemo dijeliti na više načina, a uobičajeno ih je podijeliti na sljedeći način:

1. mehanički separacijski procesi:

a) centrifugiranje

- koristi se za separaciju čestica koje sporo gravitacijski sedimentiraju; čestice se pod djelovanjem centrifugalne sile gibaju radijalno i sudaraju sa stijenkom<sup>8</sup>

b) dekantiranje

- separacija komponenata odlijevanjem bistre kapljevine nakon sedimentacije<sup>9</sup>

c) filtracija

- proces u kojem se dispergirana čvrsta faza odvaja pomoću filtarskog sredstva<sup>8</sup>

d) sedimentacija

- taloženje čestica pod djelovanjem gravitacijske sile

e) prosijavanje

- separacijska tehnika temeljena na različitoj veličini pojedinih frakcija<sup>10</sup>

2. ravnotežni separacijski procesi:

a) apsorpcija

- uklanjanje plinske komponente otapanjem u selektivnom otapalu<sup>11</sup>

b) destilacija

- separacija smjese temeljena na različitim temperaturama vrelišta komponenti<sup>11</sup>

c) ekstrakcija

- separacija kod kojeg se kapljevita smjesa dovodi u kontakt sa sekundarnim otapalom; komponenta je nejednako raspodijeljena između nemješljivih kapljevina<sup>11</sup>

d) flotacija

- proces odjeljivanja hidrofobne čvrste tvari od hidrofilnih pomoću mjehurića zraka<sup>12</sup>

e) gel-filtracija

- separacija na temelju različitih veličina čestica pomoću filtarskog sredstva

f) ionska izmjena

- separacija koja koristi ionske izmjenjivače koji na sebe vežu ione iz otopine, a ispuštaju ekvivalentnu količinu vlastitih iona u otopinu<sup>13</sup>

g) isparavanje

- svrha je ugušćivanje; do isparavanja dolazi pri temperaturi vrelišta otopine definirane tlakom i temperaturom<sup>11</sup>

h) kristalizacija

- separacijski proces kod kojeg dolazi do stvaranja čvrste faze iz otopine; pokretačka sila je prezasićenost otopine<sup>11</sup>

i) sušenje

- separacijski proces kod kojeg uklanjamo vlagu iz materijala da bismo dobili čisti čvrsti proizvod<sup>11</sup>

3. procese uvjetovane brzinom prijenosa:

a) dijaliza

- separacija otopljenih tvari na temelju njihovog različitog prolaska (difuzije) kroz selektivnu membranu<sup>14</sup>

b) elektrodijaliza

- dijaliza ubrzana djelovanjem električnog polja<sup>15</sup>

c) elektroforeza

- separacijski proces kod kojeg se električki nabijene čestice gibaju u otopini pod utjecajem električnog polja<sup>16</sup>

d) molekularna destilacija

- destilacija u vakuumu, tj. destilacija pri vrlo sniženom tlaku zbog kojeg dolazi to znatnog sniženja vrelišta kapljevine

e) plinska difuzija

- gibanje čestica u plinskog fazi zbog postojanja koncentracijskog gradijenta; tvar će difundirati u drugi plin do ravnotežnog stanja

f) reverzna osmoza

- separacijski proces u kojem se otapalo prisilno giba kroz selektivnu membranu iz područja niže koncentracije u područje veće koncentracije

g) toplinska difuzija

- separacija temeljena na činjenici da različite čestice u smjesi različito reagiraju na promjenu temperature u sustavu tj. postojanje toplinskog gradijenta; također poznato pod nazivom termoforeza

Također, separacijske procese možemo podijeliti i na sljedeći način:<sup>7</sup>

1. separacija kod koje se stvara nova faza ili se dodaje druga faza radi poboljšanja separacije (kondenzacija, isparavanje, destilacija, adsorpcija, stripiranje, ekstrakcija, sušenje, isparavanje, kristalizacija, sublimacija)
2. separacija korištenjem membrana ili fizičkih pregrada (osmoza, reverzna osmoza, dijaliza, mikrofiltracija, ultrafiltracija, pervaporacija, plinska permeacija, filtracija korištenjem kapljevite membrane)
3. separacija u kojoj dodajemo čvrsti agens (adsorpcija, kromatografija, ionska izmjena)
4. separacija korištenjem vanjskog polja ili stvaranjem gradijenta (centrifugiranje, toplinska difuzija, elektroliza, elektrodijaliza, elektroforeza)

### 2.1.2. Separacija dvofazne smjese kapljevina/kapljevina

Najčešći separacijski procesi koji se koriste da bi separirali smjesu kapljevina/kapljevina su: dekantiranje, destilacija i ekstrakcija.

Dekantiranje je separacijska tehnika kod koje se nakon slijeganja gušće otopine na dno dekantera, bistra otopina koja je iznad ugušćene otopine prelije ili u obliku sifonskog odvoda

ugušćena kapljevina odvede iz dekantera. Dekanteri su najčešće cilindrične posude koje osiguravaju dovoljno dugo vrijeme zadržavanja da bi se kapljice dispergirane faze aglomerirale i ovisno o gustoći istaložile ili isplutale. Mogu biti izrađeni i sa koalescerima koji poboljšavaju sudaranje kapljica dispergirane faze i ubrzavaju separaciju. Najčešće se izvode za kontinuirani režim rada, no mogu se vrlo lako izvesti i za šaržni režim rada.<sup>18</sup>

Destilacija je separacijska tehnika kod koje se smjesa dvaju ili više komponenti razdvaja na pojedinačne komponente. Temelji se na činjenici da će se u pari nalaziti više komponente s nižim vrelištem. Prilikom hlađenja i kondenzacije pare, destilat će sadržavati više komponente nižeg vrelišta dok će donji produkt sadržavati više komponente višeg vrelišta. Ovo je jedna od najstarijih separacijskih tehnika no njen nedostatak je što troši veliku količinu energije.<sup>11</sup>

Ekstrakcija je separacijska tehnika u kojoj smjesi iz koje želimo odvojiti dodajemo novu kapljevitu fazu koja služi kao selektivno otapalo u kojem se bolje otapa komponenta iz prve smjese. Radi toga na kraju procesa dobivamo nove dvije faze: rafinantnu fazu i ekstraktnu fazu. Važnost ekstrakcije porasla je zbog sve većih potreba za temperaturno osjetljivim produktima, potrebi za produktom veće čistoće, boljom opremom koja je postala raspoloživa, dostupnijih selektivnih otapala te korištenja ove tehnike kao načina razdvajanja produkata bioreakcija.<sup>7,11</sup>

U industriji, od navedenih separacijskih procesa najčešće se koristi destilacija iako ima velike potrebe za energijom. Razlog leži u tome jer je destilacija po svojoj izvedbi jednostavnija. Ukoliko komponenta koju želimo separirati ima vrelište blisko otapalu, separacija će biti provedena ekstrakcijom. Također će ekstrakcija biti bolji odabir ukoliko u sustavu imamo puno veći volumen vode nego druge kapljevine, ukoliko trebamo separirati azeotropnu smjesu i kada su komponente toplinski nestabilne.<sup>11</sup>

Kako kod provođenja reakcija u makrosustavima vrlo često dolazi do pojave temperaturnog i koncentracijskog gradijenta koji za posljedicu imaju smanjenje učinkovitosti i ekonomičnosti procesa, više pozornosti se počelo pridavati proučavanju toku tvari i energije u sustavu. Poznavanjem fenomena prijenosa tvari i energije omogućilo je smanjenje makrosustava u mikrosustave.<sup>19</sup>

Takvim proučavanjem strujanja i poznavanjem fenomena pri prijenosu tvari i energije, omogućeno je istraživanje separacijskih procesa u mili i mikrosustavima. Istraživanja na području

separacije u mikrokanalima otkrila su veću selektivnost i iskorištenje, uz korištenje manjeg volumena otapala i ostalih resursa zbog svojeg velikog omjera površine i volumena. Zbog toga je ovakve sustave s mikrokanalima moguće koristiti za različite separacije.<sup>20</sup>

Početakom 2000-ih počeli su se više istraživati protočni mili i mikroseparatori s pregradama i semipermeabilnim membranama. Pregrade omogućavaju usporenje protoka i povećanje vremena zadržavanja što znači duži kontakt faza te kontakt faze s čvrstom preprekom. Semipermeabilne membrane omogućavaju razdvajanje sustava kapljevina/kapljevina temeljeno na njihovim različitim kapilarnim silama i selektivne propusnosti kroz membranu. U sustavima s membranama, separacija može biti regulirana činjenicom je li membrana napravljena od hidrofilnog ili hidrofobnog materijala.

Kod protočnog separatora kapljevina/kapljevina s preprekama do izražaja najviše dolaze intramolekulske interakcije i interakcije između fluida i čvrste stijenke.<sup>21</sup> To su fizikalno-kemijska svojstva adhezije i koalescencije. Koalescencija se događa prilikom sudara istoimenih molekula uslijed čega dolazi do okrupnjavanja kapljica čija je posljedica formiranje tokova. Adhezijska sila se javlja između molekula fluida i čvrsta stijenke tj. dolazi do elektrostatskog vezivanja kapljica s površinom čvrste stijenke i prepreka. Ova pojava omogućava usmjeravanje tokova. Modifikacijom površine separatora hidrofobnim ili hidrofilnim sredstvima također smo u mogućnosti usmjeravati formirani tok unutar separatora.

## 2.2 Polimeri

Prirodni polimerni materijali, kao npr. guma, koriste se već tisućama godina. Prirodni kaučuk koristili su južnoamerički Indijanci pri proizvodnji voodootpornih spremnika, obuće, baklji i sl. Prvi španjolski istraživači današnjeg područja Meksika i Haitija, svjedočili su igrama domorodaca s gumenim loptama. Tako je 1740-ih poslan francuski znanstvenik C. M. de la Condamine u Peru da donese kaučuk u Europu.<sup>22</sup> Polimere uglavnom čine organski spojevi, razni polisaharidi, nukleinske kiseline i proteini te anorganski spojevi s najvećim udjelom oksida aluminijska i silicija.<sup>4</sup>

Broj ponavljanih strukturnih jedinica, mera, u makromolekuli treba biti toliko velik da oduzimanjem ili dodatkom jedne jedinice većina svojstva značajnije ne mijenjaju.<sup>23</sup> Same makromolekule su kemijski spojevi vrlo velikih relativnih molekulskih masa, njihov raspon može biti od nekoliko tisuća pa sve do nekoliko milijuna. Promjer makromolekule također varira te može biti od 10 nm do 1000 nm.<sup>24</sup> Podjedinice od kojih su sačinjeni polimeri nazivaju se monomeri, a reakcija u kojoj se monomeri kovalentno vežu zove se polimerizacija.<sup>25</sup> Makromolekule koje sadrže deset, pedeset ili sto ponavljajućih monomernih jedinica zovu se oligomeri. Termin polimeri odnosi se na makromolekule koje sadrže više od sto monomernih jedinica.<sup>26</sup> Također, oligomeri su uobičajeno viskozne kapljevine ili lako taljive krutine i lako su topljivi.<sup>24</sup> Uređenje makromolekulske strukture može biti kristalno ili amorfno. Kristalna struktura ima parcijalno uređena područja, odnosno pravilan raspored molekula. Amorfna struktura nema pravilan raspored molekula tj. nema 3D kristalnu uređenost.<sup>27</sup>

Temelj nazivlja i nomenklature polimera počiva na tri načela: prema nazivima monomera, prema ponavljanim konstrukcijskim jedinicama i njihovom strukturama. Ukoliko je polimer dobiven lančanom polimerizacijom jednog monomera rabi se načelo dobivanja naziva prema monomeru uz dodatak prefiksa poli. Na primjer polimeri etilena, propilena i stirena zovu se polietilen, polipropilen i polistiren. IUPAC-ova komisija za nomenklaturu makromolekula preporučuje nazive za polimere koji se sastoje od ponavljanih konstruktivnih jedinica, međutim dozvoljava se i upotreba polusastavnih ili trivijalnih imena. IUPAC-ova nomenklatura bazira se na nomenklaturi organskih spojeva, tako da se polimeri nazivaju npr. poli(etilen-tereftalat) je

poli(oksietilenoksitereftaloil), polistiren je poli(1-feniletilen) i poli(vinil-klorid) je poli(1-kloretilen).<sup>24</sup>

Polimeri nastaju dvama mehanizmima: lančanom reakcijom i stupnjevitom reakcijom. Moguće je naići i na starije nazive adicijska te kondenzacijska reakcija gdje se adicijska najčešće odnosi na lančanu, a kondenzacijska na stupnjevitu. Adicijska reakcija odvija se kod spojeva koji sadrže nezasićene veze ugljik-ugljik te dvostruke veze ugljik-ugljik. U ovom tipu reakcije svaki stupanj ovisi o prethodnome u kojem nastaje reaktivni centar. Kod kondenzacijske reakcije polimerizacije, polimeri nastaju reakcijom funkcionalnih skupina koje se nalaze na monomerima. Pojedini stupnjevi ove reakcije ne ovise o prethodnim stupnjevima reakcije kao što je to slučaj kod adicijske reakcije.<sup>23</sup>

### 2.2.1. Podjela polimera

Polimere možemo podijeliti na više načina i skupina s obzirom na njihove karakteristike. Najčešće se dijele na sljedeći način:<sup>27</sup>

#### 1. prema podrijetlu:

##### a) prirodni:

- biopolimeri od kojih su izgrađeni živi organizmi, prije svega bjelančevine, nukleinske kiseline, posebni polisaharidi, hormoni, fermenti i sl.

##### b) sintetski:

- dobivaju se iz niskomolekulskih spojeva kao što su nafta, zemni plin i sl.

#### 2. prema vrsti ponavljajućih jedinica:

##### a) homopolimeri

- izgrađeni samo od jedne vrste mera

##### b) kopolimeri

- izgrađeni od dvije ili više vrsta mera



3. prema obliku makromolekule:

a) ravnolančani

- simetrični su pri čemu krajnje skupine nemaju značajniji utjecaj na svojstva polimera zbog velikog broja jedinica

b) razgranati

- izgrađeni su od ravnog lanca koji je osnova na koji su vezani određeni broj bočnih lanaca, čiji raspored, veličina i sastav ovise o polimeru

c) umreženi

- nastaju kada bočni lanci sadrže funkcionalne skupine pa dolazi do kovalentnog vezivanja

d) trodimenzionalni

- nastaju prilikom naknadnog vezivanja linearnih makromolekula kovalentnom vezom

4. prema reakcijskom mehanizmu polimerizacije:

a) adicijski

b) kondenzacijski

5. prema termomehaničkom ponašanju:

a) plastomeri (termoplasti)

- prilikom grijanja omekšaju, hlađenjem ponovno otvrdnjavaju

b) elastomeri (guma)

- imaju svojstvo elastične deformacije pri sobnoj temperaturi

c) duromeri (duroplasti)

- ne omekšavaju pri zagrijavanju i nemaju svojstvo elastične deformacije

6. prema uređenosti makromolekulske strukture:

a) amorfni

- imaju nepravilan raspored molekula

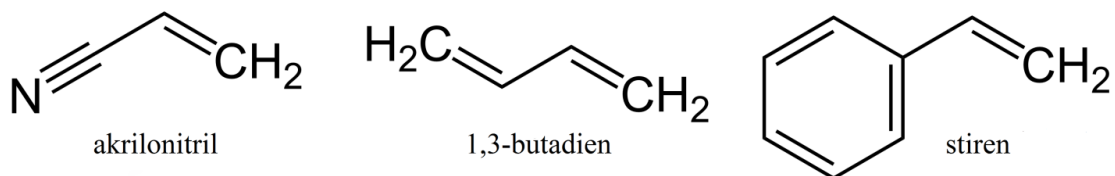
b) kristalasti

- imaju djelomično kristalno uređena područja

## 2.2.2. Polimeri i 3D-ispis

### 2.2.2.1. Akrilonitril/butadien/stiren (ABS)

Akrilonitril/butadien/stiren polimer je koji nastaje radikalskom polimerizacijom, najčešće se radi o smjesi kopolimera stirena i akrilonitrila (SAN) i polibutadiena. Pripada skupini plastomera (termoplasta) te po svome sastavu nije uvijek identičan. U praksi je poznato oko 25 vrsta ABS-a, a najčešća vrsta ABS-a koja se koristi ima sastav 21 % do 27 % akrilonitrila, 12% do 25 % butadiena i 43 % do 63 % stirena. Ovoj mješavini polimera kopolimer SAN pridonosi povećanju tvrdoće i omogućava lakšu preradljivost, dok dodatak polibutadiena poboljšava elastična svojstva i žilavost. U usporedbi s drugim polimerima na bazi stirena, velika udarna žilavost i mehanička svojstva dobivaju se disperzijom i adhezijom čestica elastomera polibutadiena sa slobodnim SAN kopolimerom.<sup>24,28</sup>



Slika 1. Monomeri od kojih je građen ABS<sup>29</sup>

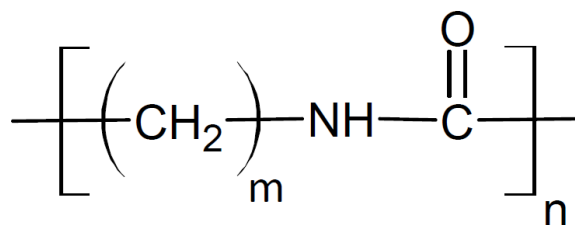
ABS je termoplastični polimer, što znači da prilikom zagrijavanja omekša, postaje plastičan i lakše se obrađuje. Temperatura staklastog prijelaza ABS-a je na 105 °C. Prilikom

hlađenja, ponovno postane tvrd i čvrst no zadržava svoju kemijsku strukturu. Može se višekratno zagrijavati i hladiti bez značajnije degradacije svojstava. Zbog loše otpornosti na atmosferske uvjete, dodaju mu se različiti aditivi da bi se usporila fotokemijska degradacija ABS-a.<sup>24, 27, 30, 31</sup>

Zbog navedenih karakteristika, ABS je materijal uravnoteženih elektroničkih, mehaničkih i toplinskih svojstva te kemijske postojanosti. Čvrstoća na savijanje, dimenzijska postojanost i udarna žilavost posebno su dobra svojstva ABS-a. Prednost pred drugim konstrukcijskim plastomerima mu je relativno niska cijena i laka preradljivost.<sup>24, 31</sup>

#### 2.2.2.2. Poliamid (PA)

Poliamidi (slika 2.) sastoje se od makromolekula naizmjenično poredanih ugljikovodičnih i funkcionalnih amidnih skupina. Skupine su povezane u linearne makromolekule te međusobno jakim vodikovima vezama te su zbog toga poliamidi kristalasti plastomeri visokog tališta i postoje na utjecaj otapala. Osnovna svojstva PA ovise o veličini ugljikovodičnog dijela makromolekule odnosno koliko su gusto raspoređene amidne skupine. Prema vrsti ugljikovodičnog segmenta poliamidi se dijele na alifatske i aromatske amide.



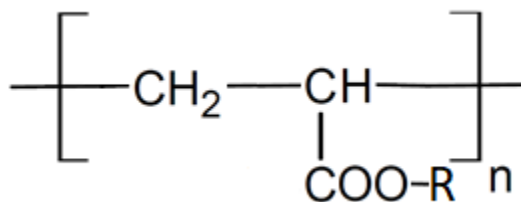
Slika 2. Opća struktura poliamida<sup>32</sup>

Alifatski poliamidi imaju visoku temperaturu taljenja, dobru vlačnu čvrstoću, udarnu žilavost i otpornost prema abraziji te otapalima i umoru materijala. Bili su prvi sintetski polimeri koji su se koristili kao tekstilna vlakna. Označavaju se prema broju ugljikovih atoma u reagirajućim monomerima.<sup>33</sup> Aromatski poliamidi, poznati i kao aramidi, su znatno krući od

alifatskih poliamida jer u glavnim lancima makromolekule sadrže aromatske strukture. Također radi aromatskih struktura pokazuju i bolju toplinsku postojanost od alifatskih poliamida.<sup>24</sup>

### 2.2.2.3. Poliakrilat (PAK)

Poliakrilati su polimeri, vrlo često polimerne smole, dobiveni polimerizacijom akrilnih estera. Male su tvrdoće, ali dobre postojani na djelovanje svjetlosti, kisika, kiselina i lužina.<sup>34, 35</sup>



Slika 3. Opća struktura poliakrilata<sup>36</sup>

Najčešće se koriste u bojilima, različitim premazima za površine, u ljepilima i u tekstilu. Najpoznatiji spojevi su poli(etil-akrilat), poli(metil-akrilat), poliakrilamid i poliakrilonitril (PAN).<sup>34, 35</sup>

Razvojem tehnologije 3D-ispisa, poliakrilati su se počeli koristiti kao materijali od kojih se izrađuju predmeti. Koriste se kao materijal u nekoliko tehnologija aditivne proizvodnje.

### 2.3. Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja termin je koji se na početku koristio za procese koji su se prije nazivali brza izrada prototipa i što se danas popularno naziva *3D-printanje*. Tehnički odbor unutar komisije *ASTM international* donio je odluku da zbog kvalitete modela koji se proizvode na uređajima ovaj proces više nije ispravno nazivati brzom izradom prototipa. Opće prihvaćeni naziv postao je aditivna proizvodnja (AP). Brza izrada prototipova, termin je koji se koristi u raznim granama industrije za opis procesa brze izrade predmeta koji prikazuju sustav ili dijelove prije puštanja u prodaju. AP naziv je za skup tehnologija koje omogućavaju da trodimenzionalni model izrađen pomoću CAD programa (npr. Fusion 360, Catia, Blender i sl.) vrlo brzo proizvede bez potrebe za planiranjem čitavog procesa proizvodnje. Omogućava se proizvodnja predmeta vrlo kompleksne geometrije.<sup>37</sup>

Zajedničko svim tehnologijama aditivne proizvodnje je činjenica da se predmeti izrađuju sloj po sloj. Slojevi su najčešće iste debljine i svaki sloj postavlja se na vrh prethodnog sloja te kao rezultat ovog procesa možemo kod nekih tehnologija dobiti predmet koji je u nekim svojim dijelovima stepenastog oblika.<sup>38</sup>

Najčešći formati u kojima se spremaju datoteke koje sadrže podatke o modelima izrađenim u CAD programima su STL (engl. *Stereolithography*) i OBJ (engl. *Object*).<sup>39</sup> Noviji formati koji se koriste su VRML (engl. *Virtual Reality Modeling Language*) i AMF (engl. *Additive Manufacturing File*) koji nam za razliku STL i OBJ formata omogućavaju i spremanje podataka o boji predmeta ili dijelova predmeta. Također, veličinom mogu biti i do dva puta manji od STL formata.<sup>40</sup>

Ovisno o tome koju vrstu materijala koriste, tehnologije se dijele na one koje koriste kapljevite materijale, praškaste materijale te krute materijale (najčešće u obliku filameta). Prema primijenjenoj tehnologiji postupci aditivne tehnologije dijele se na:<sup>41</sup>

1. stereolitografiju (fotopolimerizacija)
2. PolyJet postupak (raspršivanje materijala)
3. trodimenzionalno tiskanje (raspršivanje veziva)
4. proizvodnja rastaljenim filamentom (ekstrudiranje materijala po površini)

5. selektivno lasersko sinteriranje (sinteriranje praha)
6. proizvodnja laminiranih objekata (laminiranje)
7. izravno taloženje metala

Četiri tehnologije najraširenije tehnologije aditivne proizvodnje:

1. proizvodnja rastaljenim filamentom (FFF)
2. stereolitografija (SLA)
3. selektivno lasersko sinteriranje (SLS)
4. PolyJet postupak (PJM)

### 2.3.1. Proizvodnja rastaljenim filamentom (FFF)

Proizvodnja rastaljenim filamentom (engl. *Fused Filament Fabrication*) bazira se na taljenju polimernog materijala u obliku filameta, najčešće promjere 1,75 mm ili 3,00 mm, koji prolazi kroz dizu ekstrudera. Tijekom ovog procesa, istiskivanje polimernog materijala može se kontrolirati sustavom za dovodenje filameta u ekstruder. To se čini isključivanjem ili usporavanjem elektromotora koji na sebi ima nazubljeni kotačić koji uvlači filament.<sup>22</sup> Ovisno o izvedbi FFF 3D-pisača prilikom izrade modela, ekstruder s dizom pomiče se po X- i Y-osi, dok se grijana podloga pomiče po Z-osi ili se ekstruder s dizom pomiče po Z-osi i jednoj od X- ili Y- osi, a grijana podloga po jednoj od preostalih, X- ili Y-osi.<sup>38</sup>

Ova tehnologija poznata je i pod nazivom *Fused Deposition Modeling*, FDM, no to ime zaštićeno je od strane tvrtke Stratasys.

Najčešće, 3D-pisači koji koriste ovu tehnologiju ispisa predmet izrađuju od jedne vrste materijala. Noviji 3D-pisači u mogućnosti su koristiti dva materijala od kojih izrađujemo predmet – jedan materijal za predmet, a drugi materijal za potporne strukture. Noviji materijali od kojih se izrađuju potporne strukture topivi su u vodi kao npr. poli(vinil-alkohol) (PVAL). Neki od najčešće upotrebljavanih materijala su: akrilonitril/butadien/stiren (ABS), polilaktid (PLA), polikarbonat (PC), polistiren visoke žilavosti (HIPS) i polipropilen (PP).

Prednosti ove tehnologije 3D-ispisa su: niska cijena izrade predmeta, nema potrebe za posebnom infrastrukturom, širok izbor različitih materijala, ušteda materijala prilikom ispisa zbog odabira postotka ispune predmeta. Nedostaci su: nemogućnost izrade dijelova visoke rezolucije, potporne strukture koje se izrađuju skupa s predmetom treba ukloniti, loša kvaliteta površine, relativno spora proizvodnja ukoliko ispisujem više predmeta odjednom i vrlo anizotropna mehanička svojstva.<sup>22</sup>

### 2.3.2. Stereolitografija (SLA)

Stereolitografija (SLA) tehnologija je koja koristi kapljevitu smolu, nepolimerizirani fotopolimer, u tzv. kadici kao materijal od kojeg se izrađuje predmet. Ovo je tehnologija koja koristi laser kao izvor svjetlosti kojom osvjetli kapljevitu smolu u kojoj se nalazi fotoinicijator i tako pokrene fotopolimerizaciju. Postoje dva načina izrade predmeta pomoću ove tehnologije, jedan od njih je da se podloga na kojoj se izrađuje predmet nalazi u kadici napunjenoj smolom te se pomiče po Z-osi ovisno tome kako napreduje izrada predmeta, dok se laser pomiče po X- i Y-osi. Prilikom ispisa, podloga se nalazi tik ispod površine i laser očvršćuje smolu. Sa svakim završenim slojem, lopatice automatski nanose nove slojeve kapljevite smole preko predmeta koju treba očvrstnuti. Drugi način podrazumijeva da se podloga nalazi iznad kadice u kojoj se nalazi smola te se uranja malo ispod površine, a izvor svjetlosti dolazi s donje strane i očvršćava smolu. Laser se pomiče u smjeru X- i Y-osi. Sa svakim završenim slojem prilikom izrade na ovaj način podloga s predmetom izranja iz smole te lopatica automatski miješa smolu da bi došlo do jednake raspodjele fotoinicijatora po cijelom volumenu smole.<sup>22</sup>

Prilikom izrade predmeta ovom tehnologijom potrebno je koristiti i potporne strukture koje kasnije treba ukloniti. Ovo nam ograničava mogućnosti u orijentiranju predmeta u prostoru kako mi želimo. Potporne strukture nakon uklanjanja ostavljaju male točke na površini te zbog toga moramo pažljivo odabrati orijentaciju predmeta kako bi smanjili broj potpornih struktura. Nakon 3D-ispisa predmeta, taj predmet potrebno je naknadno očvrstnuti u UV komori. Naknadno očvršćivanje integrali je dio ove tehnologije ispisa. Zasad su dostupne samo dva materijala: epoksidna smola i poliakrilatna smola.<sup>38</sup>

Prednosti ove tehnologije su: mogućnost izrade predmeta visoke rezolucije, mogućnost izrade vrlo kompleksnih geometrijskih oblika, vrlo glatka površina (ukoliko se površina kasnije treba oblagati). Glavni nedostaci SLA tehnologije su: uklanjanje potpornih struktura koje ostavljaju male točke na površini, ograničenje s materijalima koje imamo na raspolaganju često dovodi do činjenice da nam se dijelovi slome ili na neki drugi način degradaciju zbog utjecaja UV svjetlosti dok je predmet u upotrebi, vrlo veliko vrijeme naknadne obrade tj. naknadnog očvršćivanja i nemogućnost predviđanja točnog smanjenja i izvijanja predmeta prilikom naknadnog očvršćivanja s obzirom da se taj proces odvija u termostatiranoj UV komori.<sup>22</sup>

### 2.3.3. Selektivno lasersko sinteriranje (SLS)

Selektivno lasersko sinteriranje (SLS) tehnologija je koja se bazira na selektivnom taljenju termoplastičnog praha. Općenito, ova tehnologija ispisa ne zahtjeva podloge na kojima se predmet ispisuje niti potporne strukture za predmet s obzirom da se oko predmeta nalazi nesinterirani prašak koji stabilizira i imobilizira predmet.<sup>38</sup>

Na početku ispisa, polimerni prašak zagrijava se na radnu temperaturu, idealna bi bila temperatura blizu temperature taljenja praška. Slojevi praška nanose se lopaticom ili nekim oblikom valjka. Sloj se sinterira laserom što znači da se rastali i zalijepi na prethodni sloj i tako se nanosi svaki sloj, a podloga spremnika, u kojem se ispisuje predmet, spušta se za visinu sloja. Podloga u spremniku u kojem se nalazi svježi prah podiže se za visinu koliko se spustila podloga u spremniku u kojem se nalazi predmet u izradi. Tako svakim prelaskom lopatica ili valjak mogu prenijeti prašak u spremnik gdje se ispisuje predmet.<sup>22</sup>

Nakon završetka izrade predmeta, nanosi se dodatni sloj praha koji se sinterira po cijeloj površini te dobivamo „ciglu“ koju smo u mogućnosti cijelu izvaditi iz 3D-pisača ukoliko se odmah treba ispisati novi predmet.<sup>38</sup>

Različite vrste polimernih materijala koje možemo koristiti s ovom tehnologijom ispisa pružaju veliku prednost ove tehnologije pred ostalima. Osim polimernih prašaka može se koristiti keramika, metal/polimer praškove, različite legure, najlon i polikarbonate.<sup>42</sup>



Prednosti SLS tehnologije su: mogućnost korištenja različite vrste materijala, nema postupaka naknadne obrade i nisu potrebne nikakve potporne strukture. Nedostaci su: specifična hrapavost površine, degradacija praška zbog dugog trajanja procesa na povišenoj temperaturi, vrlo dugo vrijeme ispisa ako je potrebno ispisati kompleksne strukture, izvijanje i boranje površine i dugo vrijeme hlađenja.<sup>22</sup>

#### 2.3.4. PolyJet postupak (PJM)

PolyJet postupak (PJM) je tehnologija 3D ispisa koja omogućava ispis glatkih, vrlo precizno izrađenih dijelova i prototipova. S mikroskopskom rezolucijom slojeva i preciznošću od 0,1 mm, u mogućnosti je proizvesti vrlo tanke stijenke i kompleksne geometrijske oblike i tijela koristeći veliki broj materijala.<sup>43</sup>

PJM tehnologija spoj je SLA i tehnologije ispisa tintom kakvu koriste 2D-pisači. Prilikom izrade predmeta ovom tehnologijom na radnu podlogu 3D pisač nanosi tanki sloj fotopolimerizirajućeg materijala koji se zatim osvjetli UV svjetlom da bi očvrstnuo. Radna podloga tako se pomiče po Z-osi završetkom svakog sloja sve dok zadani predmet ne bude izrađen. Nakon ispisa potrebno je ukloniti potporne strukture koje su izrađene paralelno s predmetom. Uklanjanje se mehanički ili selektivnim otapalima nakon čega su 3D ispisani predmeti spremni za uporabu.<sup>27</sup>

Prednosti PJM su: vrlo glatke površine, mogućnost izrade vrlo finih detalja, izrada složenih oblika, zamršenih detalja i vrlo tankih dijelova te vrlo brza izrada.<sup>43</sup> Za razliku od ostalih tehnologija ispisa, najlakše je proizvesti predmete u boji s ovom tehnologijom. Nedostaci PJM su to što potporne strukture ostavljaju male točke na površini i potrebno je dodatno obraditi predmet da bi ponovno imao sjaj, preporučeni način uklanjanja potpornih struktura je vodenim mlazom što možda u nekim slučajevima nije spretno.

### 3. MATERIJALI I METODE

#### 3.1. Korišteni polimerni materijali

U ovom radu korištena su četiri polimerna materijala (Tablica 1.) koji su se upotrebljavali u dvije tehnologije 3D-ispisa: proizvodnji rastaljenim filamentom i stereolitografiji. Za izradu separatora FFF tehnologijom korišten je gotovi komercijalni Zortrax-ov materijal u obliku filameta promjera 1,75 mm, dok je za izradu predmeta korištenjem SLA tehnologije 3D-ispisa korištena Formlabs-ova kapljevitna poliakrilatna (PAK) smola.

Tablica 1. Upotrijebljeni polimerni materijali i njihovi proizvođači

Osnovni materijal	Naziv	Proizvođač
ABS	Z-ABS	Zortrax S.A., Poljska
ABS	Z-Ultrat	Zortrax S.A., Poljska
ABS	Z-Glass	Zortrax S.A., Poljska
PAK	Clear	Formlabs Inc., SAD

S tri komercijalna Zortrax-ova materijala pokušao se izraditi separator, radi toga u tablici 2. navedena je temperatura ispisa i sastav tih materijala.

Tablica 2. Sastav i temperature ispisa komercijalnih Zortrax-ovih materijala

<b>Z-ABS (<math>T_{ispisa} = 275\text{ °C}</math>)</b>							
ABS	Stabilizatori	Lubrikanti	Mineralno ulje	Loj	Vosak		
90-100 %	0-3 %	0-3 %	0-2 %	0-2 %	0-2 %		
<b>Z-Ultrat (<math>T_{ispisa} = 260\text{ °C}</math>)</b>							
ABS	Stabilizatori	Lubrikanti	Mineralno ulje	Loj	Vosak	PC	Antioksidans
90-100 %	0-5 %	0-2 %	0-4 %	0-4 %	0-4 %	0-3 %	< 2 %
<b>Z-Glass (<math>T_{ispisa} = 250 - 260\text{ °C}</math>)</b>							
PETG		Stakloplastika		Lubrikanti		Stabilizatori	
80 %		8-12 %		0-4 %		0-4 %	

**Z-ABS** je polimerni materijal u čijem sastavu najveći udio ima ABS u iznosu više od 90 %. Odličan je za izradu različitih mehaničkih dijelova, igračaka i prototipova.

**Z-Ultrat** je polimerni materijal po sastavu vrlo sličan Z-ABS-u, jer ABS čini oko 90 % njegovog sastava no dodani su aditivi radi bolje otpornosti na atmosferske uvjete. Koristi se za izradu raznih prototipova i kućišta.

**Z-Glass** je materijal koji zbog udjela staklenih vlakana (engl. *fiberglass*) u svom sastavu djelomično propušta svjetlost. Zbog toga se može koristiti za izradu dijelova koji trebaju propuštati svjetlost tj. kao imitacija stakla. Relativno je otporan na agresivne okolišne uvjete: visok salinitet, bazičnost ili kiselost i prisutnost različitih otapala.

**PAK** je materijal koji se sastoji od poliakrilatnih monomera, poliakrilatnih oligomera i fotoinicijatora. Osvjetljavanjem kapljevito materijala s svjetlošću valne duljine 405 nm fotoinicijator započinje fotopolimerizaciju te tako kapljeviti materijal očvršćuje i dobivamo gotovi predmet.

## 3.2. Uređaji

U radu su korištena dva 3D-pisača: M200 proizvođača Zortrax koji izrađuje modele FFF postupkom i Form 2 proizvođača Formlabs koji izrađuje modele SLA postupkom izrade.

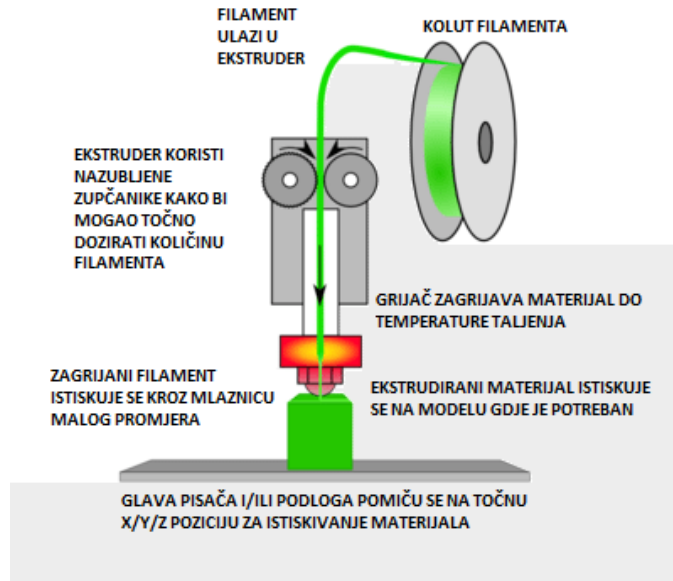
### 3.2.1. FFF pisač

3D-pisač Zortrax M200 (Slika 4.) predmeta izrađuje FFF postupkom (Slika 5.). Predmet koji izradujemo na ovome 3D-pisaču potrebno je prethodno izraditi u CAD programima i spremiti u datoteku STL formata.

Tu datoteku učitavamo u program koji će taj predmet podijeliti u horizontalne slojeve tzv. *slicer* (engl. *slicing*). Taj program izrađuje u ovome slučaju z-code datoteku u kojoj su sadržani podatci o smjeru gibanja ekstrudera (u slučaju SLA tehnologije o poziciji lasera), temperaturi podloge ispisa, temperaturi ekstruzije i sl.<sup>44</sup>



Slika 4. 3D-pisač Zortrax M200<sup>45</sup>



Slika 5. Princip funkcioniranja FFF pisača<sup>46</sup>

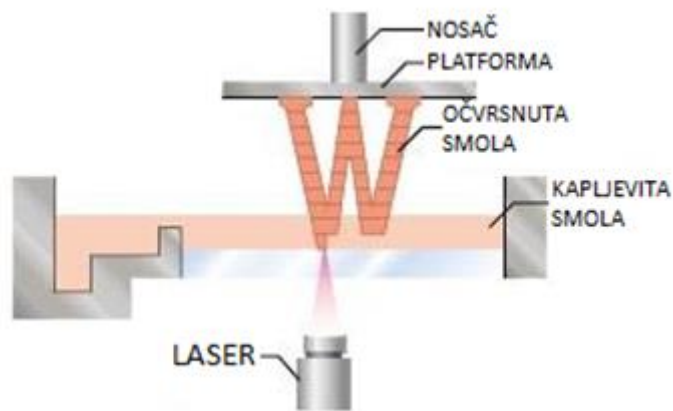
3D-ispis modela vrši se istiskivanjem filameta polimernog materijala kroz dizu. Sloj po sloj se nanose i hlade. Brzina ispisa bitna je da ne bi došlo raslojavanja, temperatura podloge je bitna da bi došlo do dobre adhezije modela i podloge jer se predmet ne smije micati po podlozi prilikom izrade te kontroliranjem temperature ekstruzije sprečavamo pojavu tankih niti filameta koji narušavaju izgled površine, a tako i mehaničke svojstva jer je temperatura 3D-ispisa u tom slučaju previsoka ili ukoliko materijal ne teče kroz dizu jer je temperatura 3D-ispisa preniska. Predmeti ne moraju biti izrađeni u potpunosti ispunjeni materijalom, nego mogu biti ispunjeni u obliku šesterokuta ili četverokuta u iznosu od 1 % do 99 %.

### 3.2.2. SLA pisač

3D-pisač Form 2 (Slika 6.) izradu predmeta temelji na SLA tehnologiji (Slika 7.) 3D-ispisa.



Slika 6. 3D-pisač Form 2 tvrtke Formlabs<sup>47</sup>

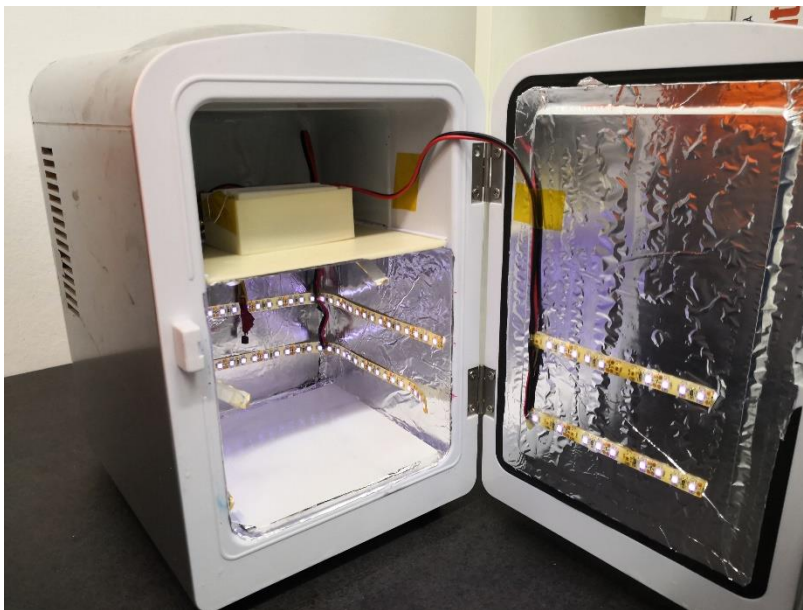


Slika 7. Princip funkcioniranja SLA pisača<sup>22</sup>

Kako je ranije i navedeno, ovaj princip koristi laser kao izvor svjetlosti. Valna duljina ove svjetlosti je 405 nm što spada UV dio spektra svjetlosti. Prije postavljanja predmeta u UV komoru, sav višak smole potrebno je ukloniti ispiranjem predmeta u propan-2-olu (izopropanol).

### 3.2.3. UV komora

Svi predmeti izrađeni na SLA 3D-pisaču dodatno su obrađeni u komori (Slika 8.). Komora je opremljena LED trakom koja emitira svjetlost valne duljine 405 nm i grijačem koji komoru grije na temperaturu od 60 °C. Vrijeme naknadnog očvršćivanja u komori iznosi 60 minuta, prilikom kojih dolazi do umrežavanja slojeva i prema tehničkom listu smole dobivamo optimalna svojstva.

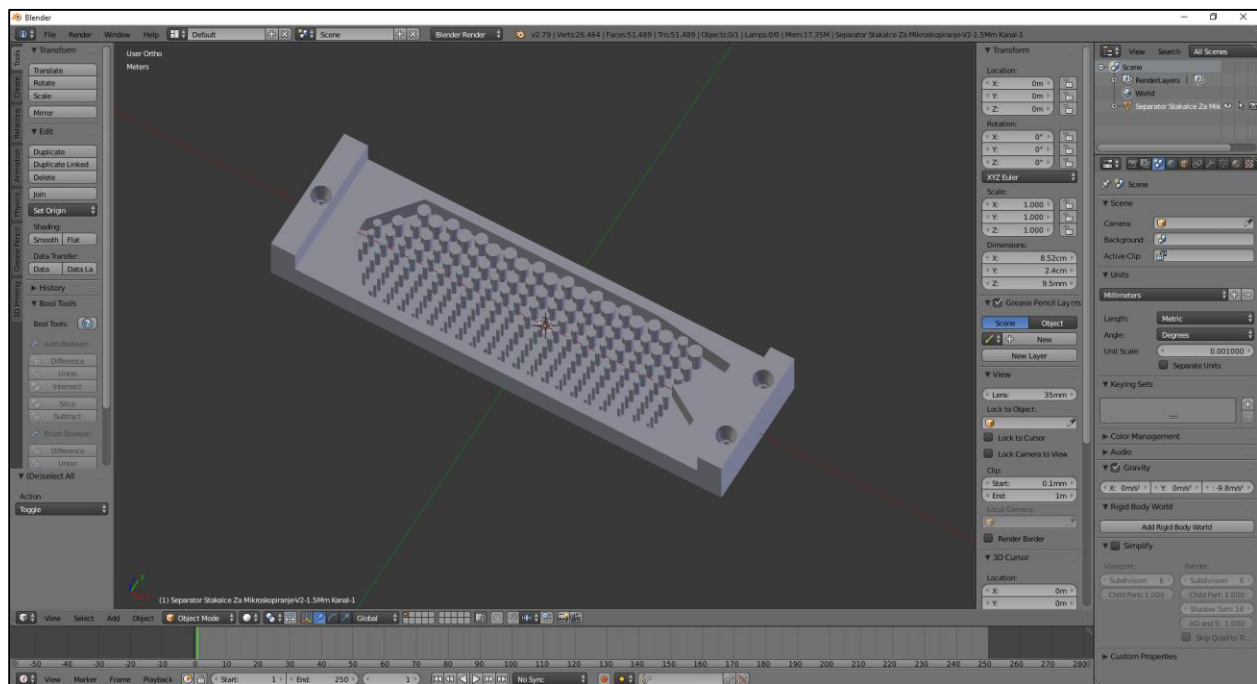


Slika 8. Samostalno izrađena komora opremljena LED trakom koja emitira svjetlost valne duljine 405 nm i grijačem koji komoru grije na temperaturu od 60 °C

### 3.3. Računalni programi

#### 3.3.1. Blender

Za 3D modeliranje predmeta na računalu se koriste CAD (engl. *Computer Aided Design*) programi. Program Blender (Slika 9.) korišten je za modeliranje separatora. Tako modelirani separator sprema se u datoteku STL formata u kojem su sadržane sve informacije o modelu.



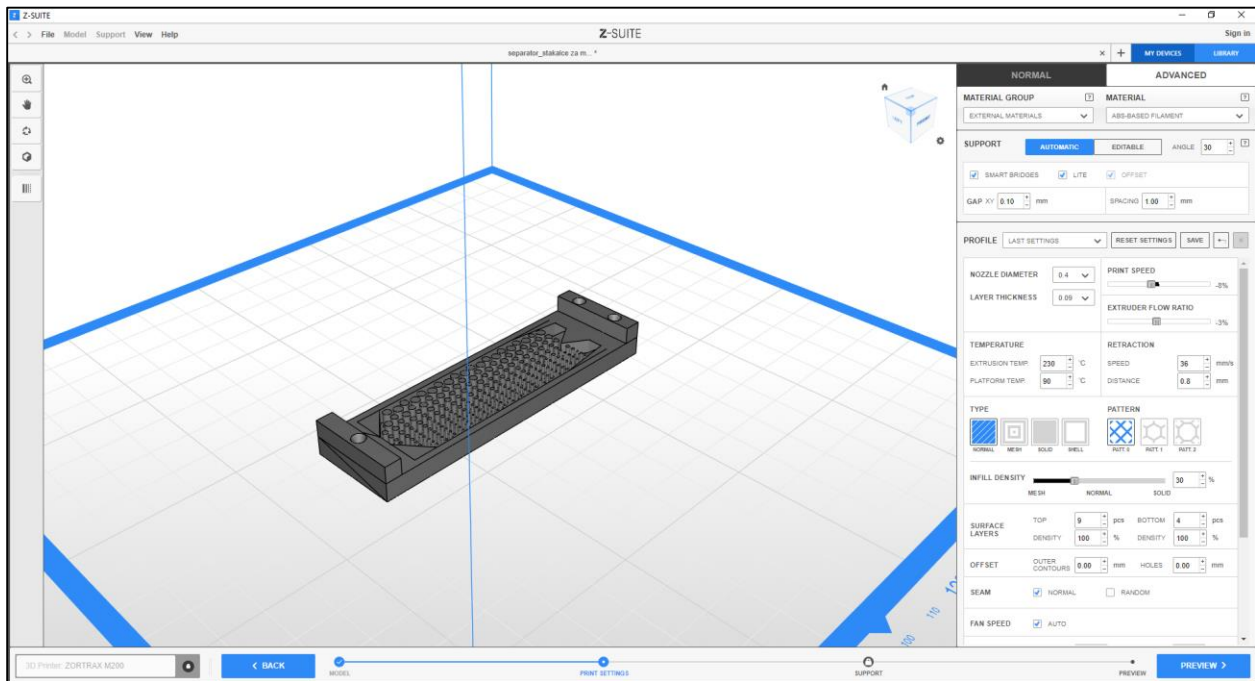
Slika 9. Model separatora u računalnom programu Blender

Ovaj program omogućava određivanje dimenzija cijelog separatora, unutarnjih i vanjskih dijelova. Pomoću ovog programa omogućeno je brzo modeliranje separatora i njegove izmjene ukoliko je to potrebno.



### 3.3.2. Z-SUITE

Z-SUITE (Slika 10.) je računalni program tzv. *slicer*, koji se koristi samo sa Zortraxovim uređajima pomoću kojeg iz STL datoteke dobivamo novu datoteku z-code koja sadrži podatke kako je model podijeljen u horizontalne slojeve, podatke o materijalu, temperaturi ispisa, temperaturi podloge, brzini puhanja ventilatora koji hladi filament, brzinu gibanja ekstrudera s dizom pri ispisu, brzini istiskivanja materijala i ostalim parametrima koji su bitni za 3D-ispis modela.

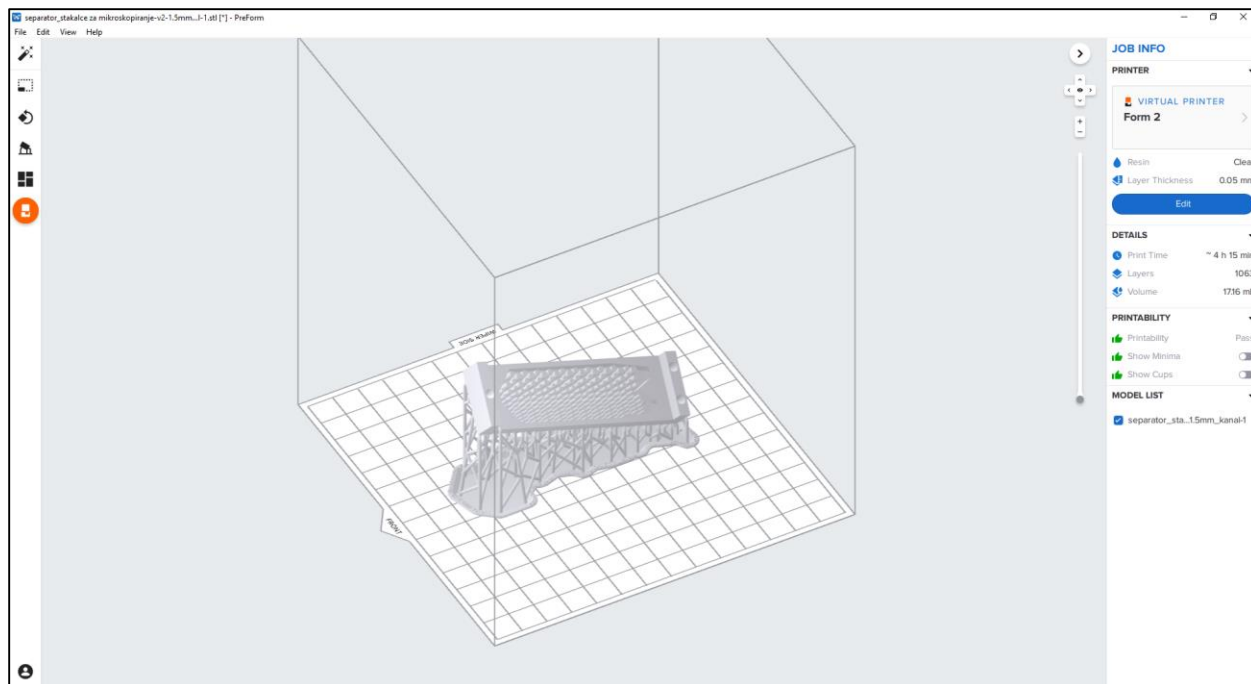


Slika 10. Model separatora u programu Z-SUITE

### 3.3.3. PreForm

PreForm (Slika 11.) je *slicer* koji se koristi sa 3D-pisačem Form 2. S ovim programom također otvaramo STL datoteke kao i sa Z-SUITE-om. Razlika između ovih programa je to što 3D-pisač Form 2 koristi kapljevitu smolu kao materijal za izradu predmeta te su shodno tome podatci koje dobivamo iz ovog programa spremljeni u FORM vrsti datoteke. U toj datoteci se nalaze se podatci o rezoluciji ispisa, gustoći i pozicioniranju potpornih struktura, vrsti smole koja

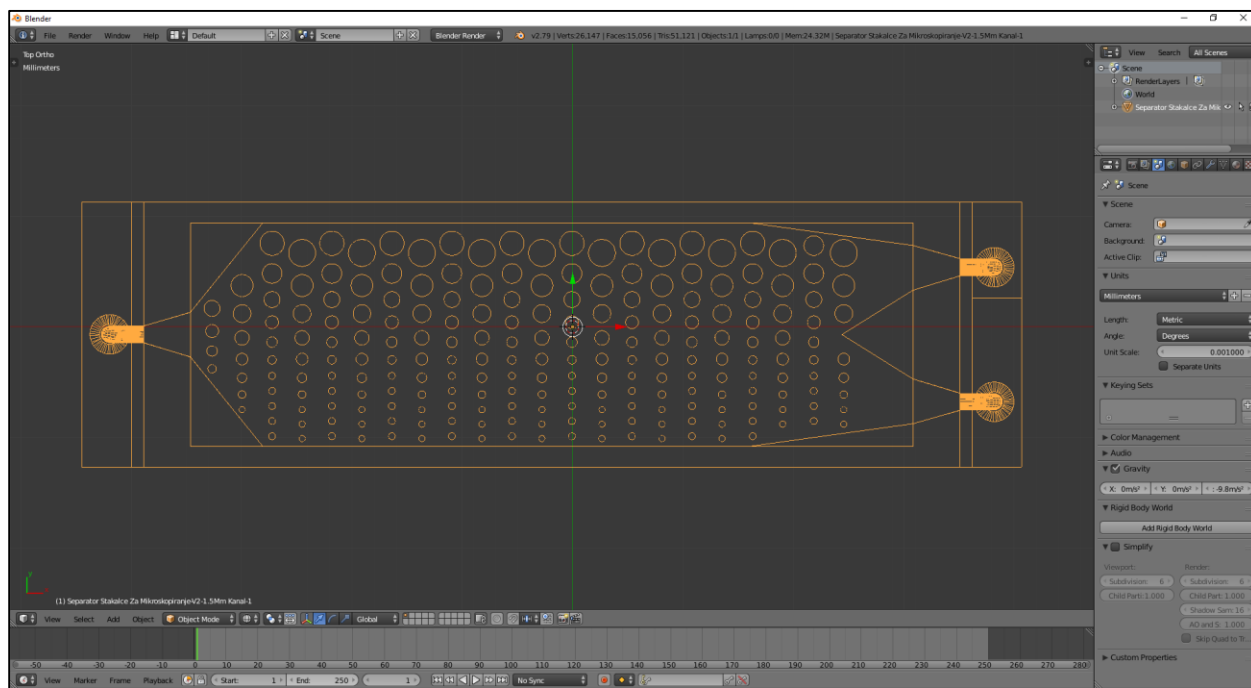
se koristi, broju slojeva i ostalim podacima koji su bitni za 3D-ispis modela na pisaču Form 2 pisaču.



Slika 11. Model separatora u programu PreForm

### 3.4. Separatori

Prilikom dizajna separatora (Slika 12.) u obzir su uzete sljedeće dimenzije: dužina, širina, maksimum 1, maksimum 2, minimum 1, minimum 2, razmak između centara stupova (gledano prema dužini separatora), razmak između oplošja stupova (gledano prema širini separatora), dužina prostora za separaciju, širina prostora za separaciju i volumen separatora. Sve dimenzije su zadane u milimetrima i nalaze se u tablici 3. Ukupna dužina separatora je zadana dimenzijom predmetnog stakalca za mikroskopiranje. Stakalce za mikroskopiranje korišteno je kao poklopac koji je lijepljen ljepilom Norland Optical Adhesive 68 tvrtke Norland. To ljepilo služi za lijepljenje spojeva plastike i stakla.



Slika 12. Izgled stupova u separatoru

Separator je dizajniran tako da u njega ulazi jedna ulazna struja. Promjer kanala koji uvodi ulazni tok u separator promjera je 1,5 mm. Ulazna struja je dvofazni sustav jestivog ulja i vode, gdje je voda obojana zelenim prehrambenim bojilom. Kraj separatora sastoji se od trokuta koji usmjerava tokove prema dva izlaza. Također kao i kod ulaza, promjer kanala kroz koji kapljevine izlaze iz separatora su 1,5 mm.

Tablica 3. Karakteristične dimenzije separatora

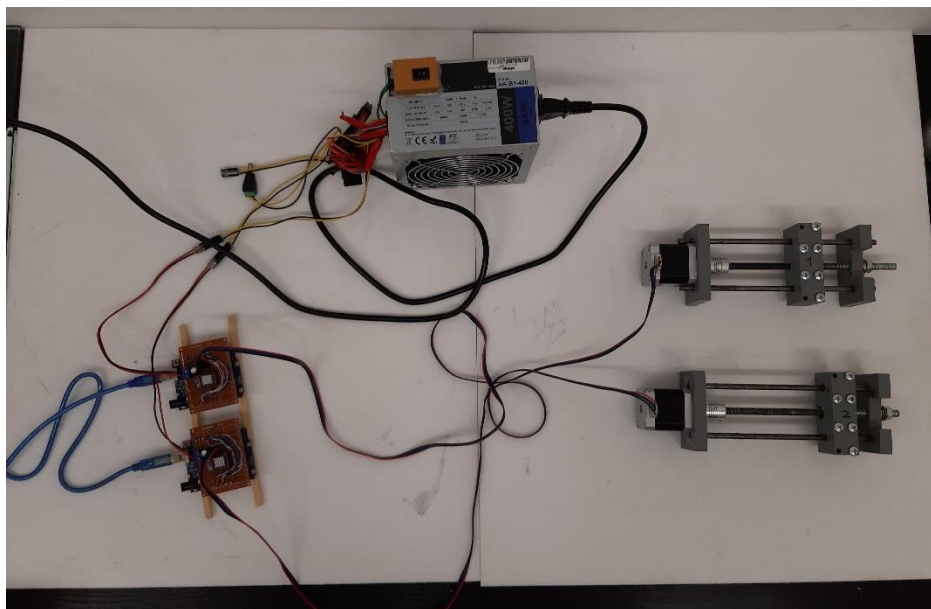
	<b>BLANK</b>	<b>#1</b>	<b>#2</b>	<b>#3</b>	<b>SiO<sub>2</sub>-Teflon</b>
<b>Dužina / mm</b>	85,2	85,2	85,2	85,2	85,2
<b>Širina / mm</b>	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0
<b>Max 1 / mm</b>	-	2,20	2,09	2,31	2,20
<b>Max 2 / mm</b>	-	2,44	2,32	2,56	2,44
<b>Min 1 / mm</b>	-	0,62	0,59	0,65	0,59
<b>Min 2 / mm</b>	-	0,56	0,53	0,59	0,53
<b>Razmak između centara stupova (D) / mm</b>	-	3,35	4,00	3,35	2,85
<b>Razmak između oplošja stupova (Š) / mm</b>	-	0,75	0,75	1,00	1,00
<b>Dužina prostora za separaciju / mm</b>	65,61	65,61	65,61	65,61	65,61
<b>Širina prostora za separaciju / mm</b>	20,62	20,62	20,62	20,62	20,62
<b>Volumen / mL</b>	4,6	3,6	3,6	3,6	3,6

Maksimum 1 je veličina koja se odnosi na promjer najvećeg stupa u prvoj koloni, koloni koja je najbliže ulazu. Minimum 1 je veličina koja se odnosi na promjer najmanjeg stupa u prvoj koloni. Maksimum 2 odnosi se na najveći, a minimum 2 na najmanji stup u drugoj koloni nakon ulaza u separator. Stupovi su postavljeni u redove i stupce i to na način da su gledano kao kolona sva središta stupova na istom pravcu i njihova oplošja su jednako udaljena od prethodnog stupa i sljedećeg stupa, a kada gledamo redove su središta stupova jednako udaljena jedna od drugog na istome pravcu.

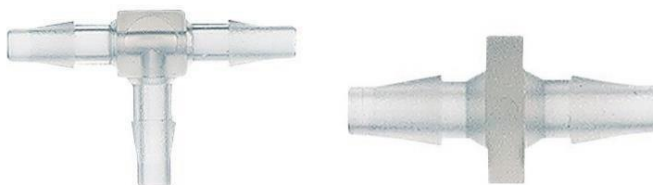
Istraživanjem je predviđeno da će separirana uljna faza zbog jače adhezije prolaziti između stupova većeg oplošja, a vodena faza između stupova manjeg oplošja. Jedan separator, SiO<sub>2</sub>-Teflon, obrađen je plazmom te su stupovi većeg oplošja (do polovice širine separatora), presvučen Teflonu nalik slojem, dok je na stupove manjeg oplošja plazmom nanesen silicijev dioksid (SiO<sub>2</sub>).

Pretpostavljeno je da će  $\text{SiO}_2$  poboljšati hidrofilnost površine poliakrilata, a Teflonski sloj povećati hidrofobnost površine. Obradu plazmom provele su kolege s ParisTecha u svom laboratoriju.

Zbog prirode korištenja sustava ulje i voda separaciju je potrebno provoditi s protokom u kojem nema turbulencija i miješanja da ne bi došlo do stvaranja emulzije. Za rad su korištene samostalno izrađene klipne pumpe kojima se upravljalo preko računala (Slika 13.), dvije šprice u kojima su se nalazili ulje i voda, t-spoj koji je služio kao miješalište navedenih struja (Slika 14.), ravni spoj koji je korišten za spajanje cjevčica s konektorom i dvije graduirane menzure pomoću kojih smo određivali izlazne volumene iz svakog izlaza.



Slika 13. Samostalno izrađene pumpe



Slika 14. Cole-Parmer t-spoj i ravni spoj

U radu su ispitivani separatori navedeni u tablici 3. od kojih je separator „BLANK“ služio da bi se odredilo vrijeme zadržavanja, dok su ostala četiri separatora ispitana u laminarnom režimu strujanja s tri različita omjera protoka (Tablica 4.).

Tablica 4. Ispitivani protoci smjese ulja i vode

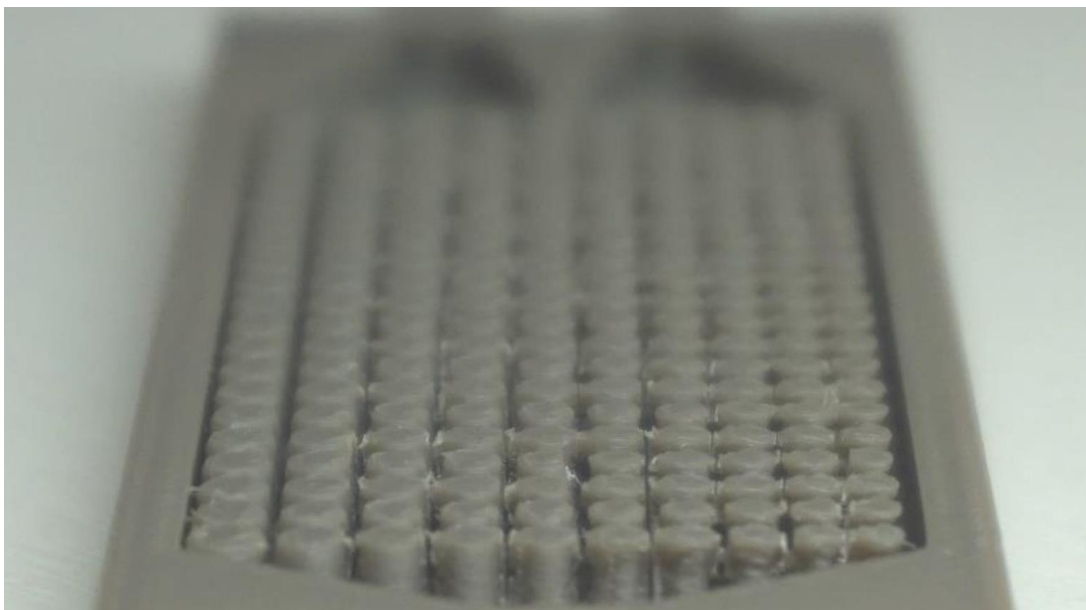
Omjer		Ciljani protoci	
Ulje	Voda	Ulje / mL min <sup>-1</sup>	Voda / mL min <sup>-1</sup>
1 : 1		1000 ± 100	1000 ± 200
2 : 1		1333 ± 100	667 ± 200
1 : 2		667 ± 100	1333 ± 200

Uz utjecaj veličine i rasporeda stupova u separatoru, ispitivana je i separacija sustava s različitim sastavom toka da bi se vidjelo utječe li to na efikasnost separacije. Zbog nemogućnosti zadavanja u potpunosti točnog protoka i zbog različite viskoznosti ulja i vode, protoci nisu bili u potpunosti identičnim omjerima od zadanog nego uz odstupanje.

## 4. REZULTATI I RASPRAVA

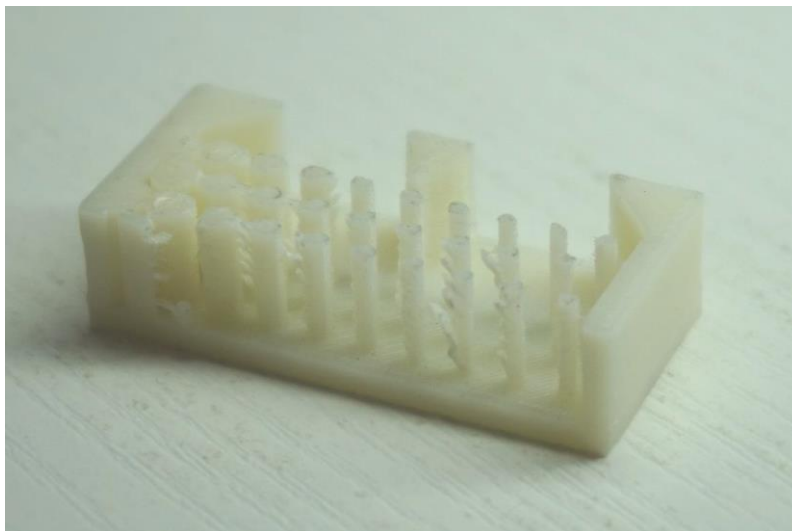
### 4.1. Ispis modela separatora

Separatori koje se pokušalo ispisati na 3D-pisaču M200 tvrtke Zortrax nisu bili uspješno ispisani. Separator izrađen od materijala Z-ABS (Slika 15.) nije bio u potpunosti prohodan jer je došlo spajanja stupova separatora.



Slika 15. Separator ispisan na M200 od materijala Z-ABS

Iz tog razloga isproban je sljedeći materijal Z-Ultrat kako bi se vidjelo može li se ispisati separator od tog materijala. Ispisan segment separatora (Slika 16.) pokazao je da ovaj materijal ne zadovoljava zahtjeve za izradu separatora tj. prilikom izrade ovog segmenta došlo je do raslojavanja stupova.



Slika 16. Segment separatora ispisan na pisaču M200 od materijala Z-Ultrat

Materijal Z-Glass također nije zadovoljio uvjete ispisa jer nije mogao postići dovoljnu preciznost izrade (Slika 17.). Z-SUITE omogućava izmjenu radnih parametara 3D-pisača (temperatura podloge i ispisa, brzina ispisa, brzina istiskivanja materijala) te su ti parametri mijenjani prilikom novih ispisa. Dobiveni separatori nisu zadovoljavali jer stupovi u separatoru nisu bili jednakog promjera i poprečnog presjeka kako je zadano u modelu. Radi nemogućnosti reprodukcije promjera i rasporeda stupova u separatoru 3D pisač M200 više nije razmatran za daljnji ispis separatora.





Slika 17. Separator ispisan na pisaču M200 od materijala Z-Glass

Pisač Form 2 koji koristi SLA tehnologiju da bi izradio predmete uspješno je izradio modele separatora (Slika 18.) te su oni korišteni dalje u eksperimentu.



Slika 18. Separatori ispisani na pisaču Form 2

## 4.2. Efikasnost separacije

Da bi se efikasnost separacije ispisanih separatora mogla usporediti, za svaki separator izračunat će se faktor separacije koji će nam govoriti o učinkovitosti separacije za sva tri slučaja omjera ulaznih protoka ulja i vode. Faktor separacije,  $K_S$ , definiran je volumenom pojedine komponente koji je izašao na izlazu A i B te se računa prema sljedećoj jednadžbi:

$$K_S = \frac{\pm(V(A)_x - V(B)_x)}{V(A)_x + V(B)_x} \quad (1)$$

gdje je  $V(A)_x$  volumen komponente X koji je izašao na izlaz A, a  $V(B)_x$  volumen komponente X koji je izašao na izlaz B. Ukoliko se  $K_S$  računa za ulje, predznak u brojniku će biti pozitivan, dok u slučaju izračuna za vodu predznak postaje negativan. Izlaz A je izlaz koji slijedi nakon stupova većeg oplošja, dok je izlaz B onaj koji slijedi nakon stupova manjeg oplošja.

S obzirom da je istraživanjem predviđeno da će ulje izlaziti kroz izlaz A, a voda kroz izlaz B, ukoliko volumen određene komponente bude više u izlazu koji nije predviđen faktor separacije može imati i negativan iznos. Faktor može biti iznosa od -1 do +1. Za svaki zadani omjer protoka separacija je provedena tri puta. Oznaka 1U:1V označava protok smjese u kojem je  $\frac{1}{2}$  volumena u protoku ulja i  $\frac{1}{2}$  volumena u protoku vode. 2U:1V označava u protok smjese u kojem je  $\frac{2}{3}$  volumena u protoku ulje, a  $\frac{1}{3}$  volumena u protoku voda. Protok 1U:2V je protok smjese u kojem je  $\frac{1}{3}$  volumena protoka ulje, dok je  $\frac{2}{3}$  volumena protoka voda.

#### 4.2.1. Separator #1

Tablica 5. prikazuje rezultate faktora separacije za tri različita protoka te svako pojedino mjerenje od tri mjerenja za svaki protok. Svako provedeno mjerenje trajalo je 120 sekundi.

Tablica 5. Faktor separacije za separator #1

Separator #1	$K_S(\text{ulje})$	$K_S(\text{voda})$	$\bar{K}_S(\text{ulje})$	$\bar{K}_S(\text{voda})$
1. mjerenje (1U:1V)	0,026	0,079	0,116 ± 0,113	0,119 ± 0,041
2. mjerenje(1U:1V)	0,037	0,099		
3. mjerenje(1U:1V)	0,286	0,180		
1. mjerenje (2U:1V)	0,053	0,091	-0,010 ± 0,042	0,235 ± 0,096
2. mjerenje(2U:1V)	-0,059	0,375		
3. mjerenje(2U:1V)	-0,023	0,238		
1. mjerenje (1U:2V)	0,231	0,892	0,424 ± 0,129	0,768 ± 0,158
2. mjerenje(1U:2V)	0,463	0,531		
3. mjerenje(1U:2V)	0,579	0,880		

Na slici 18. vidimo kako tok u separatoru #1 izgleda nakon što se separator ispuni. Na prvoj slici cijevi su spojene konektorima s navojima, no prilikom ušarafljivanja konektora za drugo mjerenje došlo je do pucanja sivih adaptera te se za spajanje dalje u radu morao koristiti nerastavljivi spoj. Razlika u protoku zbog toga nema.



Slika 18. Separator #1(1U:1V) nakon 30 sekundi

Ulaz je na lijevoj strani separatora, a izlazi na desnoj strani. Gornji izlaz je A, a donji B. Vidimo kako se ni u jednom mjerenju u prvih 30 sekundi nije formirao tok ulja i tok vode. Na izlazima još uvijek ne dolazi do jasne separacije i zaostali zračni mjehurići još izlaze.



Slika 19. Separator #1 (1U:1V) nakon 60 sekundi

Na slici 19. vidimo kako nakon 60 sekundi dolazi do koalescencije kapljica faza te one počinju okrupnjavati. Prozirna kapljevina koja se vidi kako protječe kroz stupove većeg oplošja je ulje, a obojana voda. Vidi se da kapljevine ne prate put prema predviđenom izlazu.



Slika 20. Separator #1 (1U:1V) nakon 90 sekundi

Slika 20. prikazuje nam sustav nakon 90 sekundi te se vidi kako u svim mjerenjima dolazi do destabilizacije tokova nakon polovice separatora. Formirani tok nakon polovice separatora ponovno se razbija u veće kapljice.



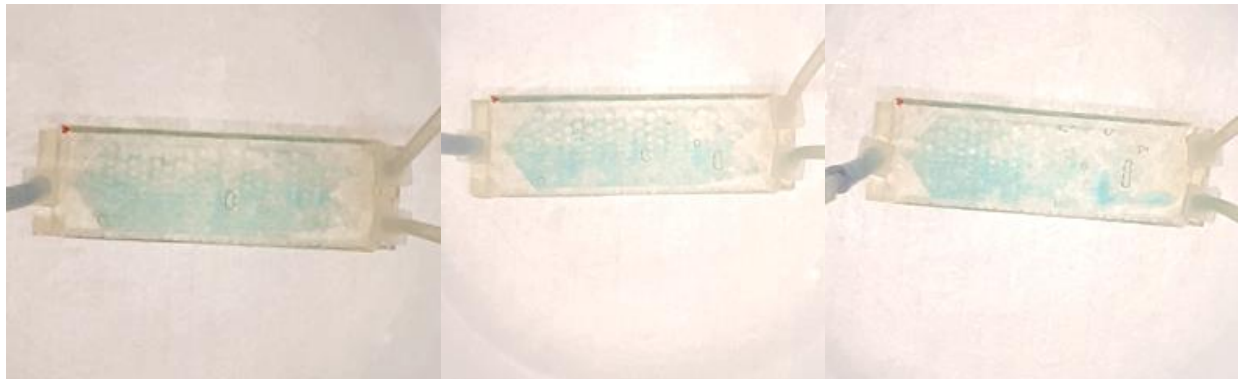
Slika 21. Separator #1 (1U:1V) nakon 120 sekundi

Na kraju separacije u 120 sekundi (Slika 21.) vidi se da tokovi nisu uspješno stabilizirani i da ulje i voda izlaze na oba izlaza. Ne kreću se prema predviđenim putanjama i ne dolazi do dobre separacije faza. Separacija uljne faze iznosila je 11,6 %, a vodene faze 11,9 %.



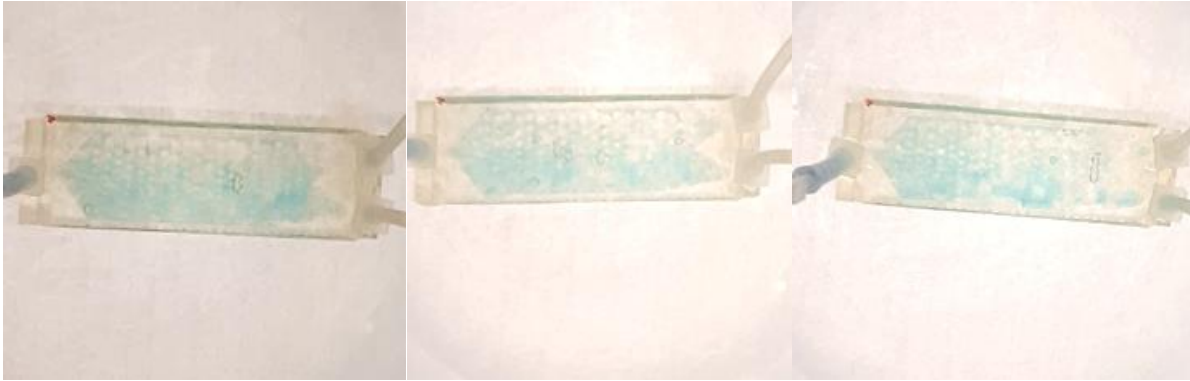
Slika 22. Separator #1 (2U:1V) nakon 30 sekundi

Separator na slici 22. pokazuje kako u sustavu u kojem je  $\frac{2}{3}$  protoka čini ulje, a  $\frac{1}{3}$  protoka voda na početku dolazi do koalescencije dispergirane faze u kontinuiranoj fazi. Obje faze započinju gibanje prema predviđenim izlazima. Ulje djelomično izlazi i na izlaz predviđen za vodu no to se smanjuje.



Slika 23. Separator #1 (2U:1V) nakon 60 sekundi

Na slici 23. vidimo kako se nakon protjecanja dvofaznog sustava kroz separator polako tok stabilizira zbog koalescencije većih kapljica te faze djelomično zadržavaju smjer predviđenim izlazima. U drugom mjerenju vidimo kako se ulje još uvijek giba prema izlazu predviđenom za vodu.



Slika 24. Separator #1 (2U:1V) nakon 90 sekundi

Vidimo kako se u separatoru nakon 90 sekundi (Slika 24.) destabiliziraju tokovi faza koji su dosada nastali. Prije izlaza su vidljive kapljice dispergirane faze i vodena faza počinje izlaziti i na izlaz koji je predviđen samo za ulje, a ulje počinje izlaziti više i na izlaz predviđen za prolazak vode.



Slika 25. Separator #1 (2U:1V) nakon 120 sekundi

Slika 25. prikazuje kako nakon 120 sekundi separacije smjese u kojoj je kontinuirana faza ulje, a dispergirana faza voda dolazi do razbijanja toka skoro u potpunosti te dolazi do segregiranog toka pojedinih aglomerata. Faze još uvijek pokazuju smjer gibanja kako je predviđeno, no na oba izlaza izlaze obje faze. Efikasnost separacije ulja iznosi -1,0 % što znači da je više ulja izašlo na izlaz B. Efikasnost separacije vode je bila 23,5 %.





Slika 26. Separator #1 (1U:2V) nakon 30 sekundi

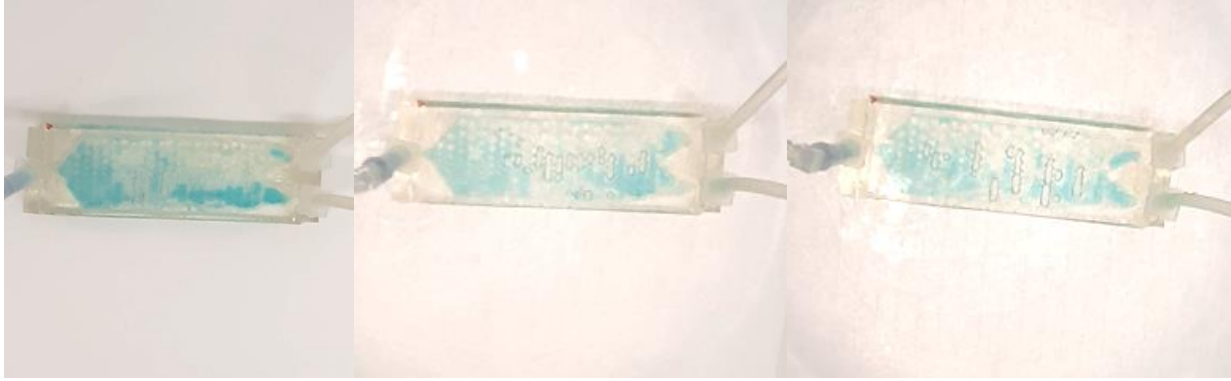
Kod separacije sustava u kojem je dispergirana faza ulje, a kontinuirana faza voda već nakon punjenja separatora tj. nakon 30 sekundi dolazi do koalescencija i okrupnjavanja (Slika 26.). Već na početku faze pokazuju afinitet prema prolasku kroz stupove kako je predviđeno i izlaze na izlaze koji su predviđeni.



Slika 27. Separator #1 (1U:2V) nakon 60 sekundi

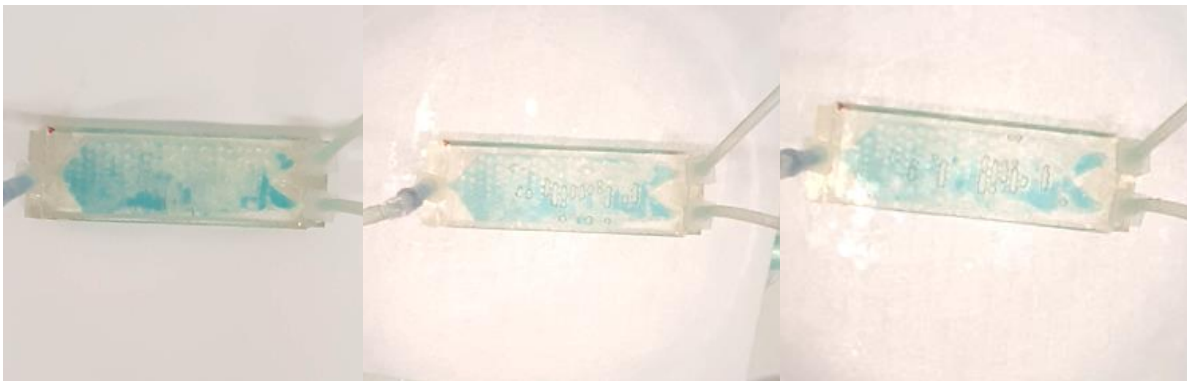
Nakon 60 sekundi u prvom i drugom mjerenju dolazi do usmjeravanja dispergirane faze prema predviđenom izlazu, dok je kod trećeg mjerenja još uvijek dolazilo do malih odstupanja (Slika 27.).





Slika 28. Separator #1 (1U:2V) nakon 90 sekundi

Na slici 28. vidimo da iako vizualno izgleda da faze ne izlaze na predviđene izlaze rezultati iz tablice 5. govore kako je separacija vrlo dobra u ovom separatoru pri uvjetima protoka u kojem je voda kontinuirana faza. Tokovi zadržavaju svoj smjer kao i na prethodne dvije slike.



Slika 29. Separator #1 (1U:2V) nakon 120 sekundi

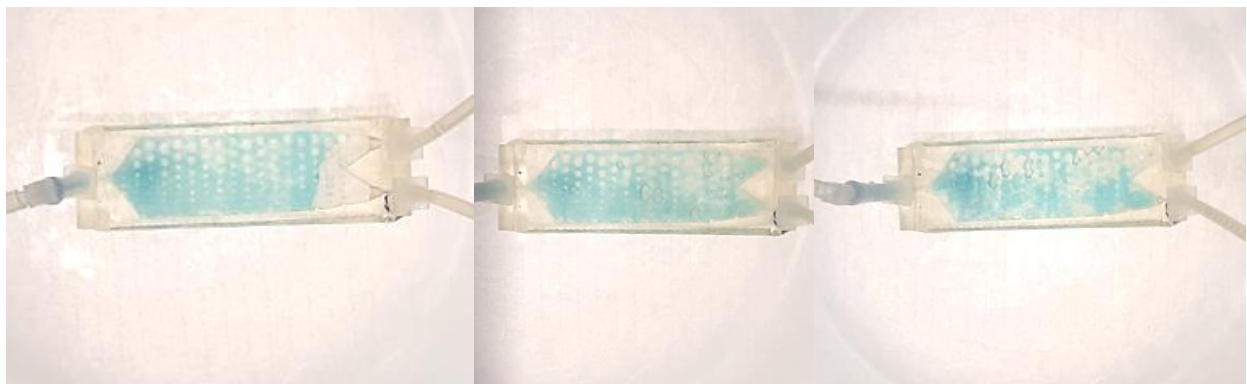
Separator #1 i nakon 120 sekundi s ovakvim omjera protoka ulja i vode zadržava smjer tokova (Slika 29.). Vizualno izgleda kako vodena faza istječe u menzure kroz oba izlaza, no zapravo je nastao aglomerat vode prije izlaza uljne faze koji svoj tok zbog koalescencije s drugim kapljicama vode nastavlja kroz predviđen izlaz i vrlo malo utječe na prolazak uljne faze. Faktor separacije ulja iznosi 42,4 %, a vode 76,8 % što ga čini najboljim za ovaj separator.

#### 4.2.2. Separator #2

Tablica 6. Faktor separacije za separator #2

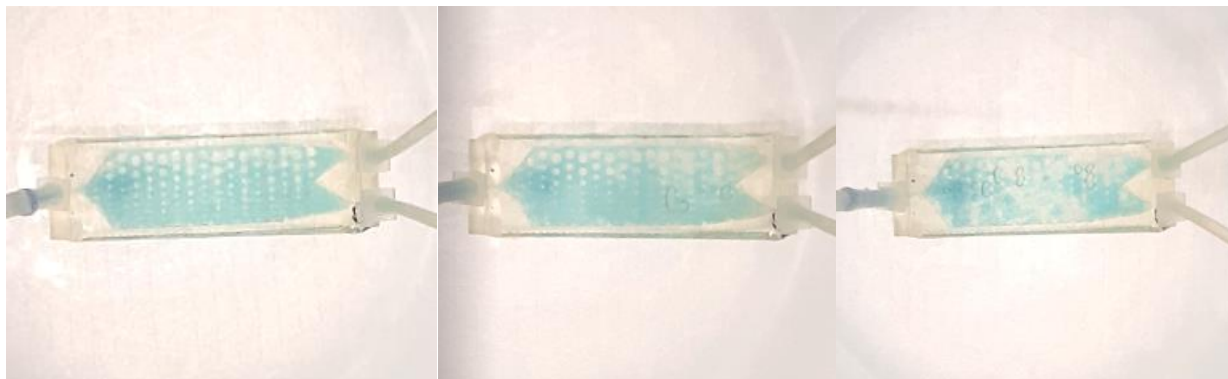
Separator #2	$K_S(\text{ulje})$	$K_S(\text{voda})$	$\overline{K_S}(\text{ulje})$	$\overline{K_S}(\text{voda})$
1. mjerenje (1U:1V)	0,217	0,200	0,096 ± 0,081	-0,007 ± 0,138
2. mjerenje(1U:1V)	0,000	-0,143		
3. mjerenje(1U:1V)	0,071	-0,077		
1. mjerenje (2U:1V)	0,081	0,167	0,126 ± 0,070	0,074 ± 0,124
2. mjerenje(2U:1V)	0,067	-0,111		
3. mjerenje(2U:1V)	0,231	0,167		
1. mjerenje (1U:2V)	0,655	0,979	0,626 ± 0,037	0,979
2. mjerenje(1U:2V)	0,571	0,979		
3. mjerenje(1U:2V)	0,652	0,979		

U tablici 6. vidimo vrijednosti faktora separacije za sva mjerenju u separatoru #2. Svako provedeno mjerenje trajalo je 120 sekundi.



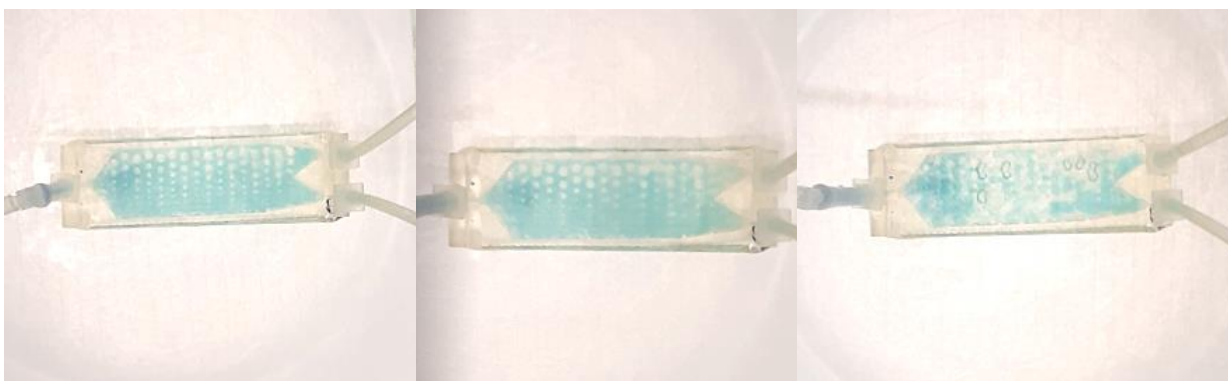
Slika 30. Separator #2 (1U:1V) nakon 30 sekundi

Nakon 30 sekundi u separatoru još ne dolazi do formiranja tokova (Slika 30.). Kapljice koalesciraju i stvaraju veće kapljice te se gibaju prema predviđenim izlazima.



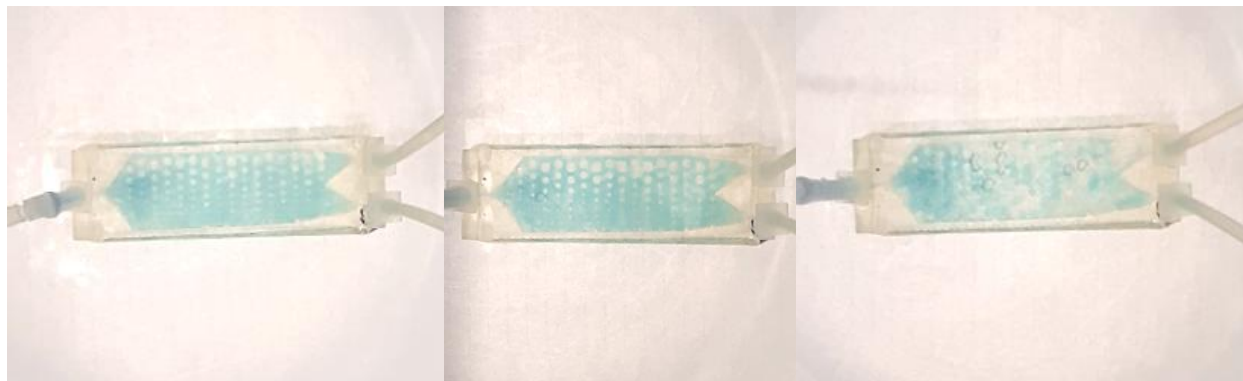
Slika 31. Separator #2 (1U:1V) nakon 60 sekundi

Niti nakon 60 sekundi ne dolazi do stvaranja tokova, kapljice se gibaju kaotično unutar separatora (Slika 31.), afiniteti faza koji su se pokazali u prvih 30 sekundi nestaju. Obje faze izlaze na oba izlaza.



Slika 32. Separator #2 (1U:1V) nakon 90 sekundi

Nakon 90 sekundi u separatoru faze još uvijek izgledaju kao da su izmiješane (Slika 32.), a ne separirane. Jedino se u trećem mjerenju faze separiraju, ali ne formiraju tokove nego aglomerate.



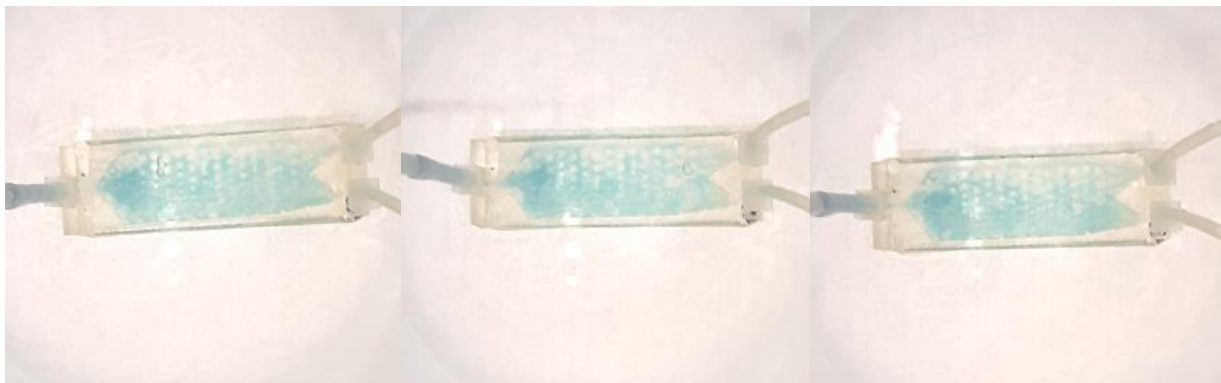
Slika 33. Separator #2 (1U:1V) nakon 120 sekundi

Prilikom zaustavljanja separacije u 120 sekundi, nije došlo do formiranja tokova, obje faze izlaze na oba izlaza i nije uspostavljeno stanje kakvo je predviđeno (Slika 33.). Separacija nije uspješna.



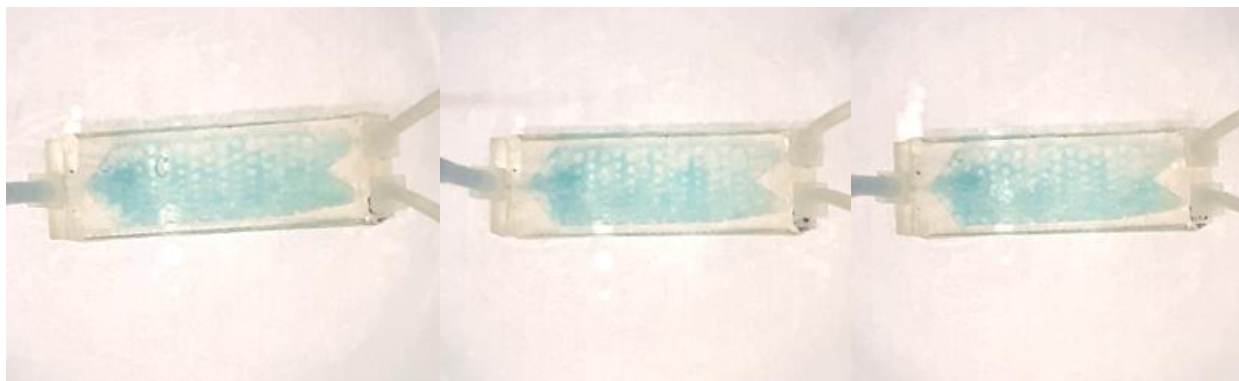
Slika 34. Separator #2 (2U:1V) nakon 30 sekundi

Nakon 30 sekundi punjenja separatora smjesom u kojoj je kontinuirana faza ulje, a dispergirana voda dolazi do koalescencije kapljica (Slika 34.) i kapljice se gibaju prema izlazu.



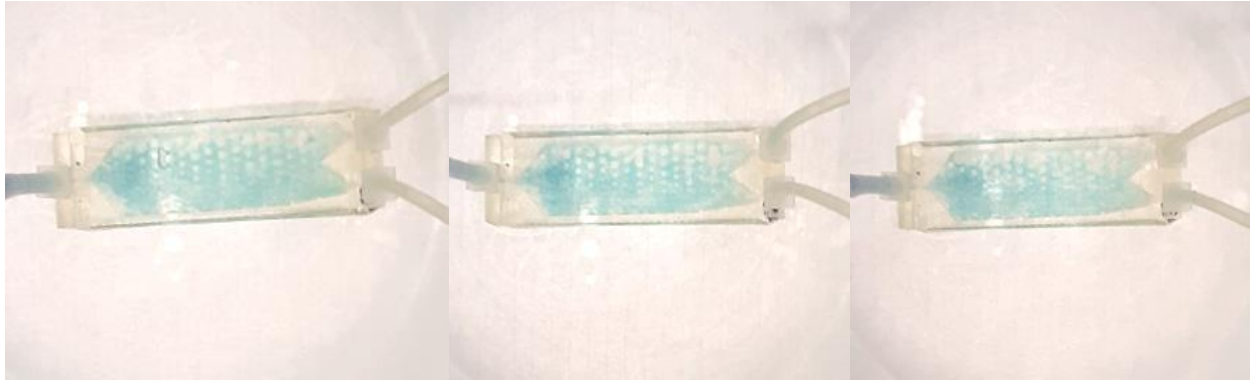
Slika 35. Separator #2 (2U:1V) nakon 60 sekundi

U separatoru nakon 60 sekundi vidimo da se dispergirana faza, voda, giba prema predviđenom izlazu no ne dolazi do formiranja kontinuiranog toka nego se voda giba u obliku kapljica prema izlazu (Slika 35.). Obje faze istječu kroz oba izlaza.



Slika 36. Separator #2 (2U:1V) nakon 90 sekundi

Ni nakon 90 sekundi u separatoru ne dolazi do formiranja toka (Slika 36.), već se kapljice kroz srednji dio gibaju dispergirano prema izlazu. Faze ne izlaze kako je predviđeno, već izlaze podjednako na oba izlaza.



Slika 37. Separator #2 (2U:1V) nakon 120 sekundi

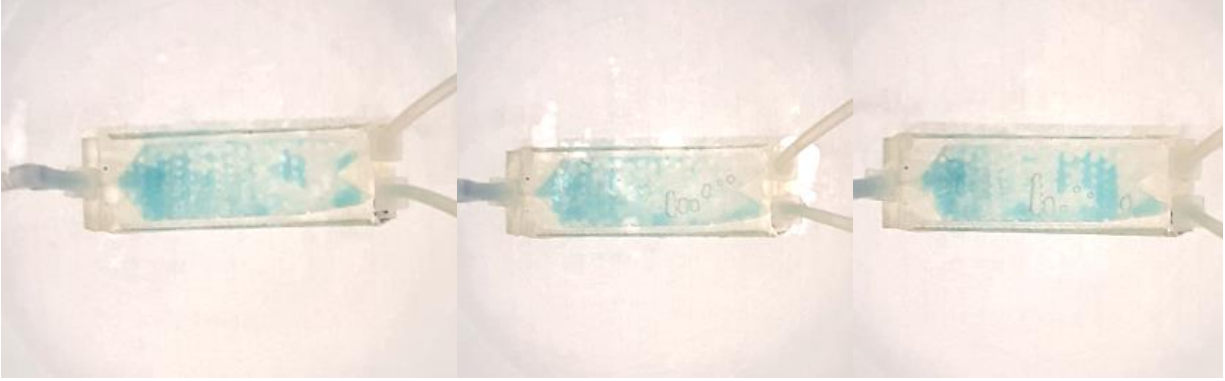
Po isteku 120 sekundi nije došlo do formiranja toka. Kapljice neometano teku prema oba izlaza i koalesciraju pritom tvoreći nešto veće kapljice (Slika 37.). Separator nije ovaj sustav kapljevine uspješno separirao jer faktor separacije ulja iznosi 12,6 %, dok faktor separacije vode iznosi 7,4 % što znači da se volumen pojedine komponente u izlazima razlikuje za mali volumen.



Slika 38. Separator #2 (1U:2V) nakon 30 sekundi

U separatoru #2 već nakon 30 sekundi u drugoj polovici separatora dolazi do formiranja tokova faza (Slika 38.). Razdvaja se sustav u kojem je kontinuirana faza voda, a dispergirana faza ulje. Kapljice već na početku koalesciraju i tvore veće dok ih adhezijska sila dobro usmjerava prema predviđenim izlazima.





Slika 39. Separator #2 (1U:2V) nakon 60 sekundi

Nakon 60 sekundi prilikom separacije ovog sustava, vizualni rezultati nam govore kako je došlo do razbijanja toka koji je nastao u manje kapljice (Slika 39.), no prema dobivenim rezultatima adhezijska sila je dobro usmjeravala komponente prema predviđenim izlazima.



Slika 40. Separator #2 (1U:2V) nakon 90 sekundi

Vizualni rezultati govore da je došlo do potpunog razbijanja toka i da kapljice dispergirane faze putuju prema predviđenom izlazu (Slika 40.). Rezultati dobiveni računanjem s volumenima iz menzura koje se nalaze na izlazima slažu se s tim rezultatima.



Slika 41. Separator #2 (1U:2V) nakon 120 sekundi

Nakon 120 sekundi ponovno se u prvom i trećem mjerenju tok počinje stabilizirati (Slika 41.), što znači da komponente istječu kroz ispravne izlaze. Rezultati faktora separacije za ulje iznose 62,6 %, a za vodu 97,9 % što su vrlo dobri rezultati. Separator #2 se razlikuje od ostalih separatora po veličini stupova (promjer stupova je najmanji) i razmaku između centara stupova (najveći razmak gledano prema dužini separatora), što znači da su kapljevine imale najviše prostora za strujanje.



### 4.2.3. Separator #3

Tablica 7. Faktor separacije za separator #3

Separator #3	$K_S(\text{ulje})$	$K_S(\text{voda})$	$\overline{K_S}(\text{ulje})$	$\overline{K_S}(\text{voda})$
1. mjerenje (1U:1V)	0,000	-0,250	$-0,004 \pm 0,079$	$-0,002 \pm 0,166$
2. mjerenje(1U:1V)	-0,123	0,231		
3. mjerenje(1U:1V)	0,111	0,014		
1. mjerenje (2U:1V)	-0,189	-0,020	$-0,131 \pm 0,039$	$0,025 \pm 0,030$
2. mjerenje(2U:1V)	-0,091	0,048		
3. mjerenje(2U:1V)	-0,114	0,048		
1. mjerenje (1U:2V)	0,636	0,931	$0,529 \pm 0,072$	$0,725 \pm 0,168$
2. mjerenje(1U:2V)	0,451	0,771		
3. mjerenje(1U:2V)	0,500	0,474		

Za provedena tri mjerenja s tri različita sastava smjese dobiveni su rezultati u tablici 7. Sva mjerenja trajala su 120 sekundi.



Slika 42. Separator #3 (1U:1V) nakon 30 sekundi

Na slici 42. vidimo kako u separatoru dolazi do koalescencije i okrupnjavanja kapljica nakon 30 sekundi. U sva tri mjerenja vidi se tendencija faza da izlaze kroz predviđene izlaze.



Slika 43. Separator #3 (1U:1V) nakon 60 sekundi

Nakon što je prošlo 60 sekundi vidi se da adhezijska sila pomalo usmjerava kapljice prema izlazima, no obje faze izlaze kroz oba izlaza te ne dolazi do uspostavljanja kontinuiranog toka jedne faze od ulaza u separator do izlaza predviđenog za tu fazu (Slika 43.).



Slika 44. Separator #3 (1U:1V) nakon 90 sekundi

Na slici 44. vidljivo je da i nakon 90 sekundi od ulaska smjese u separator ne dolazi do formiranja toka nego imamo segregirani tok obje faze koji se kreće prema oba izlaza. Iako je na početku postojala tendencija da će se faze gibati samo prema izlazima koji su prethodno predviđeni, to se nije dogodilo.



Slika 45. Separator #3 (1U:1V) nakon 120 sekundi

Na kraju vremena u kojem je trebalo doći do separacije faza, nije došlo do dobre separacije. Nisu formirani kontinuirani tokovi, nego su se faze gibale kroz separator izmiješane u obliku kapljica (Slika 45.) Veći dio volumena uljne faze iz separatora je izašao kroz izlaz predviđen za vodu. Jednaka stvar dogodila se i vodenoj fazi, više volumena je izašlo kroz otvor predviđen za uljnu fazu. To se prikazuje uz negativan predznak faktora separacije koji za uljnu fazu iznosi 0,4 %, a za vodenu fazu -0,2%.



Slika 46. Separator #3 (2U:1V) nakon 30 sekundi

Separacijom smjese u kojoj je voda dispergirana faza, a ulje kontinuirana faza prilikom punjenja separatora ne dolazi do predviđenog gibanja faza (Slika 46.). Vodena faza je prvo počela izlaziti kroz izlaz predviđen za izlaz uljne faze. Tokovi ne postoje, kapljice vode slabo koalesciraju.



Slika 47. Separator #3 (2U:1V) nakon 60 sekundi

Nakon 60 sekundi, do polovice separatora vodena faza protječe kroz stupove manjeg oplošja, a uljna faza kroz stupove većeg oplošja. Do izlaza tok ovih faza kroz predviđene stupove se mijenja te se gibaju izmiješano bez pravilnosti (Slika 47.).



Slika 48. Separator #3 (2U:1V) nakon 90 sekundi

Na slici 48. vidimo kako se sustav jednako ponaša kao i u 60-oj sekundi, na početku separatora faze se gibaju kako je bilo predviđeno no na kraju je njihov tok nepravilan i izlaze na oba izlaza.



Slika 49. Separator #3 (2U:1V) nakon 120 sekundi

Ni nakon 120 sekundi u separatoru nije formiran tok vodene niti uljne faze. Sustav izgleda jednako kao i na početku separacije, prva trećina separatora usmjerava kapljice kako je i predviđeno, u drugoj trećini separatora vidimo naznake formiranja toka, no u zadnjoj trećini separatora dolazi do nepravilnog gibanja čestica. Faktor separacije iznosi -13,1 % za uljnu i 2,5 % za vodenu fazu.



Slika 50. Separator #3 (1U:2V) nakon 30 sekundi

Na slici 50. vidimo kako već nakon 30 sekundi separacije tj. punjenja separatora dolazi do naznaka formiranih tokova. Uljna faza koja je u ovom sustavu dispergirana faza u prvom i trećem mjerenju giba se prema predviđenom izlazu, dok se u drugom mjerenju vidi kako na oba izlaza vodena faza podjednako izlazi.



Slika 51. Separator #3 (1U:2V) nakon 60 sekundi

Nakon 60 sekundi vidimo kako vodena faza u sva tri mjerenja svoj tok usmjerava kroz stupove manjeg oplošja. Vidljiva je tendencija vode da izlazi samo kroz izlaz B (Slika 51.).





Slika 52. Separator #3 (1U:2V) nakon 90 sekundi

Slika 52. prikazuje kako se adhezijska sila još uvijek usmjerava vodu u predviđenom smjeru. Uljna faza ne pokazuje jasno formiranje toka no većina volumena uljne faze izlazi kroz izlaz A.



Slika 53. Separator #3 (1U:2V) nakon 120 sekundi

U prvom i trećem mjerenju kako je prikazano na slici 53. možemo vidjeti kako su faze zadržale predviđeni smjer i kako je većina vodene faze prošla kroz izlaz B. Uljna faza je u tim slučajevima prolazila kroz izlaz B. Drugo mjerenje je pokazalo malo odstupanje jer je vodene faze nešto više izašlo kroz izlaz A nego u ostala dva navedena mjerenja. Faktor separacije uljne faze iznosi 52,9 %, a vodene faze 72,5 % što su dobri rezultati separacije.

#### 4.2.4. Separator SiO<sub>2</sub>-Teflon

U tablici 8. nalaze se rezultati mjerenja provedeni u separatoru koji je obrađen plazmom. Mjerenja su trajala 120 sekundi. Na stupove većeg oplošja nanesen je teflon, dok je na stupove manjeg oplošja nanesen SiO<sub>2</sub>. Teflon je trebao povećati hidrofobnost većih stupova, a SiO<sub>2</sub> povećati hidrofilnost manjih.

Tablica 8. Faktor separacije za separator SiO<sub>2</sub>-Teflon

Separator SiO <sub>2</sub> -Teflon	$K_S(\text{ulje})$	$K_S(\text{voda})$	$\bar{K}_S(\text{ulje})$	$\bar{K}_S(\text{voda})$
1. mjerenje (1U:1V)	-0,091	-0,059	-0,080 ± 0,015	-0,209 ± 0,261
2. mjerenje(1U:1V)	-0,057	0,032		
3. mjerenje(1U:1V)	-0,091	-0,600		
1. mjerenje (2U:1V)	-0,296	-0,500	-0,224 ± 0,048	-0,558 ± 0,169
2. mjerenje(2U:1V)	-0,220	-0,811		
3. mjerenje(2U:1V)	-0,157	-0,364		
1. mjerenje (1U:2V)	-0,858	0,333	-0,293 ± 0,377	0,439 ± 0,349
2. mjerenje(1U:2V)	-0,111	0,963		
3. mjerenje(1U:2V)	0,091	0,020		





Slika 54. Separator SiO<sub>2</sub>-Teflon (1U:1V) nakon 30 sekundi

Prolaskom 30 sekundi nakon početka punjenja separatora vidimo u prvom mjerenju kako ne dolazi do stvaranja toka, tek se vide okrupnjavanja kapljica u prvoj polovici. Vodena faza ne prolazi kroz domenu stupova većeg oplošja no na kraju dolazi do djelomične inverzije te počinje istjecati kroz oba izlaza. U drugom i trećem mjerenju vidi se kako voda nakon dispergirano g toka na početku stvara neki pseudo tok na kraju i usmjerava se prema izlazu B, no u zadnjem mjerenju dio vode izlazi dodatno i kroz izlaz A (Slika 54.).



Slika 55. Separator SiO<sub>2</sub>-Teflon (1U:1V) nakon 60 sekundi

Na slici 55. vidimo kako nakon prolaska dodatnih 30 sekundi u separatoru dolazi do razbijanja i ovog nastalog pseudo toka. U prvom i drugom mjerenju vidimo kako kapljice vode koalesciraju i stvaraju vidljive veće kapljice. U trećem mjerenju čini se kako nema vodene faze

izuzev na početku, no to nije tako jer nije došlo do koalescencije kapljica i one nisu stvorile veće kapljice.



Slika 56. Separator SiO<sub>2</sub>-Teflon (1U:1V) nakon 90 sekundi

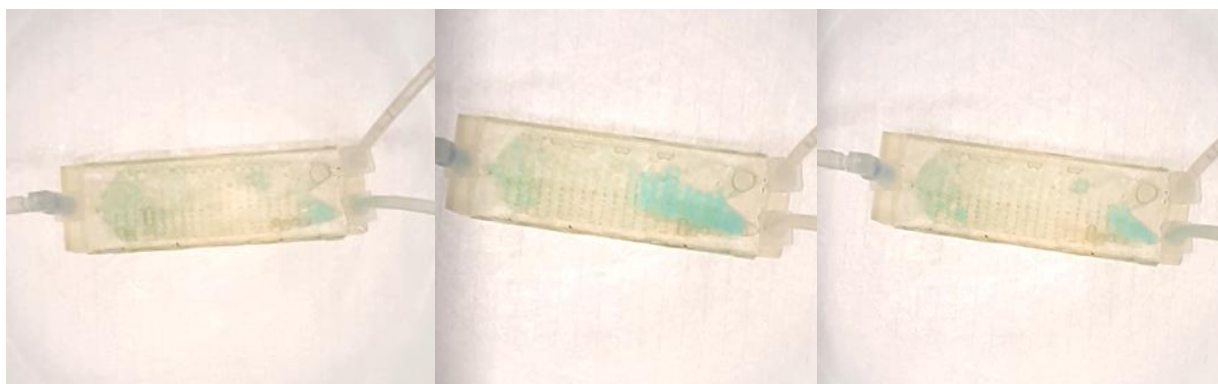
Niti nakon 90 sekundi ne dolazi do formiranja toka. Dolazi do djelomične inverzije kako vodene tako i uljne faze koje nakon prolaska kroz separator u predviđenim domenama kretanja u posljednjem dijelu separatora mijenjaju svoj tok i izlaze iz separatora kroz oba izlaza (Slika 56.).



Slika 57. Separator SiO<sub>2</sub>-Teflon (1U:1V) nakon 120 sekundi

Nakon isteka 120 sekundi protoci faza kroz stupove se ne stabiliziraju i ne dolazi do formiranja kontinuiranog toka od ulaza do izlaza. Obje faze izlazile su cijelo vrijeme na oba izlaza,

čak je veći volumen ukupno gledajući prošao kroz izlaz B za koji se pretpostavilo da će biti samo za vodenu fazu (Slika 57.). Jednako tako vodena faza više je izašla kroz izlaz A te su zbog toga dobiveni negativni iznosi faktora separacije za obje komponente i to -8,0 % za uljnu fazu te -20,9 % za vodenu fazu.



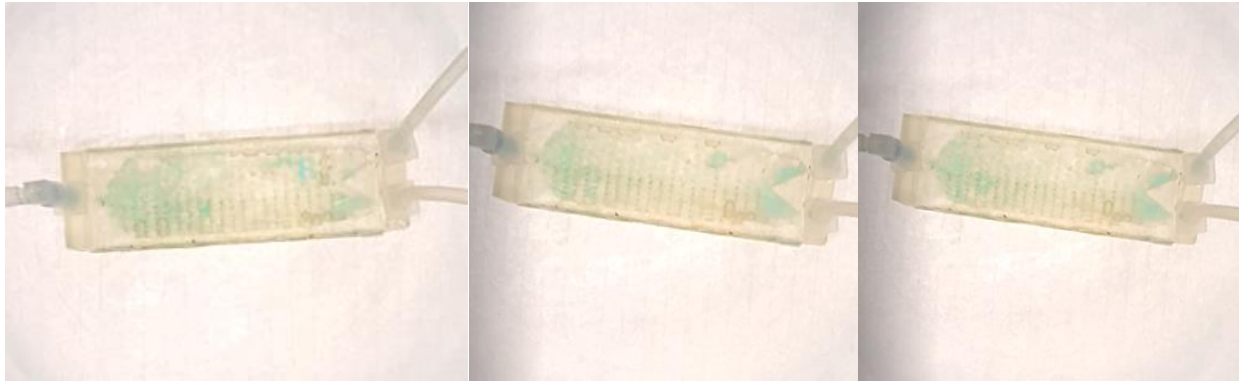
Slika 58. Separator SiO<sub>2</sub>-Teflon (2U:1V) nakon 30 sekundi

Slika 58. prikazuje kako je na početku punjenja separatora došlo do koalescencije dispergirane faze, u ovom slučaju vode, te je veća kapljica nastavila put prema izlazu B koji je bio i predviđen za ovu fazu. Zatim imamo prazninu u separatoru jer se vodena faza više sakupljala na početku zbog koalescencija kapljica i sporije se kretala kroz separator.



Slika 59. Separator SiO<sub>2</sub>-Teflon (2U:1V) nakon 60 sekundi

Na slici 59. vidimo kako se vodena faza još uvijek sporo kreće kroz separator, no vidimo kako se na početku formira tok koji se giba kroz predviđenu domenu stupova i kako dolaskom vodene faze do izlaza, vodena faza izlazi kroz oba izlaza. Kontinuirana faza također izlazi kroz oba izlaza.



Slika 60. Separator SiO<sub>2</sub>-Teflon (2U:1V) nakon 90 sekundi

Vidimo kako u sva tri mjerenja u 90-oj sekundi stanje vrlo slično stanju na prethodnim slikama. Kako je faza došla do izlaza, tako je i izlazni tok ostao isti. Razlike su uočljive u prvoj polovici separatora gdje se u prvom mjerenju vidi nešto više koalescencije kapljica i veći udio vodene faze u početku, dok u ostala dva mjerenja razlika je u početnom dijelu separatora gdje u drugom mjerenju vidimo veći udio većih kapljica što se vidi kao jače obojenje. U trećem mjerenju vodena faza cijelo vrijeme protječe do izlaza u obliku manjih kapljica koje nisu stvorile aglomerat (Slika 60.).



Slika 61. Separator SiO<sub>2</sub>-Teflon (2U:1V) nakon 120 sekundi

Na slici 61. vidimo kako nakon isteka 120 sekundi do stvaranja kontinuiranog toka dispergirane komponente nije došlo. U drugoj polovici separatora u sva tri mjerenja došlo je do djelomične inverzije domena gibanja jer je dispergirana faza, voda, nastavila put kroz domenu stupova većeg oplošja. Izlazi u sva tri slučaja izgledaju vrlo slično međusobno što ukazuje na neku zakonitost takvog ponašanja. Obje faze tekle su kroz oba izlaza što se očituje u faktoru separacije. Faktor separacije iznosi -22,4 % za ulje i -20,9 % za vodu što ovaj sustav u kojem je  $\frac{2}{3}$  volumena u protoku ulje, a  $\frac{1}{3}$  volumena voda čini sustavom s dobivenim najlošijim rezultatima separacije.



Slika 62. Separator SiO<sub>2</sub>-Teflon (1U:2V) nakon 30 sekundi



Slika 62. prikazuje punjenje i početak separacije u tri mjerenja sustava u kojem je voda kontinuirana faza, uljna faza je dispergirana. Vidimo kako se voda giba kako je predviđeno kroz domenu manjih stupova i izlazi na izlaz B.



Slika 63. Separator SiO<sub>2</sub>-Teflon (1U:2V) nakon 60 sekundi

Nakon 60 sekundi dolazi do destabilizacije i razbijanja toka koji je nastao u prvih 30 sekundi. Uljna faza kreće se kroz domenu većih stupova no vodena faza izlazi na oba izlaza (Slika 63.). Nije tako predviđeno no jednako tako dogodilo se u sustavima gdje je voda bila dispergirana faza i gdje smo imali jednake udjele faza u protoku.



Slika 64. Separator SiO<sub>2</sub>-Teflon (1U:2V) nakon 90 sekundi

Na slici 64. vidimo kako u svim mjerenjima na početku dolazi do koalescencije kapljica obje faze i kako se uljna faza giba isključivo kroz domenu većih stupova. Vodena faza iako djelomično protječe kroz domenu većih stupova, više počinje izlaziti i na izlaz A.



Slika 65. Separator SiO<sub>2</sub>-Teflon (1U:2V) nakon 120 sekundi

Slika 65. prikazuje sustav nakon 120 sekundi od početka punjenja separatora. Vidimo kako uljna faza djelomično počinje u drugoj trećini separatora protjecati i kroz domenu manjih stupova, djelomično se vraća na putanju koja je predviđena no veći dio volumena je već izašao je već kroz izlaz B. Ova promjena smjera gibanja ulja očituje se kao najlošiji faktor separacije ulja u svim mjerenjima u iznosu od -29,3 %, dok faktor separacije vode iznosi 43,9 %.

## 5. ZAKLJUČCI

U izradi ovog rada korištene su dvije tehnologije aditivne proizvodnje. Korišten FFF pislač M200 nije mogao reproducirati željene oblike iz CAD modela. Neki materijali su pokazali nedostatke u vidu spajanja dijelova koji nisu trebali biti spojeni, kod nekih je došlo do raslojavanja i na kraju male dimenzije nekih dijelova nisu mogle biti izrađene. Radi toga za ovu upotrebu, ispis separatora, pislač M200 ne može se koristiti.

Form 2 pislač koji koristi SLA tehnologiju ispisa mogao je izraditi separator i sve male dijelove koji su se nalazili u CAD modelu. Iz toga proizlazi zaključak da se ovaj pislač može koristiti u ovu svrhu te da može izraditi i dijelove vrlo malih dimenzija. Također, brzo možemo izmijeniti model i ponovno ga izraditi bez velikog utroška vremena.

Ispitivanje mogućnosti separacije dvofaznog toka ulje-voda u uspješno izrađenim separatorima pokazalo je da separator #2 najbolje separirao smjesu koja se sastojala od duplo više vode nego ulja tj. 2:1 = voda : ulje. Ovaj separator razlikuje se od ostalih jer ima najmanje dimenzije stupova i razmak između njihovih centara je najveći. Dobiveni faktori separacije iznose u tom slučaju 62,6 % za ulje i 97,9 % za vodu. Dobiveni rezultat bio je vrlo sličan u svim mjerenjima jer standardna devijacija srednjih vrijednosti faktora za ulje iznosi 3,7 %, a vode 0,1 %. Iz toga se zaključuje da je ovakav sustav, s ovako izrađenim prototipovima moguće separirati uz dobivanje najboljih rezultata. S druge strane, iznos najlošijeg faktora separacije dobiven je za separaciju sustava 1:2 = voda : ulje u separatoru SiO<sub>2</sub>-Teflon i to -22,4 % faktor separacije ulja te -55,8 % faktor separacije vode. U provedbi eksperimenta, ovaj sustav u kojem je više ulja nego vode pokazao se kao najproblematičniji sustav za separaciju te su za ova mjerenja dobiveni najlošiji rezultati.



## **6. ZAHVALE**

*Zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Domagoju Vrsaljku, mentoru, na ukazanom povjerenju i prilici za rad, savjetima, strpljenju i pomoći prilikom istraživanja i izrade ovog rada.*

*Zahvaljujem i kolegama iz Laboratorija za aditivnu proizvodnju na podršci i motivirajućoj radnoj atmosferi.*

*Posebno hvala Snješki i ostalim članovima obitelji na podršci, razumijevanju, neprestanom motiviranju i vjeri u uspjeh.*

## 7. POPIS LITERATURE

1. Feldman, D., Polymer History, Des. Monomers Polym., Volume 11, 2008, str. 1–15.
2. Thomas, D. J., Claypole, T. C., Printing on Polymers, Elsevier, Volume 18, New York, 2016, str. 293-306.
3. Bikas, H., Stavropoulos, P., Chryssolouris, G., Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 83, 2016, str. 389-405.
4. Šimunić, Ž., Polimeri u graditeljstvu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2006.
5. Hessel, V., Chem. Eng. Technol. 2009, 32, str. 1655–1681.
6. Hrvatska enciklopedija, Broj 9 (Pri-Sk). Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 2004, str. 687.
7. Seader, J.D., Henley, Ernest J., Roper, Keith D., Separation Process Principles \_ Chemical and Biochemical Operations, Third Edition, John Wiley & Sons, Danvers MA, 2010, str. 7-14, 299.
8. Matijašić, G., Jedinične operacije u ekoinženjerstvu (2. dio); Mehaničke operacije, Interna skripta, FKIT, Zagreb, 2016.
9. URL: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=14273> (pristup 10.04.2019.)
10. URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=31763> (pristup 10.04.2019.)
11. Sander, A., Jedinične operacije u ekoinženjerstvu (1. dio); Toplinski separacijski procesi, Interna skripta, FKIT, Zagreb, 2011.
12. URL: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=19949> (pristup 10.04.2019.)
13. Luterotti, S., Uvod u kemijsku analizu, 7. izdanje, FBF, Zagreb, 2014.
14. URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=15100> (pristup 10.04.2019.)
15. Davis, T.A., Electrodialysis, Handbook of Industrial Membrane Technology, M.C. Ported, ed., Noyes Publications, New Jersey, USA, 1990.
16. URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=17608> (pristup 10.04.2019.)
17. URL: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=15048> (pristup 10.04.2019.)
18. Beer, E., Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije, II. prerađeno i dopunjeno izdanje, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb, 1994, str. 631.

19. Šalić, A. Tušek, Ž. Kurtanjek i B. Zelić, "Mikroreaktori", Kemija u industriji, vol.59, br. 5, 2010, str. 227-248.
20. Novak, U., Pohar, A., Plazl, I., Žnidaršič-Plazl, P., Ionic liquid-based aqueous two-phase extraction within a micro channel system, Separation and Purification Technology, Volume 97, Elsevier, New York, 2012., str. 172-178
21. Truszkowska, A. Greaney, P., Jovanović, G., Multiscale lattice Boltzmann modeling of two-phase flow and retention times in micro-patterned fluidic devices, Computers & Chemical Engineering, Volume 95, Elsevier, New York, 2016, str. 249-259
22. Oswald, T.A., Understanding Polymer Processing, 7. Additive Manufacturing, 2nd Edition, Elsevier, 2018.
23. Pine S. H., Organska kemija, Treće dopunjeno izdanje, Školska knjiga, Zagreb, 1994.
24. Janović, Z., Polimerizacije i polimeri, HDKI – Kemija u industriji, Zagreb, 1997.
25. Solomons T.W.G., Fryhle C. B., Organic Chemistry, J. Wiley&Sons, Inc. New York, 8th edition, 10, 2004.
26. Lewis, D., E., Organic chemistry: a modern perspective,. Dubuque, IA: Wm. C. Brown Company Publishers, 1996, str. 947-965.
27. Car, F., Čevič, I., Ispitivanje fizikalno-kemijskih svojstava polimera koji se koriste u 3D tiskanju, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Rektorova nagrada, 2017.
28. Rutkowski, J. V., Levin, B. C., Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymers (ABS): Pyrolysis and Combustion Products and their Toxicity-A Review of the Literature, Fire and Materials, 10, 1986, str. 93-105.
29. URL:[https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile\\_butadiene\\_styrene#/media/File:ABS\\_res\\_in\\_formula.PNG](https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene#/media/File:ABS_res_in_formula.PNG) (pristup 15.04.2019.)
30. Fiket, L., Sušac, K., Priprema naprednih funkcionalnih filamenata za 3D ispis mikroreaktora, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Rektorova nagrada, 2018.
31. Govorčin Bajsić, E., Skripta Polimerne mješavine, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2012.
32. URL: <https://polymerdatabase.com/img2/Nylon.png> (pristup 15.04.2019.)
33. URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=49115> (pristup 15.04.2019.)
34. URL: <https://www.britannica.com/science/polyacrylate> (pristup 15.4.2019.)
35. URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=49113> (pristup 15.4.2019.)

36. URL: <http://polymerdatabase.com/img/polyacrylate.png> (pristup 15.4.19.)
37. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing, 2nd ed., Springer, New York, USA, 2015.
38. Gebhardt, A., Understanding Additive Manufacturing, Hanser Publishers, Munich, 2011.
39. URL: <https://all3dp.com/3d-printing-file-formats/> (pristup 15.4.19.)
40. URL: <https://3dprint.nih.gov/faqs/1781> (pristup 15.4.19.)
41. URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=69979> (pristup 15.4.19.)
42. Kumar, S., Selective laser sintering: A qualitative and objective approach, The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, Vol. 55 (10) 2003, 43-47.
43. URL: <https://www.stratasys.com/polyjet-technology> (pristup 15.4.19.)
44. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Slicer\\_\(3D\\_printing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Slicer_(3D_printing)) (pristup 28.4.19.)
45. URL: <https://cdn-3d.niceshops.com/upload/image/product/large/default/zortrax-m200-1-komad-185369-hr.jpg> (pristup 28.4.19.)
46. URL: <https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2013/08/400px-FFF.png> (pristup 28.4.19.)
47. URL: <https://www.3dhubs.com/s3fs-public/form-2-printer-three-quarters-hart1.jpg> (pristup 28.4.19.)

## 8. SAŽETAK

### Istraživanje i razvoj protočnog separatora izrađenog 3D-ispisom

Ivan Karlo Cingesar

Aditivnom tehnologijom danas možemo izraditi čitav niz proizvoda u vrlo kratkom vremenu. Više nije potrebno unaprijed planirati veliki broj koraka proizvodnje, nego smo u mogućnosti uz poznavanje rada u CAD programima vrlo brzo izraditi i izmijeniti željene predmete. Postoje različite tehnologije aditivne proizvodnje, u ovome radu korištene su proizvodnja rastaljenim filamentom i stereolitografija. Ove tehnologije korištene su da bi se izradio funkcionalni prototip protočnog separatora.

Najčešće korišteni separacijski procesi za razdvajanje dvofaznog sustava kapljevina/kapljevina u industriji su dekantiranje, destilacija i ekstrakcija. U ovome radu izrađen je prototip separatora u kojem se fizikalnim silama separira dvofazna smjesa nemješljivih kapljevina. Fenomeni koji omogućavaju separaciju u uređaju su adhezijska sila i koalescencija. Razmatrani su i izrađeni separatori s različitom raspodjelom i dimenzijama stupova kružnog poprečnog presjeka. Modificiranjem raspodjele i dimenzije stupova utjecalo se na adhezijsku silu i koalescenciju te se tako moglo utjecati na faktor separacije dvofaznog sustava. Upotrijebljena su četiri separatora od kojih je jedan separator obrađen plazmom te su na oplošje stupa nanoseni silicijev dioksid i Teflonski sloj kako bi se modificirala hidrofilitnost odnosno hidrofobnost površine. Tri različita sustava su separirana, ulje : voda = 1 : 1, ulje : voda = 2 : 1 i ulje : voda = 1 : 2. Sustav u kojem je veći volumni protok ulja pokazao se kao sustav u kojem je najteže separirati tok na komponente i dobiveni su najlošiji rezultati, dok je sustav u kojem je veći volumni protok vode u odnosu na ulje pokazao najbolje rezultati separacije u prototipu separatora. Separacijom u separatoru #2 dobiveni su najbolji rezultati. Separiran je sustav u kojem je kontinuirana faza voda, a dispergirana faza ulje te su dobiveni rezultati faktora separacije uljne faze 62,6 % i faktor separacije vodene faze 97,9 %.

**Ključne riječi:** aditivna proizvodnja, stereolitografija, proizvodnja rastaljenim filamentom, protočni separator

## 9. SUMMARY

### Research and development of flow separator manufactured using 3D-printing

Ivan Karlo Cingesar

Using additive manufacturing technology today we can make a lot of products in short period of time. The need to plan the steps of production does not exist anymore, because with the knowledge and ability to use CAD programs we can produce and modify the wanted objects in very short time. Variety of additive manufacturing technologies exist, in this paper fused filament fabrication and stereolithography were used in order to make functional prototype of a flow separator.

The most common separation processes in industry are decanting, distillation and extraction. In this paper, a prototype of flow separator was manufactured in order to separate a two-phase flow of liquids. Phenomena that enable this separation process are adhesion force and coalescence. Separators with the different distribution and dimensions of the pillars were made. The form of a pillar intersection is a circle. By modifying distribution and dimensions of the pillars, we were able to have influence on the adhesion force and coalescence, thus influencing the factor of separation of the two-phase flow. Four separators were used and one of them had its surface modified with silicon dioxide and Teflon coatings using plasma technology in order to modify the hydrophilic and hydrophobic properties of the surface. Three different flow systems were separated, oil : water = 1 : 1, oil : water = 2 : 1 and oil : water = 1 : 2. System with bigger flow of oil was proven to be harder to separate thus the results were the worst for this system and the system in which flow of water was bigger gave the best results of separation in the prototype. Separation conducted in the separator #2 gave the best results. The system in which continuous phase was water and dispersed phase was oil yields the result of the oil phase separation factor of 62,6 % and the water phase separation factor of 97,9 %.

**Keywords:** additive manufacturing, stereolithography, fused filament fabrication, flow separator

## 10. ŽIVOTOPIS

Ivan Karlo Cingesar rođen je 16. srpnja 1992. godine u Zagrebu. Pohađao je osnovnu školu “Kralj Tomislav” u Zagrebu. Nakon završetka osnovne škole upisuje Gornjogradsku gimnaziju. 2011. godine je maturirao. 2015. godine upisuje studij Ekoinženjerstvo na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije. Stručnu studentsku praksu odradio je u Rafineriji nafte Sisak, Ina d.d. U travnju 2018. sudjeluje u provedbi radionice u sklopu STEM discovery weeka: "*Workshop: Introduction to 3D printing*". Završni rad obranio je u lipnju 2018. godine te je iste godine upisao diplomski studij Ekoinženjerstvo na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije. 2019. godine sudjelovao je na prvom Studentskom kongresu o inženjerstvu materijala gdje je osvojio treće mjesto u konkurenciji usmenih studentskih izlaganja.