



## Raziskovalna naloga

# RAZPRŠENOST WORTHINGTONOVEGA POV RATNEGA CURKA

**Raziskovalno področje: fizika in astronomija**

**Avtorica: Vita Robar**

**Mentor: mag. Marko Žigart**

**Šola: Srednja šola Slovenska Bistrica**

Slovenska Bistrica, marec 2023

### *Zahvala*

Iskreno se zahvaljujem svojemu mentorju mag. Marku Žigartu, ki mi je med raziskovalnim delom nudil pomoč in nasvete. Prav tako se zahvaljujem svojemu očetu Igorju Robarju, ki me je navdušil za fotografiranje hitrih sprememb, me naučil rokovanja s potrebnou opremo in mi pomagal pri eksperimentalnem delu raziskovanja. Za jezikovni pregled raziskovalne naloge se zahvaljujem Lidiji Ličen, prof. slovenščine.

# KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>TEORETIČNI DEL.....</b>	<b>2</b>
2.1	Worthingtonov povratni curek .....	2
2.1.1	Oblike Worthingtonovega povratnega curka .....	2
2.2	Aerosol .....	4
2.3	Dodane snovi.....	4
2.3.1	Površinsko aktivne snovi .....	4
2.3.2	Snovi za povečanje viskoznosti .....	5
2.4	Spremenljivke.....	5
2.4.1	Površinska napetost.....	6
<b>3</b>	<b>EKSPERIMENTALNI DEL.....</b>	<b>7</b>
3.1	Pripomočki in oprema .....	7
3.2	Potek dela .....	8
3.3	Razvoj Worthingtonovega povratnega curka .....	9
3.3.1	Voda .....	10
3.3.2	Kapljice z dodatkom ksantana .....	11
3.3.3	Milnica z 0,2 ml detergenta .....	12
3.3.4	Milnica z 0,6 ml detergenta .....	14
<b>4</b>	<b>REZULTATI IN RAZPRAVA .....</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>VIRI IN LITERATURA.....</b>	<b>26</b>

## KAZALO SLIK

Slika 1: Vrste povratnih curkov (prirejeno po <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266638642200042X">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266638642200042X</a> ) .....	3
Slika 2: Prikaz vloge temperature pri povratnem curku .....	6
Slika 3: Postavitev pripomočkov za fotografiranje .....	8
Slika 4: Aplikacija Miops .....	8
Slika 5: Nastavitev fotoaparata .....	9
Slika 6: Povratni curek z vodo (250 ms–350 ms) .....	10
Slika 7: Povratni curek z vodo (360 ms–470 ms) .....	10
Slika 8: Povratni curek z vodo (480 ms–570 ms) .....	11
Slika 9: Povratni curek s ksantanom (250 ms–360 ms) .....	11
Slika 10: Povratni curek s ksantanom (370 ms–480 ms) .....	12
Slika 11: Povratni curek s ksantanom (500 ms–555 ms) .....	12
Slika 12: Povratni curek z milnico (0,2 ml) (250 ms–350 ms) .....	13
Slika 13: Povratni curek z milnico (0,2 ml) (360 ms–470 ms) .....	13
Slika 14: Povratni curek z milnico (0,2 ml) (480 ms–650 ms) .....	14
Slika 15: Povratni curek z milnico (0,6 ml) (250 ms–350 ms) .....	15
Slika 16: Povratni curek z milnico (0,6 ml) (360 ms–470 ms) .....	15
Slika 17: Povratni curek z milnico (0,6 ml) (480 ms–610 ms) .....	16
Slika 18: Razpršenost povratnega curka pri vodi .....	20
Slika 19: Sekundarni povratni curek z vodo (480 ms–570 ms) .....	20
Slika 20: Razpršenost povratnega curka pri dodatku ksantana (290 ms–330 ms) ....	21
Slika 21: Sekundarni povratni curek pri dodatku ksantana (500 ms–555 ms) .....	21
Slika 22: Odstopanje v višini (440 ms) .....	22
Slika 23: Razpršenost povratnega curka pri milnici (0,2 ml) (270 ms–360 ms) .....	23
Slika 24: Sekundarni povratni curek pri milnici (0,2 ml) (520 ms–650 ms) .....	23
Slika 25: Nagnjenost v desno (400 ms), stabilizacija in odcepitev kapljice (440 ms– 460 ms) .....	24
Slika 26: Sekundarni povratni curek pri milnici (0,6 ml) (500 ms–610 ms) .....	24

## KAZALO PREGLEDNICE

Preglednica 1: Prikaz lastnosti snovi in izračunanih podatkov .....	19
---	----

## **POVZETEK**

Za to raziskovalno nalogo sem se odločila zaradi aktualnosti teme aerosolov, ki so zaradi patogenosti v laboratorijih zelo nevarni. Še dandanes se srečujemo s posledicami SARS-CoV-2, zato sem želela ugotoviti, pod kakšnimi pogoji se pri pojavu Worthingtonovega povratnega curka izloči najmanj aerosolov, da bi se tveganje za njihovo prenašanje še dodatno zmanjšalo. Da bi razpršenost zaradi različnih dejavnikov lahko primerjala, sem s fotoaparatom z objektivom za makrofotografijo in s sprožilcem kapljic fotografirala razvoj Worthingtonovega povratnega curka in skozi stopnje razvoja curka opazovala njegovo razpršenost. Moji spremenljivki sta bili površinska napetost in viskoznost tekočine. Curke na fotografijah sem analizirala in rezultate ovrednotila v povezavi z Webrovim in Reynoldsovim številom, s katerima v hidromehaniki analiziramo tokove. Ugotovila sem, da je najnižja razpršenost prisotna pri kapljici z dodatkom ksantana, ko je vrednost Webrovega števila 1570, Reynoldsovega pa 17,4.

**Ključne besede:** Worthingtonov povratni curek, aerosol, površinska napetost, viskoznost

## **ABSTRACT**

I wanted to do this research, because of the relevance of aerosols in the air. They can be very dangerous especially in laboratories. We are still coping with the effects of SARS-CoV-2. That is why I wanted to figure out under which conditions Worthington jet produces the least aerosols so the risk of aerosols with pathogens in laboratories would be as small as possible. For my research I used my camera with an objective lens for macro photography and a dropper, which is essentially a trigger for droplets. During my research I was changing surface tension and viscosity, which were my variables. When I had enough photo material I wanted to compare my photos with Weber and Reynolds numbers that are used in hydromechanics for analyzing different flows. In conclusion, I found out that the dispersion is the least noticeable when Xanthan gum was added. The value of Weber number is 1570, Reynolds number is 17,4. This type of flow is called a laminar flow, with which I confirmed my observations on photos I took.

**Key words:** Worthington jet, aerosol, surface tension, viscosity

## 1 UVOD

Worthingtonov povratni curek je pojav, ki je zaznamoval moje raziskovanje v drugem in tretjem letniku. Gre za pojav, ki se dogaja okoli nas, vendar ga brez ustreznih kamer in osvetlitve ne ujamemo.

V naravi se povratni curek najpogosteje pojavi ob padavinah, ko kaplje dežja padajo v različno globoke luže, kar ob močnem deževju opazimo kot odskok manjše kapljice ali trk kapljice v lužo. Trk kapljice v lužo povzroči tudi škropljenje, kar je znak drobnih kapljic, ki se pri tem oblikujejo. Prav zaradi odskakovanja majhnih kapljic tekočine je pojav Worthingtonovega povratnega curka zelo nezaželen v laboratorijih, na kmetijskih površinah in ne nazadnje tudi v zraku, ki ga dihamo. Z njim se namreč lahko prenašajo patogeni organizmi, kot so virusi, z nepravilnim škropljenjem s pesticidi pa se mnogo le-teh v obliki aerosolov širi v zrak in s tem škoduje tudi drugim, sicer ne ciljanim organizmom.

Med raziskovanjem me je zanimalo, kateri pogoji morajo biti izpolnjeni, da je število aerosolov najmanjše.

Glavni namen raziskovalne naloge je torej ugotoviti pogoje za najmanjšo razpršenost Worthingtonovega povratnega curka, in to dokazati na podlagi posnetih fotografij.

V teoretičnem delu se bom posvetila predvsem neznanim pojmom, dejavnikom, ki vplivajo na povratni curek, in formulam, ki jih bom uporabila za izračun.

V eksperimentalnem delu bom podrobno opisala potrebno opremo, pripomočke in postopek eksperimentalnega dela. Svoja opažanja bom tvorila na podlagi fotografij.

V razdelku rezultatov in razprave bom opažanja pri različnih dejavnikih zapisala ter izračunala Webrovo in Reynoldsovo število, s katerima bom v praksi primerjala rezultate.

V zaključku bom svoje delo zaokroženo komentirala, povzela, kaj sem spoznala, ter predlagala izboljšave in predloge za nadaljnje raziskovanje.

## 2 TEORETIČNI DEL

### 2.1 Worthingtonov povratni curek

Worthingtonov povratni curek je odboj kapljice po trku s tekočino v lovilnem bazenu. Spremembe ob trku se dogajajo nad gladino vode in pod njo. Pojav sta vzporedno raziskovala Worthington in Rayleigh.

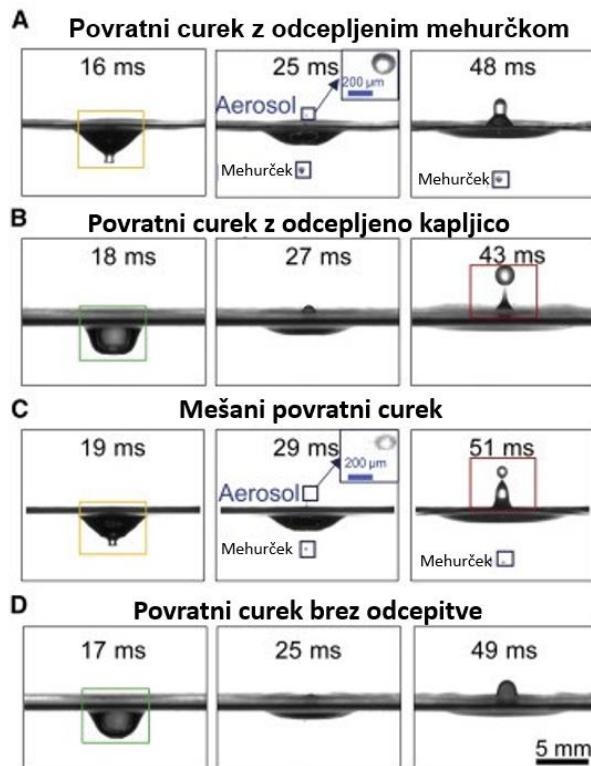
Angleški fizik Worthington je deloval predvsem v hidromehaniki, ki proučuje gibanje in spreminjanje tekočin brez zanimanja za njihovo notranjo zgradbo. Leta 1908 je izdal knjigo Study of Splashes, v kateri se je poglobil v nastanek povratnega curka in študijo, katere spremenljivke nanj vplivajo. S svojim delom je postal začetnik fotografiranja hitrih sprememb, kar je bilo treba opraviti za opazovanje povratnega curka.

#### 2.1.1 Oblike Worthingtonovega povratnega curka

Tvorba povratnega curka je odvisna od mnogo dejavnikov. Lahko rečemo, da sta lahko dva povratna curka pri enakih pogojih precej različna zaradi velikega nabora spremenljivk, ki curek spremljajo.

Ločimo štiri oblike, prepoznane po spremembi vrha, ki ga oblikuje kapljica po odboju od tekočine v lovilnem bazenu [4]. To so:

- povratni curek z odcepljenim mehurčkom,
- povratni curek z odcepljeno kapljico,
- mešani povratni curek,
- povratni curek brez odcepitve.



Slika 1: Vrste povratnih curkov (prirejeno po  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266638642200042X>)

Pri vsakem od naštetih se zaradi spremembe v potencialni energiji, ki se pretvori v kinetično, za kratek čas ustvari votlina. Zaradi površinske napetosti se stranici votline začneta premikati druga k drugi in s tem ustvarita povratni curek, ki se dvigne nad gladino vode s precej visoko hitrostjo. Nastanek aerosolov je odvisen od razdalje med lovilnim bazenom in sprožilcem kapljice, premera lovilnega bazena, temperature vode in vsebnosti površinsko aktivnih snovi. Razpršenost je kritična predvsem pri povratnem curku z odcepljenim mehurčkom in mešanim povratnim curkom.

Curek z odcepljenim mehurčkom nastane zaradi manjše vdolbine, ki ga povzroči trk kapljice. Površinska napetost vode povzroči krčenje vdolbine, pri čemer se dno vdolbine združi in formira zračni mehurček pod nastalim povratnim curkom, nad gladino pa se izločijo majhne kapljice, ki jih imenujemo aerosoli. Gibljejo se s hitrostjo od 2 do 2,5 m/s, odvisno od prvotnega volumna kapljice [4].

Kombinacijo povratnega curka z odcepljenim mehurčkom in curka z odcepljeno kapljico predstavlja mešani povratni curek. V primerjavi s curkom z odcepljenim mehurčkom se le-ta pri mešanem giblje počasneje. Tudi kapljica, ki se odcepi, je manjša od tipične kapljice pri že omenjenem.

## 2.2 Aerosol

Aerosoli predstavljajo trdne delce ali kapljice s tako majhnim volumnom in maso, da imajo zmožnost lebdenja v zraku ali drugih plinih [2]. Razdelimo jih v dve skupini:

- naravne,
- antropološke.

K naravnim spadajo predvsem mepla, prah in para gejzirjev. Med antropološke aerosole prištevamo vse, ki jih s svojo dejavnostjo v okolje vnašamo ljudje. To so pesticidi, gnojila in škropiva, ki se uporabljajo v kmetijstvu za izboljševanje kvalitete ter večanje kvantitete poljščin in vrtnih pridelkov, dim, izpušni plini in snovi, ki so pod pritiskom, kot so dezodoranti in laki za lase, ki zaradi freonov tanjšajo ozon, ki obdaja Zemljo.

Kljub svoji majhnosti imajo sposobnost prenašanja snovi, ki lahko resno vplivajo na podnebje ali prenašanje predvsem respiratornih bolezni. Zrak je dandanes vedno bolj onesnažen s plini, poleg tega so prisotni trdni delci, ki se združujejo s kapljevinskimi aerosoli, pri čemer nastajajo nove snovi. To lahko podkrepimo s primerom kislega dežja, pri čemer se voda združi z žveplovim trioksidom ( $\text{SO}_3$ ), ki nastane z reakcijo žveplovega dioksida ( $\text{SO}_2$ ) s kisikom. Ko  $\text{SO}_3$  reagira z vLAGO, torej z aerosoli, nastane žveplova kislina in s tem kisel dež, ki je zelo nevaren za ekosisteme zaradi svoje kislosti [5].

Predvsem v zimskem času so zelo aktualne respiratorne bolezni, ki se širijo med drugim tudi z aerosoli. Še vedno se srečujemo z virusom SARS-CoV-2 (s koronavirusom), ki se prenaša prav z aerosoli, pri katerem imajo najmanjše respiratorne kapljice življenjsko dobo v zraku tudi do nekaj ur. Najučinkoviteje se aerosolov izogibamo z rednim prezračevanjem, nošenjem mask in razkuževanjem pogosto uporabljenih površin.

## 2.3 Dodane snovi

### 2.3.1 Površinsko aktivne snovi

Površinsko aktivne snovi ali surfaktanti so snovi, ki tekočini znižujejo površinsko napetost. Za znižanje napetosti je potrebna majhna količina surfaktantov, med katere prištevamo emulgatorje, mila in detergente, šampone, balzame ...

Da bi zmanjšali razpršenost, si prizadevamo, da ima tekočina nizko Reynoldsovo število. Fenomen razpršenosti aerosolov, ki se prosto gibljejo po zraku, izhaja iz tega, da je Reynoldsovo število visoko. Označujemo ga z naslednjo enačbo:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (1)$$

Reynoldsovo število je brezrazsežno število brez enote. Definirano je z naslednjimi količinami: gostota tekočine ( $\rho$ ), hitrost kapljice ( $u$ ), premer kapljice ( $L$ ) in viskoznost tekočine ( $\mu$ ). [8]

Druga enačba, s katero je Worthingtonov povratni curek povezan, je Webrovo število. Uporabljamo ga za analiziranje tokov, predvsem tistih, v katerih se srečata ali trčita dve različni tekočini. Visoko vrednost tega števila prepoznamo, ko je med potekom povratnega curka veliko aerosolov, ki niso pravilnih, to je kroglastih oblik. Definiramo ga z naslednjo enačbo:

$$We = \frac{\rho v^2 l}{\sigma} \quad (2)$$

Tudi Webrovo število je brezrazsežno število brez enote. Enačba je sestavljena iz gostote tekočine ( $\rho$ ), hitrosti kapljice ( $v$ ), premora kapljice ( $l$ ) v števcu in iz površinske napetosti ( $\sigma$ ). [15]

### 2.3.2 Snovi za povečanje viskoznosti

S povišano viskoznostjo se tekočini zviša sposobnost upora proti deformaciji. Prvlak molekul med seboj je večji, kar povzroči, da je lahko tekočina izpostavljena večji količini stresa, ne da bi se deformirala. Snovi so odpornejše proti razcepljanju in ločevanju komponent med sabo. [13]

Viskoznost tekočin lahko povečamo z dodajanjem snovi za zgoščanje, kot je ksantan. Gumo ksantan proizvajajo s fermentacijo glukoze, saharoze ali laktoze. Je polisaharid, ki se uporablja predvsem v živilski industriji za zgoščanje, kar tekočinam poveča viskoznost. Dodaja se tudi kot stabilizator in preprečuje ločitev posameznih sestavin v izdelkih, ki vsebujejo olje in vodo. Z dodajanjem ksantana pospešujemo nastanek emulzije, čeprav sam po sebi emulgator ni.

Kljub temu da snov zgošča, lahko zmes z gumo za kratek čas izgubi svojo viskoznost, če je izpostavljena prekomernemu mešanju, stresanju ali žvečenju. Ko motnje prenehajo, se njeni viskoznost in gostota povrneta. [17]

## 2.4 Spremenljivke

Na tvorbo Worthingtonovega povratnega curka vpliva zelo veliko dejavnikov. Med njimi so volumen kapljice, temperatura vode v lovilnem bazenu, premer lovilnega bazena, razdalja med kapalko in lovilnim bazenom ter dodajanje površinsko aktivnih snovi, kot je detergent, ki zmanjšujejo površinsko napetost, ali različnih gum, kot je ksantan, ki spreminjajo viskoznost tekočine. Med raziskovanjem sem z dodajanjem snovi ugotavljala, ali se z dodatkom le-teh razpršenost Worthingtonovega povratnega curka resnično spreminja.

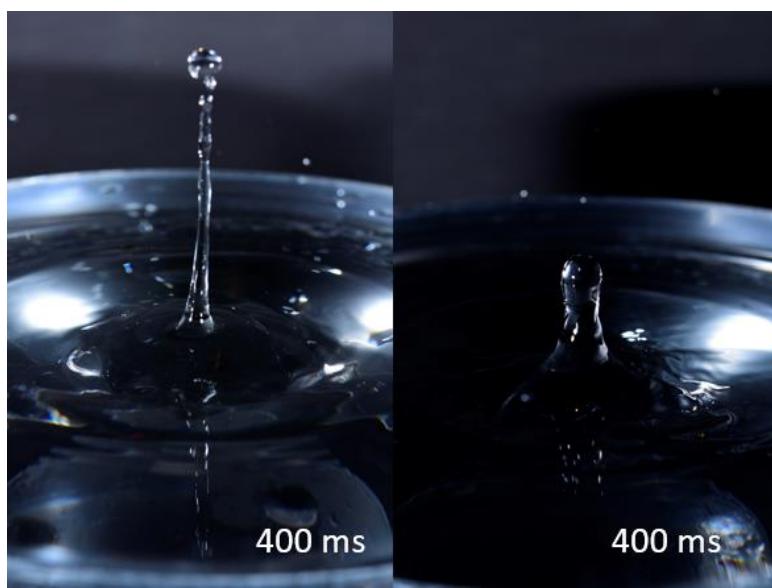
### 2.4.1 Površinska napetost

V svojem raziskovanju sem se osredotočila predvsem na površinsko napetost, ki sem jo spremenjala.

Površinsko napetost opazujemo na meji med gladino kapljevine in plinom. Zaradi šibkih privlačnih medmolekularnih sil povzroči, da se gladina kapljevine ozira vode obnaša kot napeta opna. Adhezija vodnih molekul je višja kot kohezija vodnih molekul z zrakom, zato ob kakršnih koli motnjah vode pride do nastanka aerosolov, saj napetost popusti. To si lahko predstavljamo na primeru napete gume, balona. Ko ga počimo, bo balon glede na svojo napetost bolj ali manj počil. Če je bilo opno bolj napeto, bo pok glasnejši in obratno. Enako se zgodi pri vodi, saj njena gladina deluje kot napeto opno. Višja kot je površinska napetost vode, več aerosolov naj bi se sprostilo.

Ko želimo čim manjšo razpršenost, si prizadevamo, da je vrednost le-te manjša kot površinska napetost vode. Površinska napetost vode je  $\sigma = 0,073 \frac{N}{m}$  pri  $20^\circ C$  [12]. To lahko storimo z milnico (zmesjo vode in detergenta), ki ima manjšo površinsko napetost, ki znaša od  $\sigma \doteq 0,045$  do  $0,025 \frac{N}{m}$ . [12]

Tudi temperatura ima pri površinski napetosti veliko vlogo. Le-ta se zvišuje z nižanjem temperature vode. Slika 2 prikazuje višinsko razliko med povratnima curkoma, ki sta bila fotografirana 400 ms po sprožitvi kapljice. Temperatura vode v lovilnem bazenu na levi je  $7^\circ C$ , na desni pa  $20^\circ C$ .



Slika 2: Prikaz vloge temperature pri povratnem curku

## 3 EKSPERIMENTALNI DEL

### 3.1 Pripromočki in oprema

Moja raziskovalna naloga temelji na fotografiranju in opazovanju razpršenosti kapljic, ki jih s posebno napravo spustimo v lovilni bazen, nastalo pa zajamemo z ustreznim fotoaparatom.

Pri tem je najpomembnejši fotoaparat, ki zajema dogajanje nad lovilnim bazenom. Svoje raziskovanje sem opravila z digitalnim zrcalnorefleksnim fotoaparatom Nikon D7200. Ima prilagodljivo zaklopko, ki nam nudi časovni razpon zaklopa od 1/8000 do 30 sekund, in različne načine proženja. Za svojo raziskavo sem uporabila metodo MUP (dvig zrcala). Fotoaparat je kompatibilen z brezžičnim daljinskim upravljalnikom. Vrednost ISO znaša od 100 do 25.600. S fotoaparatom lahko ostrimo ročno ali samodejno. Fotoaparat lahko priklopimo na omrežje Wi-Fi, kompatibilen je tudi z različnimi objektivi, kar nam omogoča večje povečave.

Ker za prikazovanje razpršenosti ni dovolj le fotoaparat, sem uporabljala objektiv Sigma. Takšni objektivi se uporablajo za makrofotografijo in nam odprejo okno v novi svet. Pozorni moramo biti na dve vrednosti. Pomembna je nastavitev ISO, saj z njo reguliramo šum na fotografiji. Višji kot je ISO, opaznejši bo šum na fotografiji. Druga vrednost je razpon zaslone, ki zajema vrednosti od F2,8 do F32. Vloga zaslone je reguliranje količine svetlobe, ki pade na svetlobni senzor. Z njo reguliramo svetlost fotografije. Višja kot je vrednost zaslone, manjša je odprtina, skozi katero lahko svetloba prehaja. [6]

Prav zaradi zelo zaprte zaslone potrebujemo za ustrezno osvetlitev močne bliskavice, ki so tudi zelo hitre. Hitrost uporabljene bliskavice je lahko 1/64 ali 1/128 sekunde. S hitrostjo in z močjo posrbijo, da je slika dobro osvetljena in ostra.

Bliskavice so povezane s sprožilcem kapljic, ki z magnetnim ventilom regulira volumen kapljice. Le-ta se meri v milisekundah (ms). Izmeri torej, kako dolgo je bil ventil na sprožilcu odprt. Sprožilec kapljic in bliskavici med seboj povežemo, s tem se uskladi padec kapljice z zamikom bliskavice. Povezano še enkrat povežemo z mobilno aplikacijo s tehnologijo Bluetooth. Na aplikaciji kasneje upravljamo z volumnom in zamikom bliskavice, da dobimo želeno stopnjo (fazo) Worthingtonovega povratnega curka.



### 3.2 Potek dela

Prvi korak v raziskovanju je bil postavitev kamere, bliskavic, sprožilca kapljic in lovilne posode, napolnjene z vodo. Najprej sem sprožilec kapljic usmerila v središče svoje posode, da sem lahko na fotoaparatu, ki sem ga nastavila na pogled v živo, kapljice kasneje ujela na sredino fotografije. Fotoaparat sem postavila 53 cm od središča posode in pod kotom 35 ° nad gladino vode. S tem sem imela omogočeno večje vidno polje za opazovanje aerosolov. Ključni deli priprave na fotografiranje so bili nastavitev zaslonke in vrednost ISO ter nastavitev časa odprtja zaklopke in časa trajanja bliskavice. Zaslonko sem nastavila na F10, ISO na 400, zaklopka je bila odprta šest sekund, čas trajanja bliskavice je bil 1/128 sekunde.



Slika 3: Nastavite fotoaparata

Naslednji korak je bil ročno ostrenje. Na premer posode sem postavila ravnilo, na katerem je stal naključen predmet. S proženjem kapljic in pogledom v živo na fotoaparatu sem ročno izbrala polje, ki ga je fotoaparat izostril na vsaki fotografiji.

Vnaprej sem si določila tudi časovne zamike bliskavice, da sem po opravljenem fotografiranju fotografije lahko primerjala. Delo mora potekati v skoraj popolni temi, saj je ključno, da na fotografijah ni motenj. Če postopek zmotimo z lučjo, ko je zaklopka še odprta, se Worthingtonov povratni curek na sliki ne bo videl. V ustreznih pogojih bo fotoaparat zajel le trenutek, ko se sproži bliskavica.

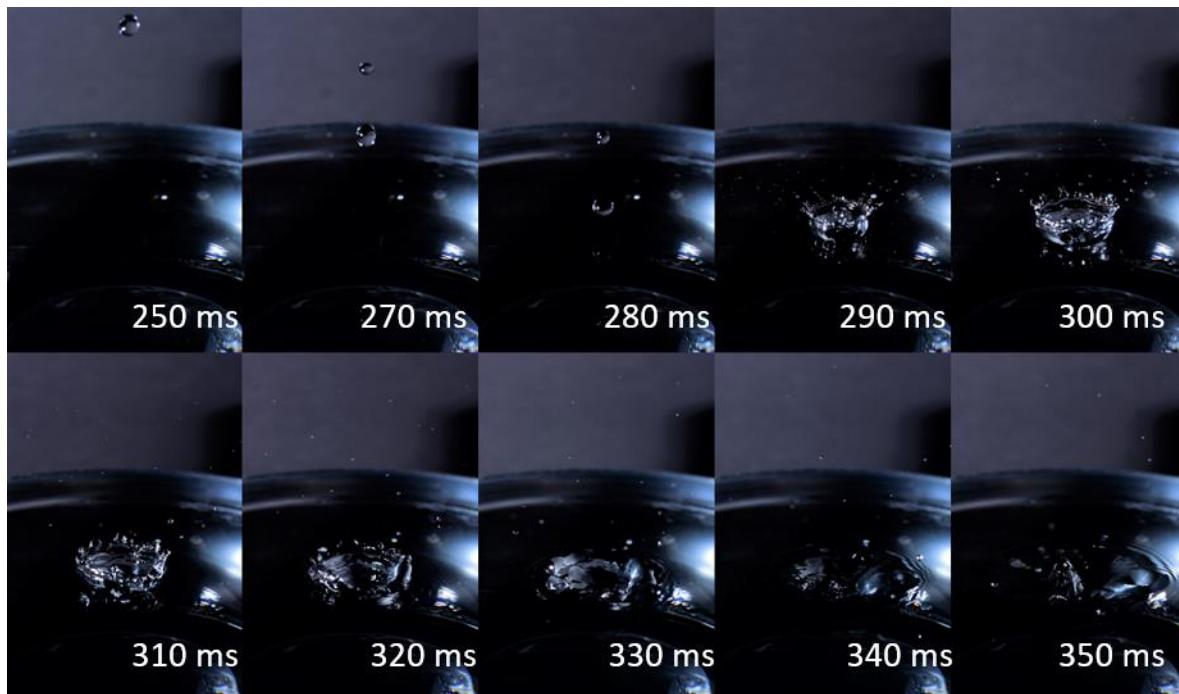
Za vsak časovni zamik sem naredila minimalno dve fotografiji, da sem lahko absolutne napake izločila na podlagi podobnega vzorca na ostalih fotografijah. Z različnimi časovnimi zamiki sem dobila razvoj Worthingtonovega povratnega curka, s katerim sem opazovala razpršenost pri dodajanju različnih dodatnih snovi.

### 3.3 Razvoj Worthingtonovega povratnega curka

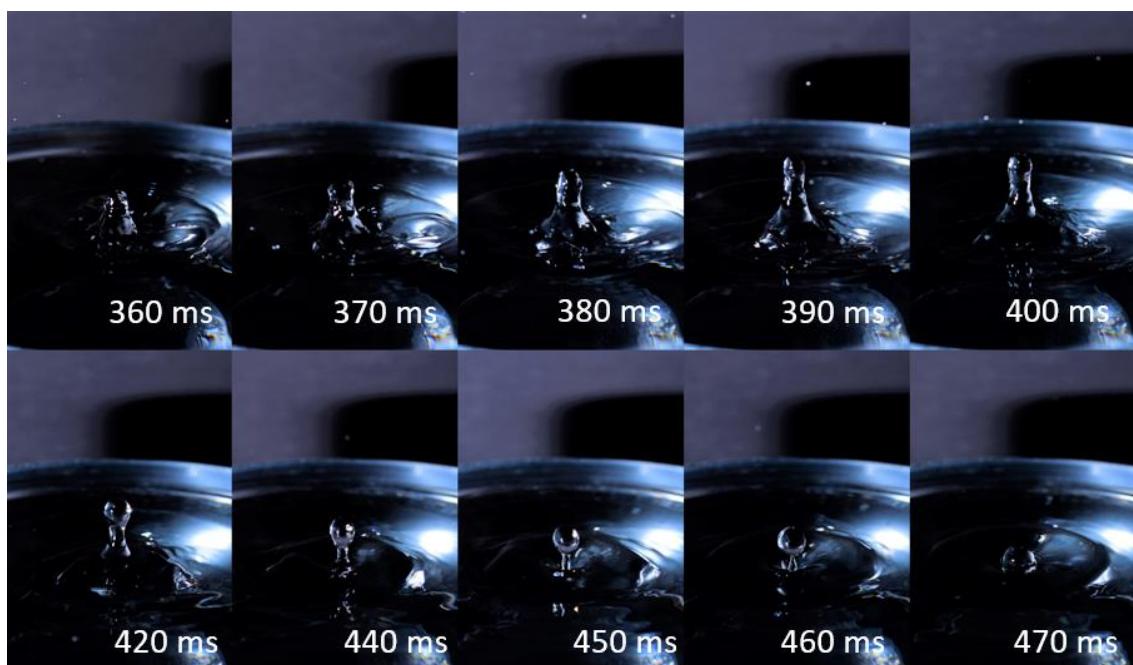
Da bi najbolje videla, ob kakšnih pogojih se razpršenost spremeni, sem pojavi zajela v različnih fazah. Fotografije so zajete v časovnem razmiku 10–20 ms, razpon fotografij pa zajema časovno obdobje 250–630 ms, kar je odvisno od trajanja Worthingtonovega povratnega curka, saj se po vseh primarnih povratnih curkih pojavijo tudi sekundarni povratni curki.

### 3.3.1 Voda

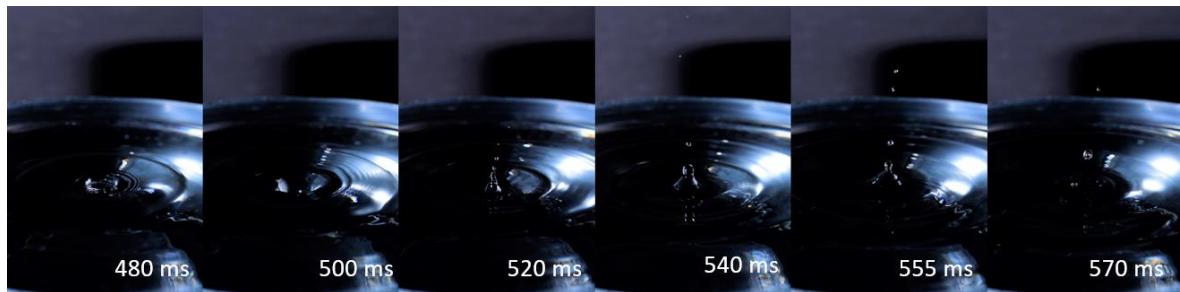
Worthingtonov povratni curek z vodo brez dodanih snovi sem fotografirala, saj je to moja kontrolna skupina, s katero bom primerjala ostale fotografije. Temperatura vode je znašala 20 °C. V časovnem obdobju od 250 ms do 570 ms od sprožitve kapljice sem fotografirala 26 faz povratnega curka.



Slika 6: Povratni curek z vodo (250 ms–350 ms)



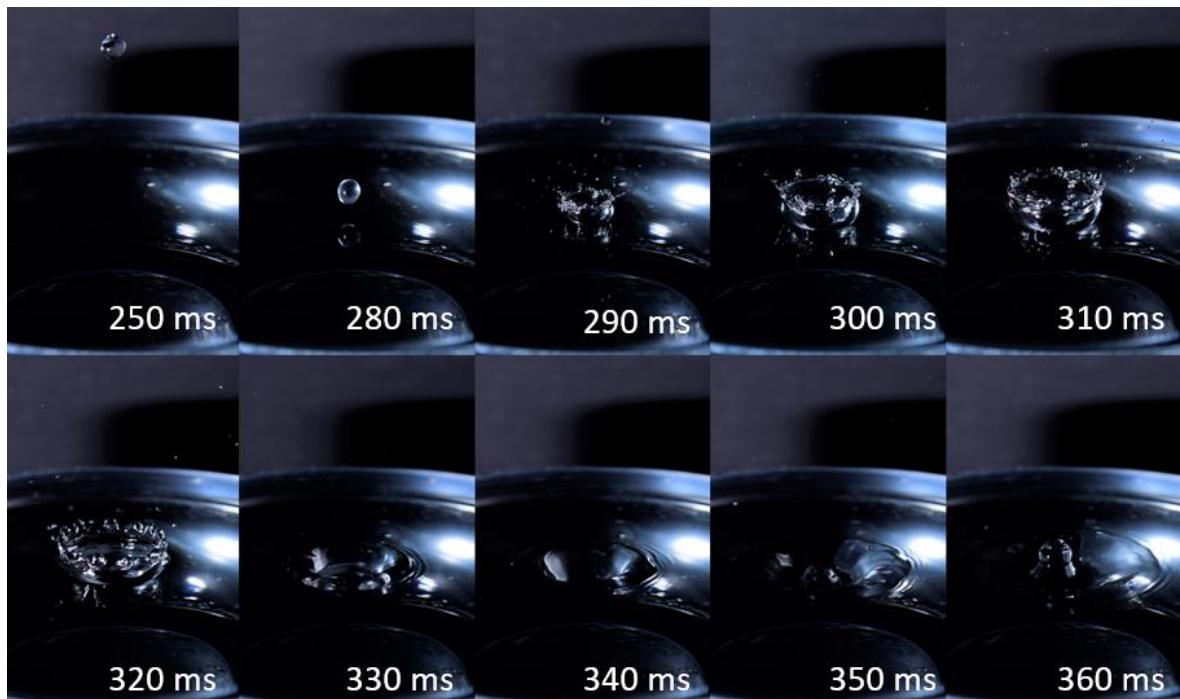
Slika 7: Povratni curek z vodo (360 ms–470 ms)



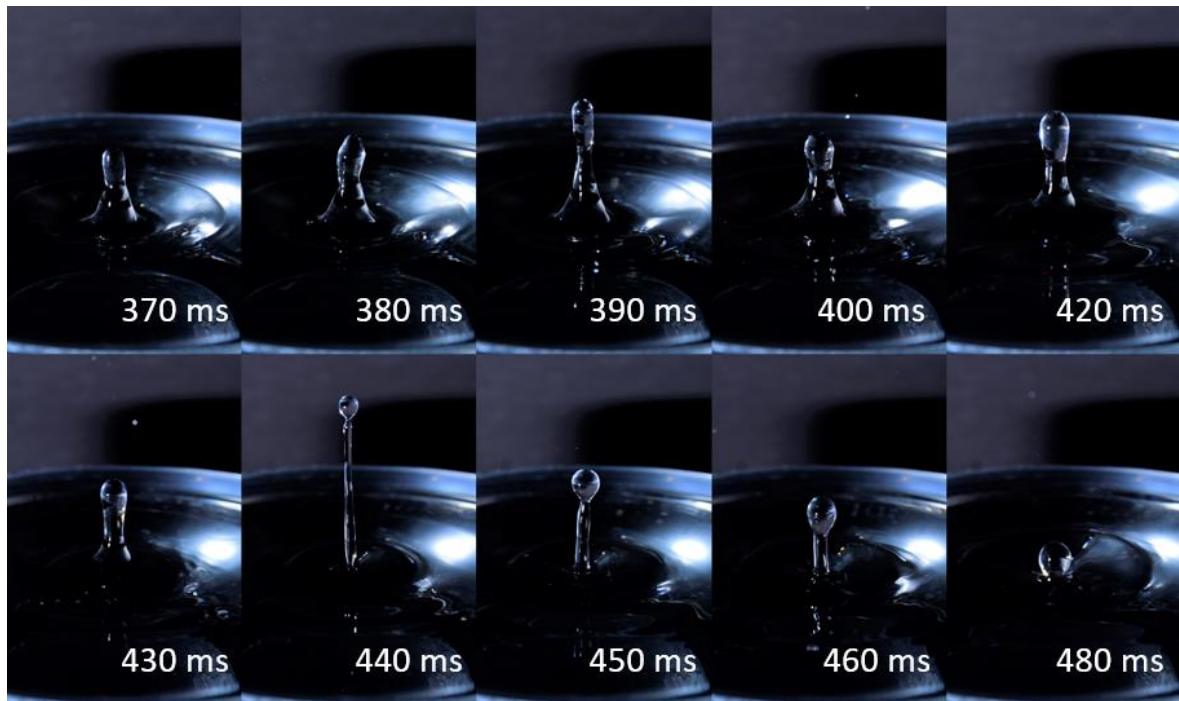
Slika 4: Povratni curek z vodo (480 ms–570 ms)

### 3.3.2 Kapljice z dodatkom ksantana

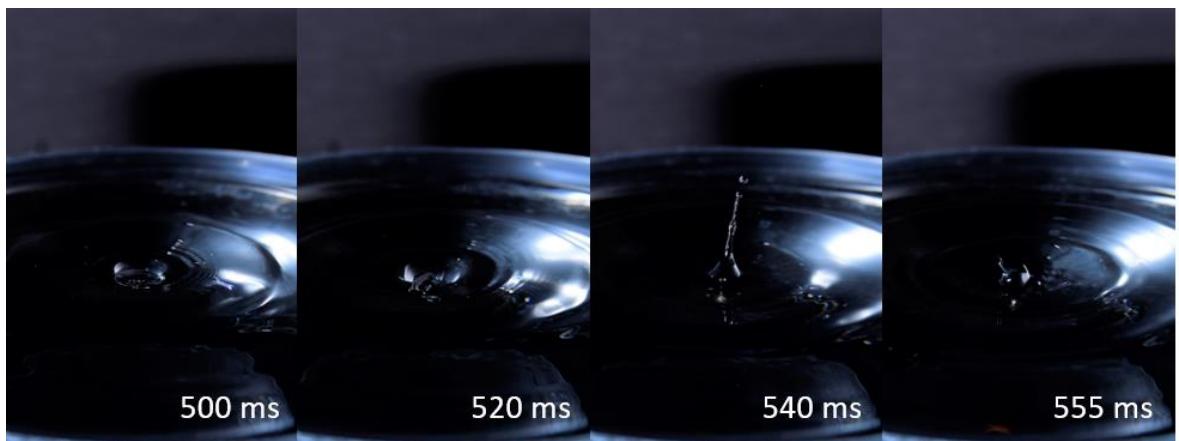
Pri dodatku gume za večjo viskoznost kapljice sem ubrala drugačno pot kot pri milnici, ki sledi. Ksantan sem namreč dodala v sprožilec kapljic in ne v lovilni bazen. S tem sem dosegla boljšo povezanost med molekulami v kapljici. V 0,5 l vode sem dodala 5 g ksantana v prahu. Raztopina ksantana v vodi je 1-odstotna. Temperatura vode je znašala 20 °C. V časovnem obdobju od 250 ms do 555 ms od sprožitve kapljice sem fotografirala 24 faz povratnega curka.



Slika 5: Povratni curek s ksantanom (250 ms–360 ms)



Slika 10: Povratni curek s ksantanom (370 ms–480 ms)



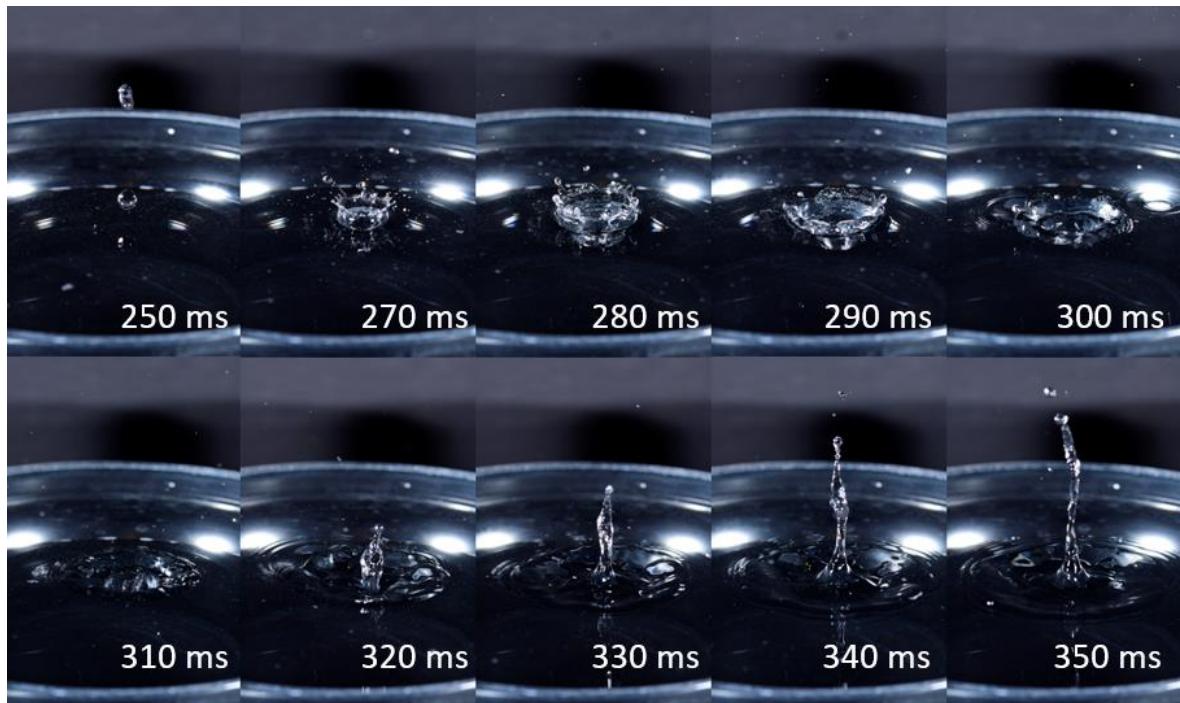
Slika 11: Povratni curek s ksantanom (500 ms–555 ms)

### 3.3.3 Milnica z 0,2 ml detergenta

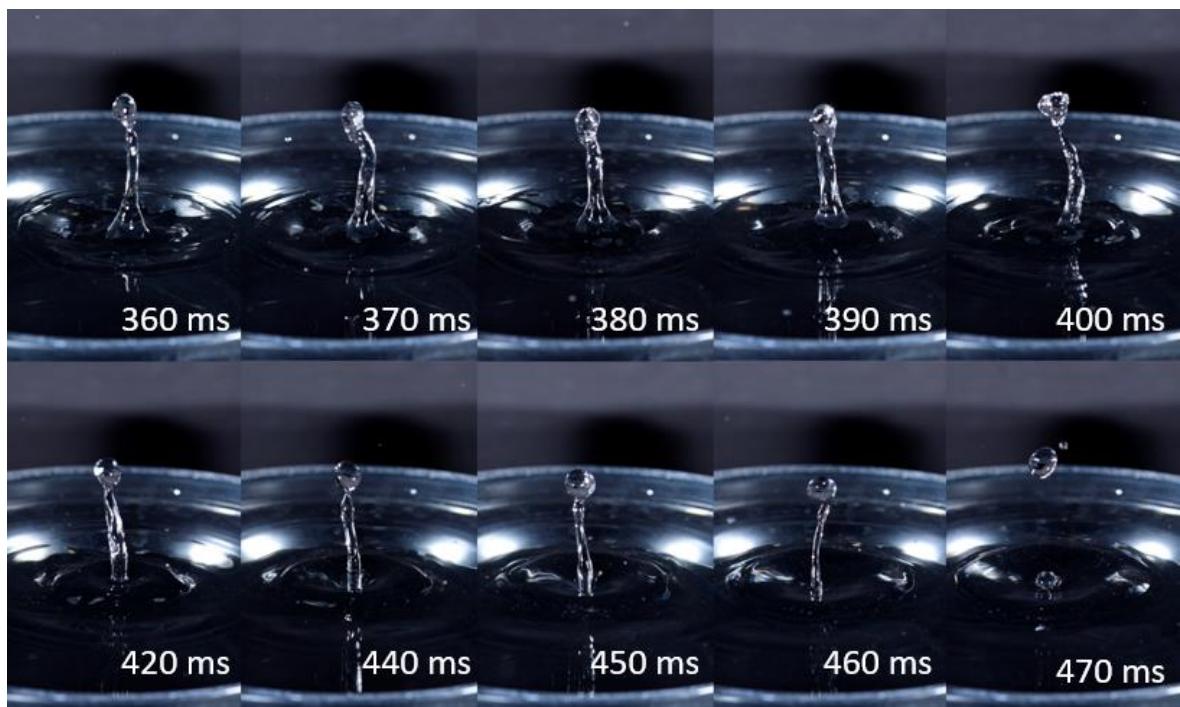
Detergent sem dodala v lovilni bazen. Ker so učinki surfaktantov vidni zelo hitro, so potrebne le majhne količine le-teh. V 2 l vode sem dodala 0,2 ml detergента. Razmerje med vodo in detergentom je 10000 : 1. Temperatura vode je znašala 20 °C.

Med fotografiranjem sem morala biti precej pozorna, saj lahko Worthingtonov povratni curek z dodatkom energenta ustvari milne mehurčke, ki so na fotografijah moteči.

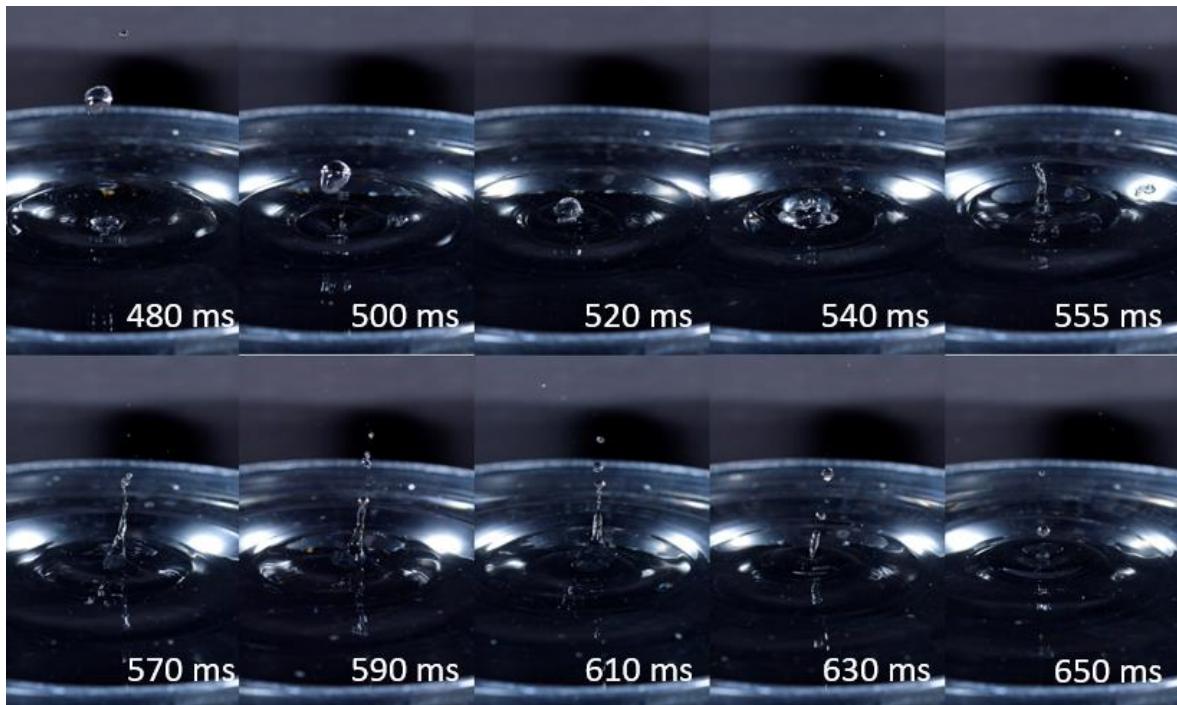
V časovnem obdobju od 250 ms do 630 ms od sprožitve kapljice sem fotografirala 30 faz povratnega curka.



Slika 12: Povratni curek z milnico (0,2 ml) (250 ms–350 ms)



Slika 13: Povratni curek z milnico (0,2 ml) (360 ms–470 ms)

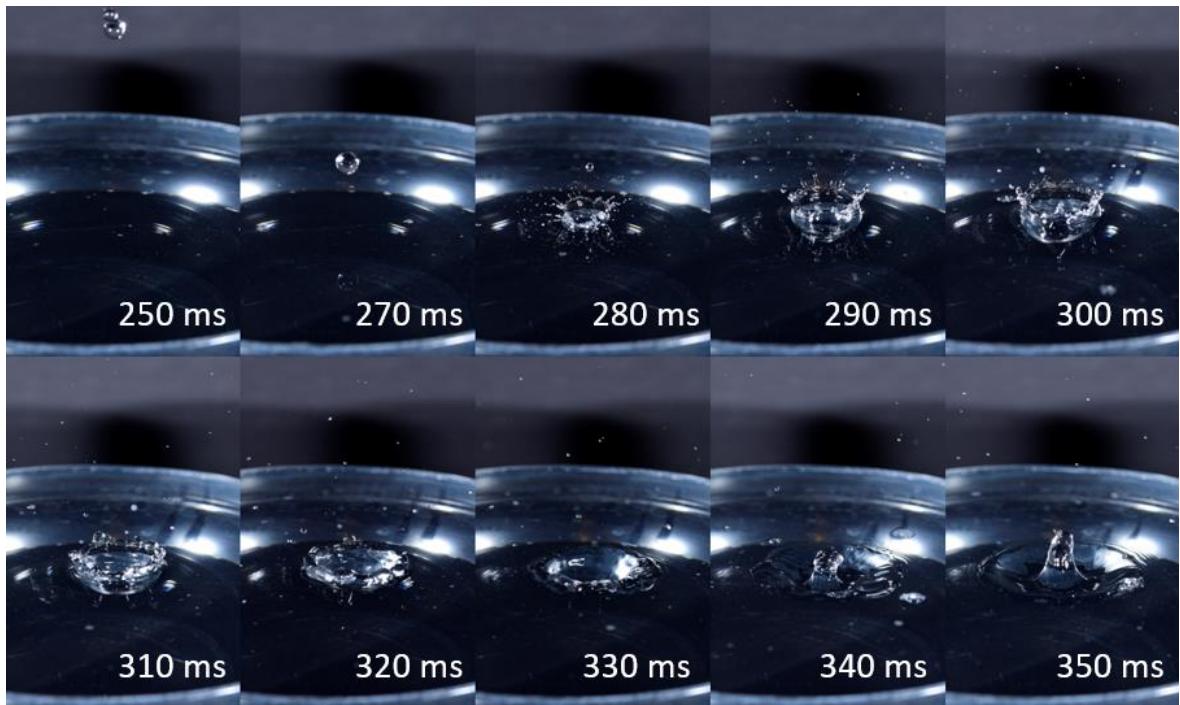


Slika 6: Povratni curek z milnico (0,2 ml) (480 ms–650 ms)

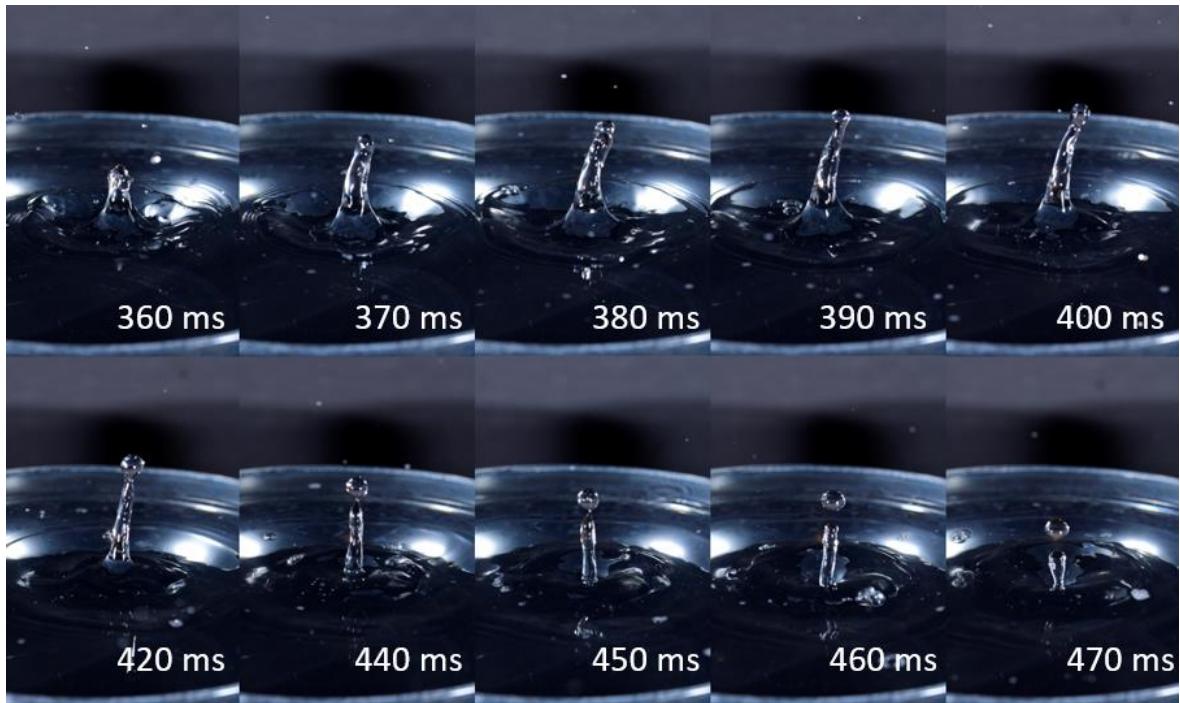
### 3.3.4 Milnica z 0,6 ml detergenta

V posodo z 0,2 ml detergenta sem dodala še 0,4 ml detergenta. Fotografiranje pri takšnih pogojih je bilo še zamudnejše, saj so se milni mehurčki pojavljali po vsaki sproženi kapljici. Razmerje med vodo in detergentom je 3333 : 1. Temperatura vode je znašala 20 °C.

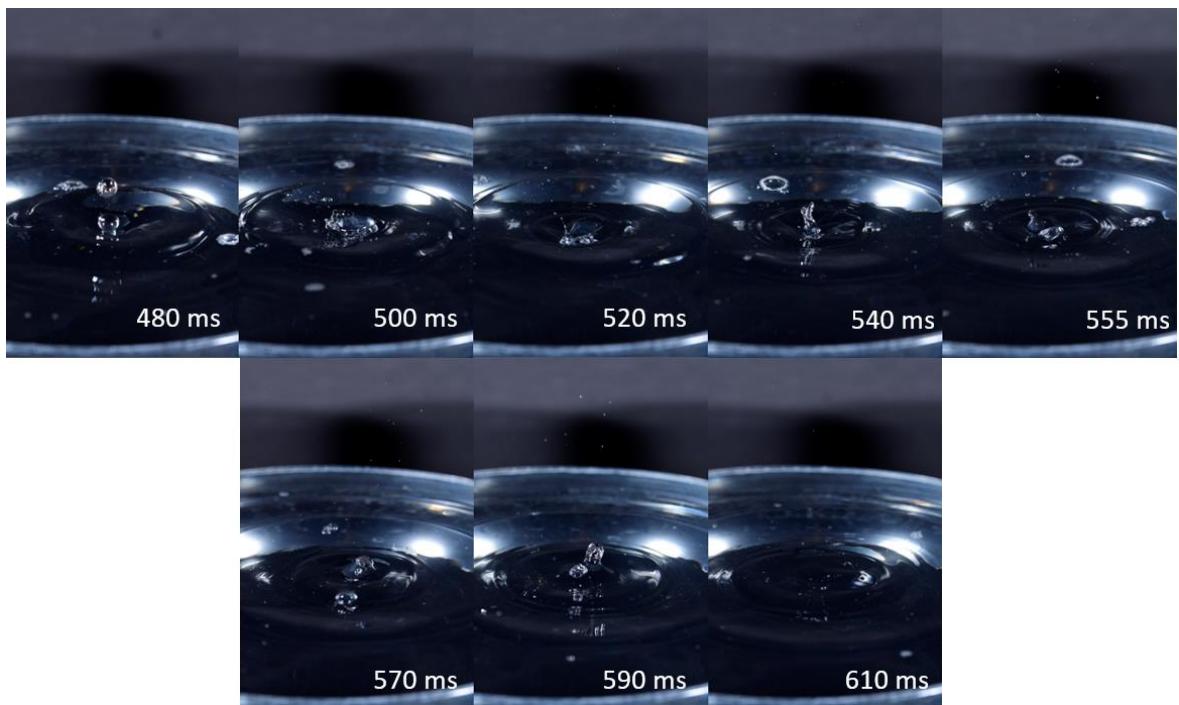
V časovnem obdobju od 250 ms do 610 ms od sprožitve kapljice sem fotografirala 28 faz povratnega curka.



Slika 15: Povratni curek z milnico (0,6 ml) (250 ms–350 ms)



Slika 16: Povratni curek z milnico (0,6 ml) (360 ms–470 ms)



Slika 7: Povratni curek z milnico (0,6 ml) (480 ms–610 ms)

## 4 REZULTATI IN RAZPRAVA

Cilj raziskovalne naloge je bil pokazati vrednosti Reynoldsovega in Webrovega števila pri Worthingtonovih povratnih curkih z vodo in ostalimi dodanimi snovmi.

Za izračun Webrovega števila sem morala predhodno izračunati še gostoto kapljice, hitrost, s katero je padala, in njen premer.

Gostoto kapljice sem izračunala po naslednji enačbi:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

Ker je masa podatek, ki ga nisem poznala, volumen pa je podan v ms, sem oba podatka izračunala. Volumen kapljice sem nastavila na 15 ms. V manjšo posodico sem nakapljala 30 kapljic vode. Tehtala sem z elektronsko tehtnico, volumen pa sem izmerila z injekcijsko brizgo. Z naslednjimi enačbami sem dobila maso in volumen vodne kapljice:

$$m (\text{vodne kapljice}) = \frac{5,0 \text{ g}}{30} = 0,17 \text{ g}$$

$$V (\text{vodne kapljice}) = \frac{5,6 \text{ ml}}{30} = 0,19 \text{ ml}$$

Enak postopek sem uporabila tudi pri kapljici s ksantanom:

$$m (\text{kapljice s ksantanom}) = \frac{7,0 \text{ g}}{30} = 0,23 \text{ g}$$

$$V (\text{kapljice s ksantanom}) = \frac{6,4 \text{ ml}}{30} = 0,21 \text{ ml}$$

Iz izračunanih podatkov sledijo izračuni gostote za obe kapljici:

$$\rho (\text{vodne kapljice}) = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho (\text{kapljice s ksantanom}) = \frac{m}{V} = \frac{0,23 \text{ g}}{0,21 \text{ ml}} = 1,09 \frac{\text{g}}{\text{ml}} = 1090 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Naslednja vrednost, ki sem jo morala izračunati, je premer kapljice. To sem storila z enačbo za volumen krogle:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (4)$$

$$r (\text{vodne kapljice}) = \sqrt[3]{\frac{V}{\frac{4}{3}\pi}} = \sqrt[3]{\frac{0,187 \text{ cm}^3}{\frac{4}{3}\pi}} = 0,355 \text{ cm}$$

$$2r = 0,710 \text{ cm}$$

Premer kapljice s ksantanom:

$$r (\text{kapljice s ksantanom}) = \sqrt[3]{\frac{\frac{4}{3}\pi}{V}} = \sqrt[3]{\frac{0,227 \text{ cm}^3}{\frac{4}{3}\pi}} = 0,378 \text{ cm}$$

$$2r = 0,757 \text{ cm}$$

Hitrost kapljic sem izračunala iz enačbe prostega pada brez upoštevanja zračnega upora. Čas padanja sem določila z zamikom bliskavice od sprožitve kapljice:

$$v = tg = 0,290 \text{ s} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2,84 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Izkazalo se je, da se časa kapljice vode in kapljice z dodatkom ksantana razlikujeta za nekaj ms, zato lahko njuno hitrost enačimo.

Z vsemi pridobljenimi podatki lahko izračunamo Webrovo število za vodo, vodo z dodatkom ksantana in vodo z detergentom.

$$We (\text{vode}) = \frac{\rho v^2 l}{\sigma} = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (2,84 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \times 0,0071 \text{ m}}{0,073 \frac{\text{N}}{\text{m}}} = 784$$

$$We (\text{milnice z } 0,2 \text{ ml detergenta}) = \frac{\rho v^2 l}{\sigma} = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (2,84 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \times 0,0071 \text{ m}}{0,045 \frac{\text{N}}{\text{m}}} \\ = 1273$$

$$We (\text{milnice z } 0,6 \text{ ml detergenta}) = \frac{\rho v^2 l}{\sigma} = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (2,84 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \times 0,0071 \text{ m}}{0,025 \frac{\text{N}}{\text{m}}} \\ = 2291$$

$$We (\text{kapljice s ksantanom}) = \frac{\rho v^2 l}{\sigma} = \frac{1090 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (2,84 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \times 0,0076 \text{ m}}{0,042 \frac{\text{N}}{\text{m}}} = 1590$$

Za vse štiri kategorije sem izračunala tudi Reynoldsovo število:

$$Re (\text{vode}) = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 2,84 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,0071 \text{ m}}{0,001 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} = 18006 = 2,0 \times 10^4$$

$$Re \text{ (kapljice s ksantanom)} = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{1090 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 2,84 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,0076 \text{ m}}{1,35 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} = 17,4$$

Za izračun Reynoldsovega števila pri milnici sem uporabila enako dinamično viskoznost kot pri vodi. Količini detergenta sta prenizki, da bi z njima občutno spreminali viskoznost tolikšne količine vode.

Rezultate svojega raziskovanja sem zapisala v obliki preglednice.

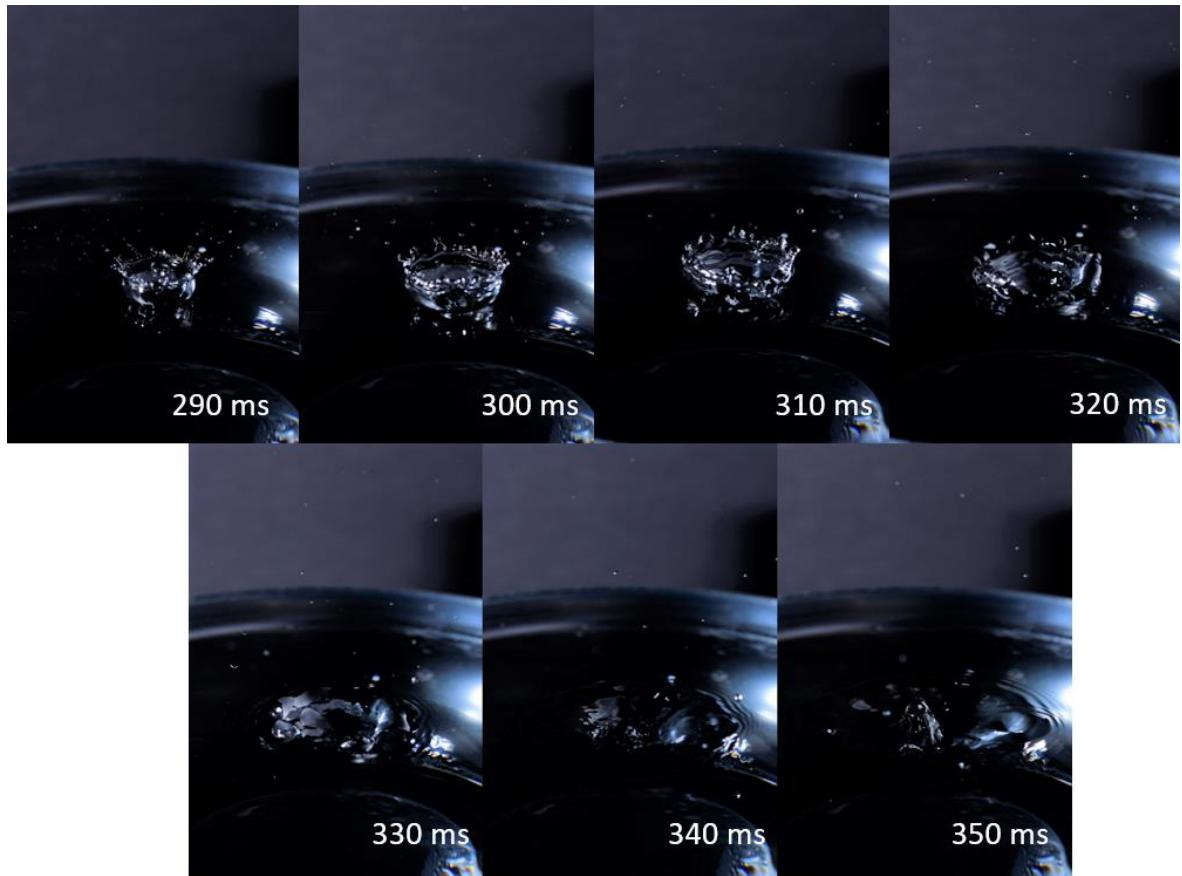
**Preglednica 1: Prikaz lastnosti snovi in izračunanih podatkov**

Volumen kapljice [cm <sup>3</sup> ]	Dodana snov	Webrovo število	Reynoldsovo število	Vrsta toka
0,187	/	784	$2,0 \times 10^4$	turbulentni
0,227	Ksantan	1590	17,4	laminarni
0,187	detergent (0,2 ml)	1273	$< 2,0 \times 10^4$	turbulentni
0,187	detergent (0,6 ml)	2291	$< 2,0 \times 10^4$	turbulentni

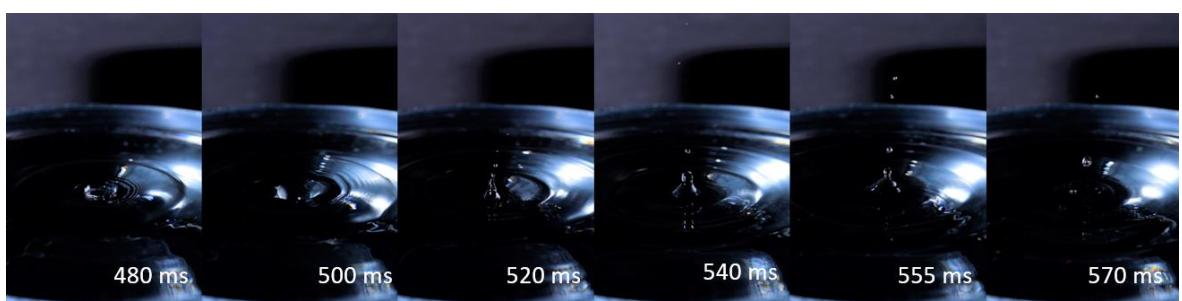
Webrovo in Reynoldsovo število sta povezani. Obe sta prisotni pri trkih s tekočinami. Reynoldsovo število je visoko, če se po trku dveh tekočin ustvari veliko aerosolov in manjših kapljic, kar je v veliki meri odvisno od dinamične viskoznosti tekočine. Če bo le-ta višja, se bo Reynoldsovo število znižalo, posledica tega je manj aerosolov. Visoko Webrovo število prikazuje predvsem kapljice, ki nastanejo po trku in niso v obliki kroglice. Po definiciji Webrovega števila vidimo, da nanj vpliva površinska napetost. Če bo torej površinska napetost višja, bo takšnih kapljic manj. Rezultate iz preglednice sem želela preveriti s svojimi fotografijami in jih s tem primerjati.

Razpršenost Worthingtonovega povratnega curka z vodo je največja ob prvem trku kapljice v lovilni bazen. Aerosoli, ki so rezultat trčenja, so na vidnem polju opazni od 290 do 350 ms. Do 380 ms aerosoli po večini padejo nazaj v lovilni bazen in jih do 400 ms na vidnem polju več ne opazimo. Pri primeru tega povratnega curka se kapljica ne odcepi popolnoma. Kljub temu se oblikuje kapljica, ki povzroči sekundarni trk, s tem pa sekundarni in manjši povratni curek. Tudi v primeru manjšega povratnega curka se oblikujejo aerosoli, pri katerih se kapljica odcepi. Časovno obdobje sekundarnega povratnega curka traja od 480 do 570 ms.

Izračunano Webrovo število je najmanjše od vseh ostalih. Vsi aerosli so bili v obliki kroglic. Reynoldsovo število je visoko. To lahko sklepamo iz fotografij, saj so aerosoli zelo opazni.



Slika 18: Razpršenost povratnega curka pri vodi



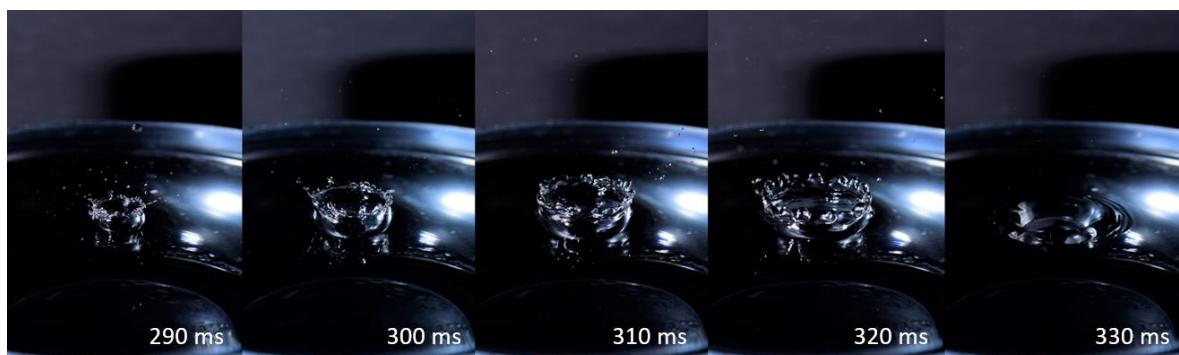
Slika 19: Sekundarni povratni curek z vodo (480 ms–570 ms)

Pri kapljici z dodatkom ksantana sem opazila razliko že med fotografiranjem. Povratni curek se mi je zdel višji in masivnejši kot povratni curek z vodo. Kljub temu da so bile nastavitev volumna enake, sem ugotovila, da je imela kapljica s ksantanom večji volumen za  $0,02 \text{ cm}^3$  in je bila težja za 0,056 g.

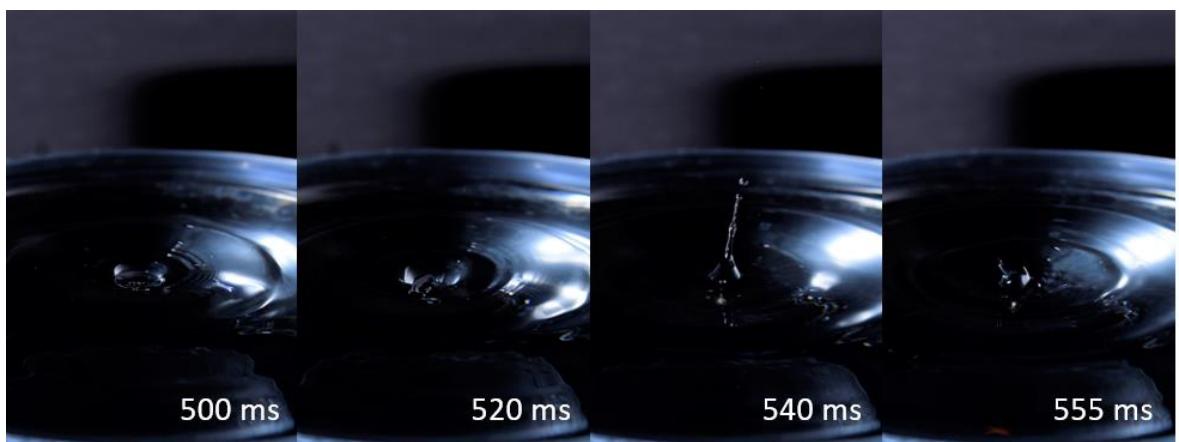
Aerosoli so se pojavili ob trku, a ne v takšni meri kot pri povratnem curku z vodo. Tudi čas, v katerem so aerosoli vidni v vidnem polju, je manjši. Gre za časovno obdobje od 290 ms

do 330 ms. Povratni curek je ostal nad gladino precej dolgo in v sorazmerno podobnem položaju. 440 ms od sprožitve kapljice iz sprožilca se je pojavilo precejšnje odstopanje v višini povratnega curka. Ker sem v kapljico dodala ksantan, so vezi med molekulami močnejše, s tem pa potrebujejo večjo silo, da se deformirajo. Tudi pri primeru kapljice s ksantanom se je pojavil sekundarni povratni curek, ki ni tipične oblike. Kljub temu da gre za sekundarni povratni curek, se tekočina ni razpršila, temveč je ostala v enem curku z odcepljeno kapljico.

Webrovo število znaša 1590, kar pomeni, da bi lahko med fotografiranjem zaznali oblike aerosolov, ki niso tipične, česar na svojih fotografijah ne opazim. Reynoldsovo število je zelo nizko, znaša le 17,4. Tok, ki je za takšno vrednost značilen, je laminaren, kar pomeni, da so tokovnice gladke in urejene. Aerosoli se v primerjavi z vodo ali milnicama pojavijo v manjšem številu in krajšem časovnem obdobju.



Slika 20: Razpršenost povratnega curka pri dodatku ksantana (290 ms–330 ms)



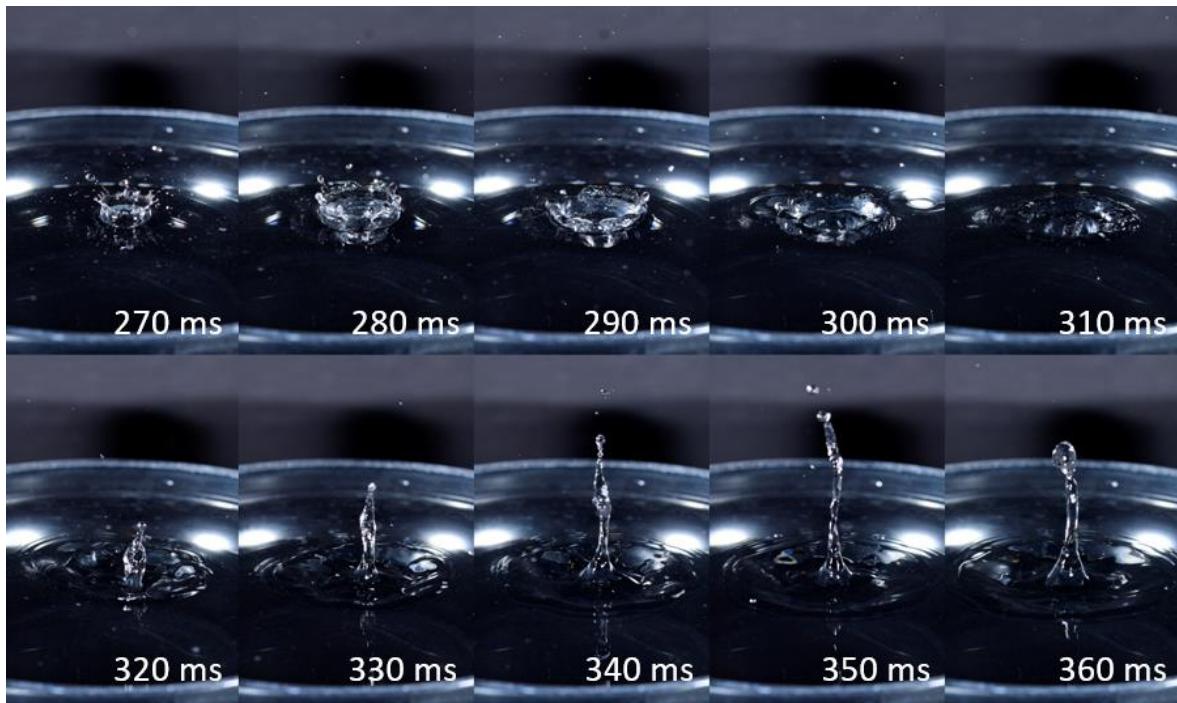
Slika 21: Sekundarni povratni curek pri dodatku ksantana (500 ms–555 ms)



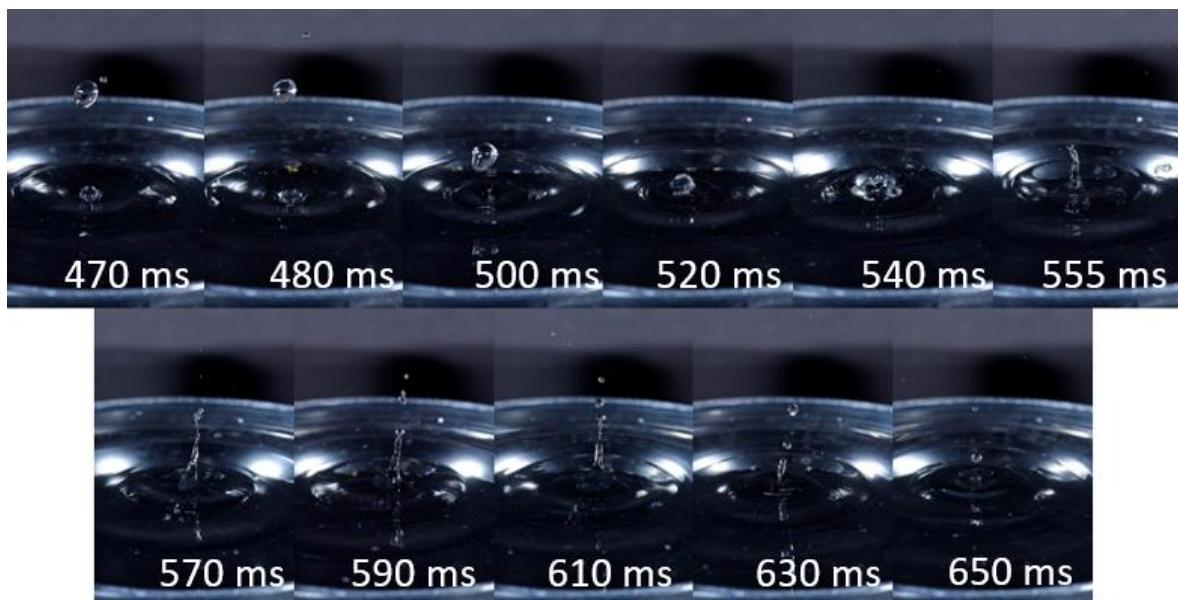
Slika 8: Odstopanje v višini  
(440 ms)

Milnica z 0,2 ml detergenta mi je predstavljala izziv, saj so povratni curki v primerjavi s predhodnima netipični in razgibani. Razpršenost sem opazila od prvega trka, to je od 270 ms, do trenutka 360 ms po sprožitvi kapljice. Povratni curek se je vsaj nekoliko stabiliziral v 370. ms. Tudi ta povratni curek je zelo dolgo ostal na podobni višini, razlike pa sem začela opažati 460 ms po proženju kapljice, ko se je vrat povratnega curka začel tanjšati in je s tem tvoril povratni curek z odcepljeno kapljico, ki je ostala v zraku 30 ms. Ker se je odcepila zelo velika kapljica, se je oblikoval tudi zelo izrazit sekundarni povratni curek, ki je precej razpršen. Sekundarni povratni curek traja od 520 ms do 650 ms.

Webrovo število tega poizkusa se nahaja med  $We$  vode in  $We$  kapljice z dodatkom ksantana. Podatka s fotografijami ne bi mogla natanko potrditi, saj so aerosoli bolj razgibani kot pri vodi in ksantanu, čeprav ima ksantan više Webrovo število. Reynoldsovo število je zaradi dodatka detergента malce nižje kot pri vodi, saj z dodajanjem detergenta višamo viskoznost tekočine. Tudi tega podatka ne bi mogla potrditi popolnoma, saj je razpršenost na fotografijah pri milnici večja kot pri vodi.



Slika 23: Razpršenost povratnega curka pri milnici (0,2 ml) (270 ms–360 ms)



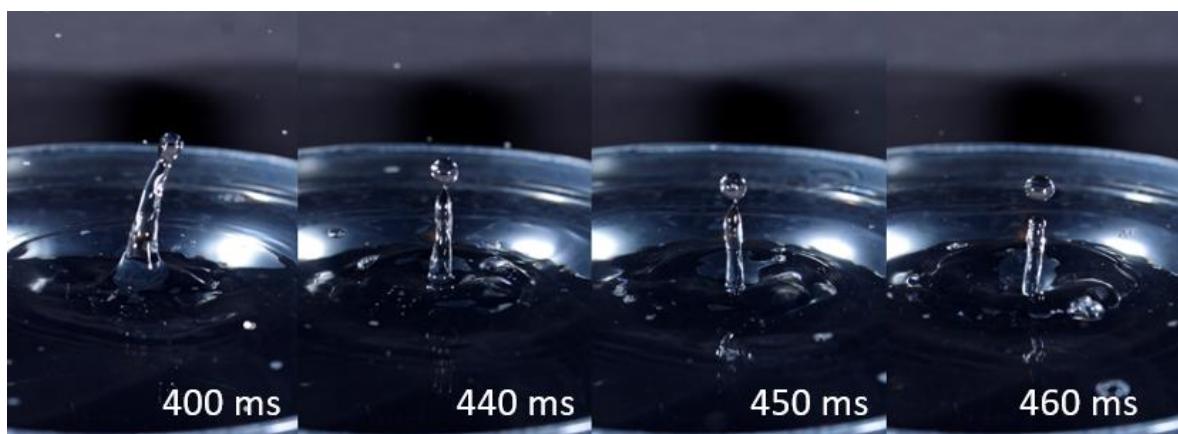
Slika 24: Sekundarni povratni curek pri milnici (0,2 ml) (520 ms–650 ms)

Pod enakimi pogoji sem fotografirala še vodo z milnico z 0,6 ml detergenta, pri kateri sem opazila, da je razpršenost manjša kot pri milnici z 0,2 ml detergenta. Kljub zelo nizki količini detergenta sem med fotografiranjem opažala milne mehurčke, ki so na slikah moteči. Tudi pri teh fotografijah sem ugotovila, da je oblika sicer podobna tipičnemu povratnemu curku, vendar se ne pojavi pod pravim kotom, ampak je povratni curek rahlo nagnjen v desno. 440

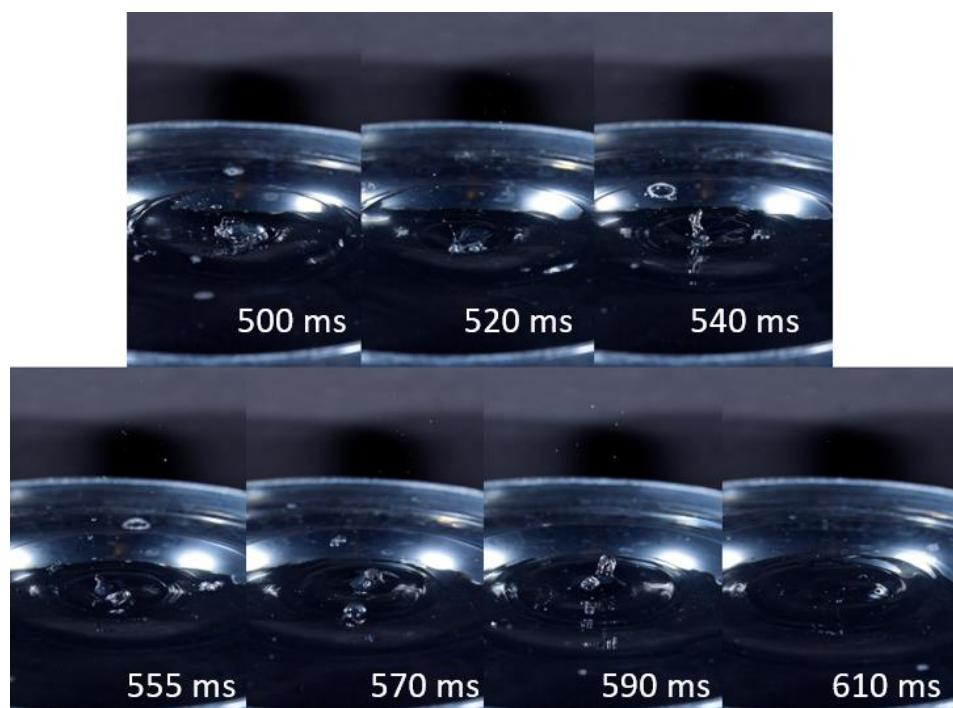
ms po sprožitvi se curek stabilizira in se vrne v pozicijo, ki je skoraj pravokotna na gladino vode v lovilnem bazenu.

Še ena podobnost, ki si jo delita povratna curka v milnici, je povratni curek z odcepjeno kapljico. Tudi tukaj se vrat oži do točke v 460. ms, da se kapljica odcepi in v nadaljevanju tvori sekundarni povratni curek, ki traja od 500 ms do 610 ms od sprožitve kapljice.

Webrovo število pri tem poizkusu znaša 2291, kar je najvišja vrednost Webrovega števila v mojem raziskovanju. V teoriji bi to pomenilo, da so oblike aerosolov pri tem poizkusu najnenavadnejše, česar ne morem potrditi s svojimi fotografijami (predvsem v sekundarnem povratnem curku). Reynoldsovo število je manjše od  $Re$  milnice z 0,2 ml. Rezultat lahko primerjamo s fotografijami.



Slika 25: Nagnjenost v desno (400 ms), stabilizacija in odcepitev kapljice (440 ms–460 ms)



Slika 26: Sekundarni povratni curek pri milnici (0,6 ml) (500 ms–610 ms)

## 5 ZAKLJUČEK

Namen raziskovalne naloge je bil ugotoviti, pod katerimi pogoji lahko zmanjšamo razpršenost pri pojavu Worthingtonovega povratnega curka. Problem aerosolov je prisoten v laboratorijih in kmetijstvu, v zadnjem času pa je predvsem povezan z respiratornimi boleznimi, ki se širijo z aerosoli, okuženimi s patogenimi delci, z virusi. Še vedno aktualen primer respiratorne bolezni je SARS-CoV-2. Širjenje aerosolov smo preprečevali z nošenjem mask in rednim prezračevanjem.

Prav zaradi aktualnosti sem želela poiskati nalogo, ki bi mi pomagala razumeti, pod kakšnimi pogoji so povratni curki najmanj razpršeni. Raziskovala sem na primeru treh različnih pogojev, pri katerih sem dodajala različne snovi. Kontrolno skupino je predstavljal povratni curek z vodo. Poizkuse s fotografiranjem sem izvedla pod enakimi pogoji (temperatura vode v lovilnem bazenu 20 °C, 35 cm oddaljenosti od sprožilca kapljice do gladine lovilnega bazena, 53 cm od središča lovilnega bazena do fotoaparata). Rezultate sem po raziskovanju tudi primerjala.

Rezultate svojega fotografiranja sem preverjala tudi teoretično. Z  $We$  in  $Re$  sem skušala potrditi zmanjševanje razpršenosti Worthingtonovega povratnega curka. Ugotovila sem, da je najmanjša razpršitev prisotna pri kapljici, v katero sem dodala ksantan. Z njim tekočini povečamo viskoznost in onemogočimo prekomerne deformacije. Čas trajanja celotnega povratnega curka je najkrajši, kar je posledica kratkega trajanja sekundarnega povratnega curka (55 ms). Svojo ugotovitev lahko podkrepim z izračunom Reynoldsovega števila, ki znaša le približno 17, kar pomeni, da je tok laminaren. V primerjavi z ostalimi povratnimi curki ima povratni curek z dodatkom ksantana najnižje  $Re$ , kar opazimo na fotografijah.

Raziskovanje Worthingtonovega povratnega curka in njegove razpršenosti me je naučilo predvsem potrežljivosti in natančnosti. Vidim še veliko možnosti za raziskovanje, in to predvsem za natančnejše raziskovanje, ki je zaradi opreme srednješolcem morda težje dostopno.

## 6 VIRI IN LITERATURA

1. Worthington, Mason Arthur. A Study of Splashes. 2012 [online]. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: <https://www.gutenberg.org/files/39831/39831-h/39831-h.htm>.
2. Aerosol. 2023 [online]. Wikipedia. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aerosol>.
3. Worthington, Mason Arthur. 2022 [online]. Wikipedia. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: [https://en.wikipedia.org/wiki/Arthur\\_Mason\\_Worthington](https://en.wikipedia.org/wiki/Arthur_Mason_Worthington).
4. Cai, Z., Wang, B., Liu, S., Li, H., Luo, S., Dong, Z., Wang, Y., Jiang, L. Beating Worthington jet by surfactants. 2022 [online]. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266638642200042X>.
5. Nastanek kislin v ozračju. 2012 [online]. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: <https://eucbeniki.sio.si/kemija8/1227/index1.html>.
6. Nikon D7200 digitalni fotoaparat. 2023 [online]. Nikon. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: [https://www.nikon.si/sl\\_SI/product/discontinued/digital-cameras/2020/d7200#tech\\_specs](https://www.nikon.si/sl_SI/product/discontinued/digital-cameras/2020/d7200#tech_specs).
7. Površinska napetost. 2023 [online]. Openprof. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: [https://si.openprof.com/wb/povr%C5%A1inska\\_napetost?ch=1176](https://si.openprof.com/wb/povr%C5%A1inska_napetost?ch=1176).
8. Reynolds number. 2023 [online]. Wikipedia. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: [https://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds\\_number](https://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_number).
9. Reynolds number. 2003 [online]. Engineering ToolBox. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: [https://www.engineeringtoolbox.com/reynolds-number-d\\_237.html](https://www.engineeringtoolbox.com/reynolds-number-d_237.html).
10. Surface tension. 2023 [online]. Britannica. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: <https://www.britannica.com/science/surface-tension>.
11. Surface tension. 2023 [online]. Wikipedia. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: [https://en.wikipedia.org/wiki/Surface\\_tension](https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_tension).
12. Surface tension. 2005 [online]. Engineering ToolBox. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: [https://www.engineeringtoolbox.com/surface-tension-d\\_962.html](https://www.engineeringtoolbox.com/surface-tension-d_962.html).
13. Viscosity. 2023 [online]. Wikipedia. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: <https://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity>.
14. Viscosity – Absolute (Dynamic) vs. Kinematic. 2003 [online]. Engineering Toolbox. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: [https://www.engineeringtoolbox.com/dynamic-absolute-kinematic-viscosity-d\\_412.html](https://www.engineeringtoolbox.com/dynamic-absolute-kinematic-viscosity-d_412.html).
15. Weber number. 2022 [online]. Wikipedia. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: [https://en.wikipedia.org/wiki/Weber\\_number](https://en.wikipedia.org/wiki/Weber_number).
16. Weber number. 2004 [online]. Engineering ToolBox. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: [https://www.engineeringtoolbox.com/weber-number-d\\_583.html](https://www.engineeringtoolbox.com/weber-number-d_583.html).
17. Xanthan gum. 2023 [online]. Wikipedia. Pridobljeno 16. 2. 2023 na spletnem naslovu: [https://en.wikipedia.org/wiki/Xanthan\\_gum](https://en.wikipedia.org/wiki/Xanthan_gum).