



Univerza v Mariboru

Fakulteta za naravoslovje
in matematiko

ANALIZA TRKOV KAPLJIC VODE Z RAZLIČNO TRDIMI POVRŠINAMI

Diplomski seminar na študijskem programu 1. stopnje Fizika

Ajda Kangler

Mentor: izr. prof. dr. Uroš Tkalec

Maribor, 2023

KANGLER, A.: Analiza trkov kapljic vode z različno trdimi površinami

Diplomski seminar, Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Oddelek za fiziko, 2023.

POVZETEK

V diplomskem seminarju povzamemo teoretično ozadje trkov kapljic vode z različno trdimi površinami ter povezavo med maksimalnim premerom kapljice ter Webrovim in Reynoldsovim številom. Predstavimo eksperiment ter opišemo dinamiko kapljic pri trkih s parafilmom, PDMS in silikonskima oljema različnih viskoznosti. Kot rezultat predstavimo grafe normiranih premerov kapljic v odvisnosti od časa, hitrost krčenja kapljic ter potrdimo prevlado inercialnega režima krčenja na izbranih podlagah.

Ključne besede: kapljice, trki, površine, Webrovo število, mikrofluidika.

ABSTRACT

In the graduate seminar, we summarise the theoretical background of the collision of water droplets with various hard surfaces and the relationship between the maximum droplet diameter and the Weber and Reynolds numbers. We present an experiment and describe the droplet dynamics in collisions with parafilm, PDMS and silicone oils of different viscosities. As a result, we present plots of normalised droplet diameters versus time, droplet shrinkage rate, and confirm the dominance of the inertial shrinkage regime on the selected substrates.

Key words: droplets, collisions, surfaces, Weber number, microfluidics

Kazalo vsebine

1 Uvod.....	1
2 Teoretično ozadje	1
3 Eksperimentalne metode	4
3.1 Uporabljeni materiali	5
4 Meritve	6
5 Rezultati in razprava.....	9
6 Zaključek	15

1 Uvod

Začetki raziskovanja trkov kapljic s podlago segajo v konec 19. stoletja, ko sta Worthington in Cole prvič obravnavala trke kapljic in trdnih kroglic s površino kapljevine [1,2]. Za študij morfologije kapljic sta uporabila posnetke več poskusov, ki sta jih zaporedoma ustvarila s kratkimi bliski svetlobe in osnovnimi metodami klasične fotografije. Do danes je tehnologija digitalnega zajema podatkov zelo napredovala in lahko kapljice opazujemo s časovno ločljivostjo milisekunde ali manj [3,4]. Na področju trkov kapljic z različnimi površinami je bilo narejenih že ogromno raziskav, saj je razlaga dinamike kapljic vsestransko uporabna. Praktično uporabo največkrat zasledimo pri nanašanju barv v spreju, nanašanju pesticidov na liste rastlin, brizgalnem tiskanju, forenzičnih raziskavah krvnih madežev, naprednem tisku tkiv v medicini ter na številnih drugih področjih [3–6].

Obravnava dinamike kapljice po trku vsebuje opazovanje maksimalnega in minimalnega premera kapljive med trkom ter njene morfologije. Znano je že, da obstaja povezava med maksimalnim premerom kapljice in Webrovim ter Reynoldsovim številom [7–9]. Na dinamiko kapljic vplivajo predvsem gostota, površinska napetost, viskoznost snovi, vpadna hitrost ter lastnosti podlage, kot so omočljivost, tekstura in elastičnost [7–14]. Eksperimentalno sta že bila določena dva režima krčenja kapljic [9] ter njune povezave z Webrovim in Reynoldsovim številom [8,9,13,15]. Dokazano je bilo, da krčenje kapljic ni odvisno od vpadne hitrosti, temveč od lastnosti podlag, na katero kapljica pade [15]. Veliko raziskovalcev je zavrnilo režime krčenja kapljice ter dinamiko raje opisalo z energijskimi zakoni in geometrijo posameznega primera [16].

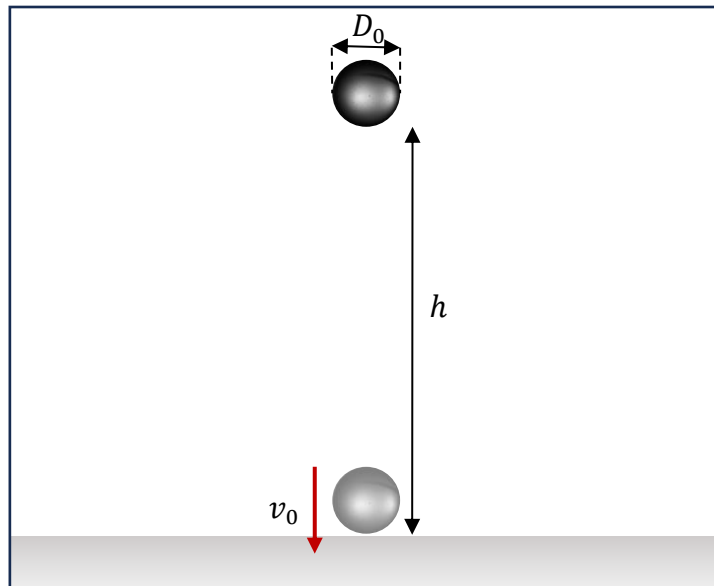
V diplomskem seminarju obravnavamo trke kapljic vode z različno trdimi površinami. Dve površini, parafilm na steklu in polidimetilsiloksan (v nadaljevanju PDMS) lahko opredelimo kot trdni. Drugi dve površini pa sta silikonski olji z različnima viskoznostima. Cilj diplomskega seminarja je pokazati, kako se dinamika kapljice po trku z različno trdimi površinami spreminja glede na različne začetne višine, s katerih spustimo kapljice.

V nadaljevanju na kratko predstavimo teoretično ozadje dinamike razširjanja kapljic na podlagah ter postavitev eksperimenta (drugo poglavje). V tretjem poglavju predstavimo eksperiment, metode merjenja ter lastnosti tekočin in podlag, ki smo jih uporabili. V četrtem poglavju povzamemo izvedbo meritev ter opišemo dinamiko kapljic s slikovnim gradivom. V petem poglavju podamo rezultate o normiranem premeru kapljic v odvisnosti od Webrovega in Reynoldsovega števila in o hitrosti krčenja kapljic na izbranih podlagah.

2 Teoretično ozadje

Zamislimo si kapljico iz materiala z gostoto ρ , viskoznostjo η in površinsko napetostjo γ . Če je kapljica dovolj majhna, ima obliko krogle in je zato njen volumen (V) enak volumnu krogle s premerom D_0 . Spustimo jo iz začetne višine h nad podlago (slika 1). Kapljica

trči s podlago z vpadno hitrostjo $v_0 = \sqrt{2gh}$ ob predpostavki, da na kapljico deluje le gravitacijska sila.

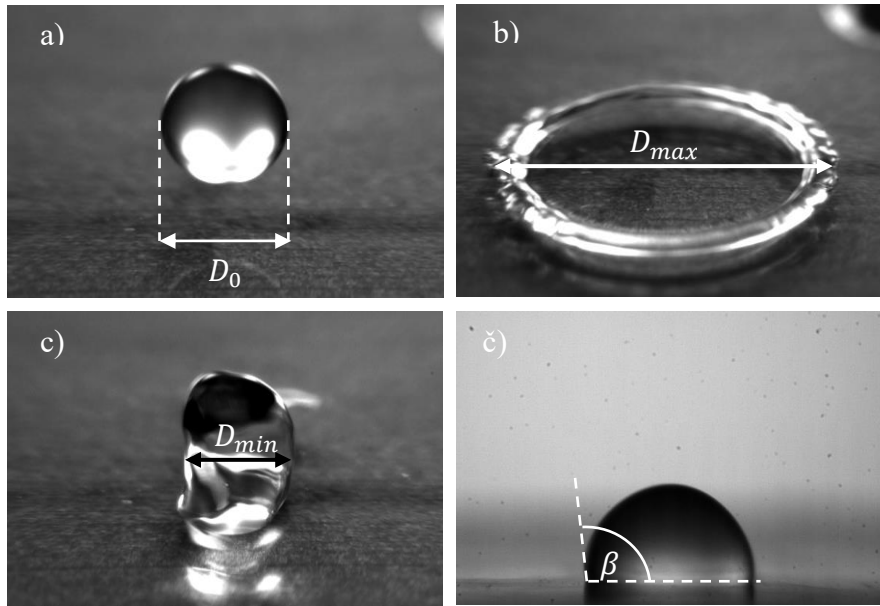


Slika 1. Kapljica s premerom D_0 pade z višine h na podlago. Hitrost tik pred trkom je v_0 .

Ko kapljica trči s površino, se začne širiti po podlagi v obliko »palačinke«. Tik preden se začne krčiti v ravnovesno obliko, ima kapljica maksimalni premer D_{max} , označen na sliki 2b. Nato se kapljica skrči do najmanjšega premera (D_{min}), označenega na sliki 2c, in nato ostane pri miru, kar je prikazano na sliki 2č. V fazi mirovanja lahko izmerimo kontaktni kot (β) med podlago in robom kapljice v stiku. Kontaktni kot je posledica razmerja kohezivnih sil med molekulami kapljice in adhezivnih sil med molekulami kapljice ter podlage. Zaradi tega je kot odvisen tako od lastnosti materiala kapljic kot tudi od lastnosti materiala, iz katerega je podlaga.

Glavno vlogo pri dinamiki širjenja in krčenja kapljic imajo: sila podlage, kapilarna sila in viskozni upor. Sila podlage kapljico zaustavlja. Na kapljico deluje sicer tudi gravitacijska sila, za katero predpostavimo, da je zanemarljivo majhna glede na silo podlage, dokler se kapljica ustavlja. Kapilarna sila je odvisna od površinske napetosti kapljice. Kapljevine vedno težijo k čim manjši površini, glede na dani volumen. Ta površina je v idealnem primeru kroglja. Ko kapljica trči s podlago, se splošči in nato vrne v obliko s čim manjšo površino, kar je v primeru, da podlaga ni izredno hidrofobna, polkroglja.

Vpliv teh sil na dinamiko kapljice preverimo z izvajanjem sistematičnih poskusov. Silo podlage povečamo s povečevanjem vpadne hitrosti kapljic, kar dosežemo s povečanjem višine, iz katere kapljica pade. Spreminjamo lahko tudi viskozno silo z uporabo več tekočin z različno dinamično viskoznostjo. Na ta način sta bila eksperimentalno ločena dva skrajna režima krčenja kapljic: inercialni in viskozni [15].



Slika 2. a) Kapljica vode s premerom D_0 tik pred trkom, b) v trenutku, ko ima maksimalni premer D_{max} , c) v trenutku, ko ima minimalni premer D_{min} in č) v fazi mirovanja na podlagi PDMS; β je kontaktni kot.

Za kvantitativno obravnavo uporabimo brezdimenzijsko Webrovo in Reynoldsovo število [13,16]. Webrovo število (We) opisuje razmerje kinetične energije kapljice in energije površinske napetosti, ki vpliva na kapilarne sile [17].

$$We = \frac{\rho D_0 v_0^2}{\gamma} . \quad (1)$$

Pri dovolj visokih Webrovih številih ($We > 100$) se večina kinetična energija kapljice pretvori v površinsko energijo sploščene kapljice po trku. Takrat je normiran maksimalni premer kapljice sorazmeren z Webrovim številom

$$\frac{D_{max}}{D_0} \propto We^\alpha , \quad (2)$$

kjer je eksponent α enak $1/2$ [8]. Če upoštevamo še vpliv kontaktnega kota in disipacijo energije zaradi viskoznosti, pa je $\alpha = 1/4$ [15]. Slednja povezava velja, kadar so kapljice iz vode in trčijo ob trdno podlago ali tanek film nemešljive tekočine.

Z Webrovim številom je povezan tudi inercialni režim krčenja kapljic. Tukaj za hitrost krčenja uporabimo Taylor-Culickov model, ki predvideva, da se kapljica po trku s površino splošči v tanko »palačinko« z maksimalnim premerom D_{max} . Nato se začne krčiti in osuši podlago ter pri tem ustvari rob, s kontaktnim kotom, podobnim kontaktnemu kotu umikajočega se roba. Krčenje kapljice povzroča kapilarna sila, inercija pa zavira krčenje kapljice.

Izračunamo tudi brezdimenzijsko Reynoldsovo število, ki nam pove razmerje med inercialnimi in viskozni silami v tekočini pri krčenju na podlagi:

$$Re = \frac{\rho D_0 v_0}{\eta} . \quad (3)$$

Kadar je $Re > 100$, lahko govorimo o viskozem režimu, ko ima kapljica relativno veliko viskoznost. Kapljica se pri trku s podlago enako kot pri inercialnem režimu splošči v obliko »palačinke«, ki je v tem primeru nekoliko debelejša. Ko se začne krčiti, hitro preide nazaj v obliko polkrogle, pri tem se spreminja le kontaktni kot. Krčenje kapljice je v tem primeru počasnejše kot v inercialnem režimu. Krčenje kapljice povzroča kapilarna sila, ki ji nasprotuje viskozna sila. Tokrat je normiran maksimalni premer kapljice povezan z Reynoldsovim številom

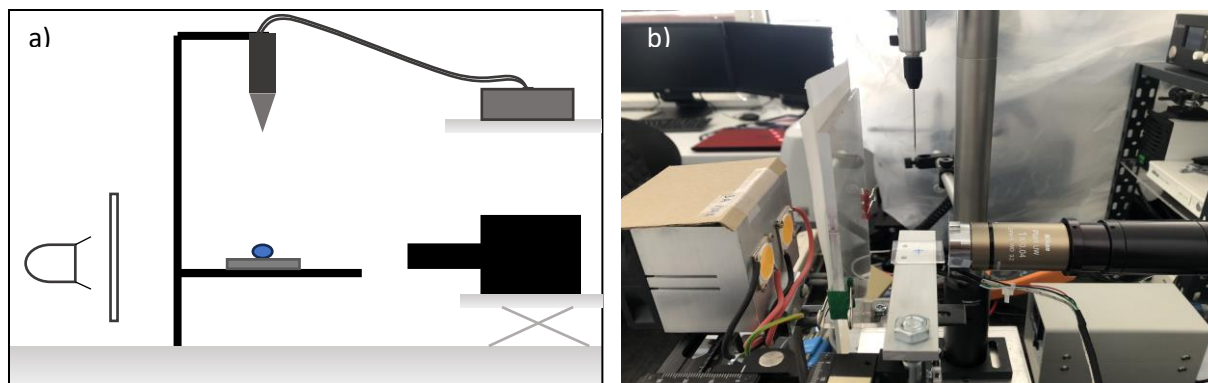
$$\frac{D_{max}}{D_0} \propto Re^\delta , \quad (4)$$

kjer je $\delta = 1/5$ [13,15,16]. Limpens navaja, da slednje velja za trke pri visokih hitrostih [13]. Obstaja tudi več različnih modelov za razlago krčenja kapljic, ki upoštevajo dodatne parametre (npr. kontaktni kot in površinsko napetost) in interpolirajo med tema dvema poenostavljenima razlagama, vendar se za potrebe tega seminarja ne bomo spuščali v te podrobnosti.

3 Eksperimentalne metode

Za snemanje trkov kapljic z izbranimi površinami smo uporabili hitro kamero Photron Mini AX 200, ki zajame 10000 posnetkov na sekundo, kar je zadostna ločljivost, da ujamemo celoten potek trka kapljice, ki se zgodi v približno 30 ms. Kamera je imela nameščen objektiv z dvakratno povečavo. Za kvaliteten zajem posnetkov smo uporabili močno LED svetilo ter svetlobni difuzor za enakomerno osvetlitev. Kapljice vode smo pripravili s črpalko WPI Micro Syringe Pump Controller, na katero smo pritrdili stekleno kapilaro s premerom 0,3 mm. Zaradi lažje izvedbe eksperimentov smo črpalko opremili s pedalom za brezročno upravljanje. Ker je vpadna hitrost kapljice odvisna od višine, iz katere jo spustimo, smo uporabili stojalo, ki je nastavljivo po višini ter omogoča natančno centriranje kapljice pred objektivom kamere (slika 2). Kamera je zajela posnetke, ki smo jih nato obdelali z namenskim programom Photron PFV3 in jih shranili v formatu *.tif.

Za analizo posnetkov smo uporabili v programskem jeziku Python napisan program, ki iz slik razbere širino in višino kapljice ter podatke zapiše v tekstovno datoteko. Dobljene podatke smo nato prikazali v programu Origin ter narisali grafe.



Slika 3. Postavitev eksperimenta. a) Shematski prikaz od leve proti desni: LED osvetlitev, svetlobni difuzor, nastavljivo stojalo, na katerem je podlaga, črpalka s kapilaro, hitra kamera, ki je priključena na prenosni računalnik; b) fotografija eksperimenta v laboratoriju.

Začetni premer kapljice, ki ga potrebujemo za normiranje širine in višine kapljic, smo izračunali iz podatka o začetnem premeru kapljice v slikovnih pikah (sp), ki znaša (185 ± 3) sp. To vrednost smo pomnožili s povečavo leče ($2 \times$) ter velikostjo slikovne pike, ki znaša $20 \cdot 10^{-6}$ m. Tako smo dobili začetni premer kapljice, ki znaša $D_0 = 1,85 \cdot 10^{-3}(1 \pm 0,01)$ m.

3.1 Uporabljeni materiali

V sklopu eksperimentov smo uporabljali štiri podlage. Parafilm in PDMS uvrščamo med trde površine. Tanka sloja silikonskega olja z različno viskoznostjo pa uvrščamo med tekočinski površini. Vse podlage so bile nanesene na steklo.

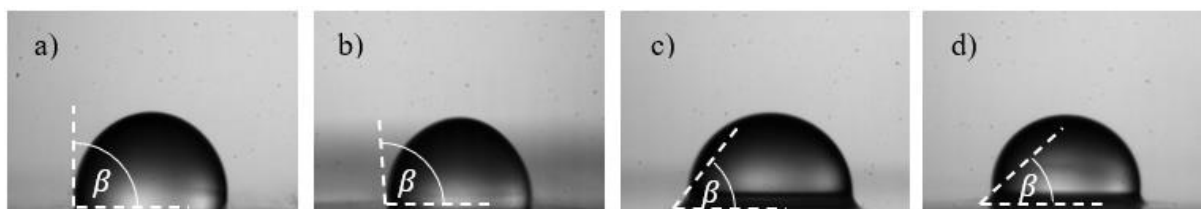
Parafilm je prosojna folija, ki se jo uporablja v laboratorijih za pokrivanje bučk, kivet, čaš in ostalih posod. Narejen je iz mešanice voskov in poliolefinov, ki mu dajejo značilno prožno strukturo. Je hidrofoben material, kar se kaže v kontaktnem kotu vode s podlago (slika 4). Parafilm smo ob robu z lepilnim trakom namestili na steklo.

PDMS ali polidimetilsiloksan je polimer, ki ga uvrščamo v skupino siloksanov. Ti so sestavljeni iz silicija, ogljika in kisika. Je prožen material, ki se po deformaciji vrne v svojo prvotno obliko in ima zelo majhno površinsko napetost. Tako kot parafilm, je tudi PDMS hidrofoben material. Za potrebe eksperimentov smo ga nanesli na steklo v tanki ravni plasti.

Silikonsko olje prav tako spada v skupino polidimetilsiloksanov, le da ima manjšo viskoznost kot strjen PDMS. Uporabljali smo dve olji različnih viskoznosti. Olja imajo podano kinematično viskoznost ν , ki je definirana kot $\nu = \eta/\rho$. Kinematična viskoznost, ki jo bomo navajali v nadaljevanju seminarja, se največ uporablja v tehniških strokah in industriji. Olje s kinematično viskoznostjo $\nu = 100$ cSt ima pri sobni temperaturi viskoznost $\eta = 960$ Pas in gostoto $\rho = 0,96$ kg/cm³, medtem ko je olje s kinematično viskoznostjo $\nu = 500$ cSt bolj viskozno ($\eta = 4900$ Pas) in tudi gostejše strukture ($\rho = 980$ kg/cm³). Silikonsko olje smo nanesli na steklo s pomočjo traku, ki je omejeval njegovo površino, ki je znašala 2,15 cm². S pomočjo te površine in mase nanesenega olja smo izračunali debelino nanosa, podano v

preglednici 1. Kontaktni kot vode na silikonskem olju je veliko manjši kot na parafilmu in PDMS. V našem primeru je bil med 40° in 50° .

Kapljice so bile iz deionizirane vode, ki jo pridobivamo s procesom uparjanja vode, zato ima zelo malo kemičnih primesi in ostalih elementov. Pravimo, da je kemično čista. Voda je primer newtonske tekočine z viskoznostjo $\eta = 0,001$ Pas. Njena površinska napetost je $\gamma = 73$ mN/m, gostota pa $\rho = 998$ kg/m³. Kontaktni koti kapljic vode na podlagah in debeline nanosa (d_N) podlag na steklu so podani v preglednici 1.



Slika 4. Kontaktni koti (β) vode na a) parafilmu, b) PDMS, c) silikonskem olju z viskoznosti 500 cSt in d) silikonskem olju viskoznosti 100 cSt.

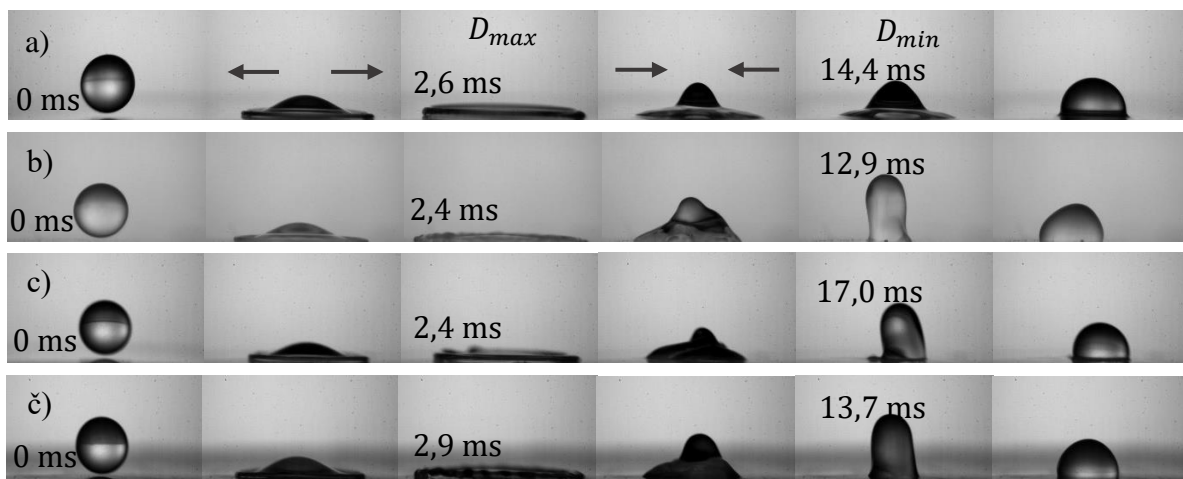
Material	β [°]	d_N [mm]
Parafilm	90 ± 5	$0,15 \pm 0,01$
PDMS	100 ± 5	$0,10 \pm 0,01$
Silikonsko olje 500 cSt	50 ± 5	$0,14 \pm 0,02$
Silikonsko olje 100 cSt	40 ± 5	$0,15 \pm 0,02$

Preglednica 1. Kontaktni (β) med vodo in podlago in debeline nanosa (d_N) materialov na podlago.

4 Meritve

Meritve smo izvajali v več zaporednih sklopih. Na vseh štirih podlagah smo izvedli meritve s kapljanjem kapljic iz šestih različnih višin: 5,0 cm, 10,0 cm, 15,0 cm, 20,0 cm, 25,0 cm in 30,0 cm, kar se ujema s hitrostmi tik pred trkom od 1 m/s do 2,5 m/s. Na vsaki višini smo izvedli 4 ponovitve. Zaradi težav z osvetlitvijo smo serijo na PDMS ponovili še enkrat ter za vsako višino posneli še dve ponovitvi.

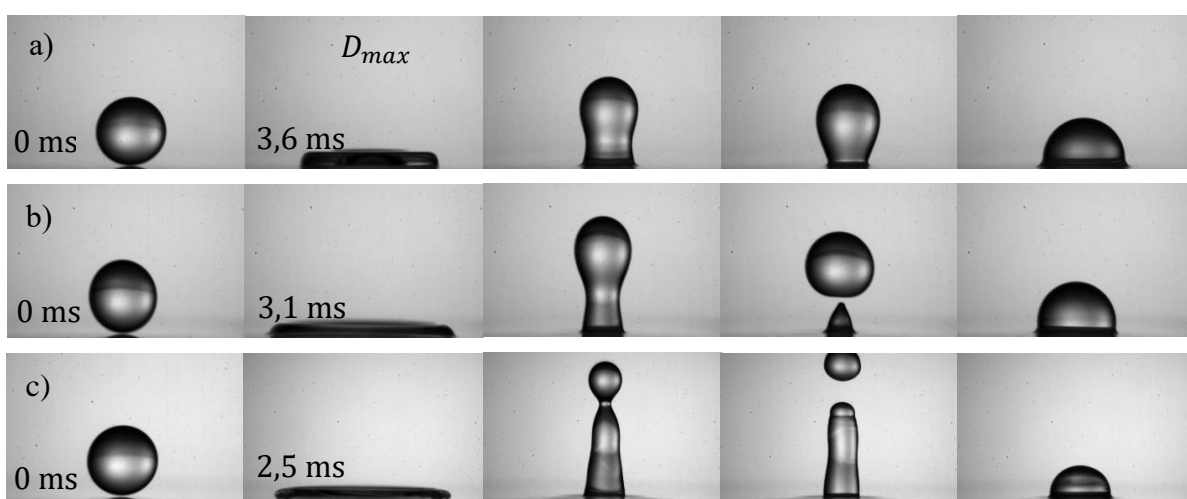
Vsaka kapljica gre skozi štiri osnovne morfološke faze. Prva je tik preden pride do trka s podlago. Takrat ima zaradi majhne velikosti obliko skoraj popolne krogle. Ko trči ob podlago, se kapljica začne ploščiti in njen premer se povečuje. V drugi fazi zavzame obliko »palačinke«, ko doseže maksimalni premer. Vse to se zgodi v približno 3 ms. Nato se začne kapljica krčiti in v sredini dvigati od podlage. V tretji fazi zavzame podolgovato obliko z maksimalno višino, do katere se dvigne vrh kapljice. Krčenje kapljice poteka približno 15 ms. V zadnji fazi se kapljica vrne v polkrogelno obliko, se počasi izniha in obmiruje. V tem stanju določimo kontaktni kot kapljice na podlagi. Kapljica je že po 0,1 s praktično pri miru. Oblike posameznih faz so prikazane na sliki 5.



Slika 5. Časovni potek trka kapljice vode s površino a) parafilm, b) PDMS, c) silikonsko olje z viskoznostjo 500 cSt in č) silikonsko olje z viskoznostjo 100 cSt.

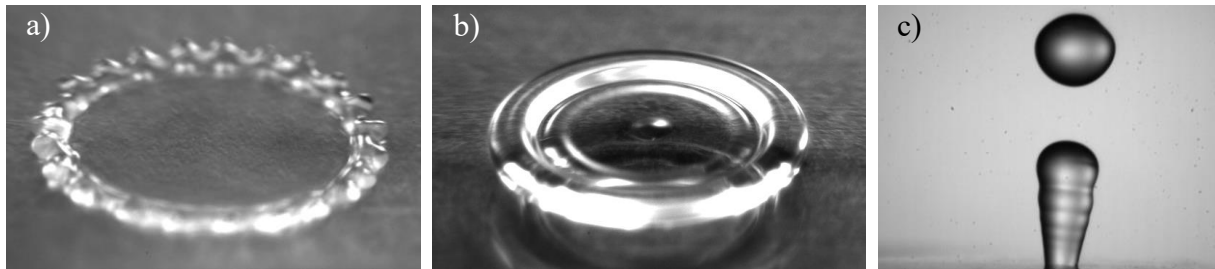
Zanima nas, v katerem režimu poteka trk kapljice v našem primeru. Tako Webrovo kot tudi Reynoldsovo število sta neposredno povezani z vpadno hitrostjo kapljice pred trkom. Če želimo vpadno hitrost spreminjati, lahko to storimo s spreminjanjem višine, s katere kapljica pade. Na sliki 6 je prikazana dinamika kapljice po trku z različnimi hitrostmi. Webrovo in Reynoldsovo število imata pri nas vrednost veliko večjo od 10, kar pomeni, da je sila podlage za vsaj en velikostni razred večja od kapilarnih in viskoznih sil. Zato se ob trku s podlago kapljica vidno deformira [15].

Iz slike 6 lahko razberemo, da se kapljica po padcu z višje začetne višine po trku bolj razširi in doseže večji maksimalni premer. Opazimo tudi, da se kapljica z večjo vpadno hitrostjo po trku tudi dvigne višje. Pri padcih z višine 25 cm se po dvigu pogosto odtrga vrh kapljice, čemur rečemo delni odboj. Odtrganega vrha ne štejemo v maksimalno višino kapljice, ampak jo določimo, ko je kapljica še v enem kosu.

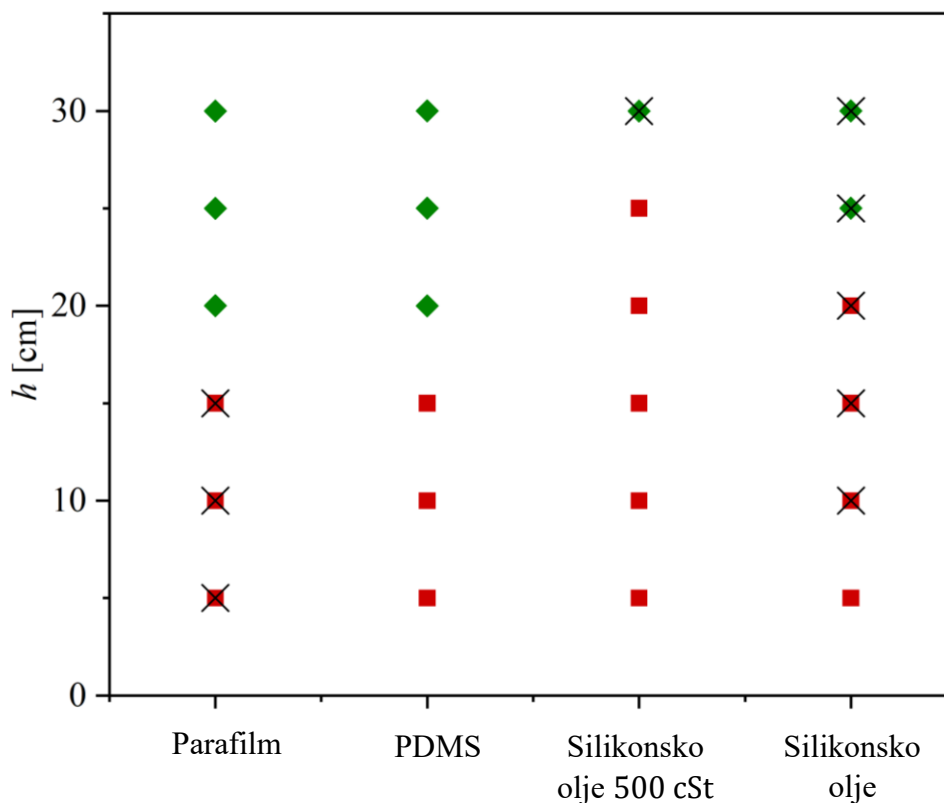


Slika 6. Časovni potek trka kapljice vode s silikonskim oljem z viskoznostjo 100 cSt z višine a) 5 cm, b) 15 cm in c) 25 cm.

Trki kapljic po prostem padu iz različnih višin na različnih podlagah razkrijejo več ponavljajočih oblik in pojavov. Depozicija kapljice z valovitim robom, prikazana na sliki 7a, se pojavlja, kadar kapljica trči ob podlago a hitrostjo nad 1,5 m/s. Depozicija kapljice s ploskim robom, se zgodi pri nižjih hitrostih na manj trdih površinah (slika 7b). Oba pojava se zgodita 2 do 3 ms po tem, ko kapljica zadene podlago. Kasneje, ko se kapljica krči, pa občasno opazimo delni odboj kapljice, prikazan na sliki 7c. Ta pojav opazimo na manj viskoznem silikonskem olju ali pri trkih z majhno vpadno hitrostjo na parafilmu. Na sliki 8 so prikazani pojavi razvrščeni po podlagah in začetnih višinah padcev kapljice.



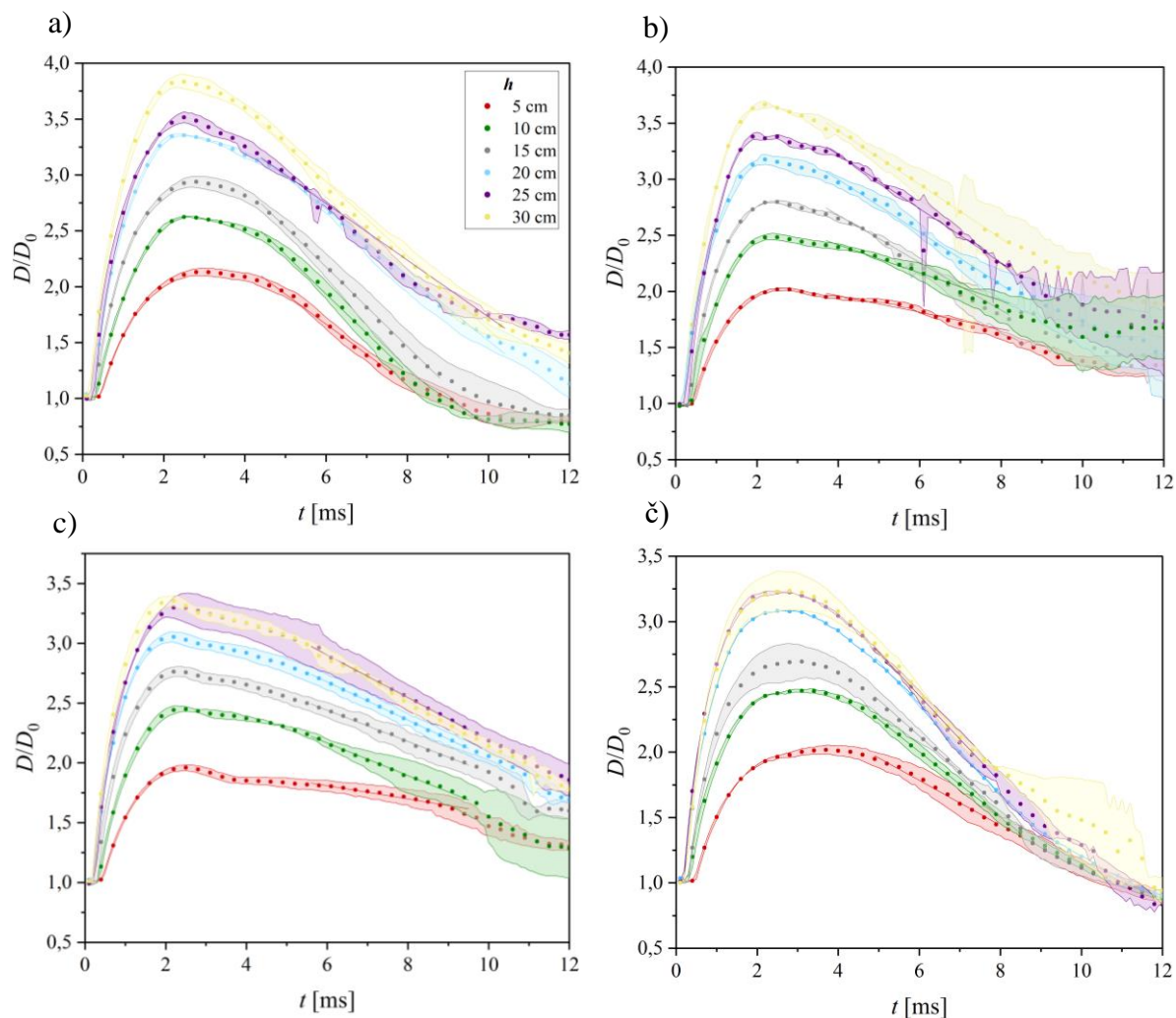
Slika 7. Depozicija kapljice a) z valovitim robom in b) s ploskim robom. c) Delni odboj kapljice.



Slika 8. Pojavi ob trku kapljic vode s podlagami. Rdeči kvadratki prikazujejo depozicijo s ploskim robom, zeleni pa depozicijo z valovitim robom in črni križec prikazuje delni odboj kapljice. S h je označena višina, s katere spustimo kapljice.

5 Rezultati in razprava

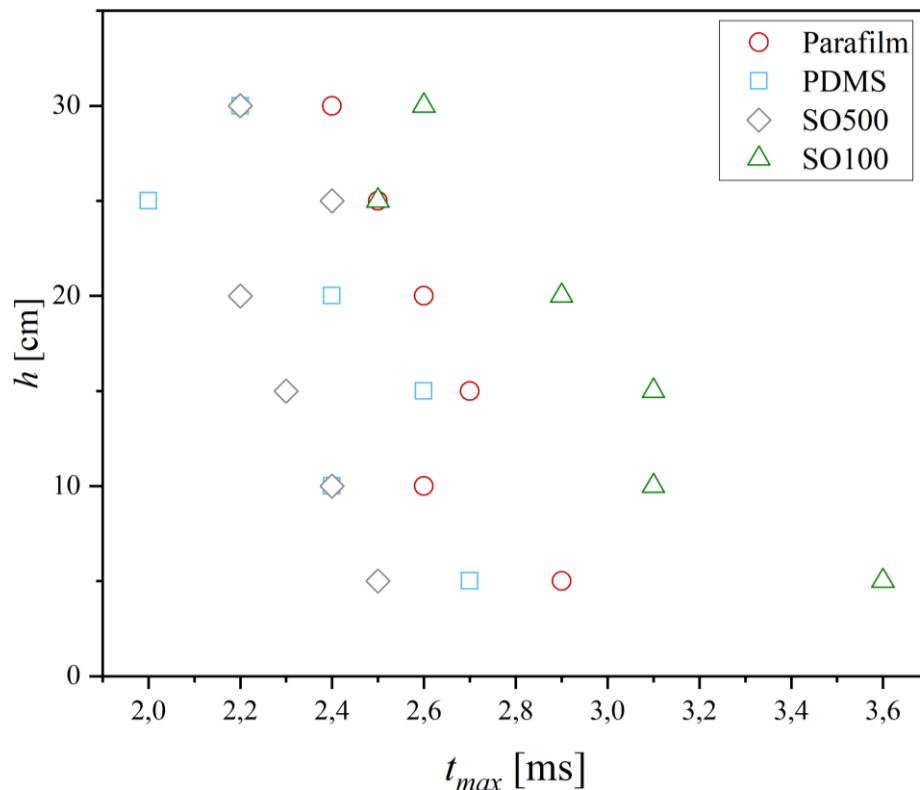
Najprej obravnavajmo spreminjanje premera kapljice s časom v odvisnosti od višine, s katere pade kapljica, in podlage, na katero trči (slika 9). Z večanjem višine, s katere pade kapljica, narašča tudi maksimalni premer kapljice med širjenjem na podlagi. To velja za vse vrste podlag. Za lažjo primerjavo smo vse vrednosti premera kapljice delili z osnovnim premerom D_0 .



Slika 9. Premer kapljice (D) deljen z začetnim premerom kapljice (D_0) v odvisnosti od časa (t) pri trku s a) parafilmom, b) PDMS, c) silikonskim oljem z viskoznostjo 500 cSt in č) silikonskim oljem z viskoznostjo 100 cSt. Višina, s katere spuščamo kapljice, je označena s h . Na grafih so prikazane tudi premice, katerih strmina predstavlja hitrost krčenja kapljice.

V primerih trka kapljice s površino silikonskega olja opazimo, da sta maksimalna premera pri padcu iz višine 25 cm in 30 cm enaka v okviru napake. To bi lahko obrazložili tako, da je velika hitrost odgovorna za še večjo deformacijo kapljice, ki se zgodi ob trku. Tukaj težavo morda predstavlja tudi debelina plasti olja, ki smo ga nanesli na podlago, saj je približno 13-krat manjša kot premer kapljice. Ko kapljica trči v oljnato plast, jo odrine in pri tem pride do stika s stekleno površino, na katero je bilo naneseno olje.

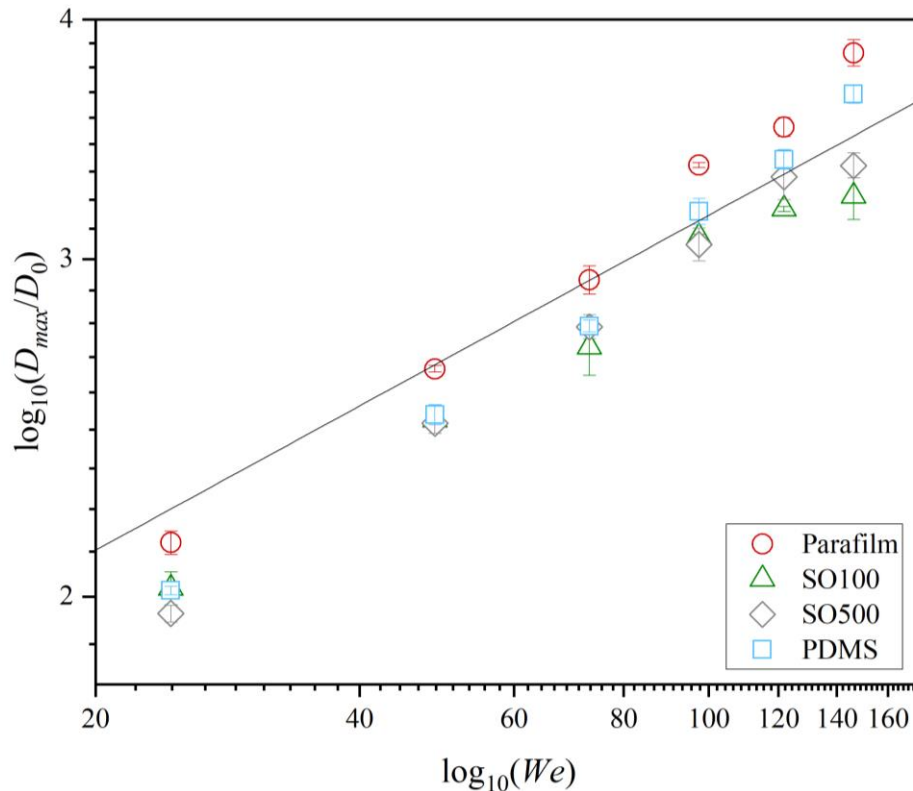
Na sliki 10 lahko vidimo, kako sta povezana višina, s katere pade kapljica, ter čas, ki je potreben, da kapljica doseže svoj maksimalni premer. Za vse štiri podlage je razvidno, da ta čas s povečevanjem višine pada. Ni izrazite linearne ali eksponentne odvisnosti, je pa trend dovolj očiten. Lahko rečemo, da je čas, v katerem se kapljica razpusti v obliko »palačinke« in doseže maksimalen premer, odvisen od višine, s katere pade kapljica. Vidimo tudi, da je na podlagah PDMS in silikonskem olju z viskoznostjo 500 cSt čas širjenja manjši, kot na parafilmu in silikonskem olju z viskoznostjo 100 cSt. Torej je čas širjenja kapljice do maksimalnega premera odvisen tudi od podlage.



Slika 10. Višina (h), s katere pade kapljica, v odvisnosti od časa t_{max} , po katerem kapljica doseže maksimalni premer.

Graf na sliki 11 nam pokaže, kako je od Webrovega števila odvisen maksimalni premer kapljice pri trku s podlago (enačba (2)). Ker je pričakovana odvisnost potenčna, smo narisali diagram z logaritemsko skalo na obeh oseh za boljšo preglednost podatkov. Strmina premice, ki je vrisana v graf je $\alpha = 1/4$. Prilagojene vrednosti eksponentov α za naše meritve so vpisane v preglednici 2.

Povedali smo že, da je Webrovo število povezano z inercialnim režimom. Eksponent α je v literaturi podan z vrednostima $1/4$ in $1/2$. Rezultati naših meritev so bližje $\alpha = 1/4$, tako da je tukaj normiran maksimalni premer kapljice odvisen od $We^{1/4}$. Naše meritve od vrednosti $1/4$ odstopajo za največ 25%.

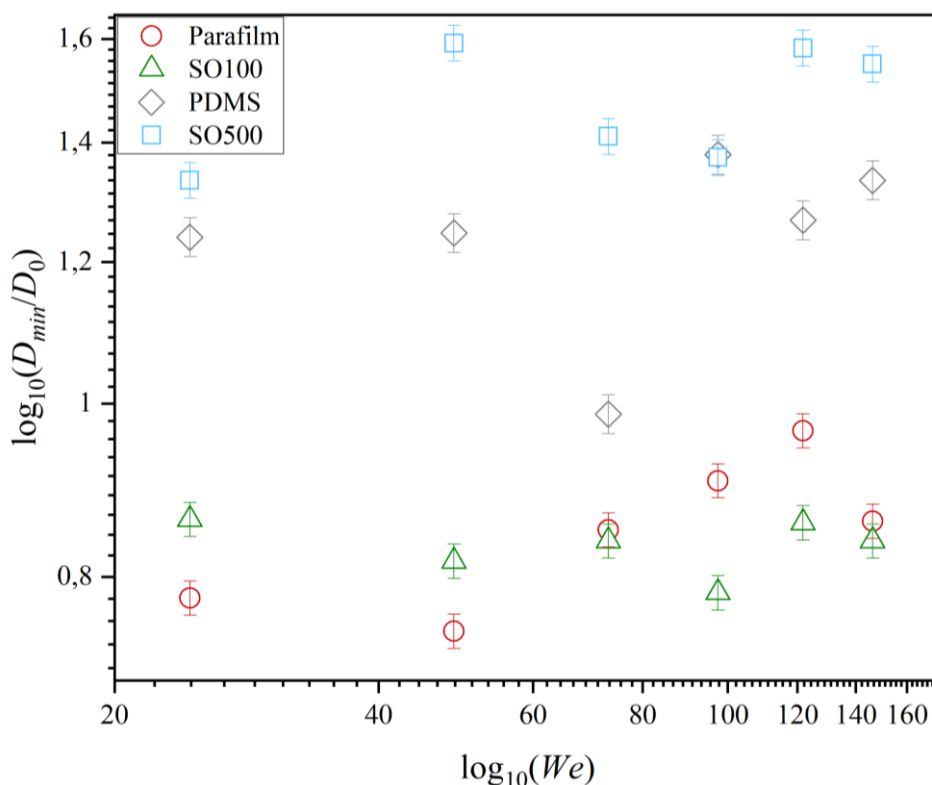


Slika 11. Odvisnost maksimalnega premera kapljice (D_{max}) od Webrovega števila (We) na logaritemski skali za vse štiri podlage. D_0 je premer kapljice pred trkom. Črna črta predstavlja $We^{1/4}$.

Podlaga	Parafilm	PDMS	Silikonsko olje 500 cSt	Silikonsko olje 100 cSt
α	$0,32 \pm 0,01$	$0,33 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0,01$	$0,31 \pm 0,02$

Preglednica 2. Eksponenti α (enačba (2)) za vse štiri podlage.

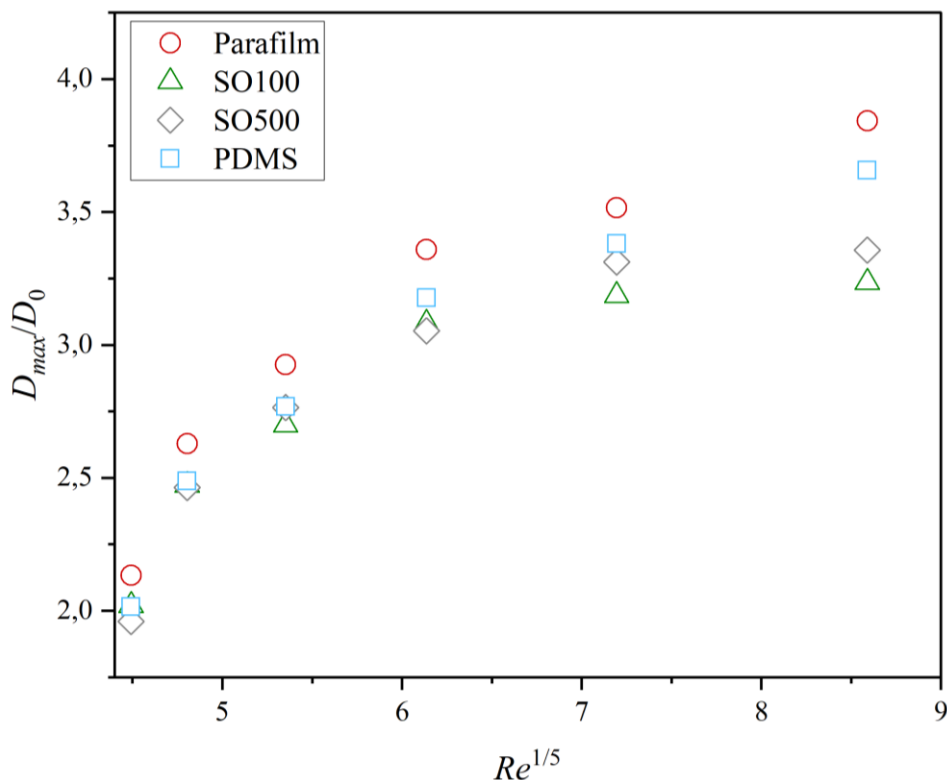
V nadaljevanju preučimo še povezavo med minimalnim premerom kapljice in Webrovim številom. Tudi tukaj smo zaradi pričakovane potenčne odvisnosti uporabili logaritemsko skalo na obeh oseh za boljšo preglednost in lažji prikaz podatkov (slika 12). Odvisnost minimalnega premera kapljic od Webrovega števila ni potenčna kot na sliki 11. Vidimo pa lahko, da minimalni premer kapljice po krčenju ni toliko odvisen od vpadne hitrosti, temveč bolj od podlage, na katero trči. Kapljice se skrčijo do večjega minimalnega premera pri trkih na bolj viskoznih podlagah. Na parafilmu imajo zaradi njegove trdote in velike hidrofobnosti manjši premer. Prav tako ima kapljica majhen premer na silikonskem olju z manjšo viskoznostjo, saj lahko spet predvidevamo, da je kapljica zaradi pretankega nanosa olja trčila s steklom. Ker je steklo podobne trdote kot parafilm, vidimo podobnost v dinamiki kapljice pri krčenju.



Slika 12. Odvisnost minimalnega premera kapljice (D_{min}) od Webrovega števila (We) na logaritmski skali za vse štiri podlage. D_0 je premer kapljice pred trkom.

Naredili smo tudi primerjavo maksimalnih širin kapljice z Reynoldsovim številom (slika 13). Ker je pričakovan eksponent $\delta = 1/5$ (enačba (4)), smo na abscisno os nanašali Reynoldsovo število z eksponentom $\delta = 1/5$.

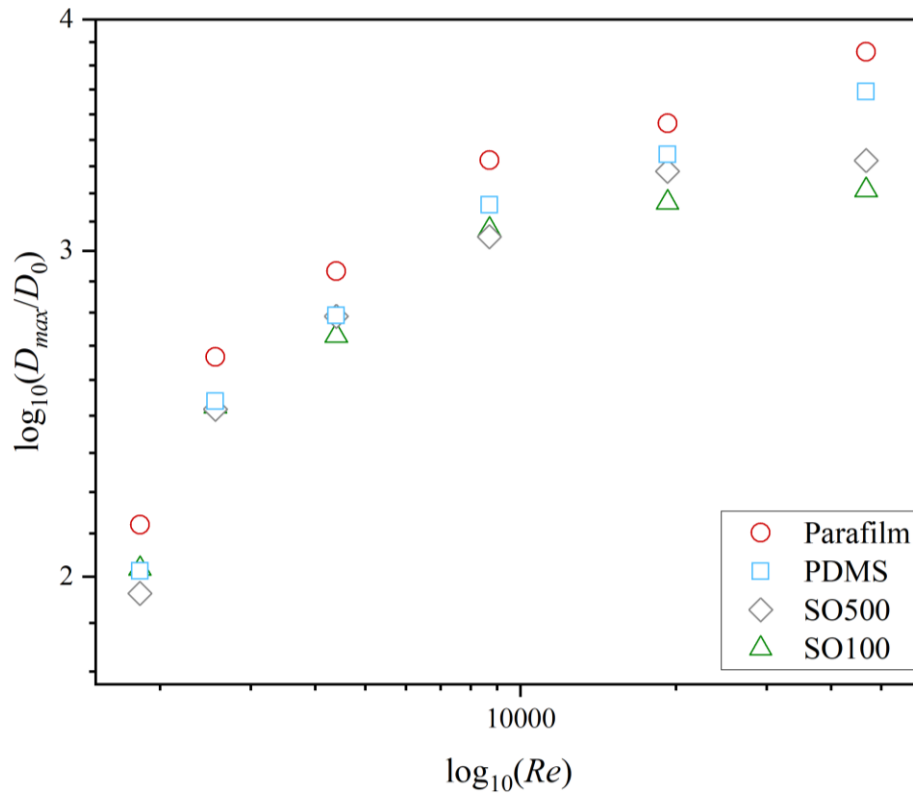
Ugotovimo, da odvisnost maksimalnega premera kapljice od Reynoldsovega števila ni linearna na celotnem območju. Zato ne moremo potrditi povezave iz enačbe (4). Na sliki 14 je še enkrat prikazan graf maksimalnega premera kapljice v odvisnosti od Reynoldsovega števila, le da je tokrat v logaritmski skali. Tudi tukaj ni linearne odvisnosti med maksimalnim premerom kapljice in Reynoldsovim številom. Potrdimo lahko, da ne gre za nikakršno potenčno odvisnost z Reynoldsovim številom. Na podlagah, ki smo jih uporabljali, je torej inercialni režim krčenja kapljic bolj prisoten kot viskozni.



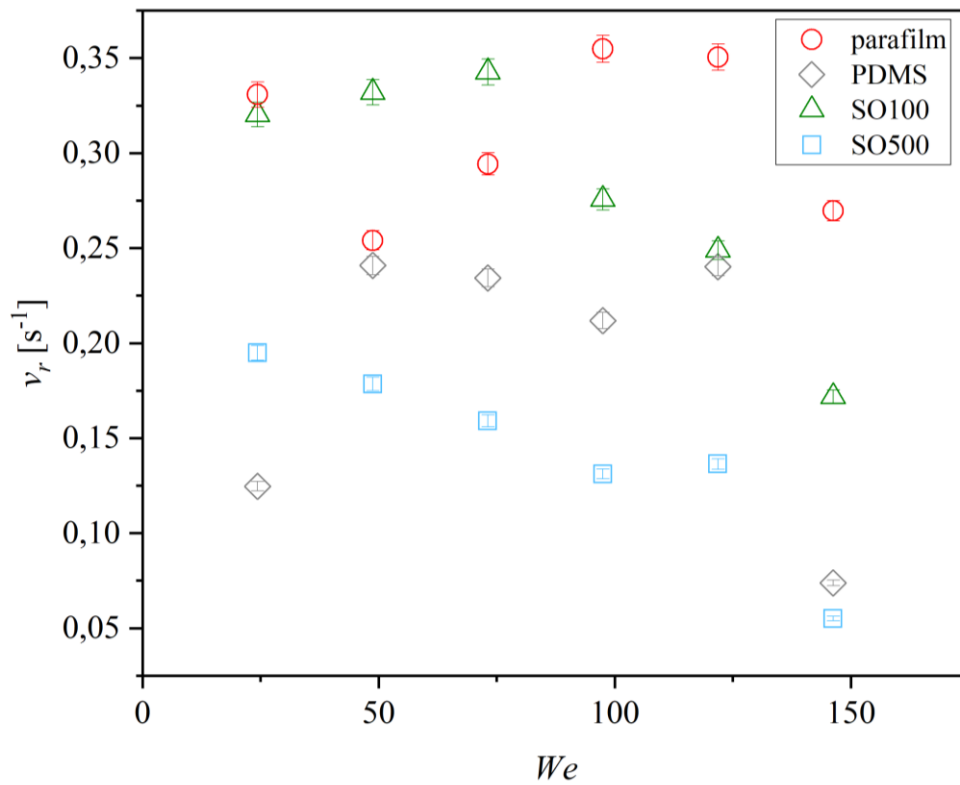
Slika 13. Odvisnost maksimalnega premera kapljice (D_{max}) od Reynoldsovega števila (Re) z eksponentom $\delta = 1/5$. D_0 je premer kapljice pred trkom.

Na koncu še pogledimo, kako je od višine in posledično od Webrovega števila odvisna hitrost krčenja kapljic. Kot vidimo na sliki 9, se vsaka kapljica krči z drugačno hitrostjo, a so hitrosti na enakih podlogah dokaj podobne. Hitrost krčenja kapljic razberemo iz slike 9. V predelu, kjer se premer kapljice začne zmanjševati, meritvam prilagodimo premico, katere strmina je enaka hitrosti krčenja kapljice. Rezultati hitrosti krčenja kapljice (v_r) v odvisnosti od Webrovega števila so zbrani na sliki 15. Hitrost krčenja na podlagi definiramo: $v_r = \Delta(D/D_0)/\Delta t$, zato ima enoto s^{-1} .

Opazimo lahko, da je hitrost krčenja odvisna od lastnosti podlage, s katero je kapljica trčila. Na parafilmu, ki je najbolj trda in hidrofobna podlaga z razmeroma velikim kontaktnim kotom, ima kapljica visoko hitrost krčenja. Prav tako je hitrost krčenja visoka tudi na silikonskem olju z viskoznostjo 100 cSt. To lahko povežemo z rezultati minimalnega premera kapljice v odvisnosti od Webrovega števila, kjer imajo kapljice po trku s tema dvema podlagama tudi najmanjši premer. Ena izmed ugotovitev, ki jo izpostavljajo drugi avtorji in jo lahko s temi rezultati potrdimo je, da hitrost krčenja kapljice ni odvisna od vpadne hitrosti kapljice pred trkom na celotnem območju Webrovega števila.



Slika 14. Odvisnost maksimalnega premera kapljice (D_{max}) od Reynoldsovega števila (Re) na logaritemski skali za vse štiri podlage. D_0 je premer kapljice pred trkom.



Slika 15. Odvisnost hitrosti krčenja (v_r) kapljice od Webrovega števila (We) na štirih podlagah.

6 Zaključek

V diplomskem seminarju smo raziskovali trke kapljic deionizirane vode z različno trdimi površinami, ki so parafilm, PDMS, silikonsko olje z viskoznostjo 100 cSt in silikonsko olje z viskoznostjo 500 cSt. Predstavili smo teoretično ozadje trkov kapljic na podlage ter vpeljali Webrovo in Reynoldsovo število, ki pomagata pri določanju vrste režima krčenja kapljic. Nato smo opisali eksperiment, raziskovalno opremo in materiale, ki smo jih uporabljali.

Ugotovili smo, da so v našem sklopu meritev bili najbolj izraženi naslednji pojavi pri dinamiki kapljice: depozicija s ploskim robom, depozicija z valovitim robom ter delni odboj kapljice. Z meritvami smo potrdili, da je vrsta depozicije odvisna od vrste podlage in da se delni odboj največkrat pojavi na bolj hidrofobnih materialih [4]. Ugotovili pa smo tudi, da so pojavi depozicije in delnega odboja odvisni tudi od vpadne hitrosti kapljice pri trku.

Nato smo raziskali še, kako se maksimalni premer kapljice spreminja s časom po trku na določeni podlagi. Iz teh grafov (slika 9) smo odčitali tudi hitrost, s katero se je kapljica krčila. Pokazalo se je, da je hitrost krčenja kapljice odvisna od materiala podlage in da se na manj viskoznih materialih krči hitreje. Potrdili smo, da hitrost krčenja kapljice po trku, ni odvisna od vpadne hitrosti kapljice pred trkom na celotnem območju Webrovega števila [15].

S primerjavo maksimalnega premera kapljice v odvisnosti od Webrovega števila smo ugotovili, da je odvisnost potenčna s potenco med 0,27 in 0,33, kar je bližje odvisnosti $We^{1/4}$, kot so ugotovili Bartolo in soavtorji [15]. Potenčne odvisnosti med maksimalnim premerom kapljice in $Re^{1/5}$ nismo potrdili, saj se naši rezultati niso skladali z napovedanim trendom [4,16]. Glede na to, da smo našli potenčno odvisnost med Webrovim številom in maksimalnim premerom kapljice, sklepamo, da je pri krčenju prevladal inercialni režim.

Primerjali smo tudi minimalni premer kapljice v odvisnosti od Webrovega števila, pri čemer smo opazili, da je minimalni primer odvisen tako od lastnosti podlage kot tudi od hitrosti krčenja kapljice. Nismo pa opazili potenčne odvisnosti.

V prihodnje bi lahko še podrobneje raziskali dinamiko trkov kapljic z različnimi gostotami na enakih podlagah ter tako preverili kako viskoznost, gostota in površinska napetost tekočine, iz katere je kapljica, vplivajo na dinamiko trka. Dobro bi bilo tudi ponoviti eksperimente na silikonskem olju, kjer bi bila debelina nanosa na steklo približno tolikšna kot premer kapljice.

Viri in literatura

- [1] A. M. Worthington, *On Impact with a Liquid Surface*, Proc. R. Soc. Lond. **34**, 217 (1883).
- [2] A. M. Worthington in R. S. Cole, *V. Impact with a Liquid Surface, Studied by the Aid of Instantaneous Photography*, Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Contain. Pap. Math. Phys. Character **189**, 137 (1897).
- [3] A. L. Yarin, *DROP IMPACT DYNAMICS: Splashing, Spreading, Receding, Bouncing...*, Annu. Rev. Fluid Mech. **38**, 159 (2006).
- [4] C. Josserand in S. T. Thoroddsen, *Drop Impact on a Solid Surface*, Annu. Rev. Fluid Mech. **48**, 365 (2016).

- [5] M. Marengo, C. Antonini, I. V. Roisman in C. Tropea, *Drop Collisions with Simple and Complex Surfaces*, Curr. Opin. Colloid Interface Sci. **16**, 292 (2011).
- [6] S. Moghtadernejad, C. Lee in M. Jadidi, *An Introduction of Droplet Impact Dynamics to Engineering Students*, Fluids **5**, 107 (2020).
- [7] S. Mangili, C. Antonini, M. Marengo in A. Amirfazli, *Understanding the Drop Impact Phenomenon on Soft PDMS Substrates*, Soft Matter **8**, 10045 (2012).
- [8] A. Alizadeh, V. Bahadur, W. Shang, Y. Zhu, D. Buckley, A. Dhinojwala in M. Sohal, *Influence of Substrate Elasticity on Droplet Impact Dynamics*, Langmuir **29**, 4520 (2013).
- [9] C. Lee, H. Kim in Y. Nam, *Drop Impact Dynamics on Oil-Infused Nanostructured Surfaces*, Langmuir **30**, 8400 (2014).
- [10] L. Chen, E. Bonaccorso, P. Deng in H. Zhang, *Droplet Impact on Soft Viscoelastic Surfaces*, Phys. Rev. E **94**, 063117 (2016).
- [11] Z. Che in O. K. Matar, *Impact of Droplets on Immiscible Liquid Films*, Soft Matter **14**, 1540 (2018).
- [12] M. Muschi, B. Brudieu, J. Teisseire in A. Sauret, *Drop Impact Dynamics on Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces: Influence of Oil Thickness*, Soft Matter **14**, 1100 (2018).
- [13] K. C. M. Limpens, *Droplet Dynamics of Newtonian Fluids and Blood on Polyester Fabric*, diplomsko delo (Univerza v Amsterdamu, Amsterdam, 2017).
- [14] B. Basso, *The Role of Substrate Elasticity in Droplet Splashing*, magistrsko delo (Univerza v Clemsonu, Clemson, 2020).
- [15] D. Bartolo, C. Josserand in D. Bonn, *Retraction Dynamics of Aqueous Drops upon Impact on Non-Wetting Surfaces*, J. Fluid Mech. **545**, 329 (2005).
- [16] N. Laan, K. G. De Bruin, D. Bartolo, C. Josserand in D. Bonn, *Maximum Diameter of Impacting Liquid Droplets*, Phys. Rev. Appl. **2**, 044018 (2014).
- [17] D. Li, editor, *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics* (Springer US, Boston, MA, 2008).