

# Protočni separator kapljevina/kapljevina

---

Cingesar, Ivan Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:833788>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ivan Karlo Cingesar

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, lipanj 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ivan Karlo Cingesar

# PROTOČNI SEPARATOR KAPLJEVINA/KAPLJEVINA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: izv. prof. dr. sc. Domagoj Vrsaljko

Članovi ispitnog povjerenstva:  
izv. prof. dr. sc. Domagoj Vrsaljko  
doc. dr. sc. Igor Dejanović  
dr. sc. Zvonimir Katančić

Zagreb, lipanj 2018.

Ovaj je rad financirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2014-09-3154.



Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Domagoju Vrsaljku na predloženoj temi, ukazanom povjerenju, odličnoj radnoj atmosferi, stručnim savjetima i prije svega na savjetu da sve ide bolje kad se podmaže. Šprica s uljem je zbilja išla bolje!

Također, zahvaljujem asistentici Mariji Lukić na savjetima i uvodu u svijet funkcioniranja i nefunkcioniranja 3D printera.

Hvala obitelji koja je samnom izdržala svo ovo vrijeme na fakultetu, u dobru i zlu.

Najviše zahvaljujem mojoj Snješki na njejoj podršci, vjeri u mene, uvodu u 3D modeliranje, debelim živicima i pritisku da što prije napišem ovaj rad.

## SAŽETAK

### Protočni separator kapljevina/kapljevina

Cilj ovog rada bio je izraditi prototip protočnog separatora kapljevina/kapljevina, koji separira dvofaznu smjesu kapljevina zbog različitih sila adhezije i različite površinske napetosti, na 3D pisačima, tehnologijom proizvodnje rastaljenim filamentom i stereolitografije. Drugi cilj bio je pokazati mogućnosti vrlo brzog optimiranja prototipa separatora. Prilikom izrade prototipa protočnog separatora kapljevina/kapljevina u obzir su uzeti sljedeći parametri: veličina separatora, razmak između stupova, utjecaj geometrije stupova i veličina stupova. Cilj je bio napraviti rastavljivi spoj prototipa separatora i izvora dvofazne smjese, no korištene su i alternativne metode spajanja.

Za izradu prototipa separatora proizvodnjom rastaljenim filamentom korišten je komercijalno dostupan filament. Tehnologija proizvodnje rastaljenim filamentom nije uspješno izradila prototip separatora ovih dimenzija, jer se prilikom izrade slojevi zbog male veličine ne mogu ohladiti te dolazi do razvlačenja niti filameta i stupovi se spoje. Također, poklopac nije mogao biti izrađen na separatoru jer prilikom istiskivanja slojevi poklopca padaju između stupova na dno separatora.

Korištenjem tehnologije stereolitografije uspješno su izrađeni prototipovi separatora. Stereolitografija je zbog svoje velike preciznosti bila u mogućnosti izraditi sve dijelove prototipa separatora. Prilikom izrade prototipa separatora s poklopcem došlo bi do zadržavanja zaostale poliakrilatne smole koja bi se tijekom naknadnog očvršćivanja, očvrstnula te bi time separator postao nefunkcionalan.

Testirano je šest prototipova separatora kapljevina/kapljevina prilikom kojeg smo dobili šest različitih rezultata separacije dvofaznog toka smjese voda/ulje.

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

## **ABSTRACT**

### **Continuous flow liquid/liquid separator**

Main goal of this study was to make prototype of continuous flow liquid/liquid separator, that separates two phase flow based on the difference between adhesion force and surface tension, on a 3D printer, using fused filament fabrication technology and stereolithography. Second goal was to show how fast a separator prototype can be optimized.

While making a prototype of liquid/liquid separator next parameters were taken into consideration: size of the separator, space between the pillars, geometry of the pillars and size of the pillars. The goal was to make detachable connection between separator prototype and the source of two phase liquid, also, alternative connecting methods were used.

Commercially available filament was used for fused filament fabrication. Because layers of fused polymers were unable to cool in such short time, fused filament fabrication technology was unable to produce a functional separator prototype. Nozzle created thread that connected the pillars. Additionally, the 3D printer was unable to print cover on separator because while printing layers, thread of melted polymer was falling in empty space between the pillars.

Separator prototypes were successfully printed using stereolithography. Because of its high resolution, stereolithographic technology was able to print all the small parts of the separator. When cover was printed on the separator using stereolithography, excess polyacrylic resin was captured in the separator and was later hardened during curing, which makes the separator dysfunctional.

Six liquid/liquid separator prototypes were used in experiments and six different results were obtained, containing six different separation results of two phase water/oil mixture.

**Keywords:** flow separator, additive technology, fused filament fabrication, stereolithography, surface tension

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. TEORIJSKI DIO.....	2
2.1. Separacija.....	2
2.2. Separacija kapljevina/kapljevina.....	2
2.3. Protočni separator kapljevina/kapljevina .....	6
2.4. Adhezija i koalescencija .....	7
2.5. Tehnologije aditivne proizvodnje .....	8
3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	10
3.1. Blender (CAD/3D modeliranje).....	10
3.2. FFF tehnologija ispisa.....	12
3.3. SLA tehnologija ispisa.....	15
3.4. Spajanje i rastavljanje .....	18
3.4.1. Lijepljenje separatora i poklopca .....	18
3.4.2. Spajanje šprice pomoću konektora na separator .....	18
3.5. Dizajn prototipa separatora .....	21
3.5.1. Veličina separatora.....	22
3.5.2. Razmak između stupova .....	23
3.5.3. Utjecaj geometrije stupova.....	23
3.5.4. Promjer stupova .....	24
4. REZULTATI I RASPRAVA .....	25
4.1. Aditivna proizvodnja separatora .....	25
4.2. Strujanje kapljevina i separacija .....	25
4.2.1. Separator v4.0-2.....	26
4.2.2. Separator v4.0-3 .....	27
4.2.3. Separator v5.0-1 .....	29
4.2.4. Separator v5.0-3 .....	32
4.2.5. Separator v6.0-1 .....	34
4.2.6. Separator v6.0-2.....	36
5. ZAKLJUČAK.....	39
6. LITERATURA .....	40
7. ŽIVOTOPIS.....	41



## 1. UVOD

Kao separatori za dvofazne nemješljive sustave u kemijskom inženjerstvu najčešće se koriste dekanteri i ekstraktori. Ovi tipovi procesne opreme koriste se na makro razini.

Tehnologije aditivne proizvodnje, inače poznatije pod nazivom 3D tisak, 3D ispis ili 3D printanje spadaju u proizvodno strojarstvo te se bave izradom predmeta sloj po sloj. Pomoću aditivne tehnologije u mogućnosti smo proizvesti predmete složene geometrije koje konvencionalnim tehnikama (npr. tokarenje) inače nije moguće izraditi.

Četiri najčešće aditivne tehnologije su: stereolitografija (SLA), selektivno lasersko sinteriranje (SLS), proizvodnja rastaljenim filamentom (FFF) i PolyJet postupak (PJM).

Izrada predmeta aditivnom tehnologijom počinje s CAD programom ili programom za 3D modeliranje. Ovi programi sami po sebi nemaju ograničenja, no granice modeliranja postavljene su materijalima koje koristimo u 3D ispisu i samim 3D pisačima.

U ovom radu korištene su dvije tehnologije aditivne proizvodnje, FFF i SLA tehnologija. Pomoću 3D pisača izrađen je prototip protočnog separatora dvofaznog sustava kapljevina/kapljevina koji će zbog različite viskoznosti i površinske napetosti kapljevina u sustavu separirati dvofazni sustav.

Cilj ovog rada jest izrada prototipa protočnog separatora kapljevina/kapljevina i separacija dvofaznog sustava kapljevina/kapljevina koji se sastoji od vodene faze i uljne faze. Također, želi se pokazati i mogućnost izrade više prototipova odjednom, mogućnost vrlo brze izmjene rasporeda stupova unutar separatora tj. mogućnost optimiranja dizajna separatora.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Separacija

U kemijskom inženjerstvu, potpuno ili djelomično razdvajanje smjesa, na temelju njihovih fizikalnih svojstava naziva se separacija.

Separacijski se procesi dijele na mehaničke (dekantiranje, prosijavanje, sedimentacija, filtracija, centrifugiranje, čišćenje plinova), ravnoteže (ekstrakcija, destilacija, sušenje, isparavanje, adsorpcija, kristalizacija, flotacija, ionska izmjena, gel-filtracija) i uvjetovane brzinom prijenosa (plinska difuzija, toplinska difuzija, dijaliza, elektrodijaliza, elektroforeza, reverzna osmoza, molekularna destilacija).

U jednofaznim sustavima čvrsto/čvrsto, mehanički separacijski procesi razdvajaju čestice prema gustoći (sortiranje) i prema veličini čestica (klasiranje). Mehanički procesi u dvofaznim sustavima čvrsto/kapljevito načelno dijelimo na procese u kojima su čvrste čestice relativno pokretljive (npr. gravitacijska sedimentacija) i procese u kojima su čestice ograničene pokretljivosti (npr. vakuum filtracija). Rudarska i kemijska tehnologija najčešće separira pojedine sastojke ruda ili smjesa, npr. metalonosni minerali ili rovni ugljen od jalovine. Takvi procesi najčešće provodimo strujom vode (hidraulična separacija), strujom zraka (pneumatska separacija), djelovanjem magnetskog polja (magnetska separacija), kapljevina kojima je gustoća veća od jednoga, a manja od gustoće drugoga sastojka te prosijavanjem [1].

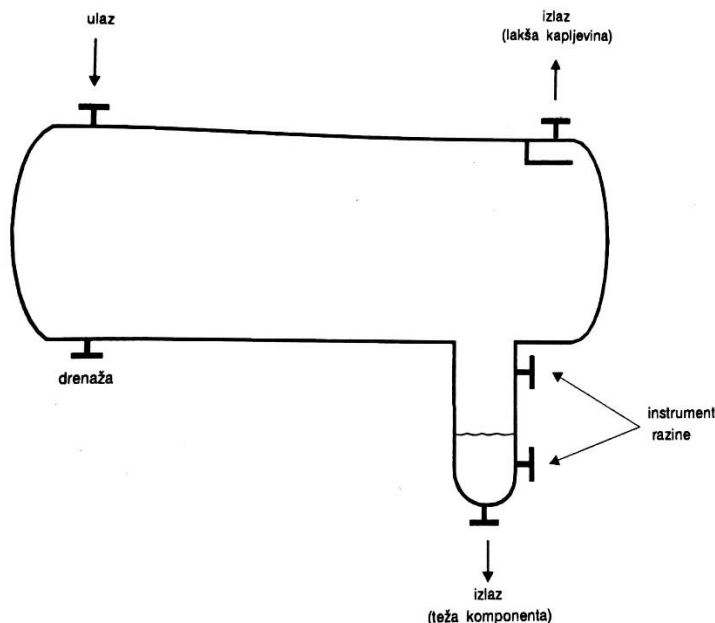
U kemijskom inženjerstvu kao najčešća metoda separacije sustava kapljevina/kapljevina koristi se ekstrakcijska tehnika.

### 2.2. Separacija kapljevina/kapljevina

Metode koje nam služe za razdvajanje dvofaznih sustava kapljevina/kapljevina su: adsorpcija, dekantiranje, destilacija, ekstrakcija i ionska izmjena.

Najčešće primjenjivane metode razdvajanja su destilacija i ekstrakcija. Destilacija je u dosta slučajeva izvedbom vrlo skupa te se za razdvajanje koriste alternativne metode.

Dekanteri su posude koje osiguravaju dovoljno dugo vrijeme zadržavanja da se kapljice dispergirane faze izdvoje iz kontinuirane faze. Separatori se obično izvode za kontinuirani rad, iako se mogu izvesti i za diskontinuirani (šaržni) rad. Najčešći oblik dekantera je cilindrična posuda (slika 1.), uspravna ili vodoravna, u kojoj se razina međufaznog kontakta regulira instrumentima razine ili vanjskim cijevima u obliku sifonskog odvoda teže kapljevine[2].



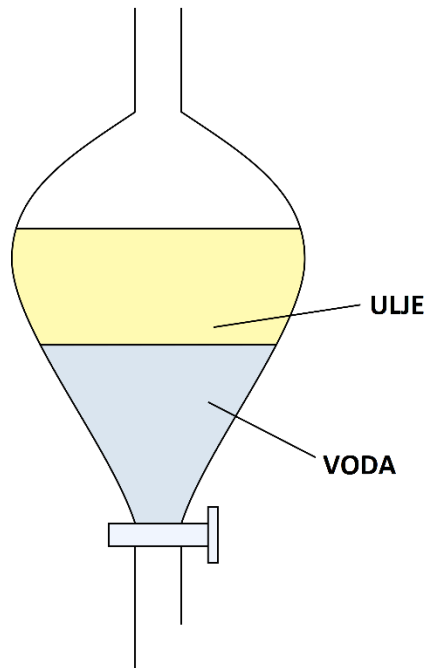
Slika 1. Vodoravni gravitacijski separator (dekanter)[2]

Ekstrakcija je ravnotežno odvajanje jedne sastavnice ili više njih iz krute ili kapljevite smjese (otapalo), s pomoću drugoga otapala (otopina), koje se s otapalom ishodišne smjese ne miješa ili se ograničeno miješa, a ostale sastavnice nisu topljive ili su manje topljive u njemu. Intenzivnim miješanjem ishodišne smjese i drugoga otapala preko što veće razdjelne površine i što dulje vrijeme, te uzastopnim ponavljanjem postupka s manjim količinama drugoga otapala, pospješuje se otapanje i povećava količina ključne sastavnice u otapalu. Ekstrakcijom se ne dobiva čista sastavnica, nego dvije nove smjese, tj. otopina iz koje se sastavnica odvaja (rafinat) i otopina obogaćena sastavnicom koja se odvaja (ekstrakt). Iz njih je lakše izdvojiti ključnu sastavnicu nekim drugim postupkom (npr. rektifikacijom), nego iz ishodišne smjese. Primjenjuje se u laboratorijima (slika 2.) i u industriji (slika 3.), najviše u hidrometalurgiji, nuklearnoj tehnologiji, biotehnologiji, zaštiti okoliša i dr. Provodi se u ekstraktorima te u kolonama s punilima ili

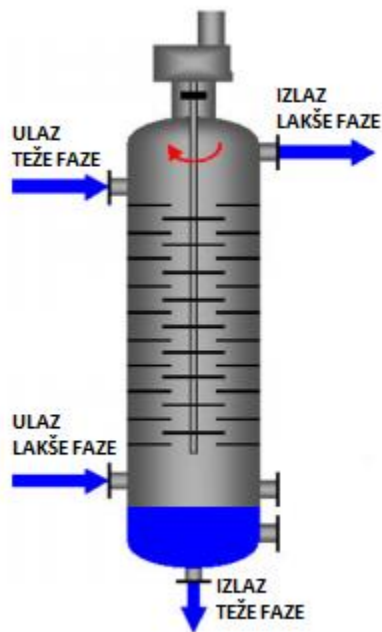
rotacijskim elementima. Postupak može biti kontinuiran ili diskontinuiran, a ovisno o kretanju ishodišne smjese i otapala, istosmjernan ili protusmjernan.

U industriji ekstrakcija ima široku i dugotrajnu primjenu (prvi patent 1908). Osim u hidrometalurgiji, gdje je to glavna tehnološka operacija, primjenjuje se u nuklearnoj tehnologiji (reprocesiranje nuklearnoga goriva), biotehnologiji (npr. ekstrakcija bjelančevina, ekstraktivna kultivacija mikroorganizama), zaštiti okoliša (npr. uklanjanje teških metala iz industrijskih otpadnih voda) i dr. Za industrijsku primjenu razvijen je niz postupaka, koji se mogu podijeliti na prekidane (šaržne, diskontinuirane) i neprekidane (kontinuirane), na jednostupanjske i višestupanjske, na križne (u svakom stupnju svježe otapalo dolazi u dodir s vodenom fazom koja se iscrpljuje) i protustrujne (najobogaćenija organska faza dolazi u dodir s neiscrpljenom otopinom i obratno). Za industrijsku ekstrakciju upotrebljavaju se dva temeljna tipa uređaja: kaskadni i diferencijalnokontaktne ekstraktor. U kaskadnom ekstraktoru zona miješanja, opremljena miješalom, odvojena je od zone odjeljivanja faza. U svakom paru jedinica za miješanje i odjeljivanje faza odvija se jedan stupanj ekstrakcije, i to ravnotežni stupanj ako su ispunjeni potrebni uvjeti. Jedinice mogu biti u obliku kolone (tornja) ili međusobno povezanih komora ili posuda (tzv. ekstraktor mješač/taložnik). Broj jedinica i način njihova povezivanja ovisi o vrsti procesa. Ekstraktor mješač/taložnik primjenjuje se osobito u hidrometalurgiji, npr. za ekstrakciju bakra, nikla i kobalta. Prema načinu raspršivanja disperzne faze (najčešće lakše organsko otapalo) u kontinuiranoj fazi (najčešće vodena otopina ili teže otapalo), kolone stepenastoga tipa mogu biti s perforiranim tavanima, mehanički miješane sa slojevima punila i dr. Diferencijalno-kontaktne ekstraktor najčešće je kolonskoga tipa, a može biti s pregradama, s punilima, rotacijski (s miješalima ili diskovima), pulzirajući i dr. Upotrebljava se kada jedinice trebaju biti manjeg volumena, a potreban je velik broj stupnjeva ekstrakcije (npr. u nuklearnoj tehnologiji).

Noviji su postupci u ekstrakciji otapalima superkrična ekstrakcija (superkrični ugljikov dioksid kao otapalo), koja ima posebnu primjenu u prehrambenoj tehnologiji (npr. u separaciji sastojaka prirodnih ulja), te ekstrakcija uz primjenu kapljevitih membrana (npr. uklanjanje teških metala iz industrijskih otpadnih voda) [3].



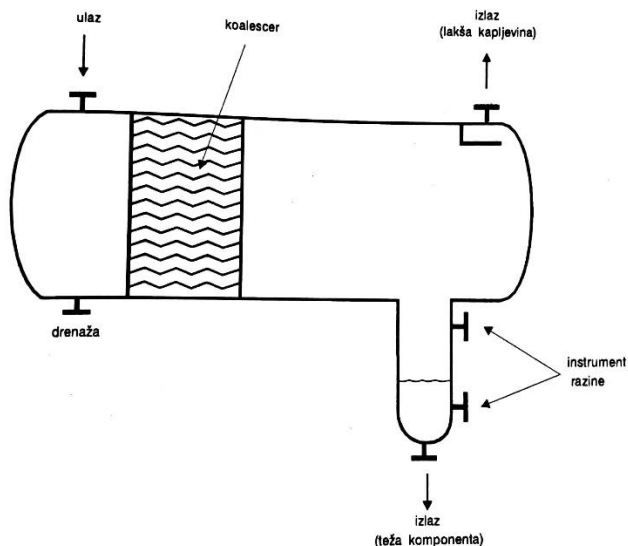
Slika 2. Ljevak za ekstrakciju



Slika 3. Ekstrakcijska kolona [4]

Odvajanje smjese dvofaznog sustava kapljevina/kapljevina može se ubrzati smanjenjem puta koji kapljice dispergirane kapljevine trebaju proći ili stvaranjem kapljica većeg promjera. Oba ta efekta postižu se ugradnjom koalescera u separator (slika 4.). Koalesceri mogu biti različitih konstrukcija: paralelne ravne ili valovite ploče, pletivo od žičanih ili plastičnih mrežica, sloj

vlakana i sl. Prolazom kroz koalescer fino dispergirane kapljice udaraju o površinu koalescera i međusobno se spajaju u veće kapljice koje se nakon izlaza iz koalescera puno brže izdvajaju iz kontinuirane faze [2].



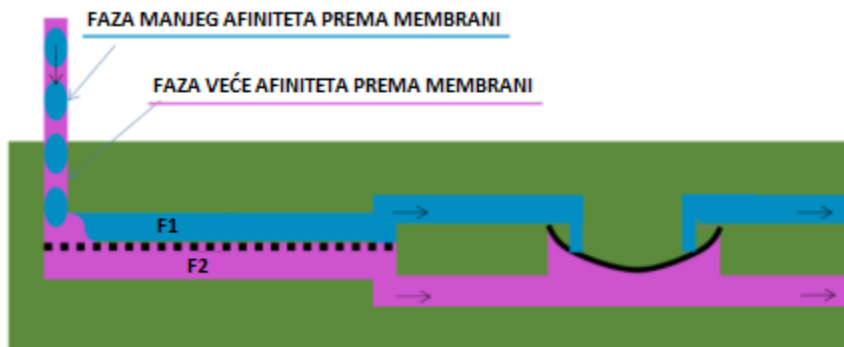
Slika 4. Vodoravni gravitacijski separator (dekanter) s koalescerom [2]

### 2.3. Protočni separator kapljevin/kapljevin

Kao protočni separator najčešće se koriste ekstrakcijske kolone. Protočne ekstrakcijske kolone mogu biti različitih izvedbi: s pliticama, s raspršivanjem, s punilima, s rotirajućim diskovima, s rotirajućim miješalima i pulzirajuće kolone [4].

U znanosti su početkom 2000-ih počela istraživanja protočnih separatora sa preprekama i polupropusnim membranama. Prepreke omogućavaju usporavanje toka da bi došlo do razdvajanja i omogućavaju pojave adhezijskih sila i koalescencije. Polupropusne membrane omogućavaju razdvajanje dvofaznog sustava kapljevin/kapljevin na temelju različitih kapilarnih sila i selektivne propusnosti kroz membranu (slika 5.). Kada dvofazni tok uđe u separator, jedna faza će imati veći afinitet tj. jače će biti privlačenje prema membrani te će ta faza ispuniti pore i nastaviti svoj tok s donje strane membrane, a druga faza će biti “odbijena” od

membrane i nastaviti će svoj tok s gornje strane membrane. Kod membranskih separatora postoji čitav niz membrana npr. različite veličine pora, je li membrana hidrofilna ili hidrofobna i sl.



Slika 5. Membranski separator (patent u vlasništvu tvrtke Zaiput Flow Technologies)

Protočni separatori sa preprekama su tek nedavno počeli više biti istraživani. Kod ovih vrsta separatora do razdvajanja faza dolazi zbog različite jačine adhezijskih sila dvaju kapljevina unutar dvofaznog sustava kapljevina/kapljevina. Kapljevine koje imaju veću površinsku napetost pokazale su veći afinitet prema preprekama veće specifične površine, dok kapljevine manje površinske napetosti svoj tok nastavljaju između prepreka manje specifične površine. Također, gibanje pojedine faze ovisi o polarnosti kapljevine i polarnosti materijala od kojeg je izrađen separator i prepreka. Polarni materijali će imati bolju adheziju s polarnim kapljevinama, a nepolarni s nepolarnim kapljevinama.

## 2.4. Adhezija i koalescencija

Fizikalno-kemijsko svojstvo adhezije i koalescencija, dvije su fizikalno-kemijske pojave koje nam omogućavaju separaciju. Adhezija je pojava koja se događa između čestica kapljevine i stijenke separatora ili prepreke prilikom koje se čestice kapljevine elektrostatski vežu na čvrste stijenke, a koalescencija se događa prilikom sudara tokova tj. sudarom dvije istovrsne čestice (u ovom slučaju kapljice) dolazi do nastanka jedne veće čestice (kapljice). Velike kapljice nastaju zbog pojave kohezivnih sila između istovrsnih kapljica. Adhezija nam pomaže u usmjeravanju tokova tj. omogućava nam razdvajanje tokova u protočnom separatoru s preprekama. Kao što je i

ranije navedeno, kapljevina koja ima veću viskoznost kretanje nastavlja između prepreka većeg oplošja, kapljice te kapljevine koalesciraju te polako formiraju tok.

## 2.5. Tehnologije aditivne proizvodnje

Aditivna proizvodnja (popularnog naziva “3D printanje”) je naziv za skup tehnologija koje nam služe da trodimenzionalni model izrađen pomoću CAD (engl. *Computer Aided Design*, računalno potpomognuti dizajn) programa proizvedu u relativno kratkom vremenu bez potrebe za planiranjem čitavog procesa proizvodnje. Ono što čini aditivne tehnologije proizvodnje zanimljivima u modernom svijetu jest činjenica da se 3D objekti kompleksne strukture mogu vrlo jednostavno izraditi direktno iz CAD programa, pri čemu je potrebno poznavati elementarne dimenzije željenog proizvoda i osnovno znanje o radu uređaja te potrebnim materijalima. S druge strane, konvencionalne proizvodne tehnologije zahtijevaju pažljivu i detaljnu analizu geometrije proizvoda da bi se primjerice odredilo kojim redom proizvesti pojedine dijelove, koje alate i procese pritom koristiti te koju opremu koristiti za dodatnu obradu dijelova konačnog proizvoda [5].

Zajedničko svojstvo svih aditivnih tehnologija je izgradnja trodimenzionalnih objekta koji se sastoje od mnogo slojeva (uglavnom) jednake debljine. Svaki je sloj oblikovan prema računalnom modelu i postavlja se na vrh prethodnog sloja. Budući da su svi slojevi jednake debljine, kao rezultat dobiva se objekt stepenastog oblika. [6].

Danas postoji mnogo tehnologija koje se ubrajaju u aditivne, a četiri najčešće su: stereolitografija (SLA), selektivno lasersko sinteriranje (SLS), proizvodnja rastaljenim filamentom (FFF) i PolyJet postupak (PJM) [7].

Kad se 3D model izradi u CAD programu, prebacuje se u STL (engl. Standard Tessellation Language) format koji se zatim učitava u računalni softver tzv. *slicer* program. *Slicer* rastavlja model u slojeve te ga na taj način priprema za izradu na 3D pisaču. Iz *slicera* se dobiva datoteka koja daje upute pisaču u kojem smjeru mora pomicati mlaznicu/laser pri proizvodnji pojedinačnih slojeva i daje podatak koja je debljina sloja, temperatura mlaznice (u slučaju FFF



tehnologije), temperature podloge (u slučaju FFF tehnologije), koja je brzina proizvodnje, koliko dugo treba biti usmjeren laser (u slučaju SLA tehnologije) te ostale parametre.

## 3. EKSPERIMENTALNI DIO

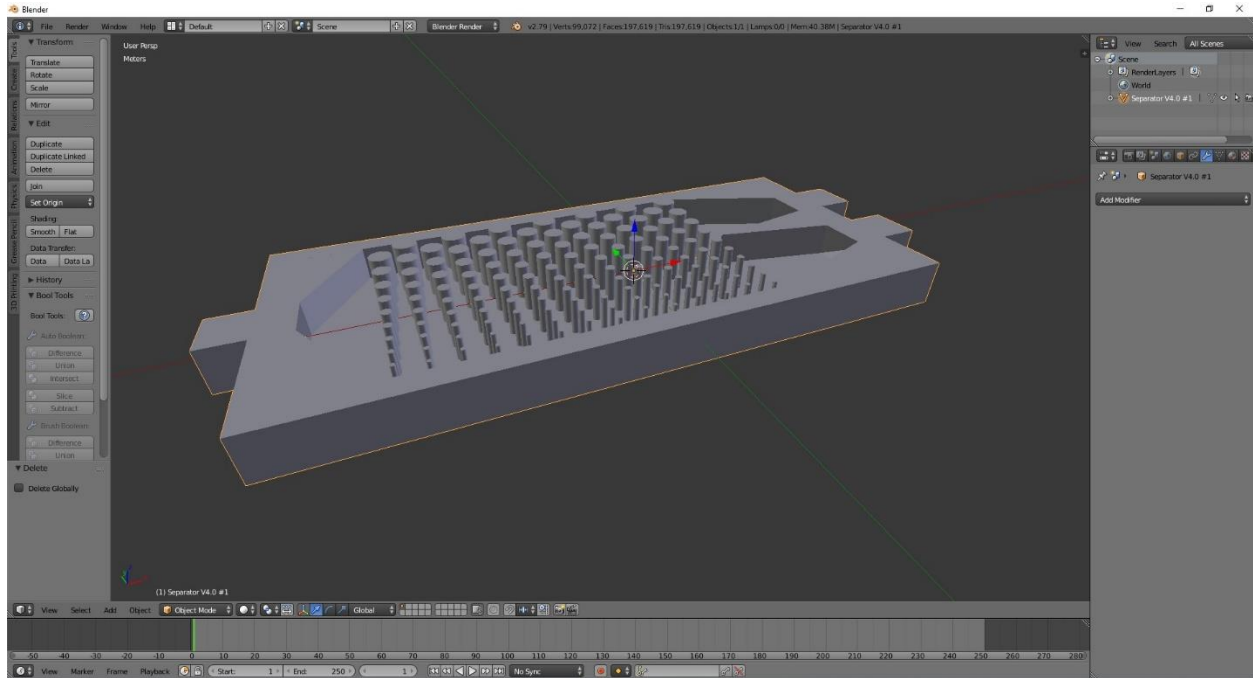
### 3.1. Blender (CAD/3D modeliranje)

Sredinom 1960-ih došlo je do razvoja CAD programa, ti sustavi više nisu bili samo u mogućnosti kopirati tehničke crteže već i više od toga. Njihova prednost bila je automatsko stvaranje tehničke dokumentacije, stvaranje skica integriranih krugova i dr. Na početku su se matematički proračuni radili ručno no ubrzo se pojavila mogućnost provođenja proračuna u CAD programima. CAD programi započeli su revoluciju u proizvodnji. CAD programi su još jedan pokazatelj kakav utjecaj su računala imala na industriju.

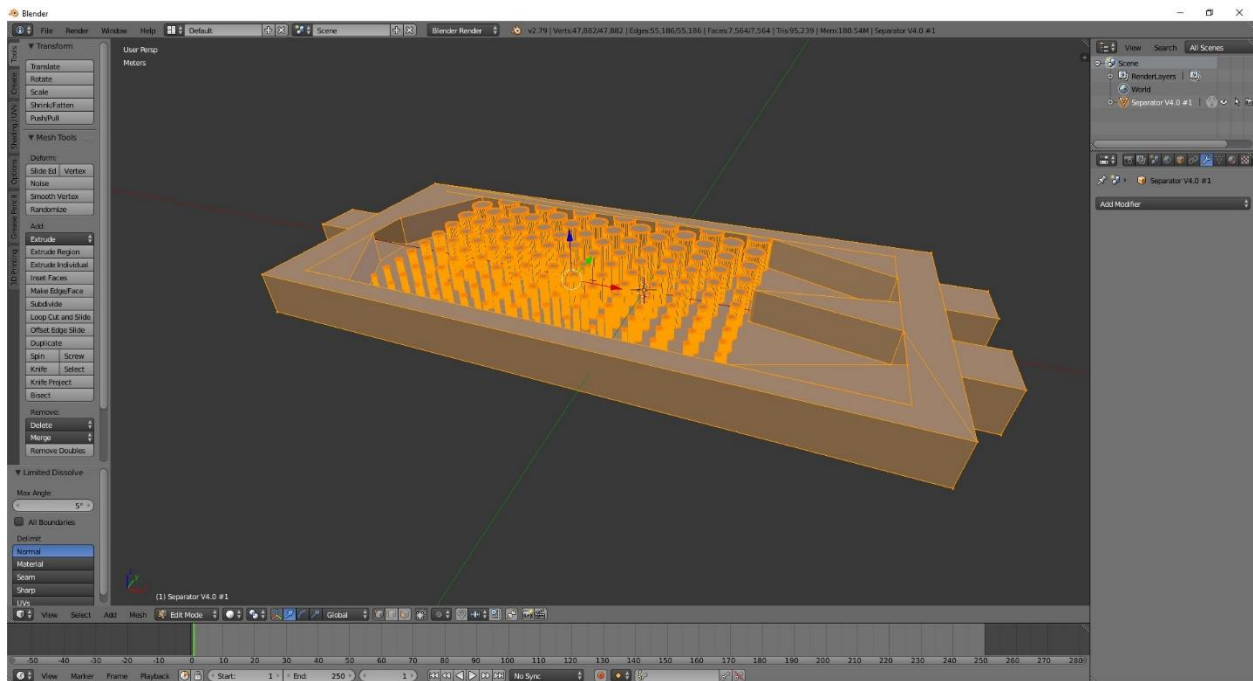
Današnji CAD programski paketi pružaju mogućnosti od 2D vektorskog prikaza do prikaza 3D tijela i 3D površina. [8]

Danas poznajemo 2 vrste programa, CAD koji nam služe za izradu predmeta koji će se koristiti (npr. matice, lažajevi) te programi za 3D modeliranje koji nam služe za animacije i/ili grafičko uređivanje no nisu toliko precizni sami po sebi (kutovi), nego trebamo biti pažljivi u procesu modeliranja predmeta.

Blender (združeni online projekt, v2.79b) je program za 3D modeliranje pomoću kojeg su izrađeni prototipovi protočnog separatora kapljevina/kapljevina. Blender omogućava modeliranje objekta u 3D prikazu. U mogućnosti smo modelirati u tzv. *object mode*-u (slika 6.) prilikom kojeg vidimo kako bi modelirani predmet izgledao kada bi bio izrađen te u tzv. *edit mode*-u (slika 7.) kada smo u mogućnost vidjeti kako su vrhovi, kutovi i stranice unutar predmeta povezani.



Slika 6. Blender – 3D prikaz prototipa (Object Mode)



Slika 7. Blender – 3D prikaz prototipa (Edit Mode)

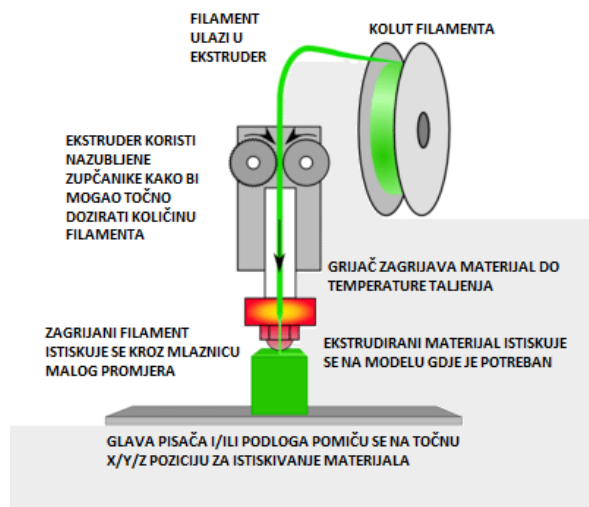
### 3.2. FFF tehnologija ispisa

Proizvodnja rastaljenim filamentom (engl. *fused filament fabrication*, FFF) vrsta je aditivne proizvodnje pri kojoj se rastaljeni materijal po izlasku iz mlaznice kontinuirano istiskuje na podlogu ili prethodne slojeve pri čemu se stvaraju novi slojevi koji tvore 3D predmet. Kao materijal koriste se polimeri koji dolaze u obliku *filamenta* (engl. *filament*) namotanog na kolutu, promjera 1,75 mm ili 3,00 mm.

FFF pisači koriste proces ekstruzije pri izradi 3D predmeta. Glava ekstrudera se zagrijava (ovisno o temperaturi potrebnoj za taljenje polimera) i kroz mlaznicu se rastaljeni materijal istiskuje na podlogu ili na prijašnje slojeve predmeta (slika 8.). Mlaznica s ekstruderom pomiče se po x-y osima te tako izrađuje sloj i prilikom završetka izrade jednog sloja koračni motor koji je s podlogom povezan remenom pomiče podlogu u smjeru z-osi za iznos visine novog sloja.

U usporedbi s drugim 3D pisačima, FFF pisači jednostavni su za upotrebu, no kvaliteta izrađenih predmeta manja je. Zbog načina na koji FFF pisači izrađuju predmete, površina predmeta dosta je lošija (neravnija) u usporedbi s SLA pisačima. FFF pisači najčešće u svojim postavkama nude za odabrati debljine slojeva između 0,09 mm i 0,3 mm.

Najčešće korišteni materijali su ABS (akrilonitril/butadien/stiren) i PLA (polilaktid). U ovom radu korišten je 3D pisač Zortrax M200 (slika 9.).



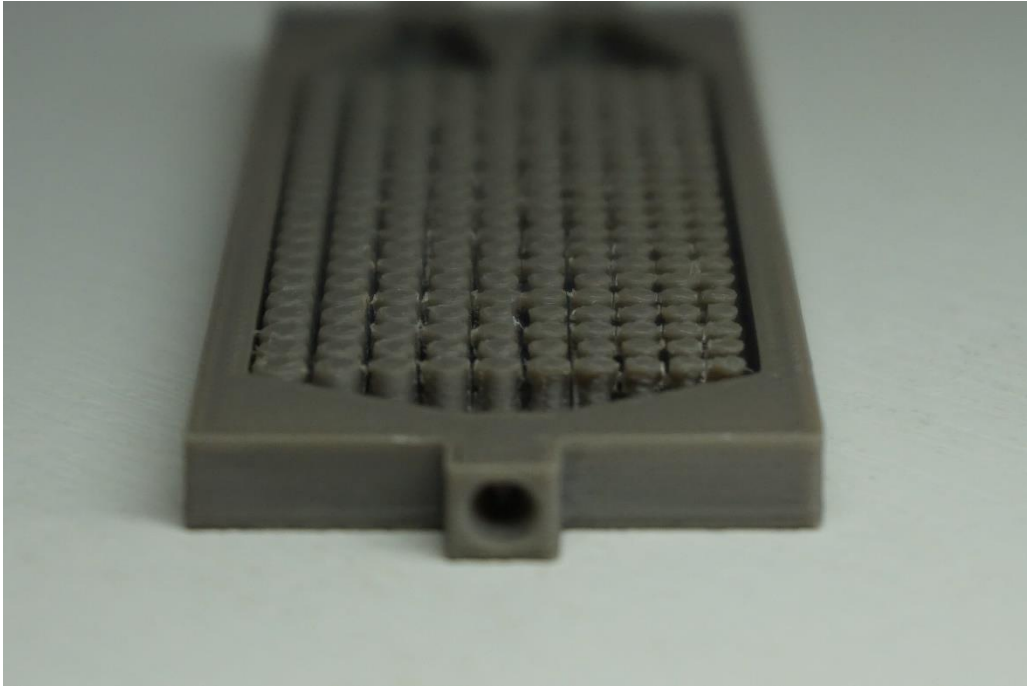
Slika 8. Princip funkcioniranja FFF pisača



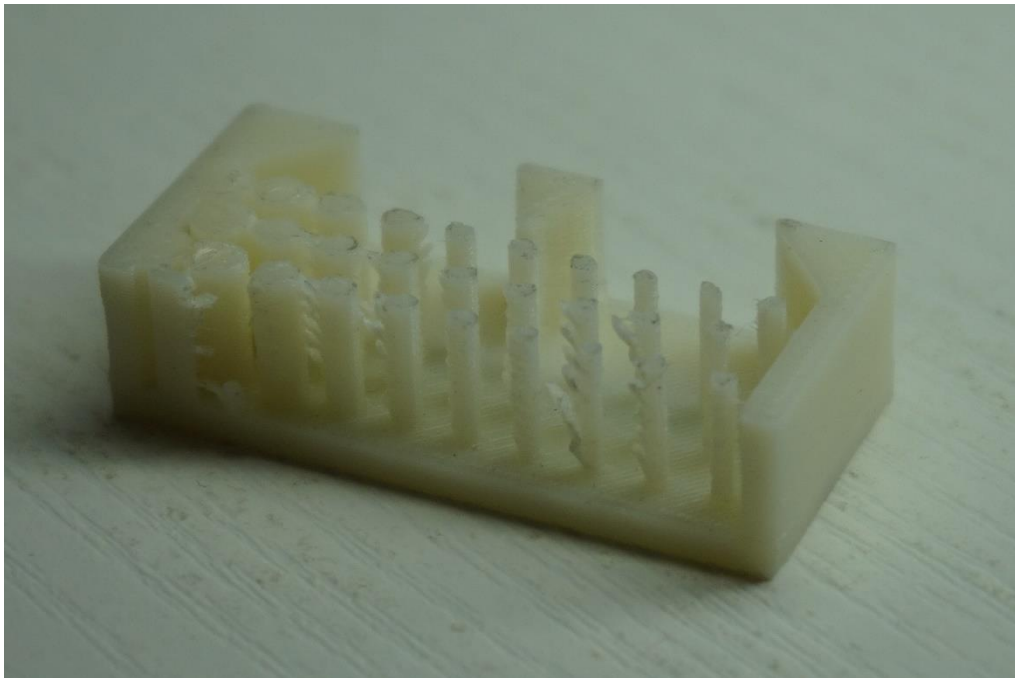
Slika 9. Pisač Zortrax M200

FFF pisač se u slučaju tiskanja prototipa separatora pokazao lošijim. Njegov način izrade predmeta sloj po sloj pokazao se kao nedostatak. S obzirom da su stupovi unutar separatora relativno malog razmaka te su neki stupovi vrlo malog promjera, pisač neke stupove nije mogao prepoznati. Prilikom prelaska izrade jednog stupa na drugi, iz ekstrudera je teкао zaostali dio materijala te su na kraju neki od stupova završili spojeni (slika 10.), iako bi između njih treba biti prazan prostor. Također, prilikom izrade separatora čiji stupovi su bili visine 10 mm i veći, kod nekih stupova došlo je do razdvajanja slojeva stupova (slika 11.) jer se zbog male veličine separatora i brzine izrade slojevi nisu stigli ohladiti te su se razdvojili. FFF pisač pokazao se uspješan kod izrade većeg modela separatora, dimenzija dužina x širina x visina = 150 mm x 60 mm x 10 mm.

Prednosti FFF pisača je brzina izrade predmeta. FFF pisač je za izradu jednog prototipa trebao oko četiri sata, dok je SLA pisaču potrebno između pet i šest sati za prototip, ovisno o njegovoj kompleksnosti.



Slika 10. Spojeni stupovi



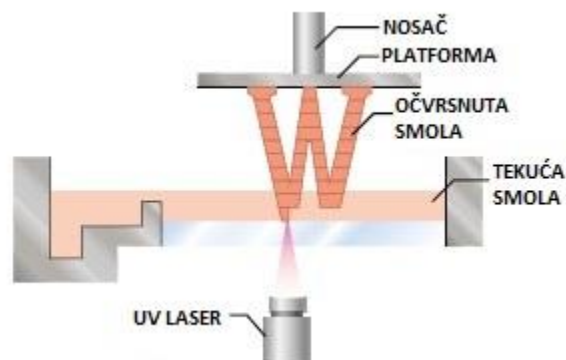
Slika 11. Raslojeni stupovi

### 3.3. SLA tehnologija ispisa

Stereolitografija (engl. *stereolithography*, SLA) je vrsta aditivne proizvodnje u kojoj se UV zraka iz lasera koristi za očvršćivanje fotopolimera sloj po sloj. Ova tehnika koristi platformu koja se nalazi uronjena u kadici u kojoj se nalazi tekuća epoksidna smola ili akrilatna smola. Za vrijeme izrade, platforma je vrlo malo uronjena u smolu, ne miče se iz smole, a pomiče se po z-osi svaki puta kada je sloj završen s očvršćivanjem pomoću UV zrake i tako sloj po sloj do završetka izrade. Laserska zraka pomiče se po x-y osima te ima određenu dubinu penetracije u smolu (slika 12.). Završetkom svakog sloja, platforma se podiže te se smola miješa u kadici pomoću lopatice [10].

Prednosti stereolitografije su: vrlo precizna izrada, može se koristiti za izradu kompleksnije geometrije, površina je glatka. Nedostaci stereolitografije su: nemogućnost predviđanja promjene veličine i savijanje prilikom naknadnog očvršćivanja, prilikom izrade predmeta potrebna je upotreba potpornja (dodaju se računalno), s obzirom da je mali broj materijala dostupan, svi dostupni degradiraju pod utjecajem UV zraka i postanu lomljivi te vrlo duga obrada predmeta nakon izrade na 3D pisaču [10].

Nakon završetka izrade predmeta, predmet se isprike u izopropilnom alkoholu da bi se uklonio višak smole. Nakon ispiranja predmet se stavlja pod UV svjetlo na naknadno očvršćivanje da bi se svi slojevi dodatno očvrsnuli.



Slika 12. Princip funkcioniranja SLA pisača

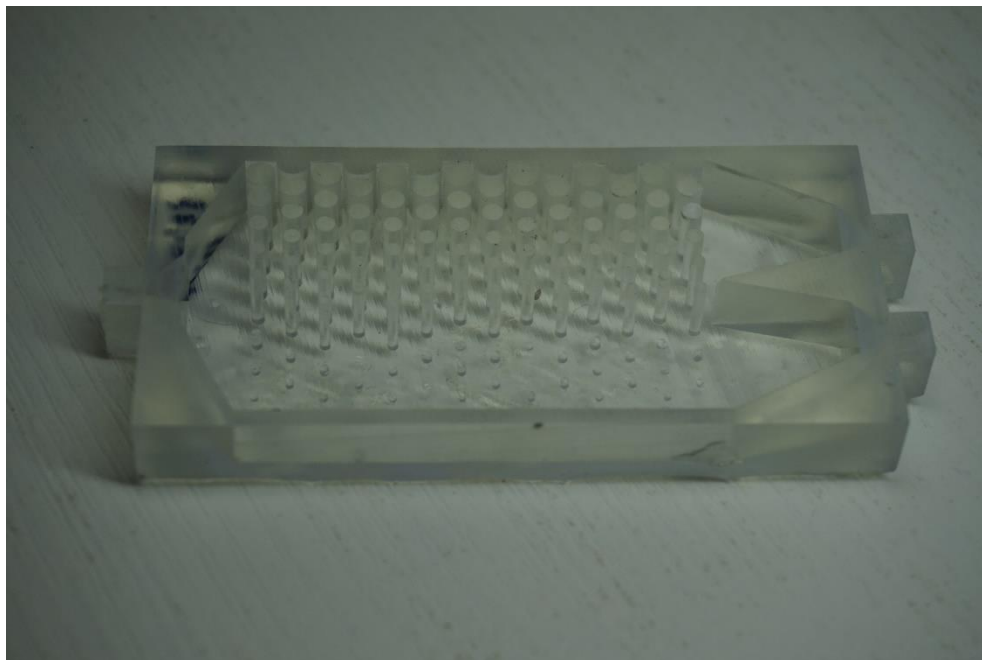


Slika 13. Pisač Formlabs Form2 [11]

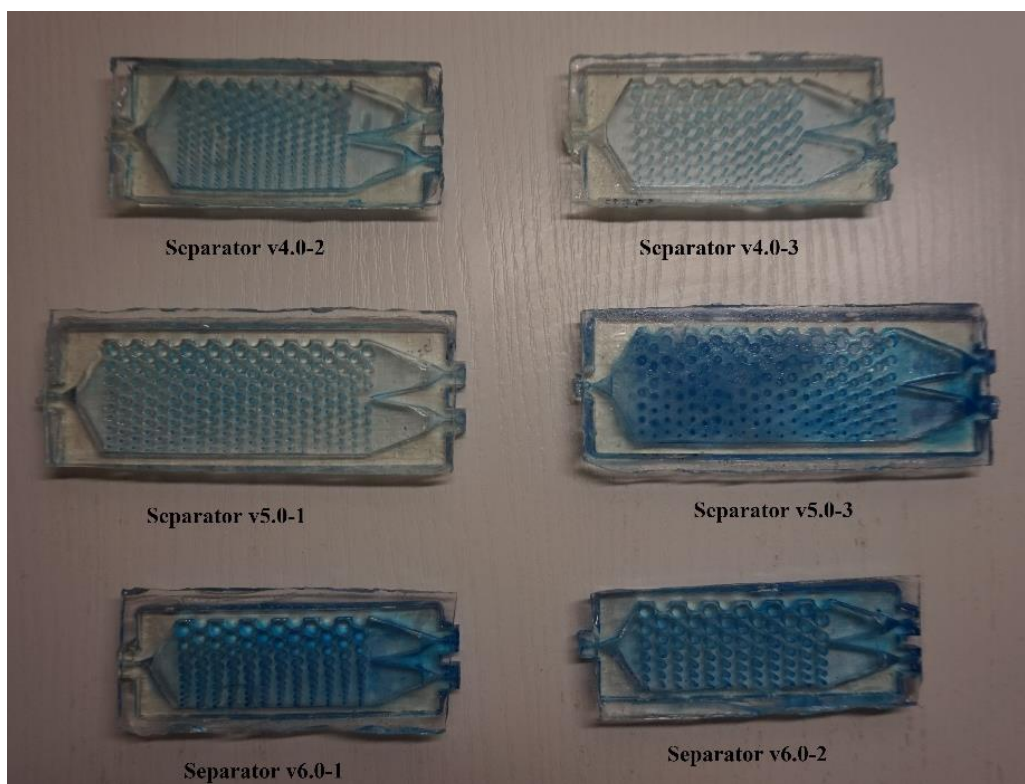
Rezolucija koja se može koristiti prilikom tiskanja sa Formlabs Form2 pisačem iznosi između 50  $\mu\text{m}$  i 200  $\mu\text{m}$ . [11] To je omogućilo izradu svih veličina stupova koje su bile zadane kod prototipa. SLA pisač pokazao je uspješnost prilikom izrade svih veličina modela separatora.

Kao ograničenje SLA tehnologije tiskanja pokazali su se dostupni materijali koji se koriste prilikom izrade. Poliakrilatna smola koja je zasad jedina dostupna za 3D pisač Formlabs Form2 pokazala je neotpornost na neke vrste kemijskih spojeva. Prilikom korištenja etanola za čišćenje očvrsnute poliakrilatne smole, dolazi do zamućenja smole koja postane ponovno prozirna tek nakon nekog vremena i stupovi postanu krući tj. izgube fleksibilnost i najčešće pucaju. To je indikator da etanol djeluje agresivno na poliakrilat. Prilikom korištenja metanola za čišćenje očvrsnute smole, dolazi do pucanja poliakrilata prilikom sljedećeg korištenja ili ukoliko je duže izložen metanolu (slika 14.).





Slika 14. Separator nakon korištenja metanola



Slika 15. Uspješno izrađeni separatori

### 3.4. Spajanje i rastavljanje

#### 3.4.1. Lijepljenje separatora i poklopca

S obzirom na činjenicu da nijedan od navedenih 3D pisaa nije bio u mogućnosti izraditi model separatora s poklopcem, na modele separatora ljepili su se poklopci. Kao poklopci korišteni su komadi stakla debljine 3 mm. Kao ljepilo kojim je staklo lijepljeno za poliakrilatnu smolu koristilo se Norland Optical Adhesive 68 (slika 16.). Norland Optical Adhesive 68 ljepilo je koje se koristi za lijepljenje stakla i/ili plastike. Bezbojna je otopina fotopolimera koja se pod utjecajem UV svjetla valne duljine između 350 nm do 380 nm očvršne. Vrijeme očvršćivanja je između 5 i 10 sekundi ako je izvor UV svjetlosti udaljen 1,5 cm ili 40 minuta na ako je izvor UV svjetlosti udaljen 15 cm. U oba slučaja preporučeni iznos energije izvora UV svjetlosti je  $4,5 \text{ J/cm}^2$ . U ovom radu korištena je ručna UV lampa s dvije LED žaruljice snage 5 W. Vrlo dobro lijepi spoj stakla i plastike, no ljepilo je pokazalo neotpornost na izopropilni alkohol.



Slika 16. Norland Optical Adhesive 68

#### 3.4.2. Spajanje šprice pomoću konektora na separator

Primarna ideja bila je spojiti šprice sa separatorom pomoću rastavljivog spoja. Za eksperimentalni dio korištene su šprice tvrtke BD s *Luer Lok* konektorom (slika 17.).

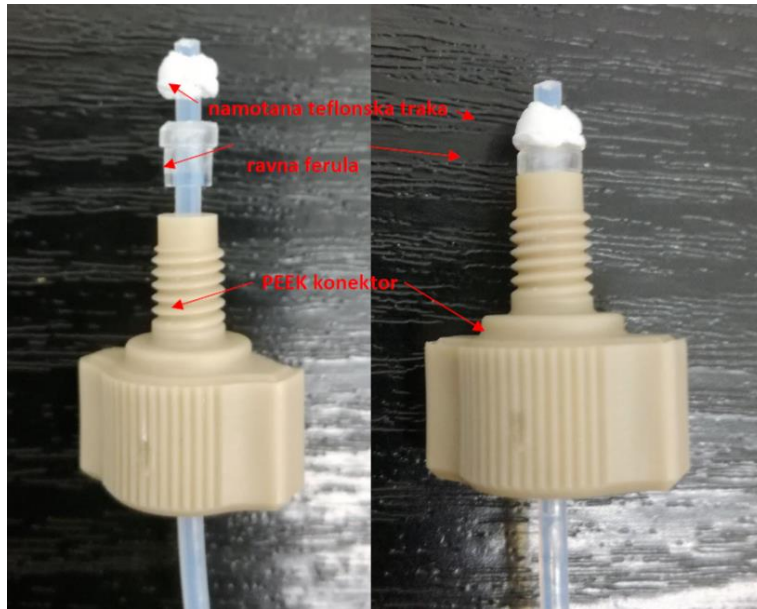


Slika 17. Šprica BD s *Luer Lok* konektorom

Krajnji dio teflonske cijevi umetne se u konektor (slika 18.) te se pomoću okvira koji je izrađen posebno za svaku veličinu separatora prišarafi tako da PEEK konektor sjedne u dio predviđen na separatoru. Kao sredstvo za brtvljenje koristila se teflonska traka omotana oko ferule (slika 19.). S obzirom da su konektori na separatoru bili postavljeni paralelno sa najdužom stranicom separatora došlo je do izvijanja separatora i okvira te je spoj separatora i poklopca popustio.



Slika 18. Konektori s ferulama



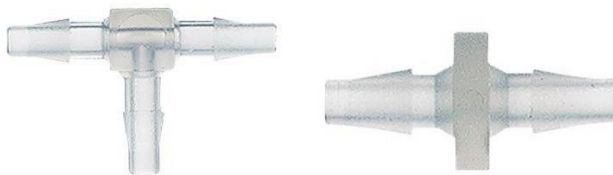
Slika 19. Teflonska cijev je provučena kroz PEEK konektor i ravnu ferulu te je oko cijevi omotana teflonska traka; razdvojeni spoj (lijevo), složeni spoj (desno)[12]



Slika 20. Izvijeni separator i okvir

Kao alternativna varijanta koristio se nerastavljivi spoj. U konektor tvrtke Cole-Parmer (slika 21.) umetnuta je teflonska cijev i dodatno pričvršćena silikonskom cijevi da prilikom rada ne bi došlo do izvlačenja teflonske cijevi. Na drugom kraju teflonske cijevi stavljen je još jedan konektor, koji je učvršćen na isti način. Unutarnji promjer teflonskih cijevi iznosi 1 mm. Kao ljepilo koristila se poliakrilatna smola ručno očvršćena UV laserom valne duljine 405 nm snage

5 mW. Navedenu poliaktilatnu smolu koristi SLA 3D pisac za izradu prototipa separatora. Ovaj način spajanja pokazao se uspješnim.



Slika 21. Cole-Parmer t-spoj i ravni konektor

### 3.5. Dizajn prototipa separatora

Jovanovic i sur.[13] izradili su prototip separatora kapljevina/kapljevina. Veličinu separatora, raspored i dimenzije stupova te brzinu protoka izračunali su pomoću LBM (engl. *Lattice Boltzmann Method*, Boltzmannova metoda ćelija). Ovom metodom rješava se diskretna Boltzmannova jednačba umjesto Navier-Stokesove jednačbe za strujanje fluida. Boltzmannova jednačba kao rješenja nudi simulaciju strujanja Newtonovskih fluida. Prototip separatora imao je jedan ulaz i dva izlaza te je pomoću prepreka unutar separatora separirao dvofazni tok smjese dvaju kapljevina. Tehnologije aditivne proizvodnje pokazale su mogućnost izrade separatora i stupova različitih oblika.

Prilikom dizajna prototipa separatora u obzir su uzeti sljedeći parametri: promjer stupova, razmak stupova, dužina i širina separatora. Protok vodene faze i protok ulja bio je po 1 mL/min. Da bi došlo do separacije tokova, tok dvofazne mješavine ulja i vode prvo se trebao stabilizirati te se zbog toga na početku prostora za separaciju ostavio prazan prostor. Kao pretpostavka uzeto je da će se tokovi separirati i da će svaki biti orijentiran prema jednom izlazu i iz tog razloga su uklonjeni stupovi ispred izlaza. Da bi do separacije došlo, pojava adhezije i koalescencije trebale bi biti jednake. U slučaju da dođe do prevladavanja neke od pojava, neće doći do potpune separacije. Razmak između središta stupova u kolonama je konstantan u svim separatorima i iznosi 3 mm. Baze svih stupova aproksimirane su likom od 360 kutova. Prilikom dizajniranja separatora, stupovi su postavljani u redove i stupce. Svi stupovi su postavljani tako da se ne

preklapaju, nego se svaki slijedeći stup nalazi u međuprostoru između dva prethodna stupa. Kako su stupovi trebali biti različite veličine, da bi imali različito oplošje, promjer stupova unutar kolone smanjuje se za 19 %, dok se promjer stupova kada stupove promatramo dijagonalno smanjuje za 10 %. Svaki od izrađenih separatora izrađen je tako da se dvije različite kolone stupova izmjenjuju. Zbog toga što svaki separator sadrži dvije različite kolone stupova, svaki od separatora navedenih u tablici 1. ima dva najveća promjera stupova (maksimum 1 i maksimum 2) i dva najmanja promjera stupova (minimum 1 i minimum 2).

Tablica 1. Karakteristične veličine separatora

Svojstvo	Verzija separatora					
	v4.0-2	v4.0-3	v5.0-1	v5.0-3	v6.0-1	v6.0-2
Dužina [mm]	79,0	79,0	100,0	100,0	79,0	79,0
Širina [mm]	32,0	32,0	32,0	32,0	24,0	24,0
Visina [mm]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Maksimum 1 [mm]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,4	3,4
Maksimum 2 [mm]	2,7	2,7	2,7	2,7	3,7	3,7
Minimum 1 [mm]	0,4	0,7	0,5	0,7	0,6	0,8
Minimum 2 [mm]	0,4	0,8	0,5	0,8	0,6	0,9
Razmak između stupova po širini [mm]	1	2	1.5	2	0.5	0.75

### 3.5.1. Veličina separatora

Prilikom određivanja dimenzija separatora u obzir je uzeto vrijeme zadržavanja dvofazne smjese kapljevina. Kao osnovni model (v4.0) uzet je model dimenzija dužina x širina x visina = 79 mm x 32 mm x 5 mm. Kao drugi prototip (v5.0) izrađen je 21 mm duži separator te je kao treći prototip (v6.0) izrađen separator koji je 8 mm uži od osnovnog. Ovim načinom testirana su tri različita vremena zadržavanja.

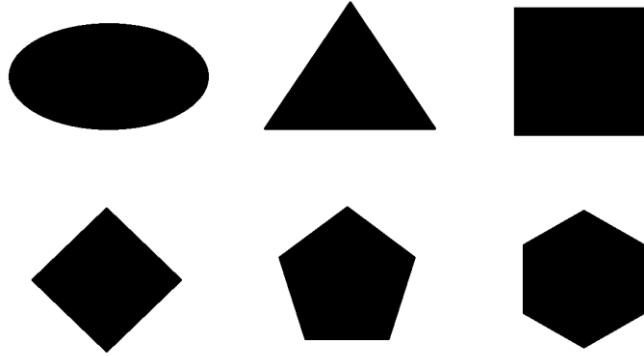
### 3.5.2. Razmak između stupova

Kao razmak između središta stupova po dužini separatora, kao što je već ranije navedeno, uzet je razmak od 3 mm. Razlog te udaljenosti leži u tome što kapljice prije no što formiraju tok moraju međusobno koalescirati. Da bi do koalescencije došlo, između kolona stupova kapljicama treba određeni prostor. Zbog toga je razmak između svih kolona stupova u svim veličinama separatora konstantan.

Razmak između stupova po širini separatora varira ovisno o veličini separatora i iteraciji unutar pojedine veličine. Pretpostavljeno je da se kapljevina koja ima veću viskoznost i površinsku napetost kreće kroz stupove većeg promjera tj. da će prolaziti između stupova koji imaju veću površinu plašta, a kapljevina koja ima manju viskoznost i površinsku napetost kretat će se između stupova koji imaju manju površinu plašta. Testirane su različiti razmaci između stupova da bi se vidio način kako dolazi do separacije kapljica, koalescencije i na kraju formiranja toka jedne faze.

### 3.5.3. Utjecaj geometrije stupova

Baza stupova lik je s 360 kutova (engl. *vertex*). Pretpostavljeno je da će takva geometrija stupova najmanje utjecati na gibanje kapljevine tj. da će pozitivno utjecati na koalescenciju kapljica, ali da neće usporavati brzinu gibanja kapljica. Svi drugi oblici koji su uzeti u razmatranje (Slika 22.) utjecali bi na brzinu gibanja kapljica u separatoru, tj. smanjivali bi je. Smanjenjem brzine gibanja kapljica unutar separatora adhezijska sila postala bi dominantan mehanizam te bi okrupnjavanje kapljica koalescencijom bilo smanjeno.



Slika 22. Moguće baze stupova

#### 3.5.4. Promjer stupova

Veličina stupova određena je količinom prostora koji bi zauzimali. Raspored stupova, tj. grupiranje stupova u kolone i njihov raspored djelomično je preuzet iz modela separatora Jovanovića i sur. Ranije je navedeno da se stupovi unutar jedne kolone smanjuju za 19 % u nizu, dok se dijagonalnim pogledom na njihov raspored veličina smanjuje za 10 % u nizu. Prilikom odabira promjera stupova pazilo se da separator bude prohodan za obje kapljevine, za kapljevinu koja prolazi kroz stupove koji imaju veći promjer tako i za kapljevinu koja prolazi kroz stupove manjeg promjera. Svaka veličina separatora, tako i iteracije određene veličine, imaju dvije kolone koje se naizmjenično ponavljaju prema izlazu. Tako svaka iteracija ima dva najveća stupa (u svakoj koloni jedan) i dva najmanja stupa.



## 4. REZULTATI I RASPRAVA

### 4.1. Aditivna proizvodnja separatora

FFF tehnologija ispisa nije pokazala mogućnost izrade funkcionalnog protočnog separatora ove veličine. Samo kućište separatora je uspješno izrađeno, no stupovi nisu dobro izrađeni. Prilikom ispisa separatora na pisaču Zortrax M200, korišten je materijal tvrtke Zortrax Z-ABS. U *sliceru* su već postojale upisane sve postavke za ispis pomoću njihovog materijala. Prilikom rada zbog male veličine separatora, slojevi istiskivani iz mlaznice nisu se stigli očvrnuti te je došlo do rastezanja materijala iz prethodnog sloja te su stupovi bili spojeni.

SLA tehnologija ispisa pokazala je vrlo veliku preciznost ispisa i mogućnost ispisa svih separatora koji su bili testirani. Pisač Formlabs Form2 bio je u mogućnosti ispisati i najmanje stupove u najmanjoj varijanti separatora (v6.0) koji su bili veličine 0,56 mm. Nedostatak SLA tehnologije pred FFF tehnologijom ispisa je vrijeme naknadne obrade separatora. Ukupno vrijeme izrade separatora veće je na pisaču Formlabs Form2.

Oba pisača pokazala su nemogućnost izrade poklopca na separatoru. Prilikom izrade poklopca na separatoru na pisaču Zortrax M200, slojevi koji izlaze iz mlaznice upadaju u prazne prostore između stupova u separatoru. Pomoćne strukture ne mogu se staviti, jer ih ne bi bilo u mogućnosti ukloniti iz separatora. Kod pisača Formlabs Form2, nije moguće “istjerati” svu zaostalu neočvrnutu poliakrilatnu smolu iz separatora. S obzirom da separator tiskan na SLA pisaču moramo staviti na dodatno očvršćivanje u peć s UV svjetlom, zaostala smola unutar separatora bi polimerizirala i separator više ne bi bio prohodan za kapljevina.

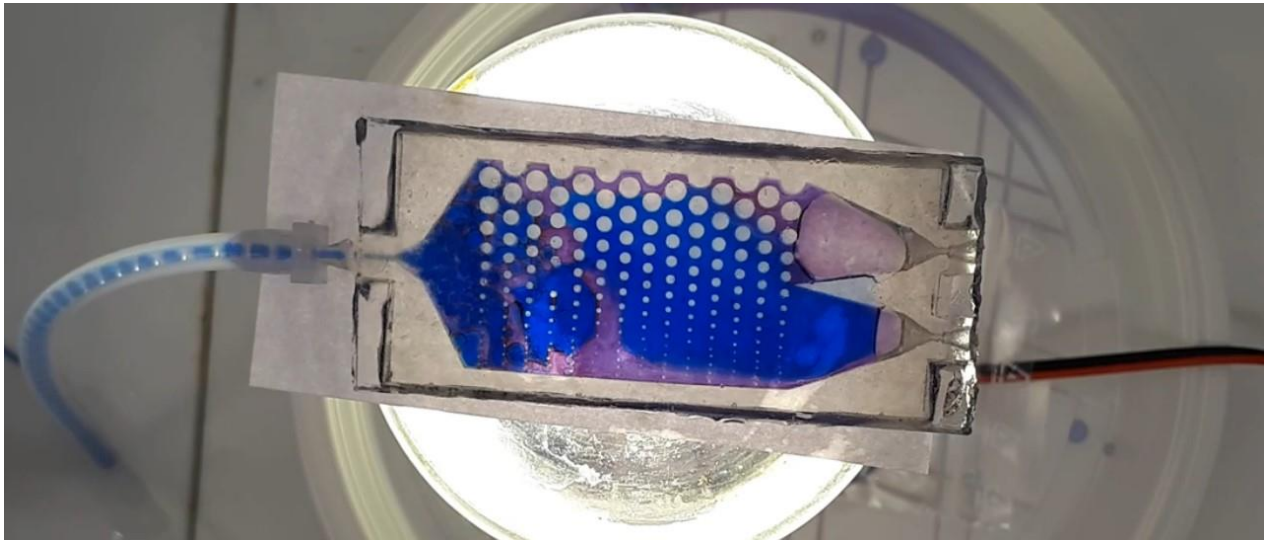
### 4.2. Strujanje kapljevina i separacija

Za potrebe eksperimenta, vodenu fazu obojali smo plavim pigmentom, a ulje nismo bojali. Prilikom provođenja eksperimenta pokazalo se da pigment prelazi iz vodene faze u uljnu fazu i

ulje oboji u blago ružičastu boju. Kod svih separatora protok vodene faze i protok uljne faze bio je po 1 mL/min.

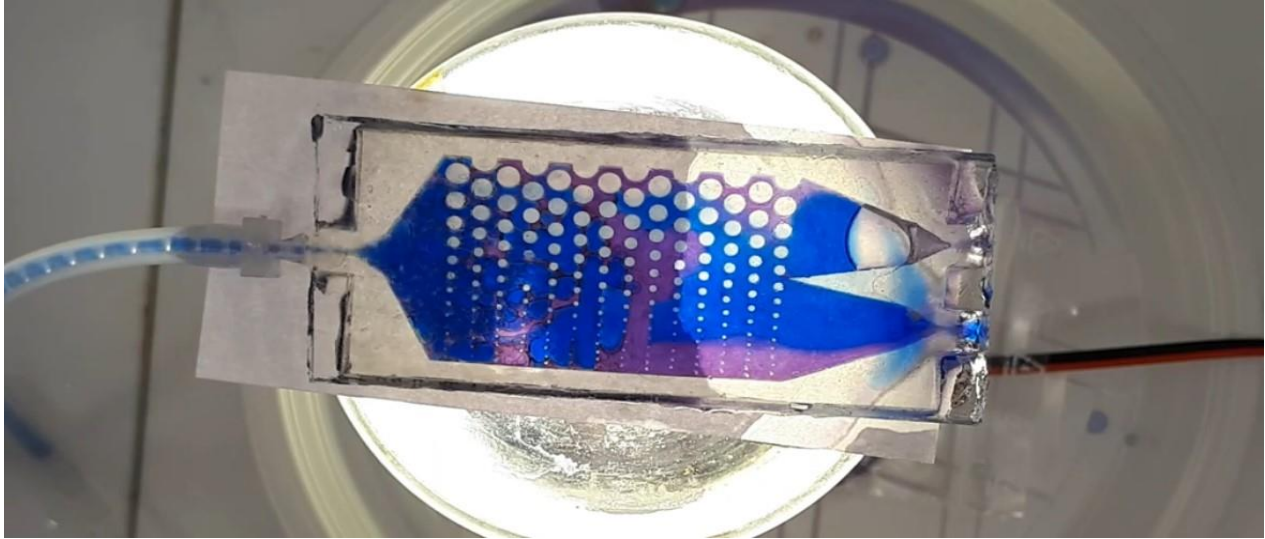
#### 4.2.1. Separator v4.0-2

Prilikom testiranja separatora v4.0-2 u separator utječe segmentirani tok vodene i uljne faze. Vidljiva je tendencija uljne faze da prolazi kroz stupove veće površine oplošja.



Slika 23. Separator v4.0-2 stabilizacija strujanja

Kao što je vidljivo (Slika 23.), u separatoru v4.0-2 dolazi do razvoja toka kapljevina. Na početku možemo vidjeti segmentirani tok, u srednjem području dolazi do koalescencije i stvaranja većih kapljica te na kraju stvaranje toka fluida. Uljna faza izlazi iz separatora dok se vodena akumulira. Nakon vremena akumulacije vodene faze dolazi do nastrojavanja većeg volumena akumulirane vodene faze i ona počinje izlaziti na oba izlaza.

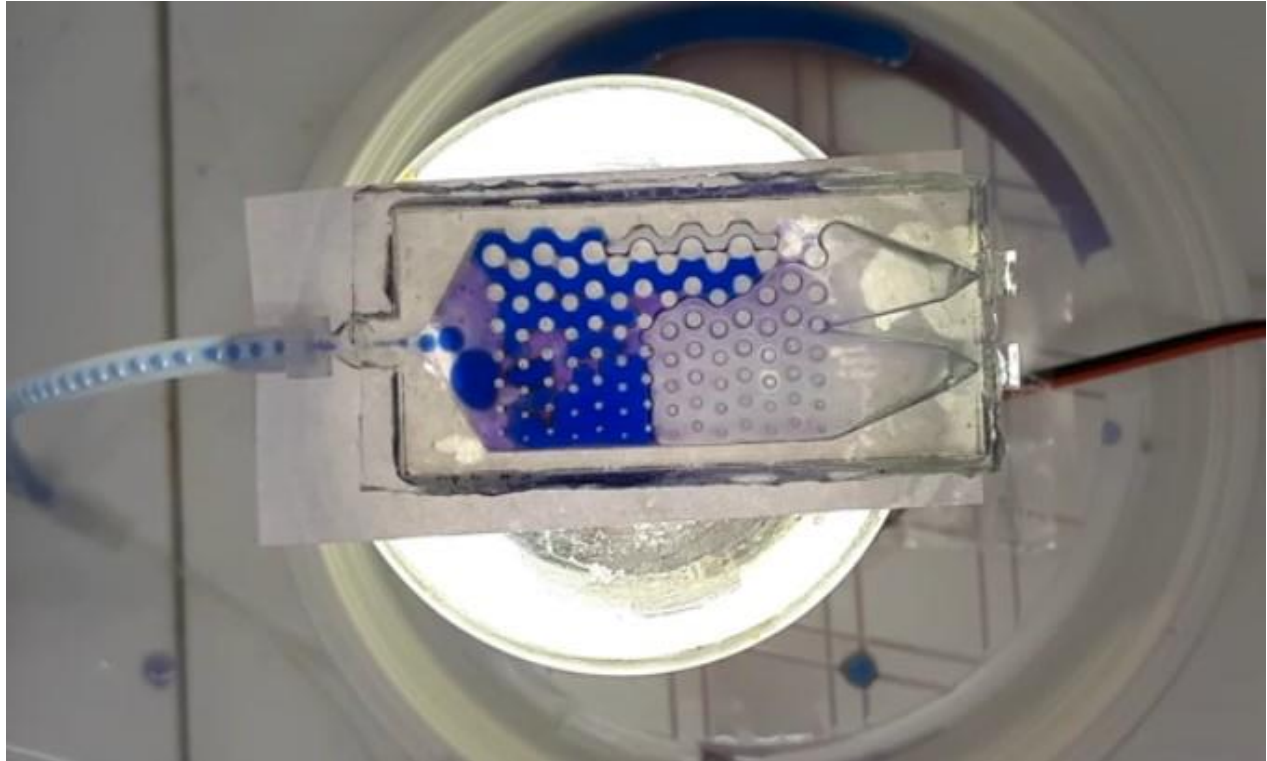


Slika 24. Separator v4.0-2 destabilizacija i kraj separacije

Separacija je sveukupno trajala 4 minute i 30 sekundi. Na kraju separacije dolazi do destabilizacije tokova i do djelomične inverzije tokova (slika 24.). Vodena faza i uljna faza se pomiješaju i izlaze na jednom izlazu, a na drugom izlazu imamo djelomičan izlazak uljne faze. Prilikom separacije vidljivo je da koalescencija nadjačava tendenciju kapljevina za prolazak kroz stupove te iz tog razloga ne dolazi do potpune separacije toka.

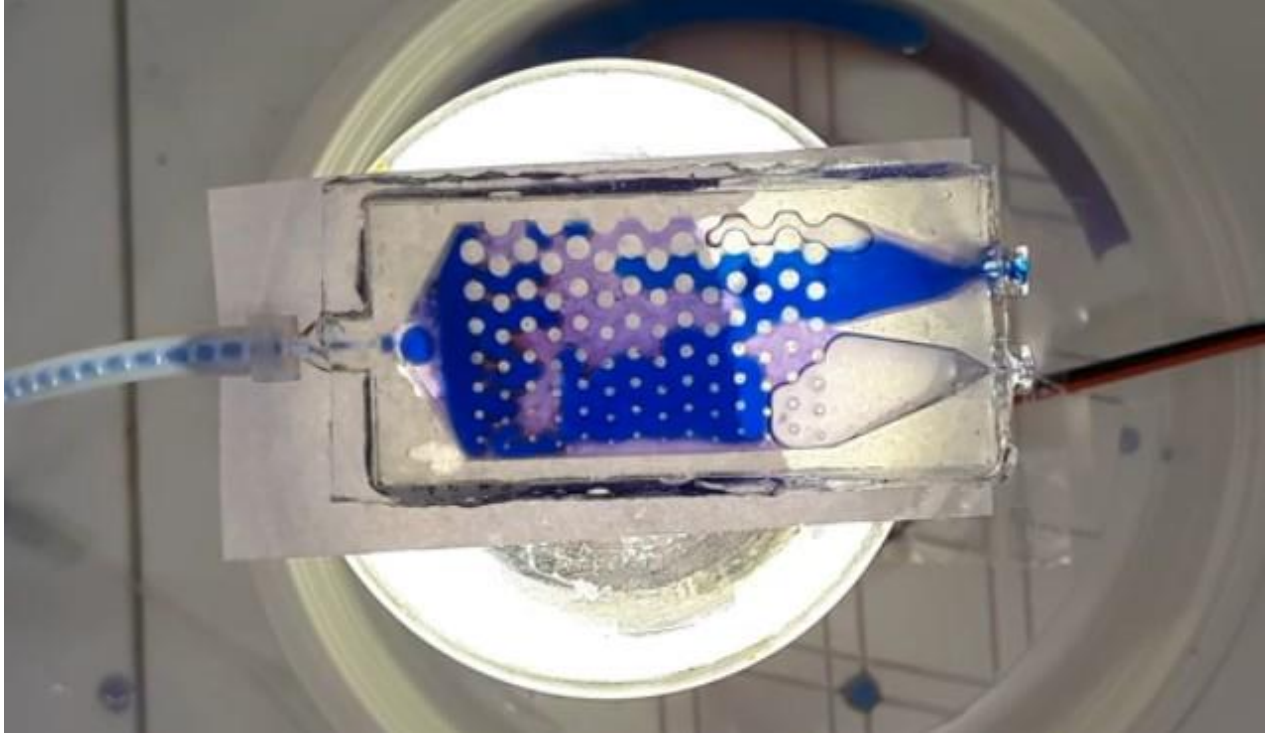
#### 4.2.2. Separator v4.0-3

Kod ovog separatora koalescencija puno više dolazi do izražaja nego adhezija. Kapljice kapljevine imale su više prostora za koalescenciju, razmak između stupova je 2 mm.



Slika 25. Separator v4.0-3 razvoj toka

Na ulasku u separator vidi se segmentirani tok vodene i uljne faze (slika 25.). Koalescencija je toliko jaka, da dolazi do formiranja toka različitih faza ranije nego kod prethodnog separatora. Iz ovog razloga nije moglo doći do separacije tokova i njihovog usmjeravanja prema izlazima.

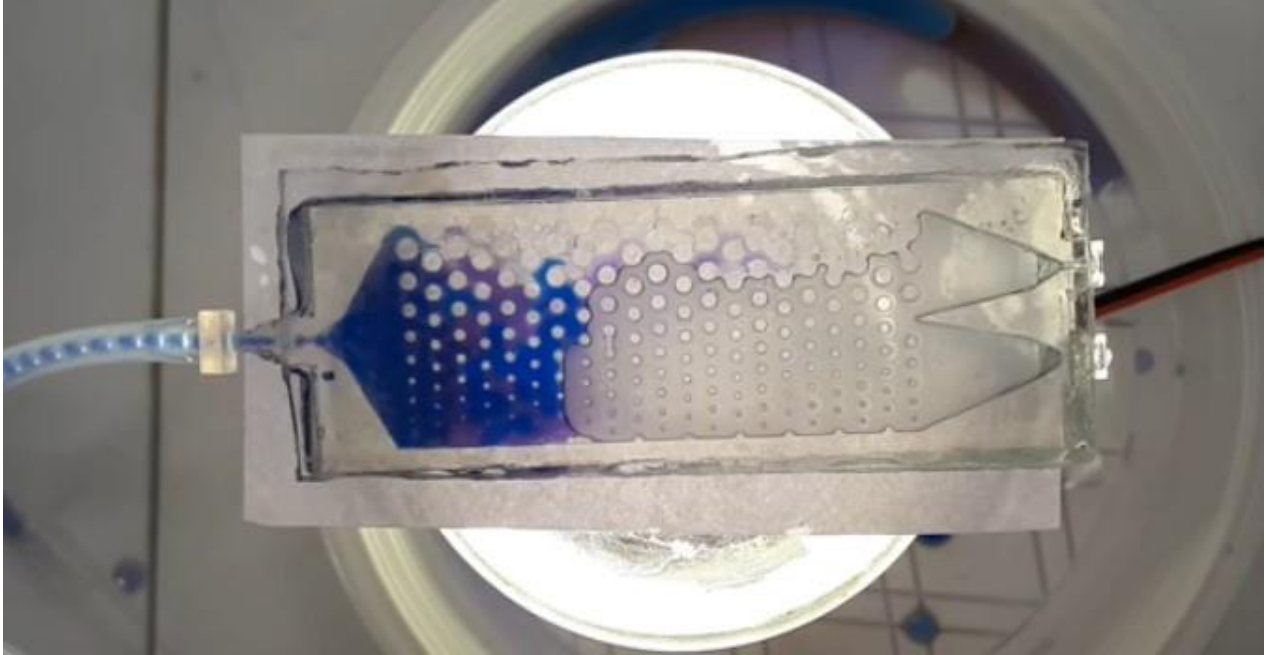


Slika 26. Separator v4.0-3 destabilizacija toka i inverzija

Kao što vidimo na slici 26., zbog puno većeg utjecaja koalescencije došlo je do destabilizacije i razbijanja tokova obje faze. Zbog utjecaja koalescencije na tok došlo je do inverzije izlaza, vodena faza je izmijenila svoj smjer izlaza i prolazi kroz stupove većeg oplošja dok uljna faza počinje svoj tok kroz stupove manjeg oplošja.

#### 4.2.3. Separator v5.0-1

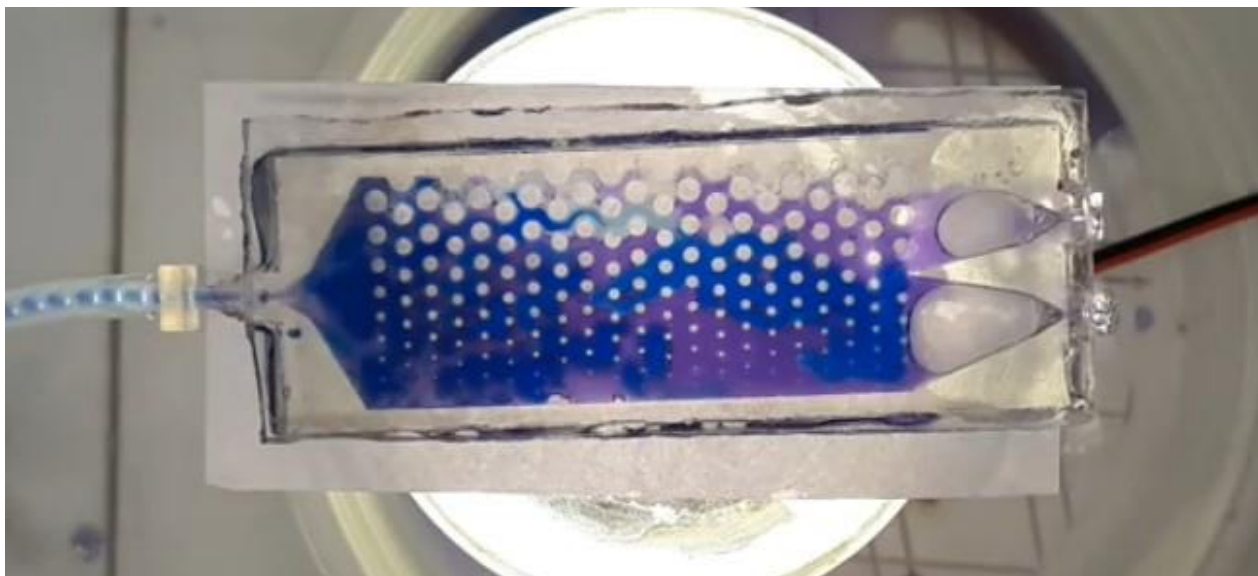
Kod ovog separatora, kapljicine su trebale prevaliti duži put te je separacija zbog toga duže trajala. Kod ovog separatora tendencija prolaska faza između stupića bila je kompetitivna koalescenciji kapljica. Oba mehanizma bila su prisutna tokom separacije.



Slika 27. Separator v5.0-1 razvijanje toka kapljevina

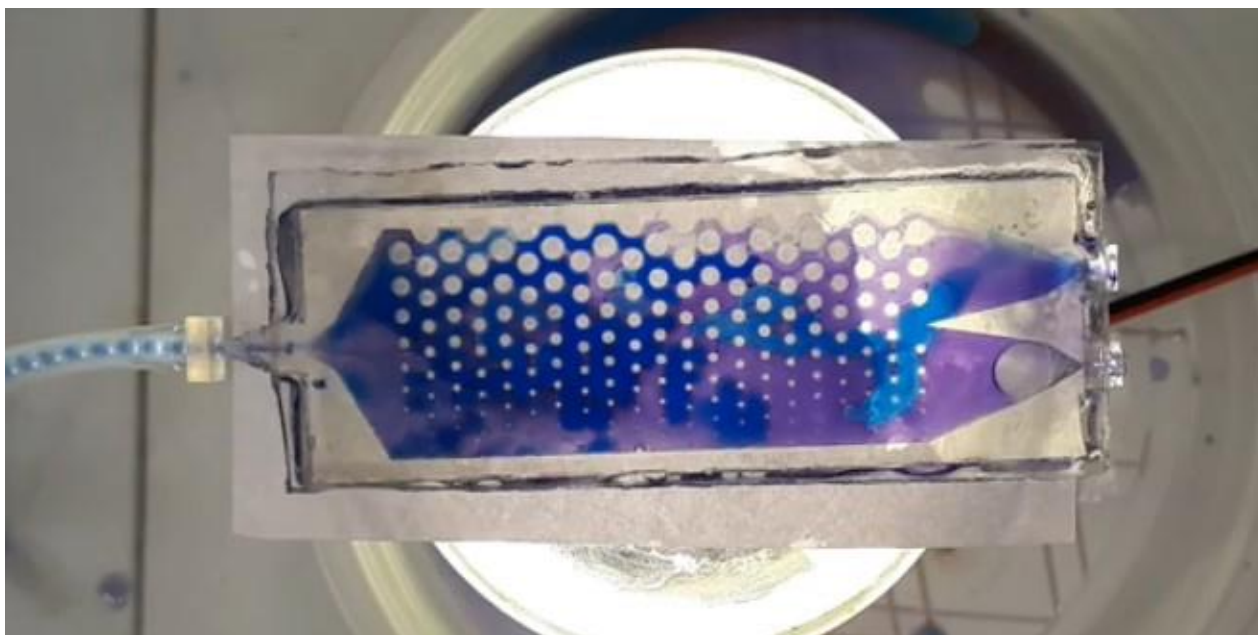
Kao što vidimo na slici 27. na početku separatora imamo sustav sačinjen od kapljica vodene i uljne faze. Vidi se da je utjecaj adhezije puno veći nego kod separatora v4.0 jer nije došlo do tolikog obojenja uljne faze jer brže dolazi do separacije tokova. Vrlo lijepo se vidi formiranje toka uljne faze uz stupove većeg oplošja te vodene faze između manjih stupova.





Slika 28. Separator v5.0-1 tok kapljevina

Na slici 28. vidimo kako uljna faza izlazi na izlaz koji se nalazi na kraju većih stupova, a vodena faza izlazi na izlaz koji se nalazi na stupova manjeg oplošja. U separatoru postoje 3 različite zone, zona segmentiranog toka, zona većih kapljica i na kraju zona toka različitih faza.

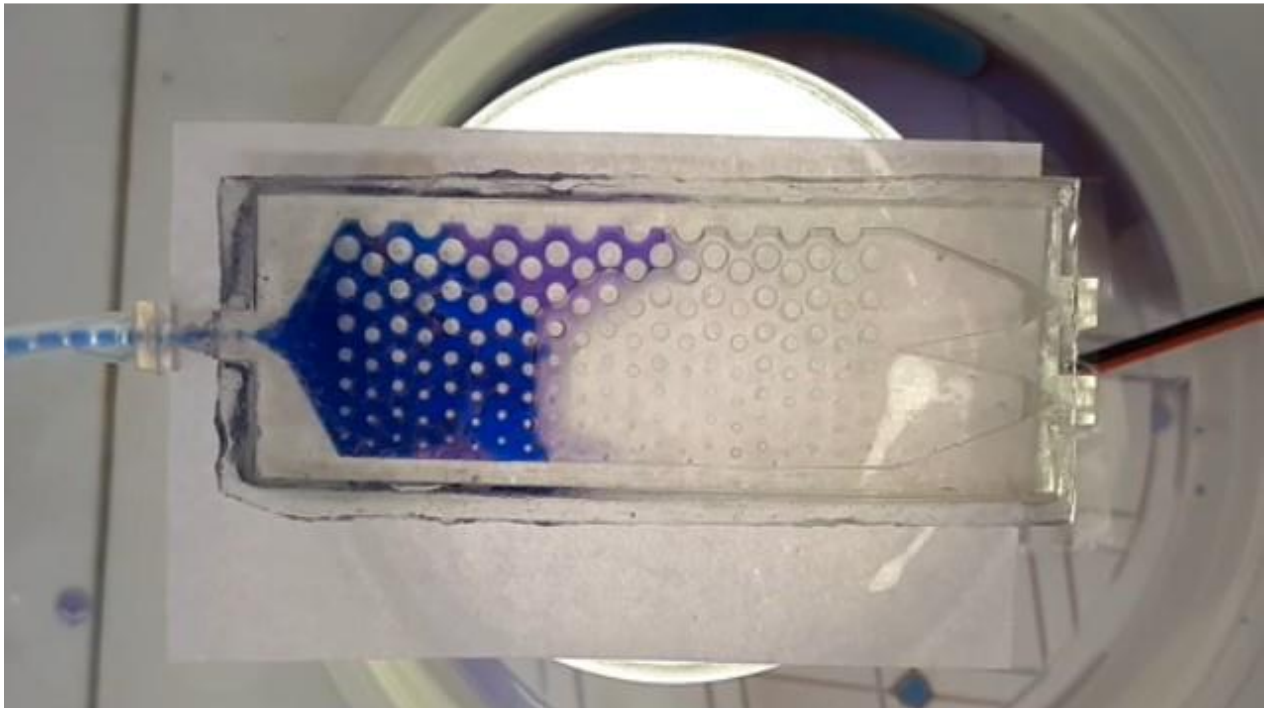


Slika 29. Separator v5.0-1 nakon 5 minuta

Na slici 29. vidi da nakon 5 minuta, dolazi do prevladavanja koalescencije u separatoru i da kod izlaza iz separatora dolazi do inverzije toka te tako na izlaz kod većih stupova izlazi dvofazni sustav, a na izlazu kod manjih stupova uljna faza. Nakon pojave inverzije tokova separacija je prekinuta, iako je do ovog trenutka dolazilo do separacije tokove te su vodena i uljna faza izlazile kroz izlaze kako je to i bilo predviđeno.

#### 4.2.4. Separator v5.0-3

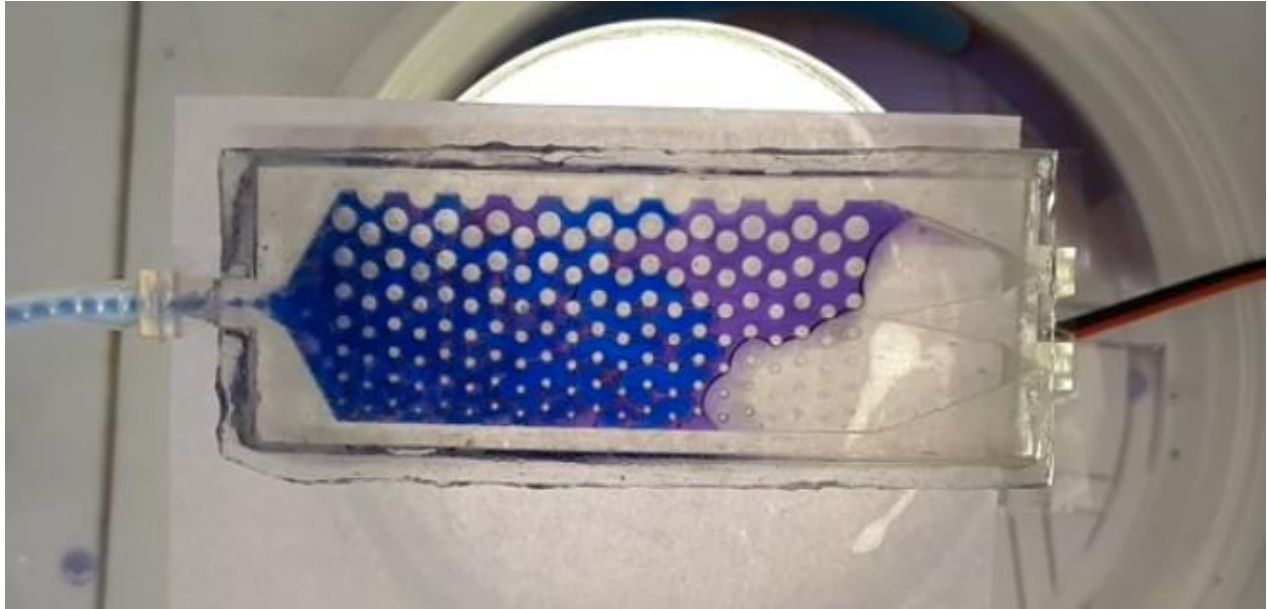
Ovaj separator tijekom rada pokazao se kao najbolji. Vrlo dugo je separacija tekla kao predviđena, no kao i kod prethodnih separatora u jednom trenu koalescencija nadjača adheziju i dolazi do spajanja tokova jedne kapljevine (najčešće vode), koji onda prekine tok druge kapljevine.



Slika 30. Separator v5.0-3 početak strujanja

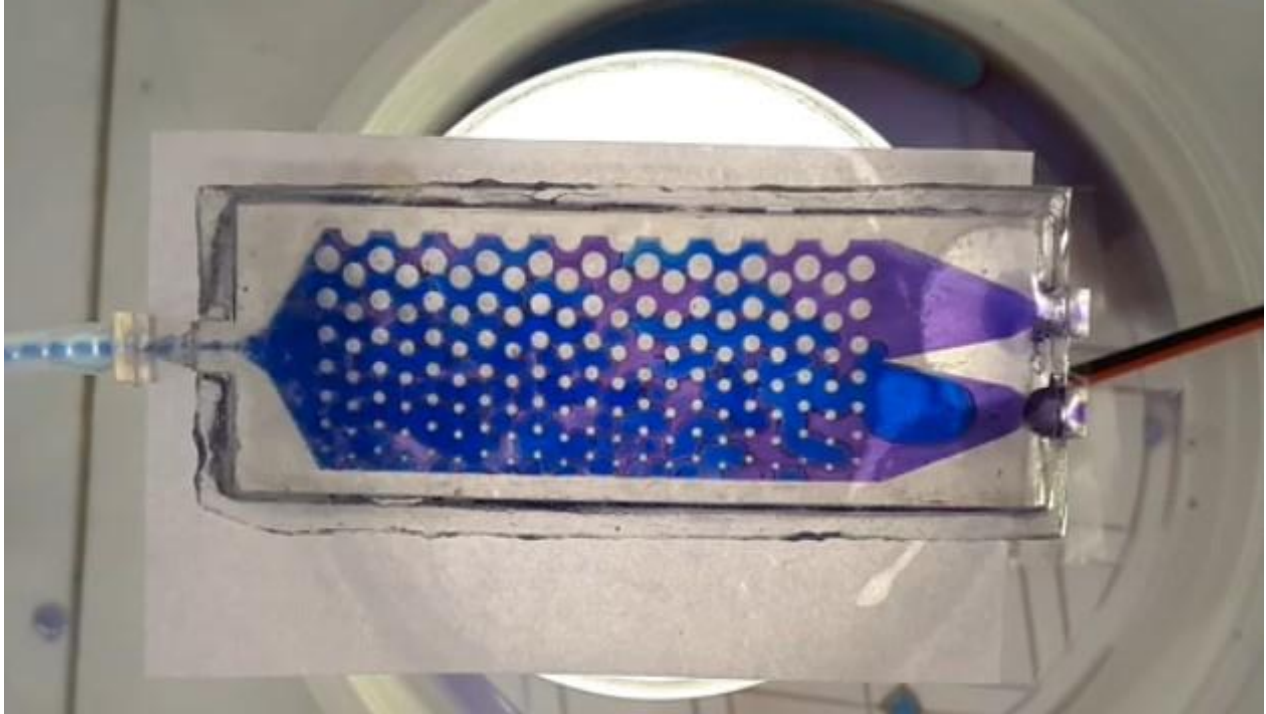


Na početku strujanja kapljevina u separatoru vidi se tendencija prolaska kapljevina kroz različite veličine stupova i okrupnjavanje kapljica. Lagano se na rubnim dijelovima fronte formira tok ulja između većih stupova i tok vode između manjih stupova (slika 30.).



Slika 31. Separator v5.0-3 razvijene 3 zone

Tri zone strujanja najbolje se vide kod ovog separatora (slika 31.). Prilikom ispunjavanja separatora obje faze ponašale su se u skladu s pretpostavkama i formirale tokove prema izlazima kako je predviđeno.

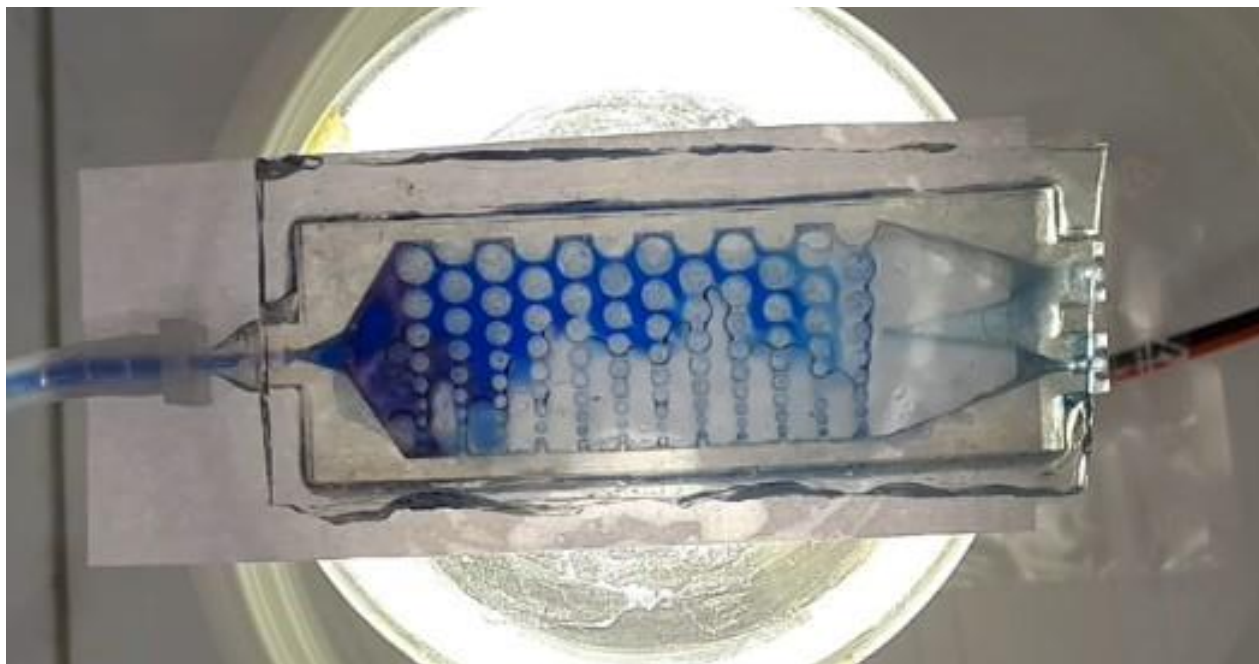


Slika 32. Separator v5.0-3 destabilizirani tokovi

Prilikom punjenja separatora i ponašanja u skladu sa pretpostavkama, tok obje faze se destabilizirao i iz 2 pravilna toka razbio se u 2 segmentirana toka (slika 32.), u kojima su faze izmješane i kapljice su stvorile veće aglomerate. Vodena faza i uljna faza još uvijek su izlazile na izlaze kako je predviđeno.

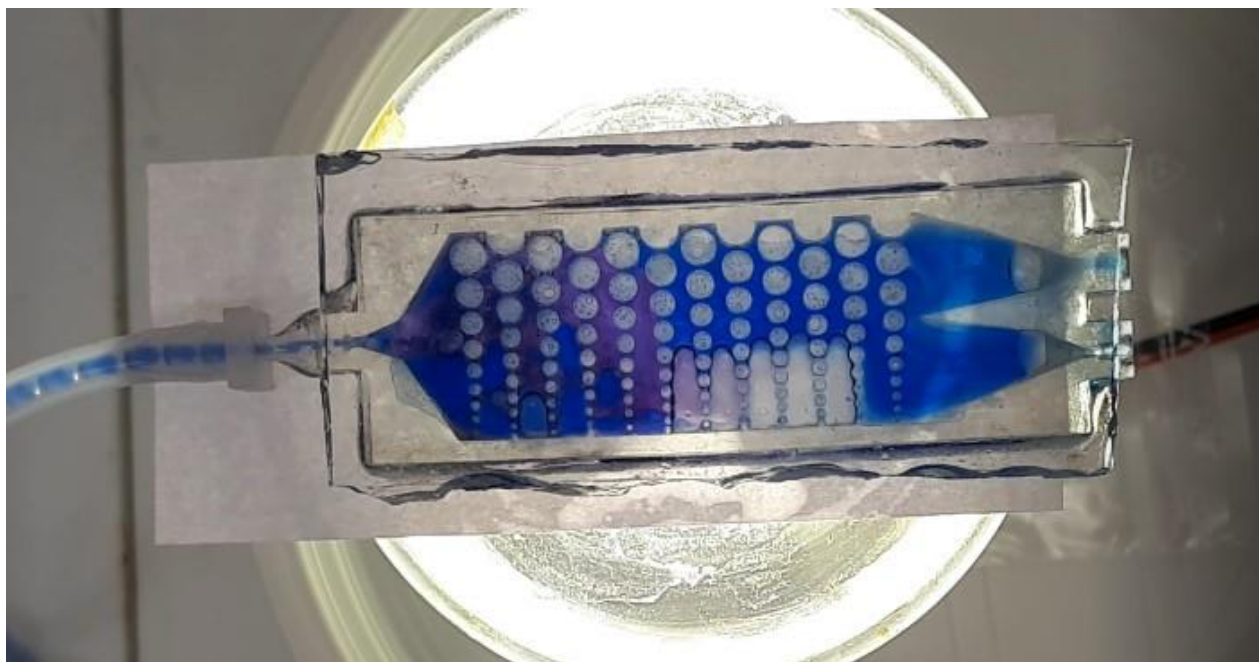
#### 4.2.5. Separator v6.0-1

Separator v6.0 najmanji je, najmanjeg razmaka među stupovima i najmanjih stupova. Promatrao se utjecaj smanjenja širine na separaciju.



Slika 33. Separator v6.0-1 nepravilan tok

Ubrzo nakon utjecanja vodene i uljne faze u separator dolazi do okrupnjavanja kapljica vodene faze i stvaranja nepravilnog toka. Došlo je do inverzije toka i vodena faza prolazi uz veće stupove (slika 33.).



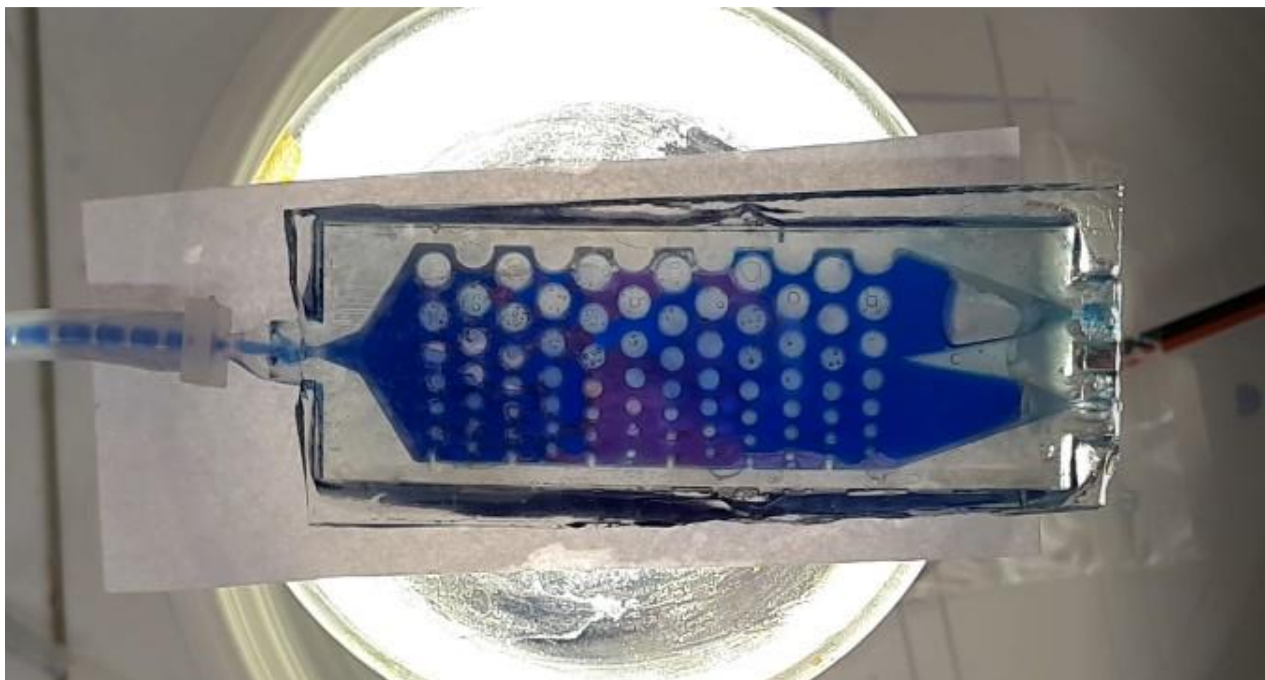
Slika 34. Separator v6.0-1 izlaz vodene faze kroz oba izlaza

Niti nakon početnog krivog toka nije došlo do stabilizacije tokova. Vodena faza puno je brže prolazila kroz stupove nego uljna faza te je zbog toga izlazila na oba izlaza dok je se uljna faza većinom akumulirala u prvoj polovici separatora (slika 34.).

Prilikom daljnjeg provođenja separacije došlo je do razbijanja toka vodene faze te je separacija prekinuta. Iz ovoga proizlazi zaključak da je brzina toka vrlo važan faktor prilikom separacije, kod separatora v6.0 potreban je sporiji tok da bi došlo do separacije.

#### 4.2.6. Separator v6.0-2

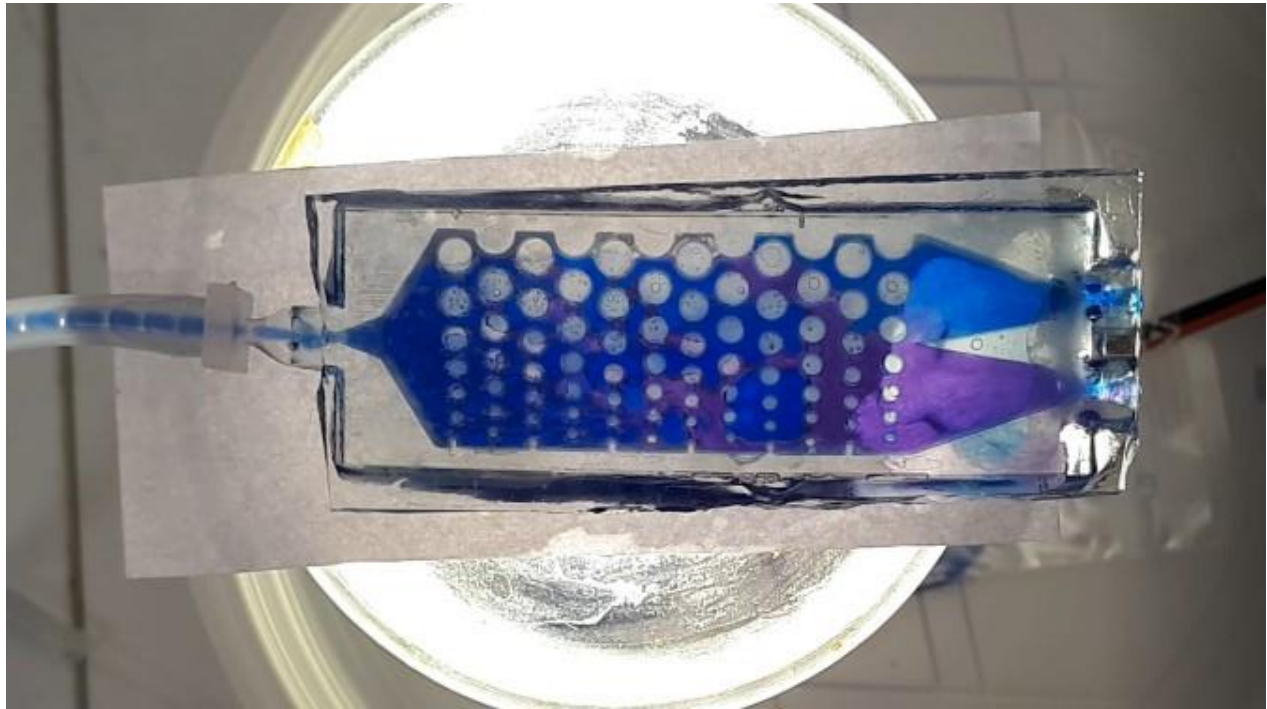
Kod ovog separatora nije došlo do stvaranja fronti različitih faza prilikom prolaska između stupova. Vodena faza se pokazala kao dominantna i prva prošla između svih stupova. Prevelika brzina toka onemogućila je separaciju. Adhezija postoji, ali je u ovom slučaju zanemarivi faktor zbog prevelike brzine toka.



Slika 35. Separator v6.0-2 vodena faza na oba izlaza

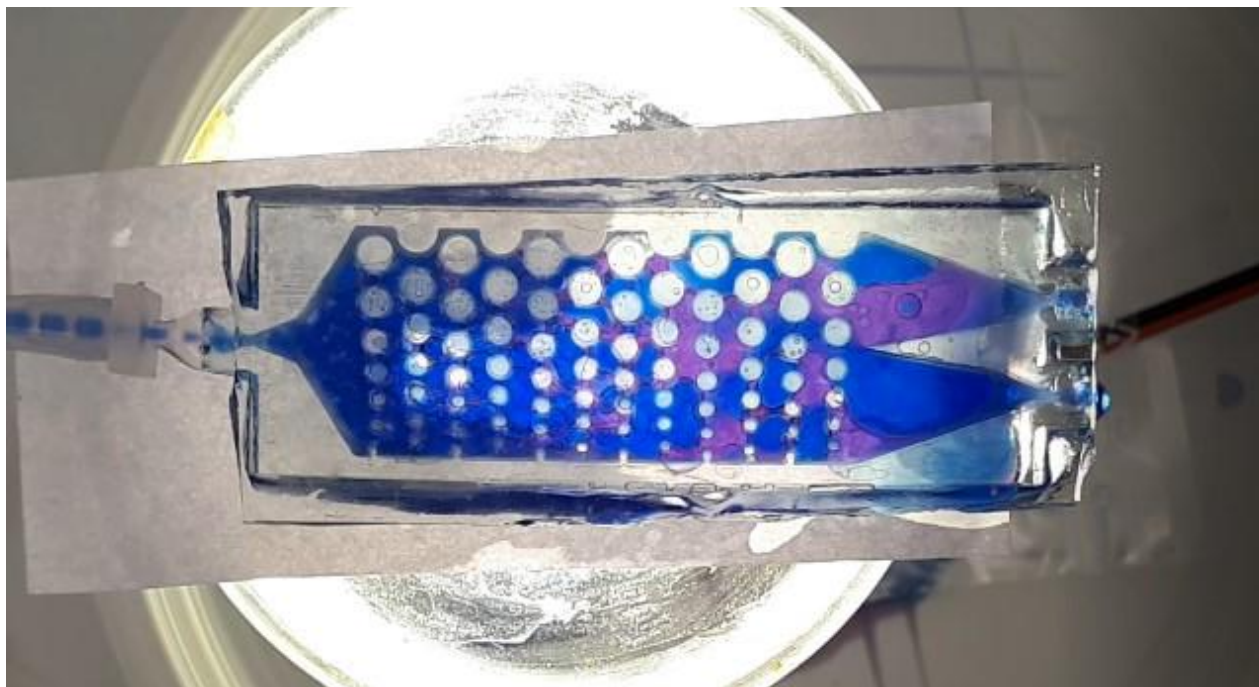


Vodena faza praktički je u vrlo kratko vrijeme ispunila separator i krenula izlaziti na oba izlaza (slika 35.). Uljna faza je za to vrijeme iz kapljica formirala segregirani tok kroz vodenu fazu. Iako iste količine vode i ulja ulaze u separator, ulje se akumuliralo u prvoj polovici separatora, dok je voda brzo prošla do izlaza iz separatora.



Slika 36. Separator v6.0-2 stabilizacija

Nakon početnog prolaska vode, uljna faza iz segregiranog tok formira normalan tok no dolazi do inverzije izlaza tokova, iako uljna faza većinom prolazi kroz veće stupova prije izlaza promijeni smjer i izlazi na izlazu gdje su manji stupovi (slika 36.).



Slika 37. Separator v6.0-2 inverzija izlaza

Nakon što se dogodila inverzija i ulje počinje izlaziti kroz izlaz na kraju manjih stupova ponovno dolazi do inverzije izlaza te uljna faza i vodena faza počinju izlaziti iz separatora kako je predviđeno. Do kraja provođenja separacije nije došlo do većih promjena. Vodena faza djelomično je ušla u izlaz uljne faze te je počela izlaziti s njom kroz izlaz (slika 37.)

## 5. ZAKLJUČAK

Korištenjem tehnologija aditivne proizvodnje moguće je izraditi funkcionalni prototip protočnog separatora kapljevina/kapljevina. Proizvodnja rastaljenim filamentom, zbog svojih ograničenja nije pogodna za ove veličine separatora. Stereolitografija je tehnologija s kojom su uspješno proizvedeni prototipovi različitih dimenzija i različitog rasporeda stupova. Nijedna od navedenih tehnologija nije uspjela izraditi separator s poklopcem te je radi toga kao poklopac korišteno staklo koje je zalijepljeno na separator ljepilom za staklo i/ili plastiku.

Radi toga što su konektori na separatoru stavljeni paralelno s najdužom stranicom separatora, prilikom šarfljenja PEEK konektora dolazi do izvijanja separatora što je dovelo do odvajanja spoja staklo-separator. Zbog toga je u eksperimentu korišten nerastavljivi spoj pomoću ravnog konektora tvrtke Cole-Parmer koji je zalijepljen poliakrilatnom smolom koju koristi pislač Formlabs Form2. Kao način optimiranja, konektor koji je smješten na separatoru trebalo bi postaviti okomito na smjer toka kapljevine kako ne bi došlo do izvijanja separatora prilikom spajanja šarfljenja PEEK konektora.

Separator v5.0-3 pokazao se kao najbolja iteracija jer je najduže separirao tokove i tokovi su bili točno usmjereni. Ova verzija separatora pogodna je za daljnje optimiranje.

Kod manjih separatora, v6.0, do izražaja je došla koalescencija kapljica te se ovoj veličini separatora mora usporiti ulazni protok i smanjiti razmak između stupova u smjeru gibanja kapljevine.

Kod osnovnih separatora, v4.0, do izražaja dolazi koalescencija i dolazi do inverzija toka faza te će se oni izuzeti od daljnjeg optimiranja.

Separatori bi se trebali optimirati na način da se smanji utjecaj koalescencije na tok kapljevina, jer se iz slika vidi kako je doprinos koalescencije pri prolasku kapljevine znatno veći od adhezije kapljevina na stupove u separatoru.

## 6. LITERATURA

- [1] Hrvatska enciklopedija, Broj 9 (Pri-Sk). Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 2004., str. 687
- [2] E. Beer, Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije, II. prerađeno i dopunjeno izdanje, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb, 1994., str. 631.
- [3] Tehnički leksikon, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 2007., str. 174.
- [4] A. Sander, Jedinične operacije u ekoinženjerstvu I dio Toplinski separacijski procesi, interna skripta, FKIT, Zagreb, 2011.
- [5] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing, Springer, 2014.
- [6] A. Gebhardt, Understanding Additive Manufacturing, Hanser Publishers, Munich, 2011.
- [7] M. Kutz, Applied Plastics Engineering Handbook, William Andrew, Elsevier, 2011.
- [8] URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided\\_design](https://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_design) (Pristup 07. lipnja 2018.)
- [9] URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fused\\_filament\\_fabrication](https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication) (Pristup 08. lipnja 2018.)
- [10] T. A. Oswald, Understanding Polymer Processing, 7. Additive Manufacturing, 2<sup>nd</sup> Edition, Elsevier, 2018.
- [11] URL: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/#sla-systems> (Pristup 08. lipnja 2018.)
- [12] T. Rahelić, Optimiranje polimernih mikroreaktora izrađenih aditivnom proizvodnjom, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, diplomski rad, 2017.
- [13] A. Truszkowska, A. P. Greaney, G. Jovanović, Multiscale lattice Boltzmann modeling of two-phase flow and retention times in micro-patterned fluidic devices, Computers & Chemical Engineering, Volume 95, 2016., str. 249-259



## 7. ŽIVOTOPIS

Ivan Karlo Cingesar [REDACTED] 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*".