



**Kauno technologijos universitetas**

Cheminės technologijos fakultetas

**Tekstūruotų ir hidrofobinių dangų sąveika su mikrobiologine  
tarša ir jų poveikis hidrodinaminiam pasipriešinimui**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Ainė Antanavičė**

Projekto autorė

**Doc. dr. Ilona Jonuškienė**

Vadovė

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**

Cheminės technologijos fakultetas

# **Tekstūruotų ir hidrofobinių dangų sąveika su mikrobiologine tarša ir jų poveikis hidrodinaminiam pasipriešinimui**

Baigiamasis magistro projektas

Pramoninė biotechnologija (6211FX010)

---

**Ainė Antanavičė**

Projekto autorė

**Doc. dr. Ilona Jonuškienė**

Vadovė

**V. m. d. Lina Vorotinskienė**

Mokslinis konsultantas

**M. d. dr. Kazimieras Anusevičius**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**

Cheminės technologijos fakultetas

Ainė Antanavičė

## **Tekstūruotų ir hidrofobinių dangų sąveika su mikrobiologine tarša ir jų poveikis hidrodinaminiam pasipriešinimui**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Ainė Antanavičė

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Antanavičė, Ainė. Tekstūruotų ir hidrofobinių dangų sąveika su mikrobiologine tarša ir jų poveikis hidrodinaminiam pasipriešinimui. Magistro baigiamasis projektas / vadovė doc. dr. Ilona Jonuškienė; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Biotechnologijos, Technologijų mokslai.

Reikšminiai žodžiai: garų plėvelė, trinties mažinimas, superhidrofobinės dangos, antibakteriškumas.

Kaunas, 2026. 59 p.

### Santrauka

Baigiamajame magistro projekte buvo siekiama iširti skirtingų paviršių įtaką biologiniam apaugimui Kuršių marių vandenyse, bei antibakterinį aktyvumą prieš gramteigiamas ir gramneigiamas bakterijas. Šiame darbe taip pat buvo tiriami skirtingų paviršių aliuminio ir vario metalų mėginiai, jų kontaktinis kampas su vandens lašu, paviršiaus morfologija, bei jo įtaka garų plėvelės susidarymui, išsilaikymui ir hidrodinaminiam pasipriešinimui.

Tyrimo metu nustatyta, kad superhidrofobine danga dengti paviršiai, ypač  $\text{Al}+\text{ZnO}_{\text{PMHS}}$  ir  $\text{Cu}+\text{ZnO}_{\text{PMHS}}$ , pasižymi itin dideliu kontaktiniu kampu (iki  $180^\circ$ ), kuris reikšmingai veikia garų plėvelės formavimąsi ir stabilumą. Aušinimo dinamikos tyrimai parodė, kad tiek aliuminio, tiek vario paviršių modifikavimas (tekstūravimas ir padengimas superhidrofobine danga  $\text{ZnO}_{\text{PMHS}}$ ) sumažina Leidenfrost efekto kritinę susidarymo temperatūrą bei pailgina garų plėvelės gyvavimo trukmę. Aliuminio atveju garų plėvelės išsilaikymo trukmė prailgėjo nuo trumpalaikės (1-2 s) poliruotame paviršiuje iki  $\sim 12$  s naudojant dangą, kai bandinio temperatūra buvo  $300^\circ\text{C}$ , o vandens temperatūra  $25 - 40^\circ\text{C}$ . Vario bandiniams kritinė temperatūra sumažėjo iki  $160^\circ\text{C}$  bei plėvelės trukmė viršijo 14 s naudojant superhidrofobinę dangą. Hidrodinaminio pasipriešinimo tyrimai atskleidė, kad mažiausias pasipriešinimas pasiekiamas aukštosiose temperatūrose, o kritimo greitis priklauso nuo paviršiaus apdorojimo. Naudojant aliuminio bandinius, didžiausias greitis siekė  $1,021\text{ m/s}$  prie  $300^\circ\text{C}$  bandinio ir  $40^\circ\text{C}$  vandens temperatūros, o vario – net  $2,152\text{ m/s}$  prie  $280^\circ\text{C}$  bandinio ir  $20^\circ\text{C}$  vandens temperatūrų, kai bandiniai yra padengiami superhidrofobinėmis dangomis. Tai patvirtina, kad aplink bandinį susidariusi garų plėvelė gali sumažinti trintį tarp paviršiaus ir vandens. Be to, nustatyta, kad superhidrofobinės  $\text{ZnO}_{\text{PMHS}}$  dangos suteikia antibakterinių savybių: didžiausias efektyvumas pasiektas prieš gramteigiamas *Bacillus subtilis* (slopinimo zona  $2,5\text{ cm}$ ), ir prieš gramneigiamas *E. coli* bakterijas (slopinimo zona  $1,9\text{ cm}$ ). Biologinio apaugimo tyrimai parodė, kad vario paviršiai dėl jonų poveikio yra atsparūs apaugimui, o aliuminio paviršiuose tekstūravimas ir dangos sumažina apaugimą atitinkamai  $27,7\%$  ir  $35,4\%$ .

Antanavičė, Ainė. Interaction of Textured and Hydrophobic Coatings with Microbiological Contamination and Their Effect on Hydrodynamic Resistance. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. dr. Ilona Jonuškienė; Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Biotechnology, Technological Sciences.

Keywords: vapor film, friction reduction, superhydrophobic coatings, antibacterial.

Kaunas, 2026. 59.

### Summary

During this study, the influence of different surface types on biological fouling in the Curonian Lagoon was investigated, as well as antibacterial activity against Gram-positive and Gram-negative bacteria. Additionally, samples of aluminum and copper metals with different surface properties were examined, including their contact angle with a water droplet, surface morphology, and its effect on the formation and stability of a vapor film, as well as hydrodynamic resistance.

The results showed that surfaces coated with a superhydrophobic layer, especially Al+ZnO<sub>PMHS</sub> and Cu+ZnO<sub>PMHS</sub>, exhibited extremely high contact angles (up to 180°), which significantly influenced the formation and stability of the vapor film. Cooling dynamics experiments revealed that surface modification of both aluminum and copper (through texturing and coating with a ZnO<sub>PMHS</sub> superhydrophobic layer) reduced the critical temperature for the onset of the Leidenfrost effect and extended the lifetime of the vapor film. In the case of aluminum, the vapor film duration increased from short-lived (1 – 2 s) on polished surfaces to approximately 12 s when coated, at a sample temperature of 300 °C and water temperatures of 25 – 40 °C. For copper, the critical temperature decreased to 160 °C, and the vapor film duration exceeded 14 s when using the superhydrophobic coating. Hydrodynamic resistance studies demonstrated that the lowest resistance occurs at higher temperatures, while the falling velocity depends on surface treatment. For aluminum samples, the maximum velocity reached 1.021 m/s at a sample temperature of 300 °C and water temperature of 40 °C, whereas for copper it reached up to 2.152 m/s at 280 °C and 20 °C, particularly when superhydrophobic coatings were applied. These results confirm that the vapor film formed around the sample reduces friction between the surface and water. Furthermore, ZnO<sub>PMHS</sub> superhydrophobic coatings exhibited antibacterial properties, with the highest effectiveness against Gram-positive *Bacillus subtilis* (inhibition zone of 2.5 cm) and Gram-negative *E. coli* bacteria (inhibition zone of 1.9 cm). Biofouling studies showed that copper surfaces are resistant to fouling due to the presence of copper ions, while for aluminum surfaces, texturing and coatings reduced biofouling by 27.7% and 35.4%, respectively.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Literatūros apžvalga .....</b>	<b>12</b>
1.1. Jūrų transporto svarba ir jų konstrukcijos .....	12
1.2. Aliuminis laivų konstrukcijose.....	13
1.3. Varis laivų konstrukcijose .....	13
1.4. Energijos efektyvumas ir pasipriešinimo mažinimas aktyviaisiais metodais.....	14
1.5. Energijos efektyvumas ir pasipriešinimo mažinimas pasyviaisiais metodais .....	16
1.6. Biologinio apaugimo įtaka ir jo mažinimas laivybos pramonėje .....	18
1.7. Laivų konstrukcijose naudojamos dangos nuo biologinio apaugimo ir joms keliami reikalavimai .....	19
1.8. Literatūros apžvalgos apibendrinimas .....	21
<b>2. Medžiagos ir tyrimų metodai .....</b>	<b>22</b>
2.1. Tyrimuose naudotos įrangos sąrašas .....	22
2.2. Tyrimuose naudotos darbo priemonės.....	22
2.3. Tyrimuose naudoti reagentai .....	22
2.4. Medžiagos ir bandiniai .....	23
2.5. Aliuminio bandinių (Al-NaOH) cheminis tekstūravimas.....	23
2.6. Vario bandinių (Cu-FeCl <sub>3</sub> ) cheminis tekstūravimas.....	23
2.7. Aliuminio (Al+ZnO <sub>PMHS</sub> ) ir vario (Cu+ZnO <sub>PMHS</sub> ) mėginių dengimas superhidrofobine TEOS-ZnO-PMHS danga .....	23
2.8. Aliuminio ir vario bandinių hidrofobiškumo kontaktinio kampo nustatymas .....	23
2.9. Tyrimui naudojamų mėginių morfologinė analizė skenuojančiu elektronų mikroskopu (SEM) .....	25
2.10. Garų plėvelės kritinių parametrų identifikavimas .....	25
2.11. Mėginių kaitinimo laiko nustatymas .....	26
2.12. Eksperimentinis stendas trinties pasipriešinimui nustatyti.....	28
2.13. Garų plėvelės tyrimo nustatymas .....	29
2.14. Tiriamųjų bandinių antibakterinis aktyvumas prieš gramteigiamas ( <i>Bacillus subtilis</i> ) ir gramneigiamas ( <i>E. coli</i> ) bakterijas .....	29
2.15. Tiriamųjų bandinių sąveikos su mikrobiologine tarša Kuršių mariose tyrimas .....	30
<b>3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas.....</b>	<b>32</b>
3.1. Garų plėvelės susidarymo tyrimas .....	32
3.1.1. Tekstūravimo ir superhidrofobinės dangos įtaka garų plėvelės susidarymui ir jos gyvavimo laikui ant Al paviršiaus bandinių .....	32
3.1.2. Tekstūravimo ir superhidrofobinės dangos įtaka garų plėvelės susidarymui ir jos gyvavimo laikui ant Cu bandinių .....	37
3.2. Hidrodinaminio pasipriešinimo tyrimas .....	40
3.2.1. Al bandinių hidrodinaminio pasipriešinimo skirtingose vandens temperatūrose tyrimas.....	40
3.2.2. Cu bandinių hidrodinaminio pasipriešinimo tyrimas .....	42
3.3. Bandinių antibakterinis aktyvumas prieš gramneigiamas ( <i>Escherichia coli</i> ) ir gramteigiamas ( <i>Bacillus subtilis</i> ) bakterijas .....	43

3.4. Tiriamųjų bandinių sąveikos su mikrobiologine tarša Kuršių mariose tyrimų .....	45
3.4.1. Tekstūravimo ir superhidrofobinės dangos ant Al bandinių įtaka biologiniam apaugimui ..	45
3.4.2. Tekstūravimo ir superhidrofobinės dangos ant Al bandinių įtaka biologiniam apaugimui ..	46
<b>4. Rekomendacijų dalis .....</b>	<b>47</b>
<b>Išvados .....</b>	<b>49</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>50</b>

## Lentelių sąrašas

<b>2.1 lentelė.</b> Bandinių tipas ir tyrimo sąlygos .....	29
<b>2.2 lentelė.</b> Antibiotiko ciprofloksacino paruošimas .....	29
<b>3.1 lentelė.</b> Garų plėvelės formavimosi trukmė ant bandinio paviršiaus .....	37
<b>3.2 lentelė.</b> Ant skirtingo paviršiaus aliuminio bandinių susiformavusios darų plėvelės storis, mm	37
<b>3.3 lentelė.</b> Garų plėvelės formavimosi trukmė ir jos storis ant bandinio paviršiaus .....	40
<b>4.1 lentelė.</b> Aparatūrinėje schemoje naudojami prietaisai .....	48

## Paveikslų sąrašas

<b>1.1 pav.</b> Garų sluoksnio susidarymas aplink laivo kurpusą, siekiant sumažinti trinties pasipriešinimą .....	15
<b>1.2 pav.</b> Leidenfrosto efektas .....	16
<b>1.3 pav.</b> Biologinis apaugimas laivyboje .....	19
<b>1.4 pav.</b> Superhidrofobinių ZnO vamzdelių pritaikomumas .....	21
<b>2.1 pav.</b> (A) Al, (B) Al-NaOH, (c) Al+ZnO <sub>PMHS</sub> (d) Cu, (e) Cu-FeCl <sub>3</sub> ir (f) Cu+ZnO <sub>PMHS</sub> sąlyčio kampai su vandens lašeliu .....	24
<b>2.2 pav.</b> SEM analizė atlikta su (a) Al, (b) Cu, (c) Al-NaOH, (d) Cu-FeCl <sub>3</sub> , (e) Al+ZnO <sub>PMHS</sub> ir (f) Cu+ZnO <sub>PMHS</sub> bandiniais .....	25
<b>2.3 pav.</b> Garų plėvelei nustatyti skirtas eksperimentinis stendas .....	26
<b>2.4 pav.</b> Mėginių kaitinimo laiko nustatymas .....	27
<b>2.5 pav.</b> Hidrodinaminio pasipriešinimo tyrimams naudojamo eksperimentinio stendo principinė schema .....	28
<b>2.6 pav.</b> Antibakterinio poveikio įvertinimas .....	30
<b>2.7 pav.</b> Tiriamųjų plokštelių paruošimas prieš merkiant jas į Kuršių marias .....	30
<b>3.1 pav.</b> Garų plėvelės pokyčiai .....	32
<b>3.2 pav.</b> Aušimo dinamikos (A) ir išvestinės (B) Al, Al-NaOH ir Al+ZnO <sub>PMHS</sub> bandinių įkaitintų iki 200 °C auštant 1) 25 °C; 2) 30 °C; 3) 35 °C; 4) 40 °C vandenyje .....	34
<b>3.3 pav.</b> Aušimo dinamikos (A) ir išvestinės (B) Al, Al-NaOH ir Al+ZnO <sub>PMHS</sub> bandinių įkaitintų iki 300 °C auštant 1) 25 °C; 2) 30 °C; 3) 35 °C; 4) 40 °C vandenyje .....	36
<b>3.4 pav.</b> Aušimo dinamikos (A) ir išvestinės (B) Cu, Cu-FeCl <sub>3</sub> ir Cu+ZnO <sub>PMHS</sub> bandinių 20 °C vandens temperatūroje, kai bandinio temperatūra 1) 160 °C; 2) 200 °C 3) 240 °C 4) 280 °C .....	39
<b>3.5 pav.</b> Aliuminio mėginių kritimo greičiai esant skirtingoms paviršiaus ir vandens temperatūros 41	
<b>3.6 pav.</b> Vario mėginių kritimo greičiai esant skirtingoms paviršiaus temperatūroms prie 20 °C vandens temperatūros .....	42
<b>3.7 pav.</b> Antibakterinis tiriamųjų bandinių vertinimas naudojant gramteigiamas <i>Bacillus subtilis</i> bakterijas .....	43
<b>3.8 pav.</b> Antibakterinis aktyvumas prieš gramteigiamas <i>B. subtilis</i> bakterijas A) Antibiotiko ciprofloksacino B) vario, dengto superhidrofobine ZnO <sub>PMHS</sub> tiriamuosiuose bandiniuose .....	44
<b>3.9 pav.</b> Antibakterinis tiriamųjų bandinių vertinimas naudojant gramneigiamas <i>E. coli</i> bakterijas 44	
<b>3.10 pav.</b> Biologinio apaugimo tyrimo rezultatai naudojant skirtingo paviršiaus aliuminio plokšteles .....	45
<b>3.11 pav.</b> Aliuminio plokštelės prieš merkimą į Kuršių marias: 1) Al 2) Al-NaOH 3) Al+ZnO <sub>PMHS</sub> ir jų biologinis apaugimas po 5 mėnesių 1.2) Al 2.2) Al-NaOH 3.2) Al+ZnO <sub>PMHS</sub> .....	45
<b>3.12 pav.</b> Vario plokštelės prieš merkimą į Kuršių marias: 1) Cu 2) Cu-FeCl <sub>3</sub> 3) Cu+ZnO <sub>PMHS</sub> ir jų biologinis apaugimas po 5 mėnesių 1.2) Cu 2.2) Cu-FeCl <sub>3</sub> 3.2) Cu+ZnO <sub>PMHS</sub> .....	46
<b>4.1 pav.</b> Aparatūrinė schema superhidrofobinių dangų formavimui ir jų pritaikymui hidrodinaminio pasipriešinimo mažinimui bei biologinio apaugimo prevencijai .....	48

## Santrumpų ir terminų sąrašas

Al – aliuminis;

Al-NaOH – aliuminis tekstūruotas NaOH tirpale;

Al+ZnO<sub>PMHS</sub> – aliuminis dengtas superhidrofobine ZnO<sub>PMHS</sub> danga;

Cu – varis;

Cu-FeCl<sub>3</sub> – varis tekstūruotas FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O tirpale;

Cu+ZnO<sub>PMHS</sub> – varis dengtas superhidrofobine ZnO<sub>PMHS</sub> danga;

LE – Leidenfrosto efektas;

PMHS – polimetilhidrosiloksanas;

SEM – skenuojantis elektronų mikroskopas;

SHS – superhydrophobic surfaces;

TEOS – tetraetilortosilikatas;

WCA – water contact angle;

ZnO – cinko oksidas.

## Įvadas

Vienas iš svarbiausių aplinkos taršos šaltinių yra tarptautinė laivyba – maždaug 80 % pasaulinės prekybos vyksta jūrų transportu, o šis sektorius generuoja apie 3 % viso pasaulinio CO<sub>2</sub>, 14-15 % NO<sub>x</sub> ir apie 16 % SO<sub>x</sub> emisijų [1]. Dėl šios priežasties vis daugiau dėmesio skiriama technologijoms, galinčioms efektyviai mažinti laivų degalų sąnaudas ir aplinkai daromą poveikį. Didelę laivo energijos sąnaudų dalį sudaro hidrodinaminis pasipriešinimas, kuris dar labiau išauga dėl ant korpuso paviršiaus besikaupiančių mikroorganizmų ir jūrinių organizmų, tokių kaip dumbliai, moliuskai ar bakterijos [2]. Šis reiškinys, vadinamas biologine tarša (angl. biofouling), ilgainiui didina paviršiaus šiurkštumą ir sukelia papildomą trintį, todėl didėja tiek degalų sąnaudos, tiek išmetamų teršalų kiekis. Dėl to tampa svarbu ieškoti sprendimų, susijusių su paviršiaus modifikavimu ar apdorojimu, siekiant sumažinti arba išvengti šio neigiamo poveikio [3].

Moksliniuose tyrimuose išskiriamos dvi pagrindinės hidrodinaminio pasipriešinimo mažinimo kryptys – aktyvūs ir pasyvūs metodai [4]. Aktyvūs metodai, tokie kaip oro ar garų sluoksnio formavimas tarp paviršiaus ir skysčio, gali sumažinti trintį apie 10-15 %, o tam tikrais atvejais – net iki 16,61 % [5]. Šiam tikslui taikomi įvairūs sprendimai, pavyzdžiui, oro burbuliukų įpurškimas, kavitacija, superkavitacija bei Leidenfrosto efektas, kai aukštoje temperatūroje tarp skysčio ir kieto paviršiaus susidaro garų sluoksnis [6]. Tuo tarpu pasyvūs metodai grindžiami paviršiaus savybių keitimu, pavyzdžiui, kuriant tekstūruotus ar superhidrofobinius paviršius. Vienas iš pavyzdžių – vadinamosios „dirbtinės ryklio odos“ (angl. *shark skin*) struktūros arba mikro grioveliai („ribletai“), kurie leidžia sumažinti trintį slopindami turbulentinio sluoksnio formavimąsi. Tokie sprendimai taikomi ne tik laivyboje, bet ir aviacijoje, vėjo energetikoje bei geležinkelių transporte, kur svarbus efektyvus pasipriešinimo mažinimas ir geresnės eksploatacinės savybės [3].

Nepaisant reikšmingos pažangos šioje srityje, vis dar trūksta išsamių tyrimų, nagrinėjančių aktyvių ir pasyvių metodų derinimą, kuris galėtų užtikrinti dar didesnę efektyvumą mažinant trintį. Naujausi darbai rodo, kad superhidrofobiniai paviršiai gali sustiprinti Leidenfrosto efektą, nes jų struktūra ir hidrofobiškumas padeda išlaikyti garų sluoksnį. Vienas perspektyviausių sprendimų – ZnO tetrapodų padengimas polimeru, kuris pasižymi gebėjimu stabilizuoti garų sluoksnį ir taip mažinti hidrodinaminį pasipriešinimą [7].

**Tyrimo tikslas** - ištirti, kokią įtaką skirtingomis medžiagomis padengti paviršiai gali turėti sąveikaujant su mikrobiologine tarša, garų plėvelei (Leidenfrosto efekto) susidaryti ir hidrodinaminiam pasipriešinimui mažinti.

### Tyrimo uždaviniai:

1. išmatuoti skirtingų paviršių (tekstūruotų ir dengtų superhidrofobine ZnO+PMHS danga) sąlyčio su vandens lašu kontaktinius kampus;
2. ištirti vario ir aliuminio skirtingais paviršiais dengtų bandinių paviršių sąveiką su mikrobiologine tarša Kuršių mariose, Smiltynės jachtklube;
3. ištirti vario ir aliuminio skirtingais paviršiais dengtų bandinių antibakterines savybes;
4. nustatyti skirtingais paviršiais padengtų bandinių įtaką garų plėvelės susidarymui ir jos išsilaikymui;
5. nustatyti skirtingais paviršiais padengtų bandinių įtaką hidrodinaminiam pasipriešinimui.

## 1. Literatūros apžvalga

### 1.1. Jūrų transporto svarba ir jų konstrukcijos

Jūrų transportas sudaro apie 80 % tarptautinės prekybos ir yra viena iš didžiausių kuro sąnaudų šaltinių visoje transporto pramonėje [8]. Laivų eksploatacijos metu į aplinką išskiriama didelė anglies dioksido (CO<sub>2</sub>), sieros oksidų (SO<sub>x</sub>), azoto oksidų (NO<sub>x</sub>), kietųjų dalelių ir kitų šiltnamio efektą sukeliančių dujų koncentracija. Todėl Tarptautinė jūrų organizacija (IMO) nustatė tikslą iki 2030 m sumažinti bendras metines šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas jūrų transporte 40 %, lyginant su 2008 m [9]. Jūrų sektoriuje kuro sąnaudas taip pat lemia tokie veiksniai kaip laivo greitis, pagrindinio variklio ir sraigto našumas, pasirinktas maršrutas, laivo padėtis ir aplinkos sąlygos, tokios kaip vėjas ar srovė [10]. Tyrimai taip pat rodo, kad bangavimas vanduo žymiai padidina kuro sąnaudas dėl didesnio hidrodinaminio pasipriešinimo, palyginti su ramiu vandeniu [11].

Efektyvus energijos naudojimas yra vienas pagrindinių Europos žaliosios energetikos tikslų, o šią politiką reglamentuoja kelios direktyvos. Pagal Europos Sąjungos reikalavimus visos ES valstybės narės 2024-2030 m laikotarpiu turi pasiekti 1,49 % metinį energijos sutaupymą. Energija daugiausia turi būti taupoma didžiausių energijos poreikį turinčiuose sektoriuose, tokiuose kaip pastatų, pramonės ar transporto sektoriai. Transporto sektoriuje efektyvų energijos naudojimą ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų mažinimą galima pasiekti taikant įvairias strategijas: tobulinant transporto sistemų projektavimą, diegiant naujas technologijas arba mažinant trinties pasipriešinimo koeficientą. Vertinant jūrų transporto sektorių, ataskaitose nurodoma, kad laivai sukuria apie 13,5 % visų transporto sektoriaus šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų Europos Sąjungoje.

Tvarus energijos naudojimas ir plėtra tampa vienu pagrindinių energetikos strategijų klausimų daugelyje šalių, nes pasaulio iškastinio kuro energijos išteklių yra riboti [12]. Pastaruoju metu atlikta daug mokslinių tyrimų, ieškant būdų taupyti energiją – ne tik kurti naujas inovatyvias technologijas, bet ir tobulinti tradicines technologijas pramonės, energetikos ir transporto sektoriuose. Daugelyje inžinerinių sričių, susijusių su skysčių srautais, energijos taupymas gali būti pasiektas taikant pasipriešinimo koeficiento (ang. *drag reduction coefficient* - DC) mažinimo metodus. Mokslinėje literatūroje pateikiama daug metodų, kaip galima sumažinti pasipriešinimą [12], tiriant objekto dydį [13], formą [14], svorį [15] arba pagrindines konstrukcines medžiagas [16].

Todėl pasipriešinimo mažinimas jūrų sektoriuje tampa svarbia užduotimi tiek moksliniuose tyrimuose, tiek praktiniuose inžineriniuose sprendimuose. Padidėjęs pasipriešinimas didina transporto priemonės energijos sąnaudas proporcingai jos greičio kubui. Sumažinus pasipriešinimą 28 %, degalų sutaupoma apie 10 %, kartu panašiai sumažėja ir emisijos [17]. Yra daug žinomų metodų, kurie gali būti naudojami hidrodinaminės trinties pasipriešinimui mažinti: burbuliukų naudojimas pasipriešinimo mažinimui [18], paviršiaus struktūros projektavimas [19] bei superhidrofobinių paviršių taikymas [20].

Statant laivą reikia atsižvelgti į tam tikrus reikalavimus ir sąlygas. Tam būtina pasirinkti tinkamas medžiagas, kad būtų pasiektas geriausias įmanomas rezultatas. Yra įvairių jūrinių dyzelinių variklių komponentų, daugybę laivų tipų ir kitų jūrinių konstrukcijų. Tačiau jų konstrukcijoje naudojamos medžiagos dažnai yra panašios. Pagrindinės laivų statybos medžiagos yra geležis, titanas, plienas, aliuminis, jo mišiniai, polimerai ir kt. [21]. Visos šios medžiagos pasižymi skirtingomis savybėmis, priklausomai nuo jų paskirties, tačiau tam tikros eksploatacinės sąlygos lemia konkrečių medžiagų pasirinkimą. Laivų kuro sąnaudų efektyvumą galima padidinti mažinant trinties pasipriešinimą.

Hidrodinaminį pasipriešinimą galima sumažinti taikant įvairius metodus: optimizuojant laivo korpusą, įrengiant energiją taupančias sistemas, naudojant superhidrofobines antibakterines dangas, mikro graviruotus paviršius, oro lubrikacijos sistemas arba sukuriant stabilų garų sluoksnį tarp objekto ir skysčio.

## 1.2. Aliuminis laivų konstrukcijose

Aliuminio lydiniai turi daug privalumų, palyginti su nerūdijančio plieno lydiniais, kai kalbama apie laivų statybą. Plieno lydiniai yra sunkesni nei aliuminio lydiniai (aliuminio lydinio tankis yra  $2,723 \text{ t/m}^3$ , o nerūdijančio plieno –  $7,84 \text{ t/m}^3$ ) [22]. Šios vertės rodo, kad naudojant aliuminio konstrukciją galima sutaupyti apie 65 % svorio, palyginti su konstrukcija iš nerūdijančio plieno. Atsižvelgiant į prekybinius laivus, tai yra pagrindinis privalumas. Be to, aliuminis yra daug atsparesnis korozijai [23].

Šiais laikais didesni laivai dažnai statomi naudojant aliuminio lydinius, nes tai sumažina vandens talpą. Taip pat pagerėja laivo skersinis stabilumas. Iš aliuminio pastatytų laivų svorio centras yra žemesnis nei plieninių, nes dėl mažesnio svorio antstatas yra aukščiau svorio centro. Tačiau kartais mažesnis svoris gali sumažinti komfortą, ypač laivuose – lengvos konstrukcijos korpusas dažnai sukelia didesnę triukšmą ir judesius. Todėl kai kuriais atvejais laivams gali būti naudingesnis didesnis svorio pasiskirstymas [24].

Aliuminio lydinių naudojimą laivų statyboje riboja keli veiksniai: didelės gamybos sąnaudos (reikalingos specialios suvirinimo technologijos), degumas, jautrumas korozijai sūriame vandenyje ir santykinis minkštumas, dėl kurio detalės gali lengviau dėvėtis dėl **trinties**.

## 1.3. Varis laivų konstrukcijose

Vario-nikelio naudojimas jūriniuose laivuose gali būti taikomas apsaugai nuo korozijos pusrūšų zonoje ir (arba) siekiant sumažinti biologinį apaugimą, o kartu – trinties pasipriešinimą arba sumažinti valymo poreikį platformų atramoms ir stovams. Siekiant apsaugos nuo biologinio apaugimo, ji tiekama kaip kompozitinis produktas – puscilindrių lakštai, perforuoti lakštai, granulės ar viela, pritvirtinti prie izoliacinio pagrindo, pavyzdžiui, neopreno [25]. Komercinėje rinkoje prieinamas produktas su įterptomis vario–nikelio granulėmis buvo sėkmingai naudojamas konstrukcinių atramų, skersinių jungčių ir stovų vamzdžių apsaugai. Vario-nikelio lydiniai taip pat naudojami kaip vientisi lakštai arba valcuoti ant plieno laivų korpusams bei platformų konstrukcijoms. Šis lydinys buvo įteisintas įvairiuose tarptautiniuose standartuose, o dėl gerų fizinių ir mechaninių savybių jis lengvai apdorojamas. Švariame, deguonimi prisotintame jūros vandenyje jis pasižymi puikiu atsparumu ir vienodai, ir lokalizuotai korozijai. Maksimalus leistinas vandens srautas daugumoje taikymų yra pakankamai didelis, kad jo naudojimas kaip vamzdyno medžiagos būtų ekonomiškai.

Vario-nikelio lydinys taip pat labai atsparus makroapaugimui dėl vario jonų išsiskyrimo ir oksidinių sluoksnių struktūros, susidarančios natūralios korozijos proceso metu. Tai naudinga ne tik jūros vandens sistemoms, bet ir, derinant su atsparumu korozijai, tinka jūrinių konstrukcijų ir laivų korpusų apsaugai [25]. Švariame, natūraliame jūros vandenyje CuNi 90/10 lydinys pasižymi dideliu atsparumu lokalizuotai korozijai, ir ši atsparumo savybė išlieka net esant aukštesnėms temperatūroms [26].

Varis plačiai pripažįstamas dėl savo plataus spektro antimikrobinų ir biologinio apaugimo prevencijos savybių [27]. Šis elementas jau seniai naudojamas kaip antimikrobinė medžiaga, tačiau tikslus mechanizmas, kuriuo varis arba vario jonai naikina bakterijas, vis dar nėra iki galo išaiškintas. Antimikrobinės vario savybės daugiausia siejamos su jo jonų ( $\text{Cu}^+$  ir  $\text{Cu}^{2+}$ ) išsiskyrimu, kurie pažeidžia mikroorganizmų membranas (I etapas – vadinamasis kontaktinis naikinimas) [28]. Viena iš vario savybių yra didelis artumas biologinėms molekulėms, dėl kurio jis gali išstumti kitus jonus iš biologinių junginių.

Kitas veikimo mechanizmas, susijęs su oksidacinio streso sukėlimu, kai susidaro reaktyviosios deguonies formos (ROS), kurios pažeidžia mikroorganizmus generuodamos didelį kiekį oksidatorių, pavyzdžiui, deguonies jonų [29]. Varis taip pat gali inaktyvuoti svarbius fermentus, jungdamasis prie įvairių funkcinių grupių (pvz., tiolio) bei trikdyti DNR replikacijos procesus, taip sutrikdydamas normalias fermentines funkcijas [30].

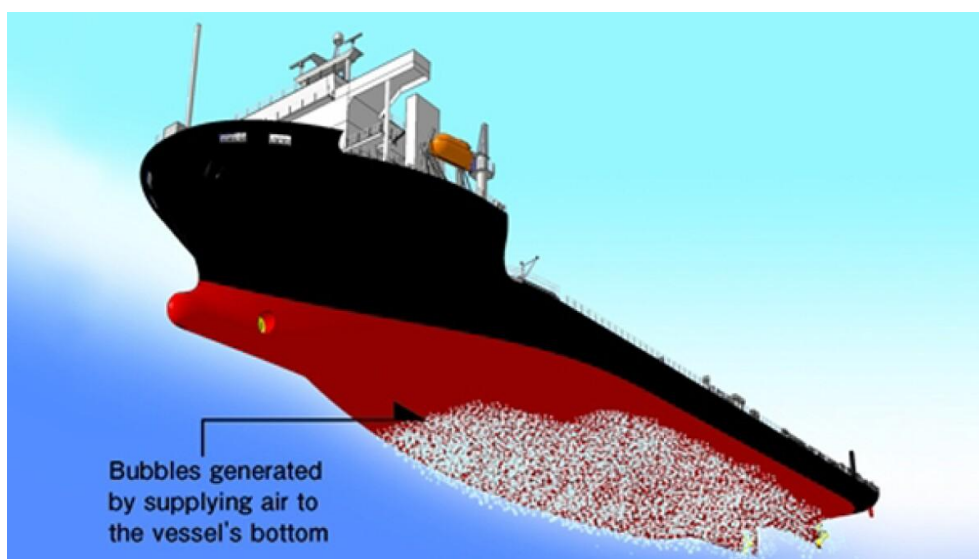
Jūrų aplinkoje biologinio apaugimo formavimasis prasideda nuo organinio kondicionuojančio sluoksnio susidarymo, po kurio seka bakterijų kolonizacija. Kitas etapas yra biofilmo formavimasis, kuris sukuria tinkamą substratą makroapnašų organizmams, tokiems kaip kriauklės, midijos ir dumbliai, įsitvirtinti [31]. Biofilmuose mikroorganizmai yra apsaugoti ekstraląstelinių polimerinių medžiagų (EPS) matrica [32]. Šiame kontekste varis slopina ankstyvojo etapo kolonizaciją, trukdydamas bakterijoms prisitvirtinti ir mažindamas EPS gamybą. Dėl to cheminiai ir biologiniai signalai, kuriuos išskiria subrendęs biofilmas ir kurie yra būtini lervoms prisitvirtinti, reikšmingai sumažėja [33].

#### **1.4. Energijos efektyvumas ir pasipriešinimo mažinimas aktyviaisiais metodais**

Jūrų sektoriuje energijos sutaupymas gali būti pasiektas mažinant hidrodinaminį pasipriešinimą. Mokslinėje literatūroje pateikiamos dvi pasipriešinimo mažinančios priemonės – pasyvūs ir aktyvūs metodai [18].

Aktyvūs įrankiai ir metodai pasipriešinimui mažinti akademiniuose tyrimuose yra gana plačiai nagrinėti. Dažniausiai naudojami yra oro įpurškimas [34], polimerų priedai [35] arba Leidenfrost efektas. Pasipriešinimas gali būti sumažintas generuojant oro burbuliukus (taip pat vadinamus oro burbuliukų lubrikacija) arba garų sluoksnį aplink judantį objektą [36]. Literatūroje pateikiami tyrimų rezultatai, kuriuose teigiama, kad mikroburbuliukų purškimas prie laivo korpuso gali sumažinti pasipriešinimą iki 26 % [37]. Ši idėja vėliau buvo plėtojama ir pristatyta pramonės sektoriuose Japonijos įmonėse „Mitsubishi Heavy Industries“ ir „Samsung Heavy Industries“. Tačiau šios sistemos reikalauja sudėtingos oro pumpavimo įrenginių prie laivo korpuso [38]. Taip pat nustatyta, kad naudojant didelius burbuliukus prie laivo korpuso gali atsirasti papildomas turbulencijos klampumas, todėl laivas gali tapti nestabilus. Tyrimai parodė, kad pasipriešinimą galima sumažinti formuojant pasienio sluoksnį aplink objektus, kuriuos apteka skystis, o rezultatai rodo 26 % pasipriešinimo sumažėjimą ir iki 10 % energijos sutaupymą [39]. Todėl mokslinėje literatūroje tiriami metodai, leidžiantys formuoti arba didinti dujų sluoksnį šalia judančio objekto. Vienas iš tokių metodų yra burbuliukų įpurškimas prie laivo korpuso [40], kuris gali sumažinti pasipriešinimo koeficientą iki 5 %, kai burbuliukai įpurškiami periodiškai (1.1 pav.). Pavyzdžiui, oro tepimo technologija gali padidinti laivo eksploatacinį efektyvumą nuo 5 iki 20 %, o kiti tyrimai atskleidžia degalų sutaupymą iki 10-20 %. Šie skaičiai rodo, kad net palyginti nedidelis trinties sumažėjimas,

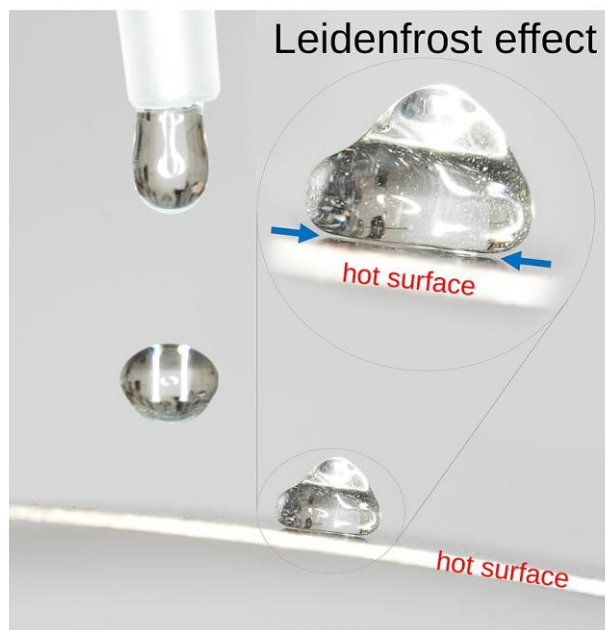
pavyzdžiui 40 %, gali lemti degalų sutaupymą iki 20 %, ypač jei kartu taikomos kelios inovatyvios paviršiaus modifikacijos kartu su oro tepimo sprendimais.



1.1 pav. Garų sluoksnio sudarymas aplink laivo korpusą, siekiant sumažinti trinties pasipriešinimą [41]

Kavitacija [42] taip pat gali sumažinti bendrą pasipriešinimą apie 15 % [43], tačiau oro kavitacijos efektyvumas mažėja didėjant laivo greičiui. Superkavitacija [44] gali turėti įtakos bendram pasipriešinimo sumažėjimui apie 16,61 % [45]. Viena iš priemonių, kuri gali būti naudojama kaip aktyvus pasipriešinimo mažinimo metodas, yra Leidenfrost efekto (LE) [46]. Šio proceso metu aplink įkaitintą paviršių susidaro garų plėvelė [47]. Tyrimai rodo, kad paviršiaus savybės, tokios kaip šiurkštumas [48], sudrėkimas [49] ar temperatūra [50], turi didelę įtaką Leidenfrost garų sluoksnio susidarymui. Tačiau žinoma, kad vanduo turi aukštą šilumos perdavimo koeficientą, todėl išlaikyti stabilų garų sluoksnį aplink judantį objektą yra sudėtinga. Todėl LE buvo tiriama įvairiuose skysčiuose, siekiant stebėti jo ypatybes, tokiuose kaip [51], Flutec perfluorokarboniniai skysčiai [52] ir kituose. Dauguma tyrimų pateikia straipsnių apie įvairių skysčių Leidenfrost temperatūrą (LT) skirtinguose paviršiuose [50]. Reikia pabrėžti, kad LE palaikymui reikalinga didelė energijos sąnauda; todėl jo pritaikymas dideliu mastu yra sudėtingas [18]. Tačiau kai kurie tyrimai buvo atlikti siekiant pritaikyti LE kaip palankų sprendimą pasipriešinimui mažinti [53]. Aprašytas tyrimų krypties pavadinimas kai kurioje literatūroje žinomas kaip „šaltas Leidenfrost režimas“, o eksperimentai ant plokščių paviršių parodė, kad LT gali būti pasiekta ant sąlyginai šaltų paviršių, kai temperatūra siekia tik apie 130 °C, stebint levituojantį lašelį [53].

Leidenfrost reiškinys (LR) ir Leidenfrost temperatūra (LT) (1.2 pav.) buvo tiriami ant įvairių dengtų ir nedengtų paviršių [54]. Mokslininkai mano, kad Leidenfrost temperatūros atsiradimas yra sunkiai prognozuojamas ir gali svyruoti nuo 185 °C iki daugiau nei 900 °C [55]. Kai kurios plėvelės gali padidinti Leidenfrost temperatūrą, palyginti su nedengtais paviršiais: pavyzdžiui, grafitas gali padidinti LR apie 100 °C [56], o vario oksido plėvelė ją padidina 16,67 %, palyginti su grynu variu [57]. Mikro ir nanostruktūrinės dangos, naudojamos ant aliuminio paviršiaus, gali pasiekti didesnę nei 500 °C Leidenfrost temperatūrą [58]. Kai kurios polimerinės plėvelės naudojamos norint pasiekti šiluminį stabilumą aplink įkaitintus vario pavyzdžius iki 400 °C [59], todėl stabilaus garų sluoksnio palaikymas taip pat yra pageidautinas. Norint sumažinti Leidenfrost temperatūrą, gali būti naudojamos tokios medžiagos kaip ZrSi<sub>2</sub> danga, kuri gali sumažinti LT 45 °C [60].



1.2 pav. Leidenfrosto efektas [61]

Mokslinėje literatūroje Leidenfrosto temperatūros eksperimentai daugiausiai buvo atliekami su stabiliais, nejudančiais įkaitintais paviršiais. Leidenfrosto temperatūrai nustatyti gali būti taikomi skirtingi metodai, kurie skirstomi į dvi pagrindines kategorijas: skirtingų skysčių lašinimas ant karšto paviršiaus arba įkaitintų kūnų panardinimas į įvairius skysčius. Dažniausiai Leidenfrosto temperatūros tyrimuose naudojami skysčiai yra vanduo, etanolis, FC-72, acetonas arba benzenas [55]. Tiriant Leidenfrosto temperatūrą aplink panardintus įkaitintus kūnus, aplinkinio skysčio temperatūra taip pat buvo nagrinėjama plačiame intervale nuo 25 °C iki 100 °C [62]. Dauguma publikacijų pateikia būdus, kaip padidinti Leidenfrosto temperatūrą ar ją valdyti, o tyrimai, siekiantys ją sumažinti, ir stebėti esant santykinai žemoms temperatūroms, nėra plačiai nagrinėjami ir pateikiami [63].

Dinaminiai eksperimentai su judančiais objektais ir Leidenfrosto reiškinių formavimu taip pat analizuojami mokslinėje literatūroje. Buvo atlikti tyrimai su sferiniais pavyzdžiais, kurių paviršius laisvo kritimo metu panirdavo į vandenį [64]. Rezultatai parodė, kad garų plėvelė buvo stebima 125 °C temperatūroje, kai bandinio greitis buvo 0,91 m/s, tačiau reiškinys nepasireiškė, kai greitis buvo 2,21 m/s. Tai patvirtina, kad garų susidarymą lemia ne tik pradinė įkaitinimo temperatūra, bet ir judėjimo greitis. Kai kurie eksperimentai taip pat buvo atlikti siekiant įvertinti įkaitintų sferų hidrodinaminį koeficientą, kai jos vertikalčiai patekdavo į 28 °C temperatūros vandenį skirtingais greičiais – 4, 10, 16 ir 20 m/s [65]. Nustatyta, kad hidrodinaminis koeficientas mažėja didėjant įkaitinto kūno temperatūrai. Tačiau esant temperatūrai virš 400 °C galima pastebėti kitokias tendencijas.

### 1.5. Energijos efektyvumas ir pasipriešinimo mažinimas pasyviaisiais metodais

Tyrimai patvirtina, kad pasyvusis metodas gali būti laikomas paviršiaus apdorojimu arba superhidrofobinio paviršiaus taikymu. Superhidrofobinis paviršius yra apibrėžiamas, kaip paviršius, kuris turi vandens kontaktinį kampą (*angl. Water contact angle – WCA*), viršijantį 150°, o slydimo kampas (*SA*) yra apie 10° [66], kuris pasiekiamas dėl mikro- ir nanomastelio paviršiaus šiurkštumo bei mažos paviršiaus energijos modifikacijos. Paviršiaus apdorojimo metodai, tokie kaip tekstūruoti

paviršiai, naudojami siekiant pagerinti šilumos laidumą, sumažinti šiluminę varžą arba optimizuoti šilumos perdavimą [67]. Superhidrofobinis paviršius gali išlaikyti dujų sluoksnį be papildomo energijos tiekimo [68].

Pasyviosios priemonės pasipriešinimui mažinti ir energijos efektyvumui didinti yra superhidrofobiniai paviršiai (*angl - Superhydrophobic surfaces* – SHS) arba plonos plėvelės. SHS gali būti sukurti taikant įvairias technologijas ir metodus. Tokie paviršiai gali būti suformuoti cheminio ėsdinimo būdu [69], pasiekiant  $171,1^\circ$  WCA; hidroterminiu metodu [70], kur WCA siekia apie  $154,7^\circ$ ; karšto įspaudimo metodu [71], kuris leidžia sukurti plėvelę su  $161,8^\circ$  WCA; litografiniais metodais [72] ir kitais būdais. Mokslinėje literatūroje pateikiami tyrimai rodo, kad taikant tik vieno etapo apdorojimą, pavyzdžiui, cheminį paviršiaus ėsdinimą, WCA gali būti gana mažas ir siekti tik apie  $120^\circ$ . Norint sukurti superhidrofobinį paviršių, reikia taikyti papildomą paviršiaus struktūros apdorojimą, pavyzdžiui, naudojant oktadecyltrichlorsilaną (OTS) kartu su stiklo mikropluošto filtru. Tokiu atveju WCA gali siekti  $154^\circ$ , o slydimo kampas –  $17^\circ$  [73]. Vieno etapo paviršiaus apdorojimo metodai gali duoti gerų rezultatų kuriant SHS, tačiau siekiant didesnių WCA reikšmių gali būti taikomi dviejų etapų paviršiaus apdorojimo metodai aliuminio paviršiams, naudojant elektrošepetėlį ir lazerinį apdorojimą. Tokiu būdu aliuminio paviršiui WCA gali pasiekti  $156,3^\circ$  [74]. Vienas iš metodų, taikantis dviejų etapų procesą, kai purškiamas angliavandenilių dervos klijai ir hidrofobinės silicio dioksido nanodalelės, leidžia sukurti paviršių su  $153^\circ$  kontaktiniu kampu. Superhidrofobiniai paviršiai ant aliuminio lydinių taip pat gali būti sukurti taikant „in situ“ augimo metodą, naudojant trijų etapų paviršiaus apdorojimą sterino rūgštimi, perfluorodeciltrimetoksisilanu (PFDTMS) ir oktadecylfosfonine rūgštimi (OPA). Tokiu būdu galima pasiekti vandens kontaktinį kampą nuo  $152,8^\circ$  iki  $153,5^\circ$  [75]. Metodika, kaip padidinti aliuminio lakšto superhidrofobinį paviršių iki  $153,5^\circ$  WCA, pateikta darbe [76]. Tačiau žinoma, kad superhidrofobiniai paviršiai susiduria su patvarumo ir paviršiaus degradacijos problema [77], kai tokia danga naudojama ilgą laiką. Todėl metodai, leidžiantys sukurti ilgalaikius ir patvarius superhidrofobinius paviršius ant aliuminio medžiagos, kurie galėtų būti naudojami daug kartų ir reikalautų mažų energijos sąnaudų, vis dar yra svarbus daugelio mokslinių tyrimų tikslas ir reikalauja papildomų tyrimų.

Kadangi superhidrofobiniai paviršiai yra intensyviai tiriama visame pasaulyje, mokslininkai nagrinėja ZnO nanodaleles ir jų paviršiaus modifikacijas [78]. ZnO nanodalelių modifikacijos gali būti atliekamos pridėdant polidimetilsiloksano (PDMS), silikono [79] arba dengiant kitomis medžiagomis [80]. Dėl to dangos vandens kontaktinis kampas viršija  $150^\circ$  [81]. Tokios dangos jau naudojamos vandens [82] ir nuotekų valymui [83], nuosėdų šalinimui, trinties mažinimui [84], apsaugai nuo apledėjimo [85] bei pasižymi antimikrobinėmis savybėmis [84]. Modifikuotos ZnO ir PMDS dangos buvo tiriamos imituojant jas ant ryklio odos paviršiaus. Šis eksperimentas parodė, kad paviršius, padengtas šia danga, pasižymi  $151^\circ$  superhidrofobiniu kontaktiniu kampu. Taip pat nustatyta, kad ZnO/PMDS „ryklio odos“ struktūra gali sumažinti pasipriešinimą iki 12,2 % [84]. PMDS pasižymi puikiu atsparumu biologiniam irimui, cheminiu stabilumu, dujų pralaidumu ir geromis mechaninėmis savybėmis [86]. Dėl gerų PDMS cheminių savybių ši medžiaga pradėta taikyti laivų korpusų dangose.

Gerai žinoma, kad hidrofobinės dangos gali turėti įtakos pasipriešinimo mažinimui, nes nedidelis oro tarpas tarp skysčio ir paviršiaus leidžia kūnui judėti vandens paviršiumi patiriant mažesnę trinties jėgą [68]. Taip pat buvo atlikti eksperimentai siekiant įvertinti superhidrofobiškumo įtaką pasipriešinimo koeficiento mažėjimui [80]. Buvo tiriamas nano-SiO<sub>2</sub>/HLR dangos paviršius (su stipriu hidrofobiškumu kampu –  $163^\circ$ ), ir rezultatai parodė, kad maksimalus pasipriešinimo sumažėjimas gali siekti 23,4 % [87]. Literatūroje taip pat pateikiami eksperimentiniai rezultatai su

kita pažangia nanomedžiaga, pasižyminčia didelėmis superhidrofobinėmis savybėmis, o gauti rezultatai parodė, kad oro pasipriešinimas gali būti sumažintas apie 12,1 % [88]. Kita danga – ZnO/epoksidinė – buvo naudojama laivo modelyje tiriant pasipriešinimo koeficientą ir parodė, kad dėl superhidrofobinių plėvelės savybių pasipriešinimas gali būti efektyviai sumažintas nuo 5 iki 21 % [89]. Taip pat pastebėta, kad pasipriešinimo mažinimas labai priklauso nuo Reinoldso skaičiaus. Rezultatai parodė, kad apie 11 % pasipriešinimo sumažėjimas gali būti pasiektas, kai medžiagos paviršius yra superhidrofobinis (ER/ZnO dangos medžiaga) [90]. Todėl tiriant pasipriešinimo mažinimo metodus labai svarbu įvertinti hidrofobiškumo įtaką.

Svarbiausias superhidrofobiškumo kriterijus yra didelis paviršiaus šiurkštumas. Kai kurie eksperimentai taip pat buvo atlikti su patobulintais paviršiais taikant įvairius metodus. Vienas iš jų buvo ZnO sintezė ant mikro-smeigtukinių briaunų (micro-pin-fins), ir pastebėta, kad tokia struktūra pagerina skysčio virimo procesą bei gali padidinti šilumos perdavimo koeficientą iki 63 % [91].

Dvigubas paviršiaus apdorojimas, naudojant įvairias priemones, pavyzdžiui lazerio ir cheminio ėsdinimo derinį, parodė reikšmingą pasipriešinimo sumažėjimą – iki 29,83 % [92]. Kombinuota SHS kūrimo metodika, naudojanti itin greitą femtosekundinį lazerinį ėsdinimą ir paprastą purškimo metodą, gali pasiekti maksimalų 23,3 % pasipriešinimo sumažėjimą [93]. Taip pat trinties mažinimo idėjos naudojant SHS paviršius buvo pateiktos darbe [94], kuriame tyrėjai pateikė rezultatus su tekstūruotu aliuminiu, ėsdintu natrio hidroksidu (NaOH). Buvo pastebėta, kad po ėsdinimo aliuminio lydinio paviršiaus sudrėkinamumo kampas padidėjo iki daugiau nei 120°, ir parodė geras trinties mažinimo savybes – iki 48,7 %.

Tačiau mokslinėje literatūroje yra palyginti nedaug publikacijų, kuriose pateikiami kombinuoto metodo rezultatai, kai pasyvūs ir aktyvūs metodai naudojami kartu siekiant sumažinti pasipriešinimo koeficientą. Kai kurie tyrimai nagrinėja, kaip superhidrofobinis paviršius ir jo savybės daro įtaką Leidenfrosto efekto susidarymui bei temperatūros palaikymui paviršiuje. Kai kurie Leidenfrosto taško formavimosi eksperimentai buvo atlikti naudojant Zn arba ZnO nanomedžiagas [95]. Vienas iš šio straipsnio autorių [96] sukūrė ZnO tetrapodų sintezės metodą bei paviršiaus modifikavimo su PDMS būdą ir ištyrė jų poveikį garų susidarymui bei jų išsilaikymui ant mėginio paviršiaus. Todėl šiame darbe bus toliau tiriama PMHS padengtų ZnO tetrapodų (žymimų „ZnO<sub>PMHS</sub>“) poveikis garų formavimuisi ir jų išsilaikymui ant mėginio paviršiaus. Taigi „ZnO<sub>PMHS</sub>“ tampa tyrimo objektu, siekiant iširti, kaip hidrofobinė plėvelė veikia Leidenfrosto efekto susidarymą ir kokią įtaką tai turi pasipriešinimo koeficientui.

## **1.6. Biologinio apaugimo įtaka ir jo mažinimas laivybos pramonėje**

Kitas svarbus veiksnys, didinantis laivų pasipriešinimą, yra biologinis apnešimas (1.3 pav.), kai ant paviršiaus kaupiasi mikroorganizmai, dumbliai ir kiti vandens organizmai. Šis procesas ne tik mažina laivo greitį ir didina degalų sąnaudas, bet ir prisideda prie invazinių rūšių plitimo. Siekiant to išvengti, naudojamos apsauginės nuo mikrobiologinio apaugimo dangos, tačiau dauguma jų sudėtyje yra biocidų, kurie yra kenksmingi vandens ekosistemoms ir gali kauptis dugno nuosėdose. Komerciškai taikomose dangose dažnai derinami keli aktyvūs junginiai, tokie kaip vario oksidas arba DCOIT.



**1.3 pav.** Biologinis apaugimas laivyboje [97]

Atsižvelgiant į didėjančius aplinkosauginius reikalavimus, intensyviai ieškoma alternatyvų tradicinėms dangoms. Viena iš tokių krypčių – nanostruktūruotos polimerinės dangos, kurios gali suteikti paviršiui superhidrofobinių, antibakterinių ir didelio atsparumo savybių. PDMS-PMMA kompozitas, papildytas Ag-TiO<sub>2</sub>@GO nanodalelėmis, demonstravo itin didelį vandens kontaktinį kampą ir labai žemą toksiškumą. Kita tyrimų kryptis rodo, kad tokie nanokompozitai pasižymi dideliu smūginio atsparumu, todėl gali būti tinkamesni praktinėms jūrų sąlygoms [98]. Taip pat nagrinėjami cinko oksido nanovamzdeliai, kurie pasižymi tiek hidrofobiškumu, tiek antibakteriniu poveikiu. Eksperimentiniai duomenys rodo, kad tinkamai parinktos hidrofobinės dangos gali sumažinti hidrodinaminį pasipriešinimą iki 15 %.

### **1.7. Laivų konstrukcijose naudojamos dangos nuo biologinio apaugimo ir joms keliami reikalavimai**

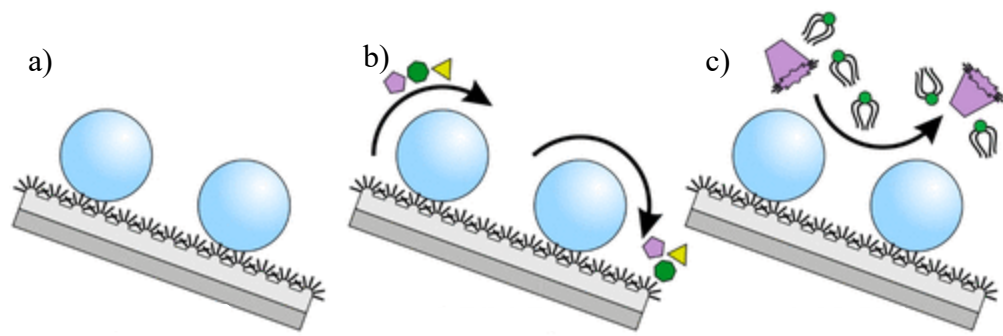
Naujų, apaugimo prevencijai skirtų dangų kūrimas ir vystymas yra svarbi mokslinė užduotis jūrų sektoriuje ir pramonėje. Pagrindinė jų funkcija - užkirsti kelią jūrų įrangos, tokios kaip laivo korpusas [99], naftos platformos, lynai [100] ar daugelis kitų panardintų offshore/onshore konstrukcijų [101], apaugimui jūrų organizmais. Dumbliai, kriauklės, midijos ir kitos panašios biologinės rūšys paprastai vadinamos bioapaugimu. Natūralių organizmų augimo procesas nėra pageidaujamas, nes jis mažina įrangos efektyvumą, sukelia ekonominius nuostolius ar aplinkos problemas. Ekonominiu atžvilgiu biologinis apaugimo procesas yra didelis iššūkis jūrų pramonei, nes padidina laivų hidrodinaminį pasipriešinimą, dėl ko didėja kuro sąnaudos, mažėja greitis ar sumažėja techninis manevringumas. Net plonas organizmų sluoksnis, pavyzdžiui, diatomų gleivės, gali padidinti kuro sąnaudas nuo 10 % iki 16 % [102]. Organizmų susiformavimas ant laivo korpuso verčia laivus naudoti daugiau galios, norint palaikyti tą patį greitį, todėl didėja bendras kuro sąnaudų ir teršalų emisijų kiekis. Todėl inovatyvių ir pažangių biologinio apaugimo apsaugai skirtų dangų kūrimas tampa viena pagrindinių mokslinių ir inžinerinių dekarbonizacijos užduočių, norint iki 2030 m. pasiekti 40 % emisijų mažinimą, o iki 2050 m. – nulinę emisiją, atsižvelgiant į Tarptautinės jūrų organizacijos (IMO) tikslus.

Siekiant sumažinti natūralios aplinkos faunos poveikį laivų veikimui jūrų sektoriuje, kuriamos naujos aplinkai draugiškos dangos. Pagrindiniai reikalavimai naujoms apsauginėms dangoms yra aplinkai

draugiškos medžiagos [103], ilgaamžiškumas [104], savaiminio valymosi paviršiai, bei atsparumas erozijai jūriniame vandenyje. Atsižvelgiant į šiuos iššūkius, kuriamos naujos ir inovatyvios apsauginės medžiagos, skirtos jūrų sektoriui. Vienas iš perspektyvių derinių tai ZnO dangos naudojimas ant įvairių metalinių paviršių. Žinoma, kad ZnO dalelės pasižymi antibakterinėmis ir biologinį apaugimą mažinančiomis savybėmis. Tyrimas su membranomis, padengtomis ZnO danga, parodė, kad įrenginys išlaikė savaiminio valymosi ir apsaugos savybes po penkių eksploatacijos ciklų, kai paviršius buvo veikiamas UV šviesos, o teršalų surinkimo efektyvumas buvo virš 90 % [105]. Bakterijų prilipimas prie ZnO AF dangų laboratorinėmis sąlygomis buvo tiriamas sukuriant bakterinę aplinką pridodant *Pseudoalteromonas marina* ir inkubuojant plokšteles 18 °C temperatūroje 48 valandas [106,107]. Iš cheminės pusės žinoma, kad ZnO dalelės turi mažą toksiškumą [107] ir pasižymi cheminėmis bei fizinėmis savybėmis, kurios padeda sukurti biologinę aplinką tausojančius ir hidrofobinius paviršius [108]. Siekiant platesnio pritaikymo ir pageidaujamų savybių išplėtimo, egzistuoja daug ZnO dangos modifikacijų, kurios jau buvo tirtos. Kai kurie tyrimai teigia, kad pažangių polimerų, pavyzdžiui, polidimetilsiloksano (PMDS) [109], pasirinkimas yra geras sprendimas kurti antimikrobines dangas jūrų sektoriui, nes tokios dangos turi mažą paviršiaus energiją, mažą biologinį poveikį ir atsparumą korozijai jūriniame vandenyje. Tyrimas buvo atliktas panardinant PMDS mėginius į 3,5 % NaCl tirpalą 25 °C temperatūroje, siekiant įvertinti korozijos greitį pagal ASTM G102-89 standartą, ir parodė gerus patikimumo rezultatus [110]. Bandymai su PMDS dangomis atskleidė, kad per 16 savaičių tik kelios midijos susiformavo ant paviršiaus, o minkštos apnašos ir mikrodumbliniai sluoksniai nesusiformavo, kas rodo PMDS kaip gerą pasirinkimą prieš nepageidaujamą biologinį augimą [111].

PMHS integracija į ZnO dangą sukuria naujos kartos apsauginę biologinio apaugimo dangą, kuri atitinka ekologinius tikslus ir gali sumažinti galimą žalą aplinkai. Todėl ZnO<sub>PMHS</sub> derinys kartu su vario medžiaga užtikrina dvigubą apsaugą nuo nepageidaujamo biologinio poveikio. Varis (Cu) yra viena pagrindinių medžiagų, kurios vis dar naudojamos apsauginėse dangose įvairiomis cheminėmis formomis. Varis gali išskirti toksiškas jonų dalis į vandenį ir apsunkinti biologinių organizmų, tokių kaip kriauklės, vamzdiniai kirminai, dvigeldžiai ir kitos apnašų rūšys, augimą ant paviršių [112]. Tačiau varis yra sunkusis metalas, ir jo taikymas apsauginėse nuo biologinio apaugimo dangose (dėl vario toksiškumo) natūralioje aplinkoje yra sudėtingas ir ribojamas dėl griežtėjančių aplinkosaugos reikalavimų. Optimali vario dozė, išsiskirianti iš apsauginės dangos yra nustatyta ne daugiau, nei kaip 7 μm cm<sup>-2</sup> per dieną laivams jūrų sektoriuje [113]. Nepaisant to, kai kurie tyrimai siūlo vario ir ZnO derinį, kuris sukuria stabilų mechanizmą, efektyvų biologinių poveikių kontrolėje [99]. Ankstesni tyrimai pabrėžia, kad ZnO kompozitinės dangos yra efektyvios ir naudojamos, siekiant sumažinti toksiško vario poveikį. Todėl natūralios arba mažesnio toksiškumo kompozicinės dangos sulaukia didelio mokslinio dėmesio ir tampa svarbiu tyrimų objektu.

Šis darbas nagrinėja sukurta ZnO<sub>PMHS</sub> dangą [80] ir jos modifikaciją su tetrapodų smaigais, skirtą jūrų sektoriui kaip apsauginę dangą nuo biologinio apaugimo (4 pav.). Tetrapodų sukūrimas paviršiuje yra ypatingas dėl savo formos, struktūros ir struktūrinių defektų kiekio. Tokia danga pasižymi geromis superhidrofobinėmis savybėmis, kai vandens kontaktinis kampas yra 148°. Leidenfrost efekto integracija kartu su hidrofobine ZnO<sub>PMHS</sub> danga leidžia pasinaudoti abiejų sprendimų stiprybėmis ir sukurti kompleksinį metodą pasipriešinimui mažinti jūrų sektoriuje bei apsaugoti laivo korpusus nuo biologinio apaugimo proceso.



**1.4 pav.** Superhidrofobinių ZnO vamzdelių pritaikomumas [114]: a) superhidrofobiniai b) savaiminio valymosi c) apsaugantys nuo biologinio apaugimo

Tačiau nėra daug tyrimų, nagrinėjančių aktyvių ir pasyvių metodų kombinaciją, skirtą trinties pasipriešinimui mažinti. Šiame darbe siekiama atlikti naujus eksperimentus su mėginiais ir stebėti pasipriešinimo mažinimo galimybes, taikant pasyvių ir aktyvių įrankių derinį, siekiant sumažinti pasipriešinimo koeficientą aluminio medžiagai (kuri plačiai naudojama pramonės sektoriuje dėl savo fizinių savybių). Pasyviu įrankiu buvo pasirinktas SHS paviršiaus sukūrimas, naudojant dviejų pakopų paviršiaus apdorojimą, leidžiantį pasiekti aukščiausias superhidrofobinės dangos rodiklius ir paviršiaus savybes. Aluminio paviršiui buvo taikytas NaOH, o vario paviršiui  $\text{FeCl}_3$  cheminis ėsdinimas, kuris leido suformuoti superhidrofobinį paviršių, rodantį geras paviršiaus sukibimo savybes ir patvarumą. Antroje paviršiaus apdorojimo stadijoje mėginiai buvo dengiami ZnO superhidrofobine danga su PMHS polimeru (polimetilhidrosiloksanas). Aktyvus įrankis buvo LE taikymas, kuris apima garų sluoksnio generavimą aplink įkaitintą mėginį. Kombinuotas požiūris buvo pritaikytas siekiant ištirti garų sluoksnio palaikymą aplink mėginį.

## 1.8. Literatūros apžvalgos apibendrinimas

Literatūroje yra pateikiami ir tiriami tiek aktyvūs, tiek pasyvūs trinties mažinimo metodai, siekiant pagerinti pasipriešinimą ir sumažinti energijos sąnaudas tarptautinėje laivyboje. Didelis dėmesys yra skiriamas superhidrofobiniams paviršiams ir biologinio apaugimo mažinimui ant laivų korpusų. Labiausiai yra išskiriami perspektyvūs sprendimai, tokie kaip ZnO nanovamzdelių modifikavimas polimerinėmis dangomis, kuris galėtų būti sveikesnė alternatyva šiuo metu plačiai laivyboje naudojamiems biologinio apaugimo prevencijai skirtiems dažams.

Atsižvelgiant į išvardintus iššūkius, šio projekto tikslas yra įvertinti, kaip ZnO ir PMHS pagrindu suformuota danga veikia tekstūruotų ir netekstūruotų paviršių atsparumą mikrobiologinei taršai bei jų hidrodinaminį pasipriešinimą. Šio darbo tyrimo aktualumas atsiskleidžia keliuose srityse. Praktiniu požiūriu jis gali prisidėti prie mažesnių laivybos sektoriaus degalų sąnaudų ir su tuo susijusių emisijų, o moksliniu aspektu baigiamasis darbas apibrėžia novatorišką perspektyvą, nagrinėjant aktyvių ir pasyvių trinties mažinimo metodus bei jų bendrą sąveiką. Šis baigiamasis darbas išsiskiria idėjos originalumu bei tarpdiscipliniškumu, grindžiamu paviršiaus inžinerijos ir aplinkosauginių technologijų mokslo sričių principais.

## 2. Medžiagos ir tyrimų metodai

### 2.1. Tyrimuose naudotos įrangos sąrašas

- Magnetinė maišyklė *Heidolph Mr Hei - Tec*;
- Precizinės svarstyklės *Shimadzu ATX 8400*;
- Vandens vonelė *Memmert WNE 7*;
- Laminarinė traukos spinta *Telstar BV 100*;
- pH-metras *Winlab*;
- Termostatas *Binder BD23*;
- Mufelinė krosnelė *Nabertherm RT 50–250/11 GmbH (1,8 kW)*;
- Vandens siurblys *Stairs Pumps HBI 2–40 RQBE 630 W*;
- Vandens šildytuvas *Kospel PPE2-9/11/12/15*;
- Greitaeigė vaizdo registravimo kamera *MIRO-321*;
- E tipo termopora;
- Programinė įranga *Data Logging software PicoLog Recorder*;
- Programinė įranga *Phantom Camera Control (PCC)*;
- Programinė įranga *Phantom Video Player*;
- Duomenų skaitytuvas *PICO TC-08 Thermocouple Data Logger*;
- Vandens šildytuvas *Kospel-9/11/12/15*;
- Vandens siurblys *Stairs Pumps HBI 2-40 RQBE 630 W*;
- Kompiuteris;
- Azoto dujų balionas;
- Vandens talpa (40 l);
- Vandens talpa (180 l);

### 2.2. Tyrimuose naudotos darbo priemonės

- Petri lėkštelės;
- Skirtingo tūrio automatinės pipetės;
- Skirtingo tūrio stiklinės;
- Magnetas maišymui;
- Vienkartinio naudojimo pirštinės;
- Įrankiai (pincetas, stiklinė lazdelė maišymui);
- Vienkartinės pipetės;
- Apsauginės vinilinės pirštinės;

### 2.3. Tyrimuose naudoti reagentai

Natrio hidroksidas (NaOH), izopropanolis (99 %), cinko oksido (ZnO) milteliai, polimetilhidrosiloksanas (PMHS), tetraetilortosilikatas (TEOS), vandenilio chloridas (HCl), distiliuotas vanduo, antibiotikas – ciprofloksacinas, geležies chlorido heksahidratas ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), dimetilsulfoksidas (DMSO).

## 2.4. Medžiagos ir bandiniai

Šiame darbe buvo naudojami aliuminio ir vario sferiniai bandiniai, kurių skersmuo 19,05 mm., o grynumas 99,99 %. Šių tipų metalai buvo parinkti dėl gero šiluminio laidumo ir didelės šiluminės talpos [115]. Aliuminio ir vario mėginių paviršius buvo poliruotas „3M Hookit“ abrazyviniais diskais (šiurkštumas P-4000), siekiant pašalinti oksido sluoksnį, susidarantį dėl aplinkos poveikio.

## 2.5. Aliuminio bandinių (Al-NaOH) cheminis tekstūravimas

Aliuminio bandiniai buvo poliruojami bei nuvalomi propanoliu, siekiant pašalinti oksido sluoksnį nuo bandinių paviršiaus. Aliuminio bandiniai buvo dedami į NaOH 7,5 % tirpalą įkaitintą iki 100 °C ir laikomi 1h. Po tekstūravimo, bandiniai išimami ir gerai nuplaunami su distiliuotu vandeniu, sonikuojami ultragarsinėje vonelėje, po jos džiovinami kambario temperatūroje.

## 2.6. Vario bandinių (Cu-FeCl<sub>3</sub>) cheminis tekstūravimas

Poliruoti vario mėginiai tekstūruojami FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 40 % koncentracijos tirpale, 40 – 50 °C temperatūroje 30 minučių. Praėjus tekstūravimo laikotarpiui, mėginiai išimami ir gerai nuplaunami distiliuotu vandeniu ir paliekami išdžiūti prieš naudojimą.

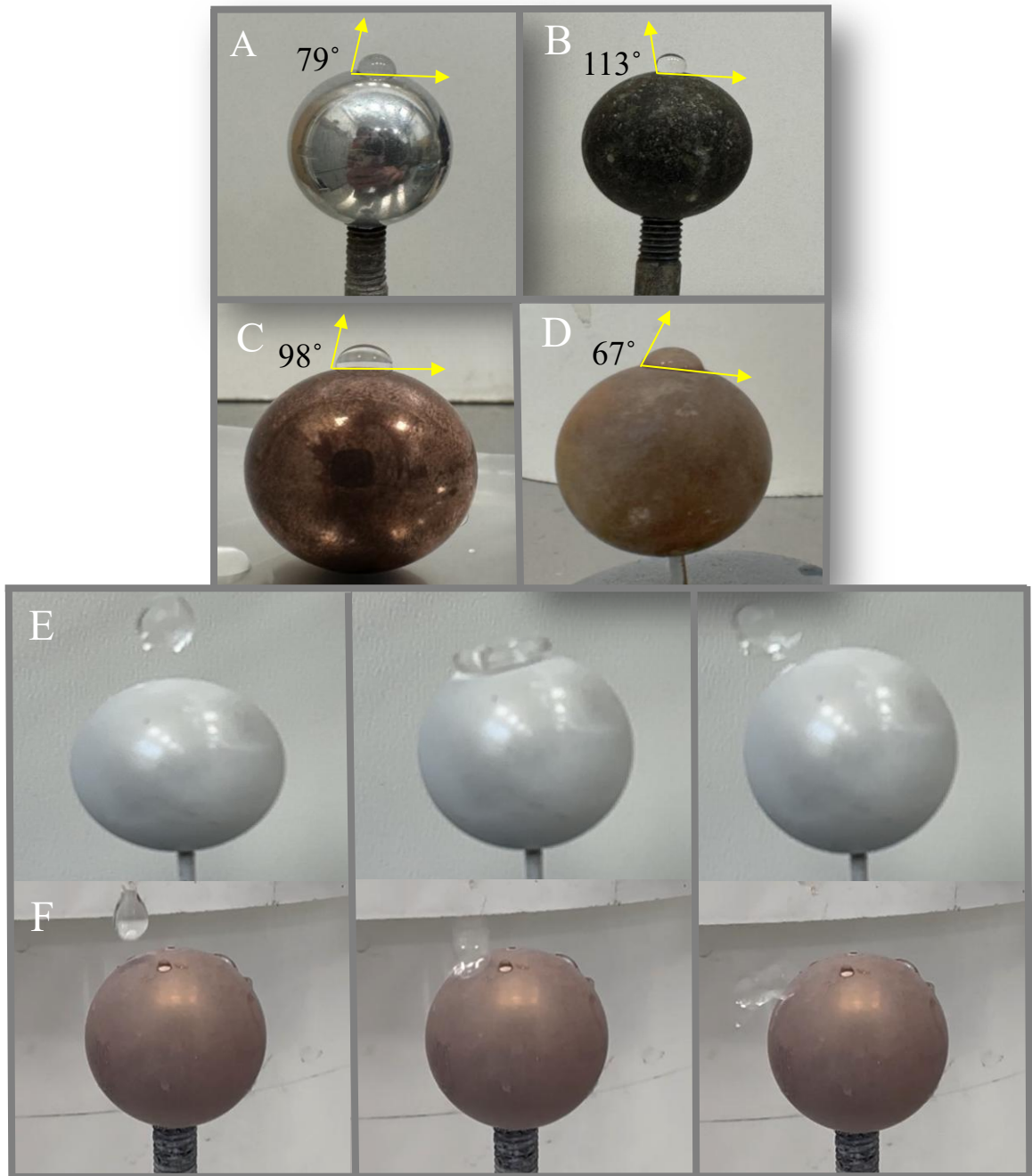
## 2.7. Aliuminio (Al+ZnO<sub>PMHS</sub>) ir vario (Cu+ZnO<sub>PMHS</sub>) mėginių dengimas superhidrofobine TEOS-ZnO-PMHS danga

ZnO tetrapodai buvo sintetinti degimo metodu [116], naudojant cinko miltelius kartu su metanu ir deguonimi, laikantis anksčiau nustatyto proceso [96]. ZnO milteliai buvo naudojami ZnO<sub>PMHS</sub> dangai kurti.

Poliruoti aliuminio ir vario mėginiai dedami kaitinti į 60 °C krosnelę apie 30 min, norint, jog aplink bandinius susidarytų oksido sluoksnis, ant kurio būtų galima dengti hidrofobinę dangą. Atvėsinti mėginiai nardinami ir laikomi apie 30 s 10 % TEOS tirpale pH 3-4 (reguliuojama su HCl). Ištraukus mėginius, jie paliekamas išdžiūti kambario temperatūroje. Mėginiams išdžiūvus, jie yra du kartus merkami į ZnO (ZnO tetrapodai buvo susintetinti degimo metodu [116], naudojant Zn miltelius bei metaną ir deguonį [96]) 2 % tirpalą ir yra laikomi 30 s. Ištraukus mėginį, jis paliekamas išdžiūti kambario temperatūroje. Mėginiui išdžiūvus, jis yra merkiamas į 0,5 % PMHS tirpalą, kuriame laikomi 30 s. Ištraukus bandinius jie kaitinami 1h 100 °C krosnelėje, norint, kad sustingtų struktūra. Visi tirpalai yra gaminami TEOS, ZnO ir PMHS medžiagas tirpinant izopropanolio tirpikliuose.

## 2.8. Aliuminio ir vario bandinių hidrofobiškumo kontaktinio kampo nustatymas

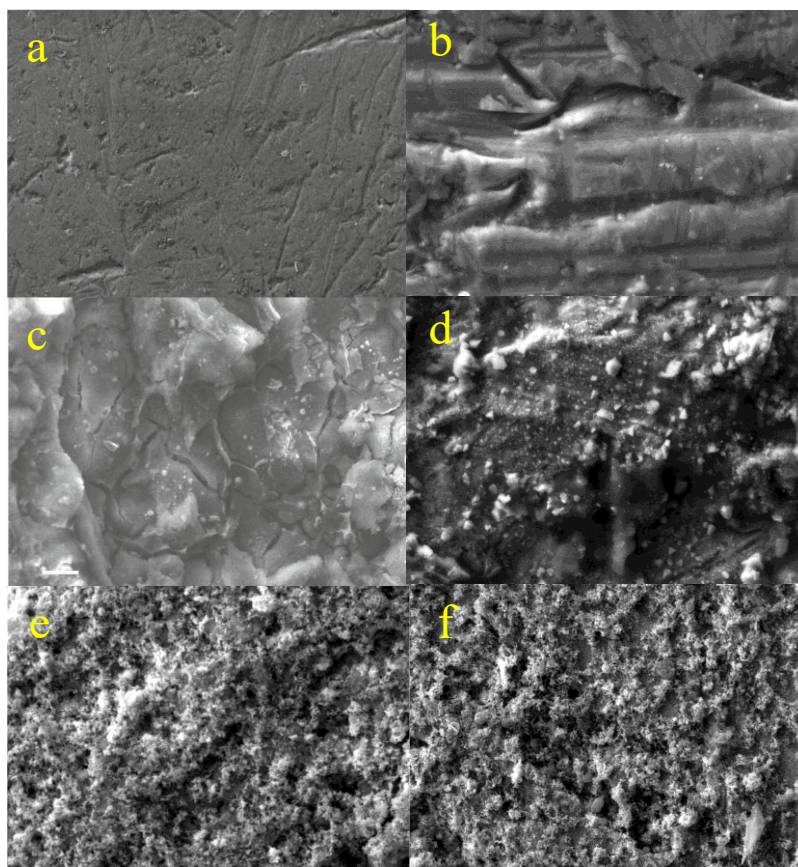
Prieš pradėdant garų plėvelės (Leidenfrost efekto) nustatymo eksperimentus, buvo įvertinti Al, Cu, Al-NaOH, Cu-FeCl<sub>3</sub>, Al+ZnO<sub>PMHS</sub> ir Cu+ZnO<sub>PMHS</sub> bandinių paviršių hidrofobiškumas.



**2.1 pav.** (A) Al, (B) Al-NaOH, (c) Cu-FeCl<sub>3</sub> (d) Cu, (e) Al+ZnO<sub>PMHS</sub> ir (f) Cu+ZnO<sub>PMHS</sub> sąlyčio kampai su vandens lašeliu

Apskaičiavus visų bandinių kontaktinius kampus su vandens lašu nustatyta (2.1 pav.), jog poliruotas aliuminio bandinys sudarė 79° kontaktinį kampą su vandens lašu, o varinis sferinis bandinys šiek tiek didesnę – 98° kontaktinį kampą. Tekstūruotas Al-NaOH bandinys sudarė 113° kontaktinį kampą su vandens lašeliu, o Cu-FeCl<sub>3</sub> bandinys tik 67°. Didžiausiu kontaktiniu kampu pasižymėjo superhidrofobine ZnO<sub>PMHS</sub> danga dengti aliuminio ir vario bandiniai, kurių kontaktinis kampas su vandens lašu buvo 180° – vandens lašas pilnai atsimušdavo ir nušokdavo nuo mėginių paviršiaus.

## 2.9. Tyrimui naudojamų mėginių morfologinė analizė skenuojančiu elektronų mikroskopu (SEM)

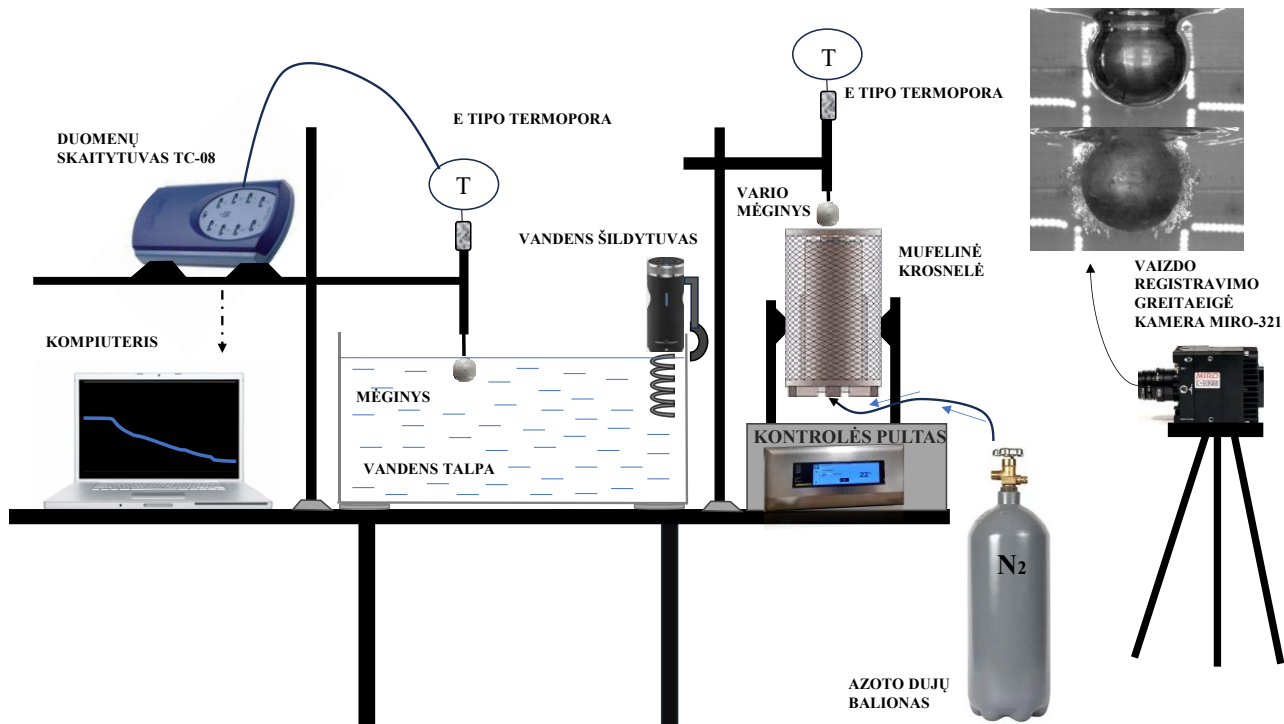


2.2 pav. SEM analizė atlikta su (a) Al, (b) Cu, (c) Al-NaOH, (d) Cu-FeCl<sub>3</sub>, (e) Al+ZnO<sub>PMHS</sub> ir (f) Cu+ZnO<sub>PMHS</sub> bandiniais

2.2 paveiksle yra matoma a) aliuminio, b) vario, c) tekstūruoto aliuminio (Al-NaOH) ir d) vario (Cu-FeCl<sub>3</sub>) bei superhidrofobine danga dengtų e) aliuminio (Al+ZnO<sub>PMHS</sub>) ir f) vario (Cu+ZnO<sub>PMHS</sub>) morfologinė analizė, kuri buvo atlikta skenuojančiu elektronų mikroskopu, išdidinta 5000 kartų. 2.2 pav. a ir 2.2 pav. b nuotraukose galima matyti šiek tiek netolygius aliuminio ir vario plokštelės reljefus, pasidengusius oksido plėvele. 2.2 pav. c nuotraukoje yra matoma tekstūruota ištekstūruota aliuminio nelygi plokštelė natrio hidroksido tirpale. 2.2 pav. d nuotraukoje yra matoma geležies chlorido tirpale ištekstūruota vario plokštelė, kurioje matomi po tekstūravimo susidarę nelygumai. 6 pav. e ir 6 pav. f nuotraukose yra matomos aliuminio ir vario plokštelės dengtos superhidrofobine danga. Nuotraukose galima pastebėti ant paviršiaus susidariusių daug cinko oksido tetrapodų, kuriuos dengia plonas polimetilhidrosiloksano (PMHS) sluoksnis.

## 2.10. Garų plėvelės kritinių parametrų identifikavimas

Leidenfrost efekto identifikavimo ir kritinių temperatūrų nustatymo tyrimai atliekami keliais etapais. Pirmajame etape į vamzdinę krosnį tiekiamos azoto dujos, kurios naudojamos kaip apsauginės dujos tam, kad kaitinimo metu apsaugoti sferinį mėginį nuo oksidacijos. Bandinys prijungiamas prie E tipo termoporos ir duomenų skaitytuvo temperatūros registravimui. Tuomet bandinys patalpinamas į krosnį ir kaitinamas iki skirtingų temperatūrų (nuo 160 iki 300 °C). Šiame bandymų stende (2.3 pav.), skirtame Leidenfrost kritinės temperatūros nustatymui buvo tiriami Al, Cu, Al-NaOH, Cu-FeCl<sub>3</sub>, Al+ZnO<sub>PMHS</sub> ir Cu+ZnO<sub>PMHS</sub> tipo bandiniai.

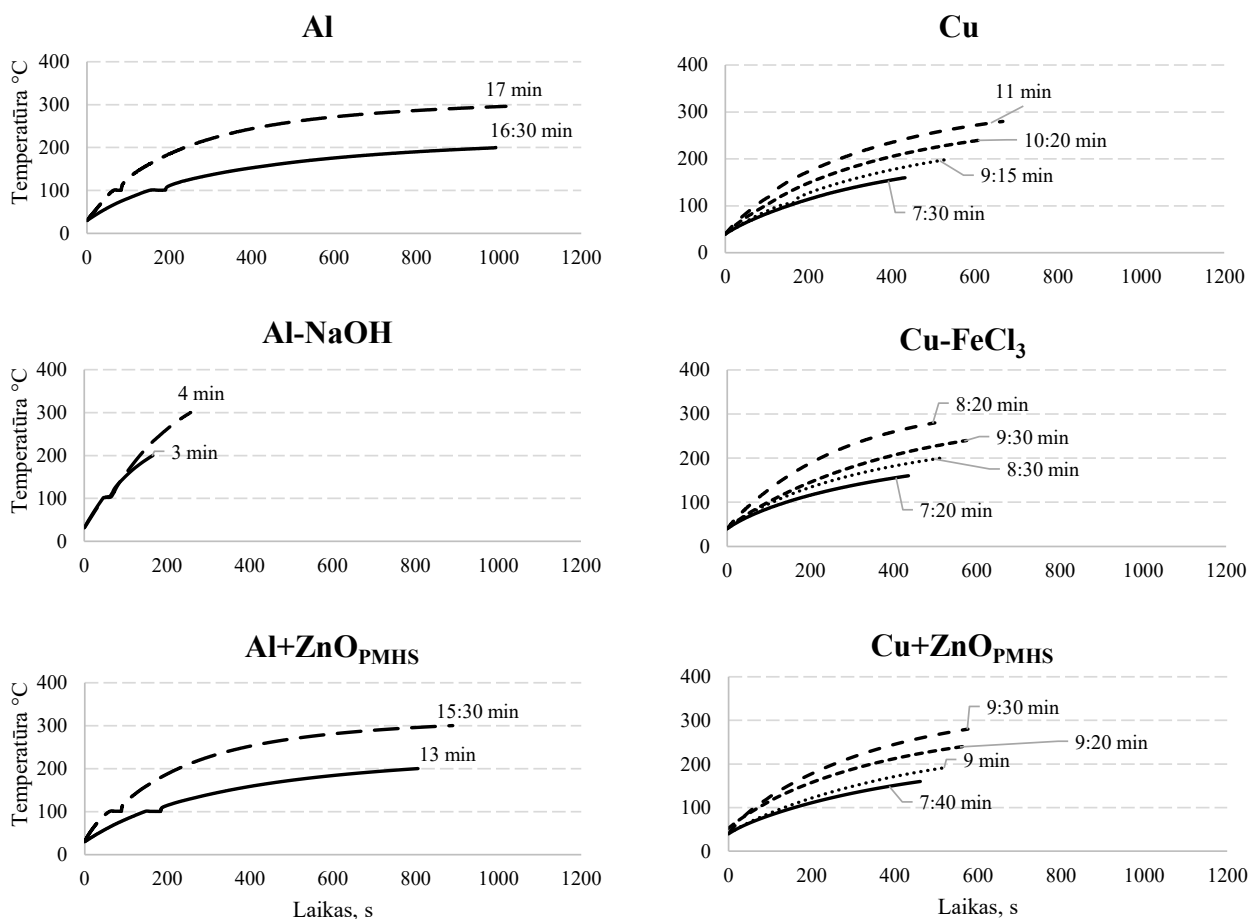


2.3 pav. Garų plėvelei nustatyti skirtas eksperimentinis stendas

Kol bandinys kaitinamas krosnyje, vandens šildytuvas panardinamas į vandens talpą, o vanduo pašildomas iki skirtingų temperatūrų (20, 25, 30, 35, 40 °C). Pasiekus reikiamą bandinio temperatūrą, jis kartu su termopora įdedamas į vandens talpą. Garų plėvelės susidarymui aplink bandinio paviršių fiksuoti naudojama greitaieigė vaizdo registravimo kamera ir „Phantom Camera Control“ programinė įranga. Vaizdo medžiagos peržiūrai naudojama „Phantom Video Player“ programinė įranga, kuri buvo naudojama garų plėvelės storiui išmatuoti (mm), o bandinio aušinimo temperatūrinei dinamikai fiksuoti ir sekti buvo naudojama kompiuterinė programa – „PicoLog Recorder“. Temperatūros duomenys į kompiuterį buvo registruojami naudojant programinę įrangą, kuri gauna duomenis iš duomenų skaitytuvo. Eksperimentas kartojamas tris kartus, siekiant gauti kuo tikslesnius rezultatus.

### 2.11. Mėginių kaitinimo laiko nustatymas

Kadangi tiesiogiai išmatuoti sferinių bandinių paviršiaus temperatūros nėra galimybės, būtina atlikti paviršiaus temperatūros kalibravimą (Al, Cu, Al-NaOH, Cu-FeCl<sub>3</sub>, Al+ZnO<sub>PMHS</sub> ir Cu+ZnO<sub>PMHS</sub>), t. y. nustatyti jų išilimo laiką. Eksperimentams bandiniuose buvo išgręžta skylė, į kurią įmontuota E tipo termopora, prijungta prie duomenų kaupiklio ir duomenų nuskaitymo sistemos (2.3 pav.).



2.4 pav. Mėginių kaitinimo laiko nustatymas

Matavimų tikslumas buvo užtikrinamas kaitinimo laiką matuojant kelis kartus. Surinkti duomenys leido nustatyti tikslų laiką, per kurį bandinių paviršiai pasiekia nustatytas 160, 200, 240, 280 ir 300 °C temperatūras. Eksperimentų metu krosnies temperatūra visada buvo nustatoma 100 °C aukštesnė nei pageidaujama bandinio paviršiaus temperatūra. Atliekant eksperimentus, siekiant užtikrinti inertinę aplinką, į krosnį buvo tiekiamos azoto dujos. Remiantis gautais rezultatais, buvo apskaičiuota Al, Cu, Al-NaOH, Cu-FeCl<sub>3</sub>, Al+ZnO<sub>PMHS</sub> ir Cu+ZnO<sub>PMHS</sub> bandinių kaitinimo trukmė (2.4 pav.).

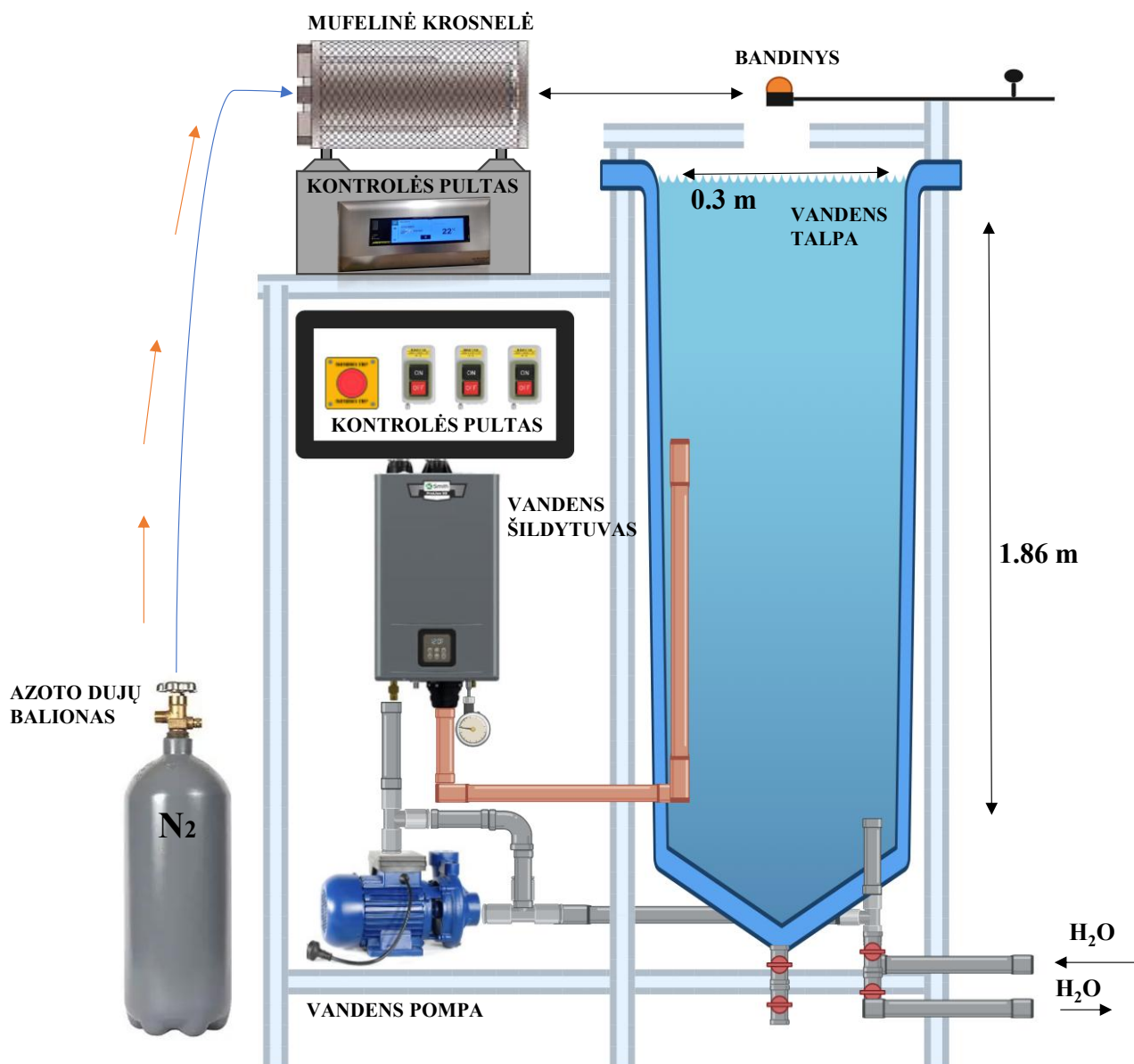
Kaitinant aliuminio bandinius buvo nustatyta, jog poliruoto aliuminio bandinys įkaista iki 200 °C per 16:30 min., tekstūruoto aliuminio bandinys per 3 min, o superhidrofobine PMHS danga dengtas bandinys per 13 min. Pakėlus temperatūrą iki 300 °C, buvo nustatyta, jog aliuminio bandiniai kaito 17 min., tekstūruoto aliuminio bandiniai 4 min., o superhidrofobine danga dengti bandiniai kaito 15:30 min.

Kaitinant vario bandinius buvo nustatyta, jog poliruoto vario bandiniai 160 °C temperatūrą pasiekė per 7:30 min., tekstūruoto vario bandiniai per 7:20 min., o superhidrofobine danga dengto vario bandinys – 7:40 min. Pakėlus temperatūrą iki 200 °C nustatyta, jog vario mėginys šią temperatūrą pasiekė per 9:15 min., tekstūruotas vario bandinys per 8:30 min., o superhidrofobine danga dengtas bandinys per 9 min.. Padidinus temperatūrą iki 240 °C, vario mėginys kaito 10:20 min., tekstūruotas vario mėginys 9:30 min., o superhidrofobine danga dengtas vario mėginys – 9:20 min.. Pakėlus vario bandinių temperatūras iki 280 °C temperatūros, nustatyta, jog poliruotas vario bandinys kaito 11 min.,

tekstūruotas vario bandinys 8:20 min., o superhidrofobine PMHS danga dengtas vario bandinys – 9:30 min.

## 2.12. Eksperimentinis stendas trinties pasipriešinimui nustatyti

Mokslinėje literatūroje yra žinoma, kad judančio kūno hidrodinaminį pasipriešinimą galima sumažinti koreguojant kūno formą arba keičiant paviršiaus savybes. Paviršiaus įtaka trinties jėgoms buvo vienas pagrindinių šio eksperimentinio tyrimo tikslų. Bandinių kritimo greičiui nustatyti buvo sukurta speciali eksperimentinė bandymų sistema (2.5 pav.).



2.5 pav. Hidrodinaminio pasipriešinimo tyrimams naudojamo eksperimentinio stendo principinė schema

Prieš pradėdant eksperimentus, cilindrinė vandens talpa, kurios aukštis 1,86 m (tūris 180 l), pripildoma vandeniu atidarius vožtuvą. Vanduo šildomas vandens šildytuvu iki skirtingų temperatūrų (20, 25, 30, 35 ir 40 °C). Sistemoje pašildytas vanduo cirkuliuoja naudojant vandens siurblių, o slėgis reguliuojamas vožtuvu. Laisvojo kritimo eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami siekiant nustatyti bandinių kritimo greitį. Eksperimentams buvo naudojami Al, Cu, Al-NaOH, Cu-FeCl<sub>3</sub>, Al+ZnO<sub>PMHS</sub> ir Cu+ZnO<sub>PMHS</sub> bandiniai. Nuo eksperimento pradžios į mufelinę krosnį tiekiamos azoto dujos, kurios

apsaugo mėginių paviršių nuo oksidacijos., Šie bandiniai tam tikrą laiką kaitinami krosnyje. Kaitinimo laikas buvo nustatytas pirmojo tyrimo etapo metu. Bandiniai buvo kaitinami iki skirtingų paviršiaus temperatūrų (nuo 160 °C iki 300 °C). Nešildyti arba įkaitinti bandiniai buvo metami į vandens talpą, o jų kritimo greitis buvo registruojamas greitaigė vaizdo registravimo kamera milisekundžių tikslumu. Po kiekvieno eksperimento bandiniai išimami per atidarius vandens talpos apačioje esančias sklendes. Eksperimentinė sistema valdoma valdymo pulto jungikliais: avarinio išjungimo, mufelinės krosnies, vandens šildytuvo ir vandens cirkuliacinio siurblio. Siekiant užtikrinti rezultatų tikslumą, eksperimentai buvo atliekami ne mažiau kaip tris kartus skirtingose temperatūrose. Bandinių kritimo greičiui fiksuoti naudojama greitaigė vaizdo registravimo kamera ir „Phantom Camera Control“ programinė įranga. Vaizdo medžiagos peržiūrai naudojama „Phantom Video Player“ programinė įranga, kuri buvo naudojama išmatuoti bandinių kritimo greitį (m/s). Baigus eksperimentinius, vanduo išleidžiamas į kanalizaciją atidarius išleidimo vožtuvus.

### 2.13. Garų plėvelės tyrimo nustatymas

Kadangi aliuminio ir vario mėginiai pasižymi skirtingu šiluminiu laidumu, (Al – 213-237 W/(m·K), Cu – 398-401 W/(m·K)), buvo pasirinktos skirtingos vandens ir bandinio temperatūros. Tyrimo metu buvo pastebėta, jog garų plėvelei susiformuoti aplink skirtingais paviršiais turintį aliuminio bandinį reikalinga ne žemesnė nei 200 °C bandinio temperatūra ir ne žemesnė nei 25 °C vandens temperatūra. Kadangi vario bandinys turi žymiai aukštesnį šilumos laidumą negu aliuminis, garų plėvelei susidaryti aplink vario bandinį (priklausomai nuo paviršiaus) prireikė žemesnės bandinio ir vandens temperatūros (2.1 lentelė).

2.1 lentelė. Bandinių tipas ir tyrimo sąlygos.

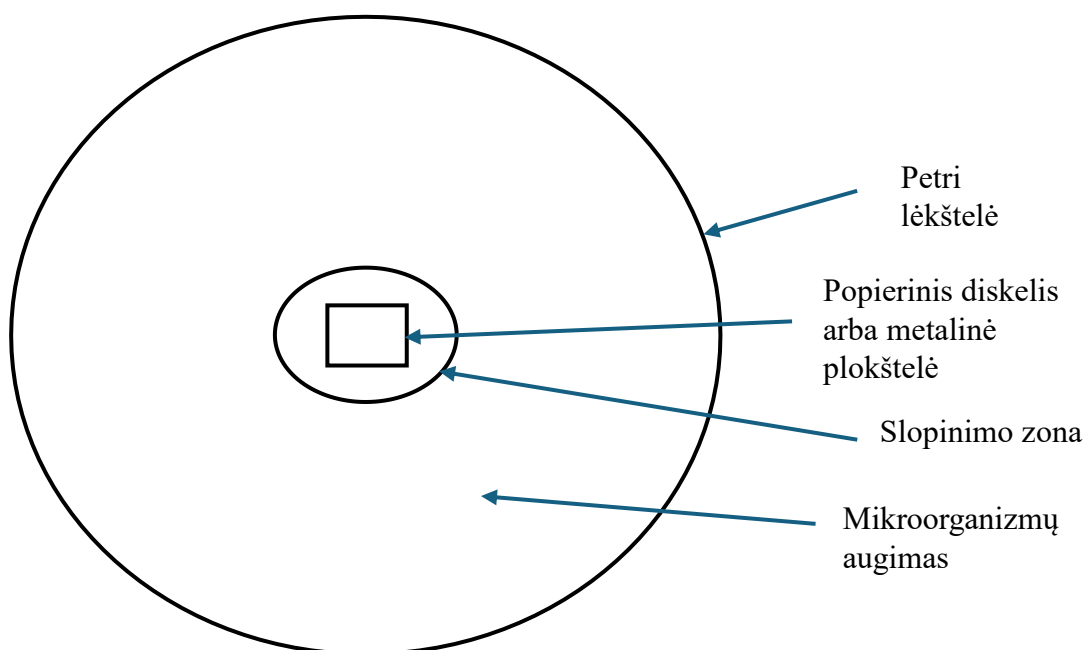
Bandinio tipas		Vandens temperatūra °C				
Al, Al-NaOH, Al+ZnO <sub>PMHS</sub>		20	25	30	35	40
Bandinio temperatūra °C	200		✓	✓	✓	✓
	300		✓	✓	✓	✓
Cu, Cu-FeCl <sub>3</sub> , Cu+ZnO <sub>PMHS</sub>						
Bandinio temperatūra °C	160	✓				
	200	✓				
	240	✓				
	280	✓				

### 2.14. Tiriamųjų bandinių antibakterinis aktyvumas prieš gramteigiamas (*Bacillus subtilis*) ir gramneigiamas (*E. coli*) bakterijas

2.2 lentelė. Antibiotiko ciprofloksacino paruošimas

Antibiotikas	Pradinė koncentracija ir antibiotiko paruošimas	Darbinė koncentracija
Ciprofloksacinas	10 mg/ml DMSO (dimetilsulfoksidas)	50 µg/ml

Ant LB terpės užpilama Petri lėkštelėse užpilti *E. coli* ir *Bacillus subtilis* bakterijų suspensijos 50  $\mu$ l ir uždėti popierinį diską, suvilgytą 50  $\mu$ l antibiotiku arba tiriamąją metalinę plokštelę (2.2 lentelė). Petri lėkštelės sudedamos į termostatą 37 °C. Po vienos dienos buvo stebimas bakterijų augimas ir antibiotiko bei metalinių plokštelių antibakterinis poveikis (2.6 pav.).



2.6 pav. Antibakterinio poveikio įvertinimas

### 2.15. Tiriamųjų bandinių sąveikos su mikrobiologine tarša Kuršių mariose tyrimas

Šiam tyrimui buvo išpjauštos ir naudotos 140x140x1 mm matmenų metalinės aliuminio ir vario plokštelės, kurios chemiškai ištekstūruotos ( $\text{Al-NaOH}$ ,  $\text{Cu-FeCl}_3$ ) ir padengtos superhidrofobine  $\text{ZnO}_{\text{PMHS}}$  danga  $\text{Al+ZnO}_{\text{PMHS}}$  ir  $\text{Cu+ZnO}_{\text{PMHS}}$ .

Eksperimentinis tyrimas buvo paremtas Smithsonian Environmental Research Center (SERC) Šiaurės Amerikoje sukurtu protokolu, kuris yra tarptautiniu mastu taikomas ilgalaikiuose bioapgimimo tyrimuose ir uostuose visame pasaulyje. Pagal šį protokolą kiekvienas eksperimentinis vienetas susideda iš žemyn nukreiptos plokštelės, pritvirtintos prie plytos, kuri naudojama kaip svoris. Horizontali plokštelės orientacija siekia imituoti plūduriuojančius pontonus arba laivų korpusus ir, teoriškai, sumažinti dumblių augimą, taip sudarant palankesnes sąlygas bestuburių kolonizacijai [117].

Paruoštos plokštelės yra išgręžiamos ties kraštu dviejose vietose, per kurias tvirtinimo dirželiais – užtraukėjais buvo stipriai pritvirtinamos prie betoninės trinkelės (2.7 pav.).



**2.7 pav.** Tiriamųjų plokštelių paruošimas prieš merkiant jas į Kuršių marias

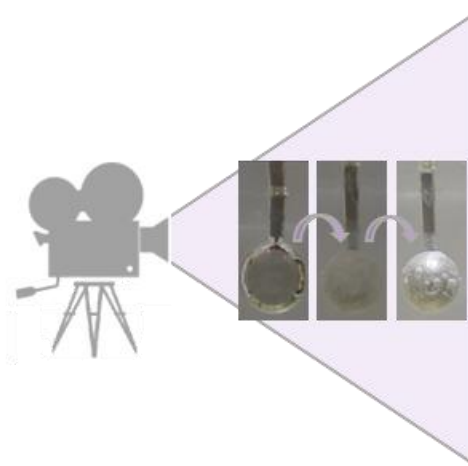
Betoninės plytos su pritvirtintomis metalinėmis plokštelėmis buvo aprišamos virve, kuri yra pritvirtinta prie Smiltynės jachtklubo lieptelio ir įleidžiama į 1 metro gylį. Plokštelės Kuršių marių vandenyje yra laikomos 5 mėnesius, norint stebėti skirtingai paveiktų aliuminio ir vario plokštelių paviršių sąveiką su mikrobiologine Kuršių marių aplinka ir mikroorganizmų sugebėjimą prikibti prie paviršiaus.

### 3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

#### 3.1. Garų plėvelės susidarymo tyrimas

##### 3.1.1. Tekstūravimo ir superhidrofobinės dangos įtaka garų plėvelės susidarymui ir jos gyvavimo laikui ant Al paviršiaus bandinių

Atlikti papildomi Leidenfrost efekto identifikavimo ir kritinių temperatūrų nustatymo tyrimai su skirtingomis dangomis parodė (3.1 pav.), kad garų plėvelės susidarymui didelę įtaką turi dangos hidrofobiškumas ir paviršiaus tolygumas. Dėl šios priežasties buvo atlikti tyrimai su ZnO danga ir ištekstūruotais NaOH tirpale mėginiais, o gauti rezultatai palyginti su gautais Al bandinio rezultatais. Šių eksperimentinių tyrimų metu Al, Al-NaOH ir Al+ZnO<sub>PMHS</sub> bandiniai buvo kaitinami iki 200 ir 300 °C temperatūros ir aušinami 25, 30, 35, 40 °C temperatūros vandenyje.



3.1 pav. Garų plėvelės pokyčiai tyrimo metu [118]

Leidenfrost efekto nustatymo tyrimai ir jo įtaka pasipriešinimui buvo atlikti naudojant stacionarią (2.3 pav.) ir nestacionarią (2.5 pav.) eksperimentines sistemas. Stacionarioje sistemoje dalyje buvo tiriamas Leidenfrost efekto susidarymas ir mėginių aušinimo dinamika: Al, Al-NaOH ir Al+ZnO<sub>PMHS</sub> (3.2 pav.), nustatant kritines Leidenfrost efekto susidarymo temperatūras skirtingiems mėginiams (200 ir 300 °C), kai vandens temperatūra buvo 25, 30, 35 ir 40 °C. Atliekant Leidenfrost efekto nustatymo eksperimentus, svarbus momentas yra garų plėvelės susidarymas ir jos išnykimas, todėl visi bandymai buvo filmuojami vaizdo kamera. Eksperimentų metu buvo matuojama mėginių paviršiaus temperatūra, o iš gautų duomenų sudarytos mėginių aušinimo kreivės (3.2 pav. A) ir apskaičiuotas aušinimo greitis (3.2 pav. B)  $dT/d\tau$ .

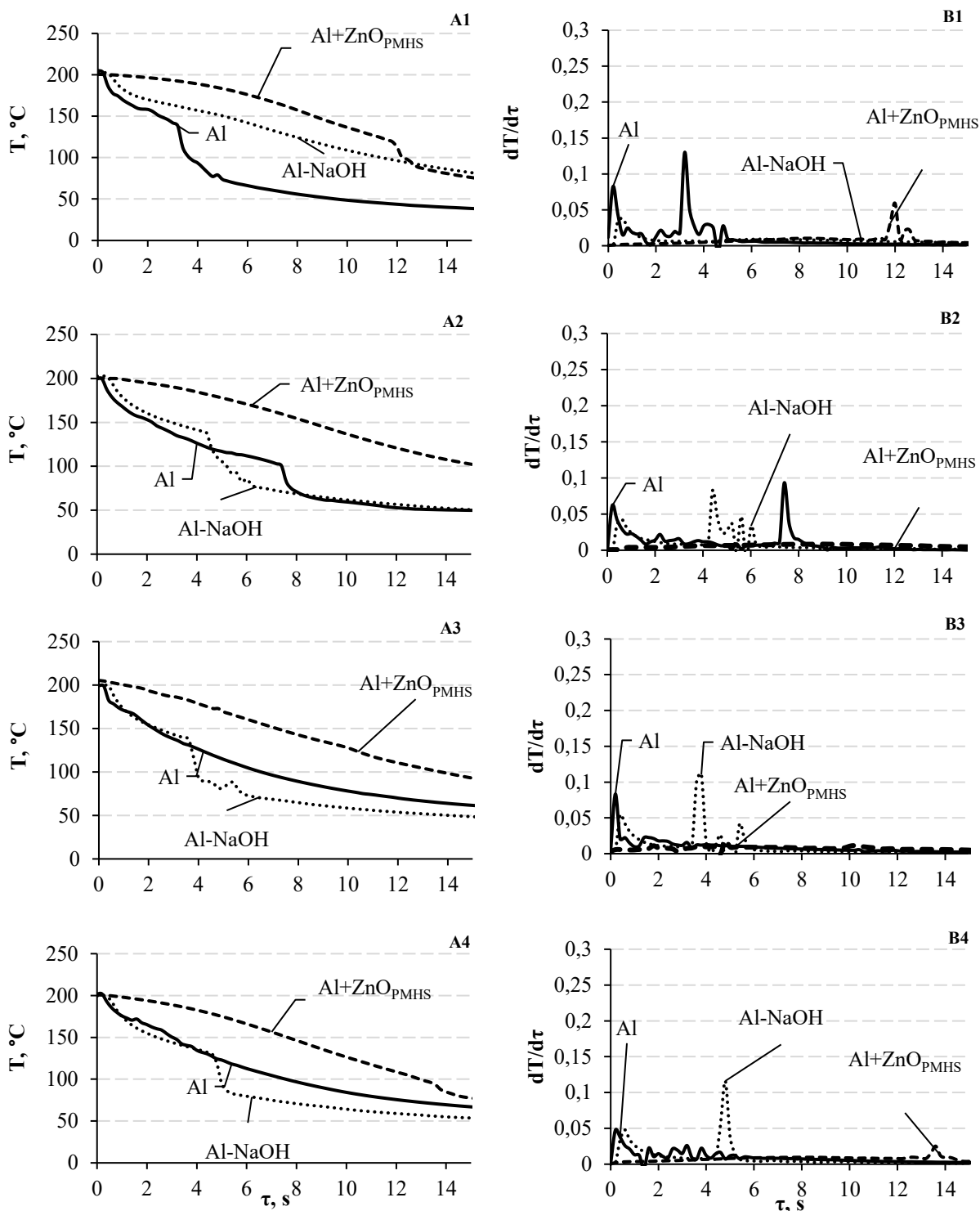
Remiantis tiek eksperimentine vaizdo medžiaga, tiek gautais rezultatais, į 25 °C temperatūros vandenį panardinus iki 200 °C įkaitintus aliuminio mėginius, buvo stebimas garų plėvelės susidarymo procesas (3.2 pav. A1). Buvo pastebėta, jog Al ir Al-NaOH mėginiai garų plėvelę nesusidarė todėl aušimo greičio išvestinės grafike yra matomas pokytis ties pirmosiomis sekundėmis (3.2 pav. B1), tačiau, kai aliuminio bandiniai buvo padengti superhidrofobine ZnO<sub>PMHS</sub> danga, ji truko apie 12 s ir jos storis atitinkamai buvo 0,778 mm.

Padidinus vandens temperatūrą iki 30 °C (3.2 pav. A2), Al ir Al-NaOH bandiniai nesuformavo garų plėvelės, tačiau aplink Al+ZnO<sub>PMHS</sub> mėginius buvo galima stebėti Leidenfrost efektą, kurį galima identifikuoti pagal aušinimo dinamikos išvestines (mėginio paviršiaus aušinimo greitį). Garų plėvelė aplink 200 °C Al+ZnO<sub>PMHS</sub> mėginį 30 °C vandenyje susidarė ir išsilaikė ilgiau nei 14 s., o jos storis

buvo 0,819 mm. Ryškaus plėvelės suirimo nepastebėta, todėl aušinimo greičio išvestinės maksimumas siekė tik 0,025.

Lyginant Al, Al-NaOH ir Al+ZnO<sub>PMHS</sub> mėginių, panardintų į 35 °C temperatūros vandenį, aušinimo dinamikos kreives (3.2 pav. A3), matyti, kad dėl aplink Al+ZnO<sub>PMHS</sub> mėginį susidariusios garų plėvelės aušimas truko taip pat ilgai, kadangi susidarė stora (0,825 mm) garų plėvelė, kuri laikėsi virš 14 s. Šis garų sluoksnis veikia kaip barjeras šilumos perdavimui į aplinką (į vandenį). Al ir Al-NaOH mėginiai garų plėvelės nesudarė, todėl mėginio staigus virimas matomas aušimo greičio dinamikoje (3.2 pav. B3)

Panardinus įkaitintus iki 200 °C mėginius į 40 °C temperatūros vandenį (3.2 pav. A4), aliuminio ir tekstūruoto aliuminio bandiniai nesudarė garų plėvelės kaip ir su praėjusiomis vandens temperatūromis, tačiau Al+ZnO<sub>PMHS</sub> mėginiai sudarė apie 13,5 s. išsilaikančią storą garų plėvelę – 0,801 mm (3.2 pav. A4).



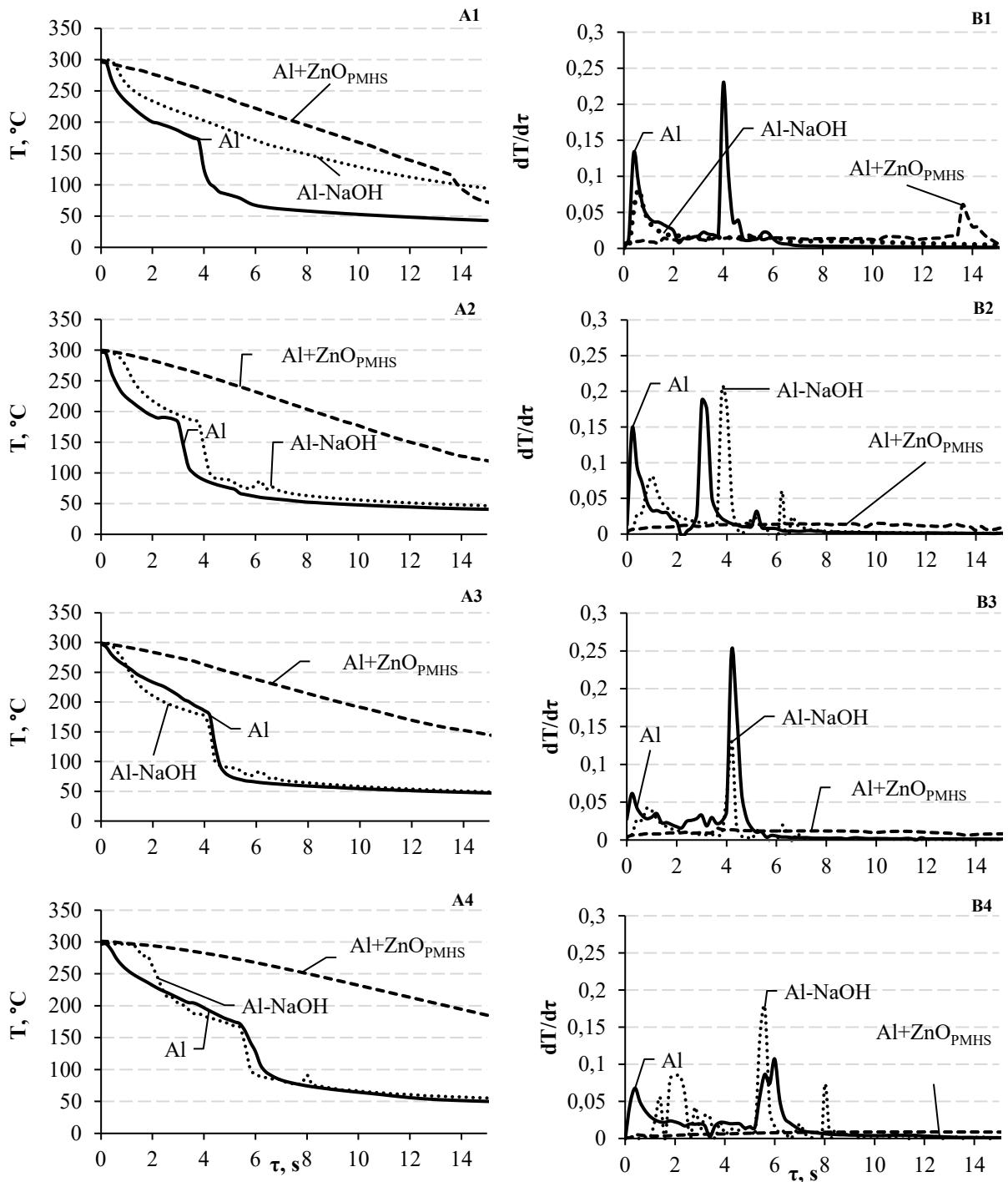
**3.2 pav.** Aušimo dinamikos (A) ir išvestinės (B) Al, Al-NaOH ir Al+ZnO<sub>PMHS</sub> bandinių įkaitintų iki 200 °C auštant 1) 25 °C; 2) 30 °C; 3) 35 °C; 4) 40 °C vandenyje.

Atlikus eksperimentus su Al, Al-NaOH ir Al bandiniais padengtais ZnO danga ir įkaitintais iki 300 °C buvo aiškiai stebima hidrofobinės dangos įtaką garų plėvelės susidarymui bei jos gyvavimo laikui (3.3 pav. A1-4). Superhidrofobiškumu pasižymintys ZnO bandiniai panardinti į sąlyginai žemos temperatūros (25 °C) vandenį suformavo garų plėvelę, kuri išsilaikė net iki 13,5 s. (plėvelės storis – 0,854 mm), kai aplink Al bandinius tik 0,5 s. (plėvelės storis 0,376 mm), o aplink Al-NaOH bandinį garų plėvelė nesiformavo (3.3 pav. A1). Išanalizavus vaizdinę medžiagą paaiškėjo, kad staigus bandinio paviršiaus temperatūros sumažėjimas įvyko dėl garų plėvelės susprogimo ir ZnO dangos

pašalinimo nuo bandinio, ką parodo ir aušimo dinamikos išvestinės, kur ties 13,5 s aiškus pikas siekiantis 0,065 vertę (3.3 pav. B1).

Esant 30 ir 35 °C vandens temperatūroms Al+ZnO<sub>PMHS</sub> aušimo dinamikos išvestinių kreivėse pikų nėra, kadangi aplink bandinius susidariusi garų plėvelė traukdavosi-plonėdavo palengva (3.3 pav. B2-3). Todėl Leidenfrost efekto gyvavimo laikui identifikuoti buvo analizuota vaizdinė medžiaga, kurioje aiškiai pastebimi skirtumai tarp garų plėvele apgaubto bandinio ir bandinio turinčio kontakta su vandeniu. Susidariusi garų plėvelė ženkliai sumažina šilumos atidavimą vandeniui, todėl tirtų Al, kur prie šių tirtų vandens temperatūrų garų plėvelė išsilaikė iki 0,5 s, (plėvelės storiai – 0,372-0,384 mm). Tekstūruoto aliuminio bandiniai formavo 1 s trunkančią garų plėvelę, todėl aušimas truko šiek tiek ilgiau negu aliuminio bandinių (plėvelės storiai – 0,402-0,468 mm). Superhidrofobine danga dengti bandiniai formavo ilgesnę nei 14 s trunkančią garų plėvelę (plėvelės storiai 0,873 – 0,882 mm), kas puikiai atsispindi 3.3 pav. A2-A3 grafikuose.

Ryškiausią garų plėvelės išsilaikymą daugiau nei 14 s. (3.3 pav. A4) ant bandinio parodė Al+ZnO<sub>PMHS</sub> bandinys, kuris prie 40 °C vandens temperatūros sudarė ilgiau nei 14 s. trunkančią garų plėvelę (0,887 mm). Tuo tarpu tekstūruotas aliuminio bandinys sudarė 2 s trunkančią ploną garų plėvelę (0,675 mm). Ploniausią ir trumpiausią garų plėvelę sudarė poliruotas aliuminis (stori 0,405 mm). Bandinių ir vandens temperatūrų sąlygos (ties kuriomis buvo stebėtas Leidenfrostas arba ne) formotis garo plėvelei bei jo trukmė parodyti 3.1 lentelėje, o susidariusios plėvelės storis – 3.2 lentelėje.



3.3 pav. Aušimo dinamikos (A) ir išvestinės (B) Al, Al-NaOH ir Al+ZnO<sub>PMHS</sub> bandinių įkaitintų iki 300 °C auštant 1) 25 °C; 2) 30 °C; 3) 35 °C; 4) 40 °C vandenyje.

**3.1 lentelė.** Garų plėvelės formavimosi trukmė ant bandinio paviršiaus

Bandinio tipas		$T_{\text{vandens}}, ^\circ\text{C}$			
		25	30	35	40
<b>Al</b>		Garų plėvelės gyvavimo trukmė, s			
$T_{\text{bandinio}}, ^\circ\text{C}$	200	nesiformavo	nesiformavo	nesiformavo	nesiformavo
	300	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
<b>Al-NaOH</b>		Garų plėvelės gyvavimo trukmė, s			
$T_{\text{bandinio}}, ^\circ\text{C}$	200	nesiformavo	nesiformavo	nesiformavo	nesiformavo
	300	nesiformavo	<1	<1	2
<b>Al+ZnO<sub>PMHS</sub></b>		Garų plėvelės gyvavimo trukmė, s			
$T_{\text{bandinio}}, ^\circ\text{C}$	200	12	>14	>14	14
	300	13,5	>14	>14	>14

**3.2 lentelė.** Ant skirtingo paviršiaus aliuminio bandinių susiformavusios garų plėvelės storis, mm

Bandinio tipas		$T_{\text{vandens}}, ^\circ\text{C}$			
		25	30	35	40
<b>Al</b>		Garų plėvelės storis, mm			
$T_{\text{bandinio}}, ^\circ\text{C}$	200	nesiformavo	nesiformavo	nesiformavo	nesiformavo
	300	0,376	0,372	0,384	0,405
<b>Al-NaOH</b>		Garų plėvelės storis, mm			
$T_{\text{bandinio}}, ^\circ\text{C}$	200	nesiformavo	nesiformavo	nesiformavo	nesiformavo
	300	nesiformavo	0,402	0,468	0,675
<b>Al+ZnO<sub>PMHS</sub></b>		Garų plėvelės storis, mm			
$T_{\text{bandinio}}, ^\circ\text{C}$	200	0,778	0,819	0,825	0,801
	300	0,854	0,873	0,882	0,887

**3.1.2. Tekstūravimo ir superhidrofobinės dangos įtaka garų plėvelės susidarymui ir jos gyvavimo laikui ant Cu bandinių**

Leidenfrosto proceso tyrimas ant varinio tipo bandinių tai pat buvo atliekamas Leidenfrosto temperatūros nustatymo eksperimentiniame stende (2.3 pav.). Optimaliai Leidenfrosto efekto susidarymo temperatūrai nustatyti, buvo daromi eksperimentai su skirtingomis vario bandinių temperatūromis jas didinant kas 20 °C. Kadangi varis pasižymi žema šilumine talpa (380 J/(K·mol)), Leidenfrosto efektui susidaryti aplink bandinį nustatyta žemiausia temperatūra siekė 160 °C, o aukščiausia 280 °C. Eksperimentai buvo atliekami su Cu, Cu-FeCl<sub>3</sub> ir Cu+ZnO<sub>PMHS</sub> bandiniais vandens temperatūrai esant 20 °C. Eksperimentų metu buvo matuojama mėginių paviršiaus temperatūra, o iš gautų duomenų sudarytos mėginių aušinimo kreivės (3.4 pav. A) ir apskaičiuotas aušinimo greitis (3.4 pav. B) dT/dt.

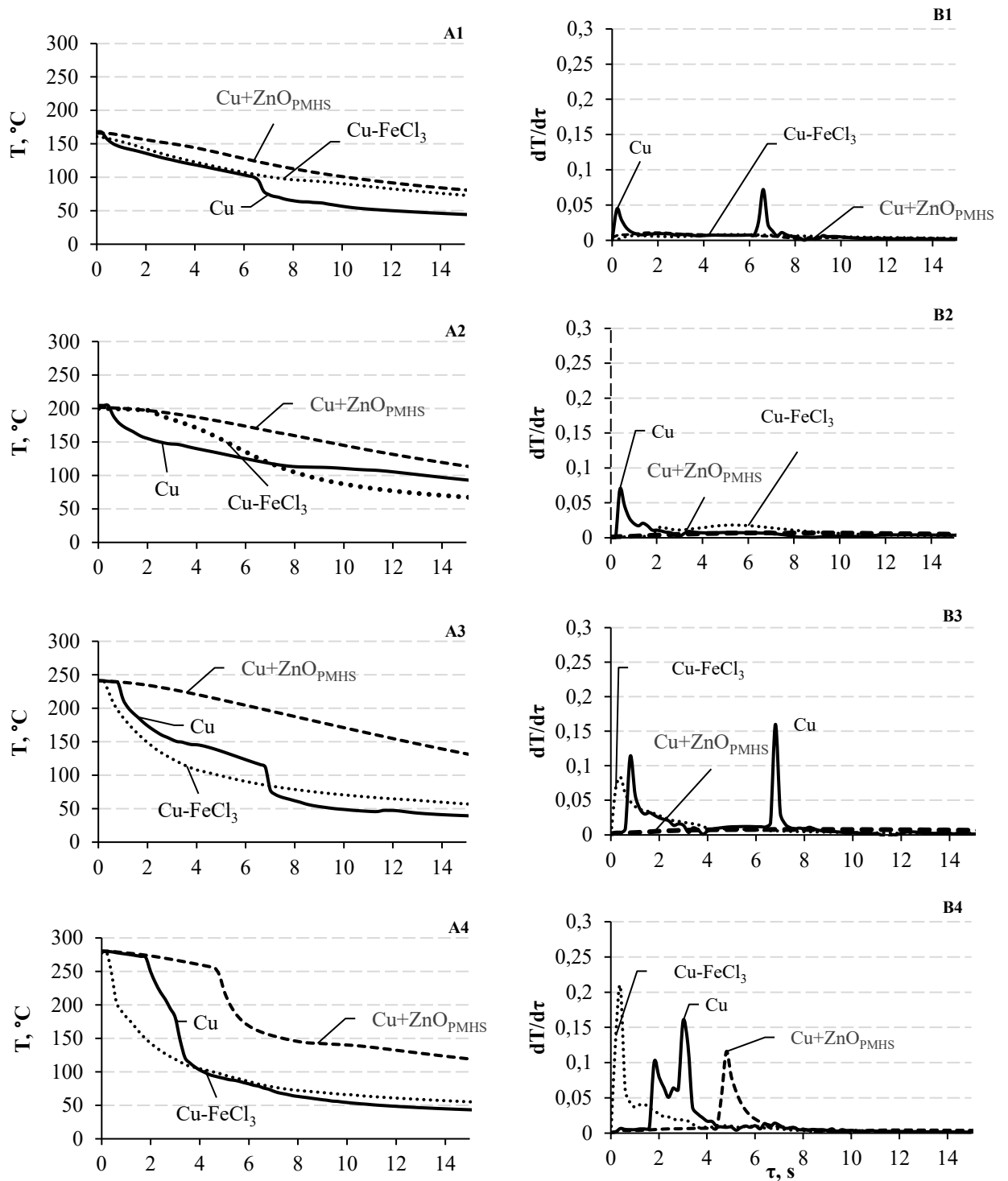
Pakaitinus vario bandinius iki 160 °C, buvo nustatyta, jog poliruoto (Cu) ir tekstūruoto vario (Cu-FeCl<sub>3</sub>) mėginys nesudarė garų plėvelės, todėl grafike šis temperatūros pokytis yra matomas aiškiau (3.4 pav. A1-B1), lyginant su superhidrofobine danga dengtais Cu+ZnO<sub>PMHS</sub> bandiniais, kurie esant tokiomis pačiomis sąlygomis sudarė pakankamai storą garų plėvelę (0,661 mm), kuri laikėsi ant bandinio apie 3 s ir palengva plonėjo. Šis reiškinys leidžia suprasti, jog vario bandinio tekstūravimas ir dengimas superhidrofobine danga padeda ne tik sudaryti garų plėvelę, bet ir prailginti jos gyvavimo

trukmę, kuri neleidžia bandiniui atiduoti šilumos į aplinką taip greitai, kaip ją atiduoda niekuo nedengtas vario bandinys.

Kai bandinio temperatūra yra 200 °C, pastebėta, jog poliruotas varis nesudaro garų plėvelės, tačiau tekstūruotas varis suformuoja iki 2 s išsilaikančią garų plėvelę (storis – 0,758 mm), kuri iš lėto plonėjo, kadangi maksimalus greitis siekė 0,012 dT/dτ. Cu+ZnO<sub>PMHS</sub> bandinys išlaikė ilgiau nei 14 s trunkančią garų plėvelę (storis – 0,775 mm), kurios pokyčio dėl šios priežasties aušimo greičio išvestinės grafike nesimatyti (3.4 pav. B2).

Bandinio temperatūrai esant 240 °C, poliruotas varis suformavo 1 s išsilaikiusią garų plėvelę (storis 0,668 mm), o tekstūruotas varis tik 0,5 s, ir kaip galima matyti iš grafiko (3.4 pav. A3), sukėlė staigų temperatūros kritimą, dėl susidariusios labai plonos plėvelės (0,315 mm). Cu+ZnO<sub>PMHS</sub> bandinys sudarė daugiau kaip 14 s gyvavusią storą (0,892 mm) garų plėvelę. Nors aušimo greičio grafike (3.4 pav. B3) yra labai gerai matomas poliruoto ir tekstūruoto vario mėginių pokytis ir maksimumai, dėl superhidrofobinės dangos įtakos aušimo grafike Al+ZnO<sub>PMHS</sub> bandinio pokyčio nematyti.

Kai bandinių temperatūra pasiekė aukščiausią Leidenfrosto efektui susidaryti reikalingą temperatūrą 280 °C, pastebėta, jog susidariusi garų plėvelė, nepaisant to, koks bandinio paviršius bebūtų, pradėjo plonėti ir sunkiau formotis ant kai kurių paviršių (3.4 pav. A4). Bandymo metu pastebėta, jog poliruoto vario bandinys suformavo 1 s trukmės garų plėvelę (storis 0,343 mm), o tekstūruotas varis nesudarė jokios plėvelės. Cu+ZnO<sub>PMHS</sub> bandinys sudarė garų plėvelę kuri truko 5 s (0,782 mm) ir šio mėginio aušimo greičio maksimumas siekė 0,12 dT/dτ (3.4 pav. B4). Eksperimento metu nustatomos visų mėginių garų plėvelės gyvavimo trukmė ir jų storis yra pateiktas 3.3 lentelėje.



3.4 pav. Aušimo dinamikos (A) ir išvestinės (B) Cu, Cu-FeCl<sub>3</sub> ir Cu+ZnO<sub>PMHS</sub> bandinių 20 °C vandens temperatūroje, kai bandinio temperatūra 1) 160 °C; 2) 200 °C 3) 240 °C 4) 280 °C

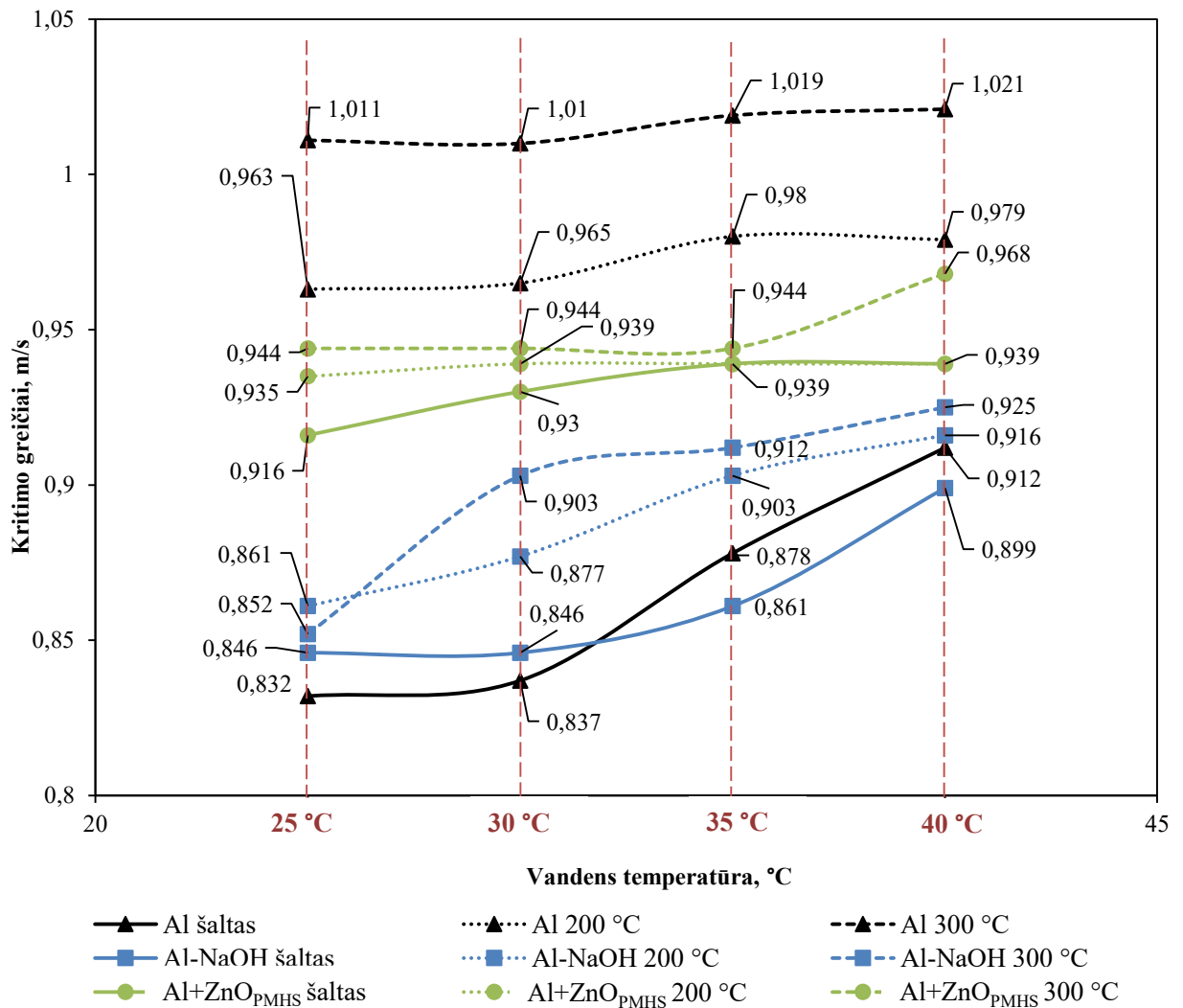
**3.3 lentelė.** Garų plėvelės formavimosi trukmė ir jos storis ant bandinio paviršiaus

Bandinio tipas		T <sub>vandens</sub> , °C	
		20	
Cu		Garų plėvelės gyvavimo trukmė, s	Garų plėvelės storis, mm
T <sub>bandinio</sub> , °C	160	nesiformavo	nesiformavo
	200	nesiformavo	nesiformavo
	240	1s	0,668
	280	1s	0,343
Cu-FeCl <sub>3</sub>		Garų plėvelės gyvavimo trukmė, s	Garų plėvelės storis, mm
T <sub>bandinio</sub> , °C	160	nesiformavo	nesiformavo
	200	1s	0,758
	240	0,5s	0,314
	280	nesiformavo	nesiformavo
Cu+ZnO <sub>PMHS</sub>		Garų plėvelės gyvavimo trukmė, s	Garų plėvelės storis, mm
T <sub>bandinio</sub> , °C	160	2s	0,661
	200	>14s	0,775
	240	>14s	0,892
	280	5s	0,782

**3.2. Hidrodinaminio pasipriešinimo tyrimas**

**3.2.1. Al bandinių hidrodinaminio pasipriešinimo skirtingose vandens temperatūrose tyrimas**

Pirmieji hidrodinaminio pasipriešinimo tyrimai atlikti su Al bandiniais. Eksperimentai buvo vykdomi naudojant laisvojo kritimo greičio matavimo sistemą (3.5 pav.). Tyrimams naudoti trijų tipų mėginiai: Al, Al-NaOH ir Al+ZnO<sub>PMHS</sub>.



3.5 pav. Aliuminio mėginių kritimo greičiai esant skirtingoms paviršiaus ir vandens temperatūros

3.5 pav. pateikti mėginių vidutiniai kritimo greičiai esant skirtingoms vandens temperatūroms (25, 30, 35, 40 °C). Šios priklausomybės atskleidžia dangų savybių, paviršiaus temperatūros ir vandens temperatūros įtaką mėginių kritimo greičiui. Lyginant gautus rezultatus su nekaitintais Al mėginiais, didėjant vandens temperatūrai užfiksuotas mažiausias kritimo greitis, nulemtas didžiausio trinties pasipriešinimo: 0,832 m/s esant 25 °C vandens temperatūrai, 0,837 m/s – esant 30 °C, 0,878 m/s – esant 35 °C ir 0,912 m/s – esant 40 °C. Didžiausias kritimo greitis – 0,929 m/s – užfiksuotas nešildyto Al+ZnO<sub>PMHS</sub> mėginio, panardinto į 25 °C temperatūros vandenį. Vis dėlto pastebėta, kad didėjanti vandens temperatūra šio tipo mėginių kritimo greičiui ryškios įtakos nedaro. Didėjant vandens temperatūrai, kritimo greitis sumažėja tik nežymiai: esant 30 °C – iki 0,923 m/s, 35 °C – iki 0,918 m/s, o 40 °C – iki 0,904 m/s.

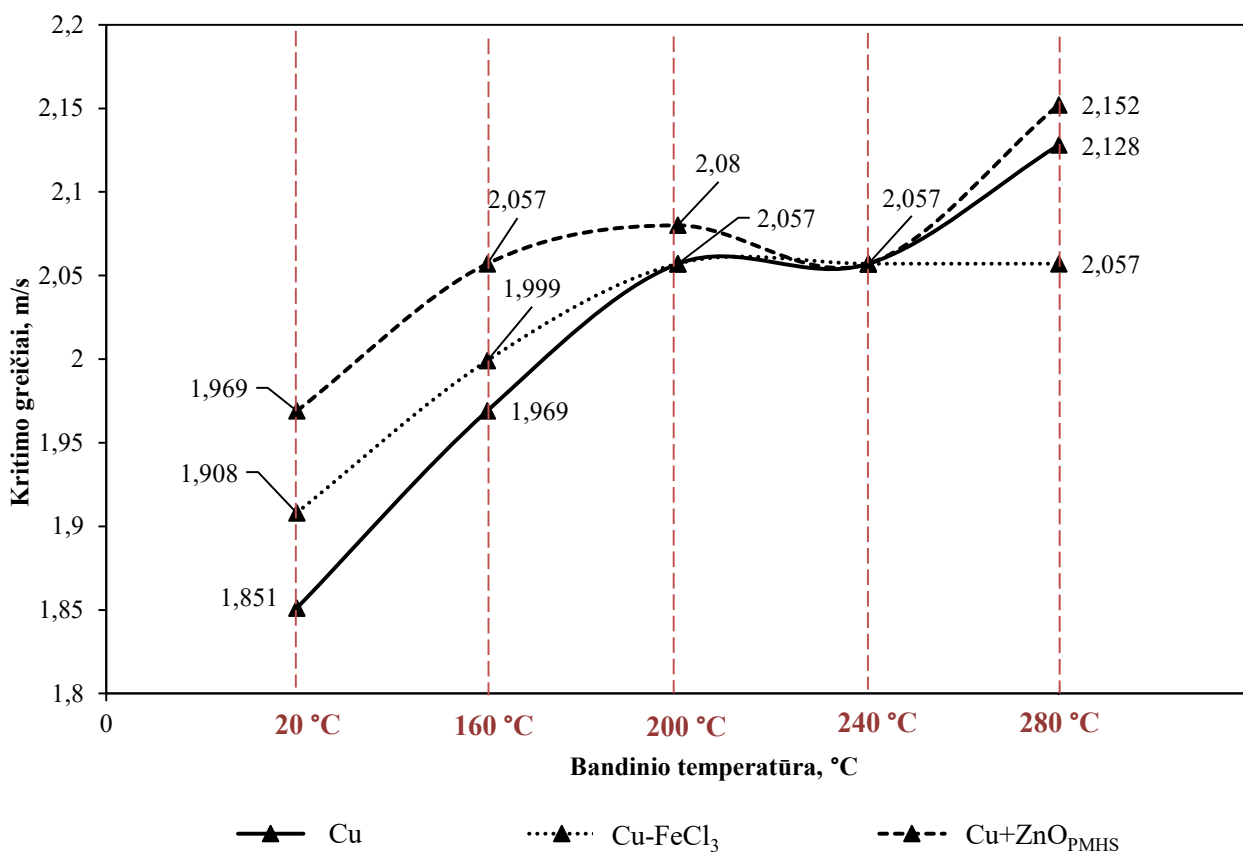
Lyginant gautus aliuminio bandinių rezultatus, kurie yra pakaitinti iki 200 °C pastebėta, jog žemiausiu kritimo greičiu pasižymi tekstūruoti aliuminio bandiniai (Al-NaOH), kurių greitis prie 25 °C vandens temperatūros siekia 0,861 m/s, o keliant šią temperatūrą didėja: prie 30 °C vandens temperatūros 0,877 m/s, prie 35 °C – 0,903 m/s, o prie aukščiausios 40 °C vandens temperatūros siekia 0,916 m/s. Didžiausias kritimo greitis užfiksuotas aliuminio bandinių įkaitintų iki 200 °C temperatūros. Prie žemiausios vandens 25 °C temperatūros buvo užfiksuotas 0,963 m/s greitis, kuris

keliant vandens temperatūra po truputį didėjo: esant 30 °C – iki 0,965 m/s, 35 °C – iki 0,98 m/s, o 40 °C – iki 0,979 m/s.

Lyginant gautus aliuminio bandinių rezultatus, kurie yra pakaitinti iki 300 °C pastebėta, jog žemiausią kritimo greitį išvystė tekstūruoti aliuminio bandiniai, kurių kritimo greitis, keliant vandens temperatūrą vis didėjo: prie žemiausios vandens temperatūros siekė 0,852 m/s, prie 30 °C – 0,903 m/s, prie 35 °C – 0,912 m/s, o prie aukščiausios temperatūros – 0,925 m/s. Didžiausią vandens temperatūrą užfiksuota aliuminio bandinių, kurių kritimo greitis nežymiai didėjo keliant vandens temperatūrą: nuo 1,011 m/s prie 25 °C vandens temperatūros iki 1,021 m/s prie 40 °C vandens temperatūros.

### 3.2.2. Cu bandinių hidrodinaminio pasipriešinimo tyrimas

Antrieji hidrodinaminio pasipriešinimo tyrimai atlikti su vario bandiniais. Eksperimentai buvo vykdomi naudojant laisvojo kritimo greičio matavimo sistemą (2.5 pav.). Tyrimams naudoti trijų tipų mėginiai: Cu, Cu-FeCl<sub>3</sub> ir Cu+ZnO<sub>PMHS</sub>.



3.6 pav. Aliuminio mėginių kritimo greičiai esant skirtingoms paviršiaus temperatūroms prie 20 °C vandens temperatūros

3.6 pav. pateikti mėginių vidutiniai kritimo greičiai esant skirtingoms bandinio temperatūroms. Šios priklausomybės atskleidžia dangų savybių bei paviršiaus temperatūros įtaką mėginių kritimo greičiui. Lyginant gautus rezultatus su nekaitintais Cu mėginiais (1,851 m/s), žemiausias kritimo greitis buvo užfiksuotas vario mėginių (1,851 m/s), o didžiausias – superhidrofobine danga dengto vario mėginių (1,969 m/s).

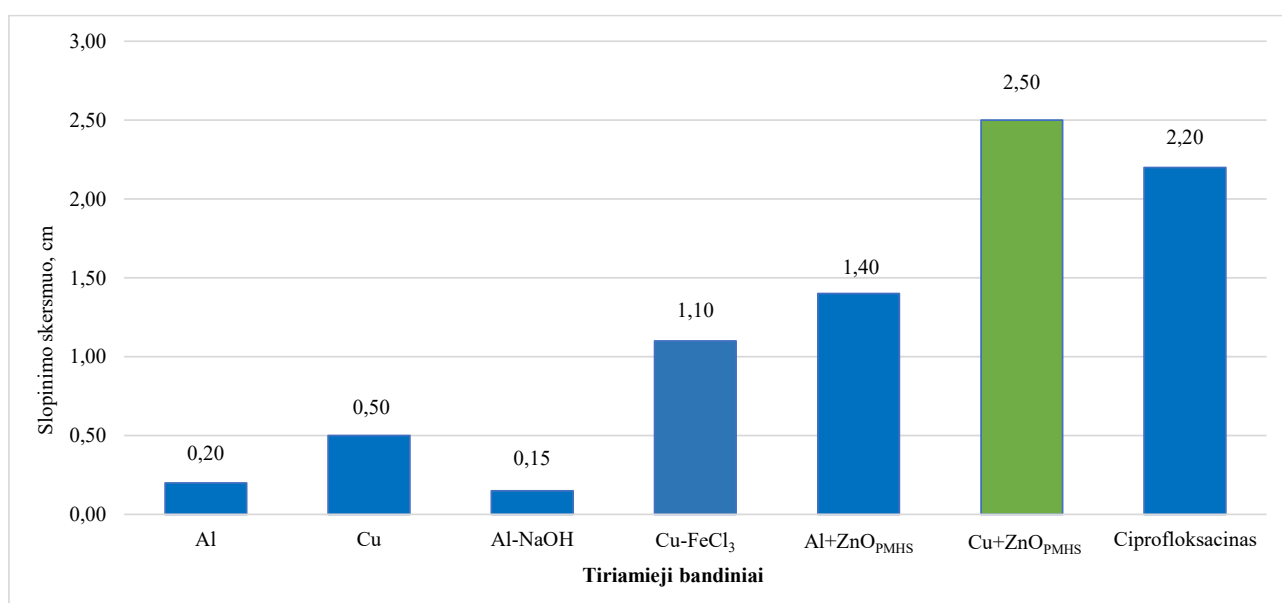
Lyginant pakaitintų iki 160 °C vario mėginių rezultatus pastebėta, jog žemiausią kritimo greitį turėjo poliruoti vario mėginiai (1,969 m/s), kurie prie šios temperatūros nesudarė jokios garų plėvelės, o didžiausią kritimo greitį turėjo superhidrofobine danga dengti vario mėginiai (2,057 m/s). Pakėlus vario mėginių temperatūrą iki 200 °C, žemiausias kritimo greitis nustatytas poliruotų ir tekstūruotų vario mėginių (2,057 m/s), kurie nesudarė garų plėvelės (Cu) arba sudarė labai plotą ir trumpai trukusią garų plėvelę (Cu-FeCl<sub>3</sub>). Kuomet vario mėginių temperatūra siekė 240 °C, visų tipų vario mėginiai sudarė garų plėvelę ir jų kritimo greitis siekė 2,057 m/s, o kai temperatūra pasiekė aukščiausią garų plėvelės formavimosi temperatūrą (280 °C), pastebėta, jog žemiausią kritimo greitį išvystė tekstūruoti vario mėginiai, kurie prie šios temperatūros nesudarė garų plėvelės. Didžiausias kritimo greitis buvo nustatytas superhidrofobine danga dengtų vario mėginių, kurie išvystė didžiausią – 2,152 m/s kritimo greitį.

### 3.3. Bandinių antibakterinis aktyvumas prieš gramneigiamas (*Escherichia coli*) ir gramteigiamas (*Bacillus subtilis*) bakterijas

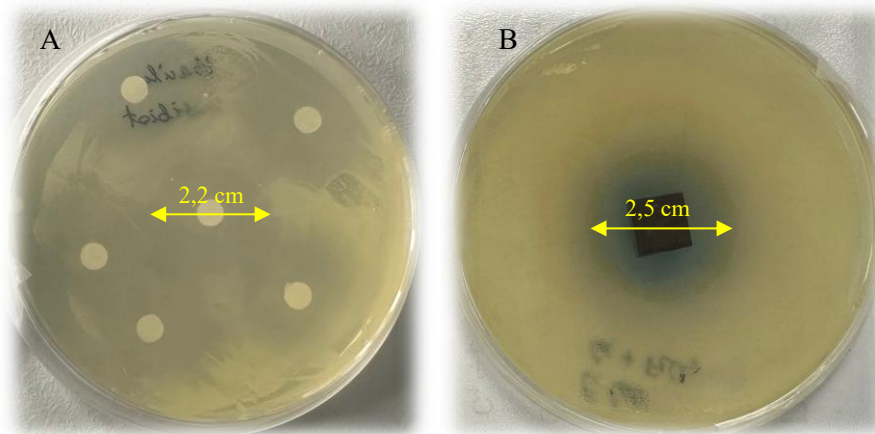
Antibakteriniams tyrimams nustatyti prieš gramteigiamas ir gramneigiamas bakterijas buvo naudoti šios metalinės 10x10x1 mm matmenų plokštelės:

- aliuminio;
- vario;
- aliuminio plokštelės tekstūruotos NaOH 7,5% tirpale (Al-NaOH);
- vario plokštelės tekstūruotos FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 40% tirpale (Cu-FeCl<sub>3</sub>);
- aliuminio plokštelės dengtos superhidrofobine danga (Al+ZnO<sub>PMHS</sub>);
- vario plokštelės dengtos superhidrofobine danga (Cu+ZnO<sub>PMHS</sub>).

Antibakterinis aktyvumas buvo fiksuojamas aplink metalines plokšteles arba popieriaus diskelius susidarius slopinimo zonos, skersmenį, kuris matuojamas milimetrais (mm). Tyrimo rezultatams palyginti su augalo ekstraktų antibakteriniu aktyvumu prieš gramteigiamas ir gramneigiamas bakterijas, buvo naudojamas plačiai farmacijoje naudojamas antibiotikas ciprofloksacinas.

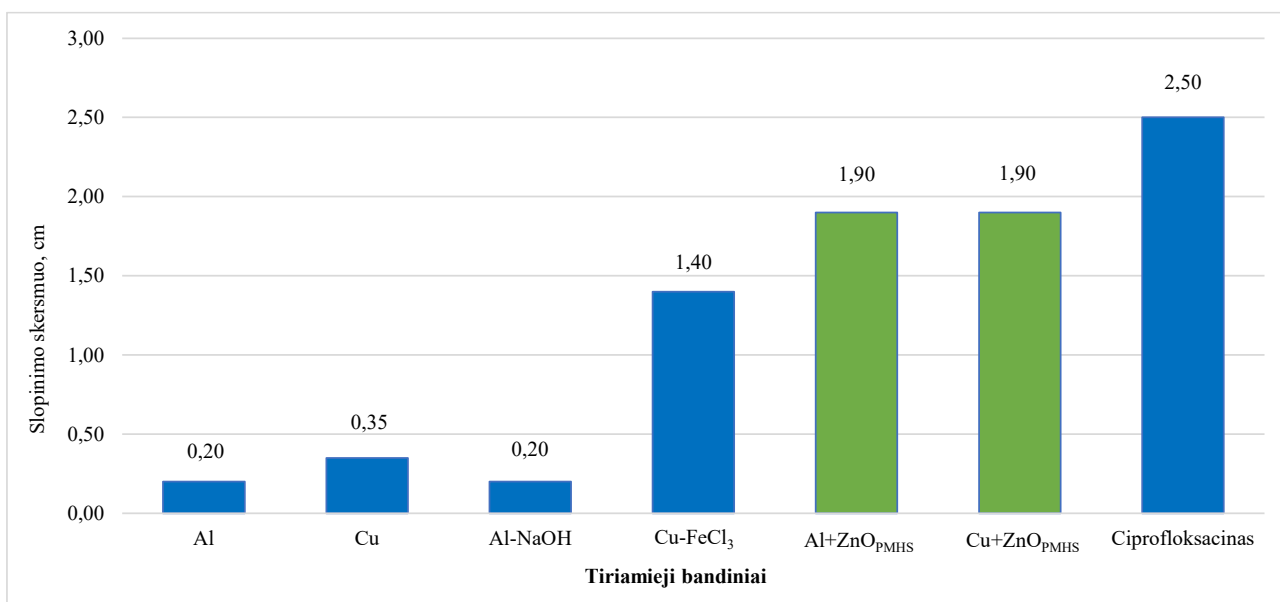


3.7 pav. Antibakterinis tiriamųjų bandinių vertinimas naudojant gramteigiamas *Bacillus subtilis* bakterijas



**3.8 pav.** Antibakterinis aktyvumas prieš gramteigiamas *B. subtilis* bakterijas A) Antibiotiko ciprofloksacino B) vario, dengto superhidrofobine ZnO<sub>PMHS</sub> tiriamuosiuose bandiniuose

Gauta, (žr. 3.7 ir 3.8 pav.), kad intensyviausias antibakterinis aktyvumas naudojant gramteigiamas *Bacillus subtilis* bakterijas pasireiškė varinės plokštelės, kuri buvo dengta superhidrofobine ZnO<sub>PMHS</sub> danga (2,5 cm slopinimo skersmuo) tiriamajame bandinyje ir turėjo didesnę aktyvumą nei palyginimui (3.8 pav.) naudojamas antibiotikas ciprofloksacinas (2,2 slopinimo skersmuo). Mažiausias antibakterinis aktyvumas pasireiškė aliuminio plokštelės, tekstūruotos NaOH tirpale bandinyje, kurio slopinimo skersmuo buvo tik 0,15 cm.



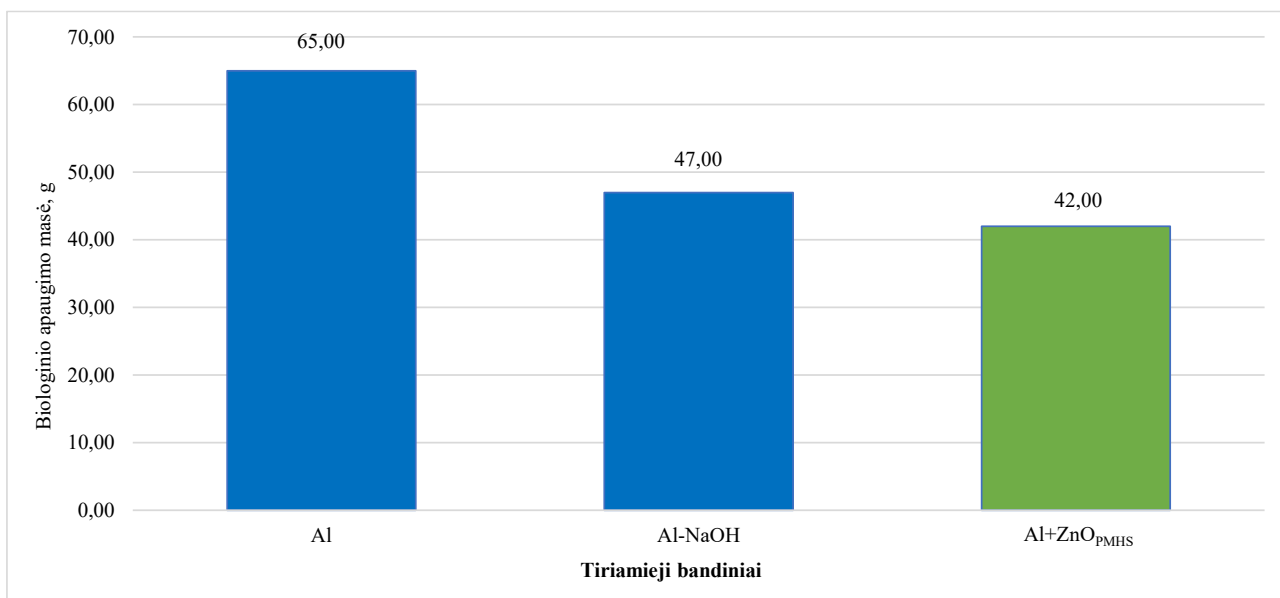
**3.9 pav.** Antibakterinis tiriamųjų bandinių vertinimas naudojant gramneigiamas *E. coli* bakterijas

Nustatyta, (3.9 pav.), jog intensyviausias antibakterinis aktyvumas naudojant gramneigiamas *E. coli* bakterijas buvo superhidrofobine danga dengtų (ZnO<sub>PMHS</sub>) aliuminio ir vario (1,9 cm slopinimo skersmuo) plokštelių bandiniuose, o mažiausias antibakterinis aktyvumas pasireiškė aliuminio ir natrio šarme tekstūruoto aliuminio bandiniuose – slopinimo skersmuo 0,2 cm.

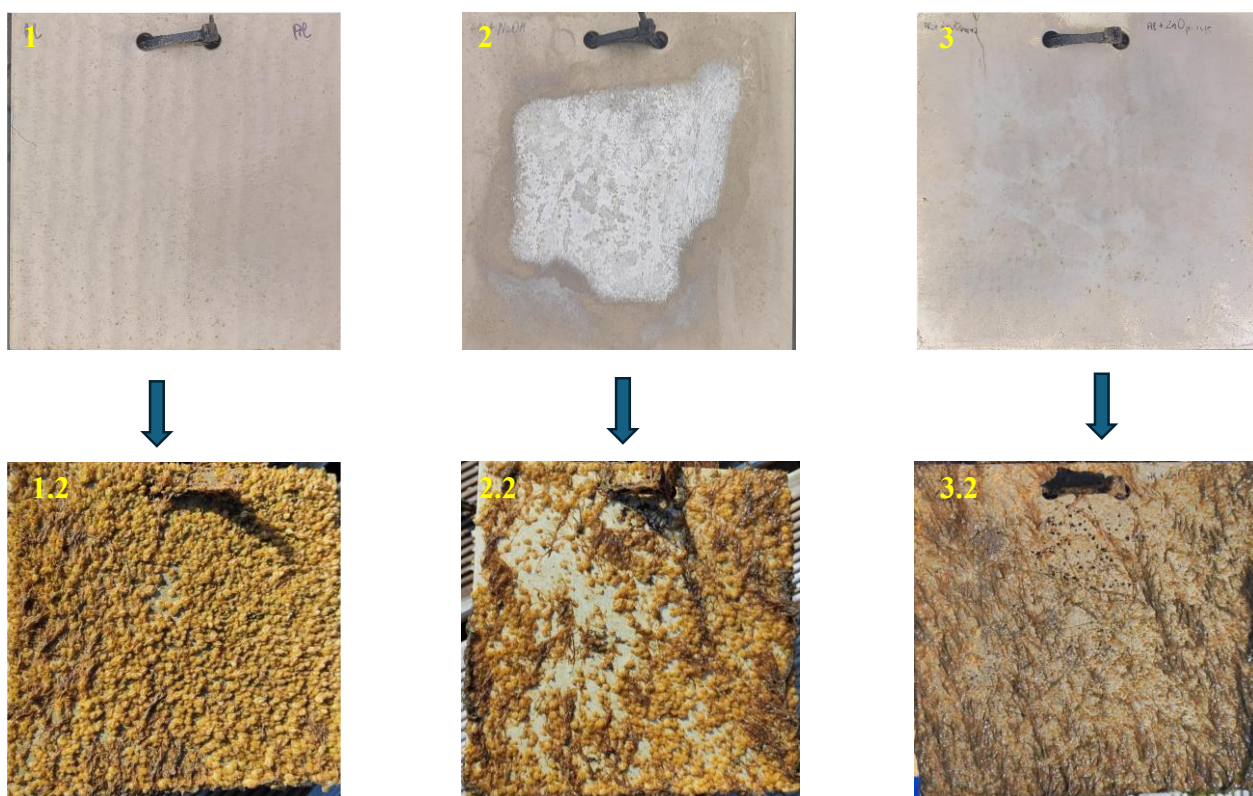
### 3.4. Tiriamųjų bandinių sąveikos su mikrobiologine tarša Kuršių mariose tyrimų

#### 3.4.1. Tekstūravimo ir superhidrofobinės dangos ant Al bandinių įtaka biologiniam apaugimui

Plokštelės buvo įrengtos birželio mėnesį, o pirmasis vertinimas atliktas rugpjūtį (praėjus maždaug trimis mėnesiams). Šiame etape augalinė bendrija dar buvo ankstyvos vystymosi stadijos, dominavo maži augantys ūsakojai vėžiagyviai, siūliniai žalieji dumbliai ir smulkios juodos taškinės struktūros.



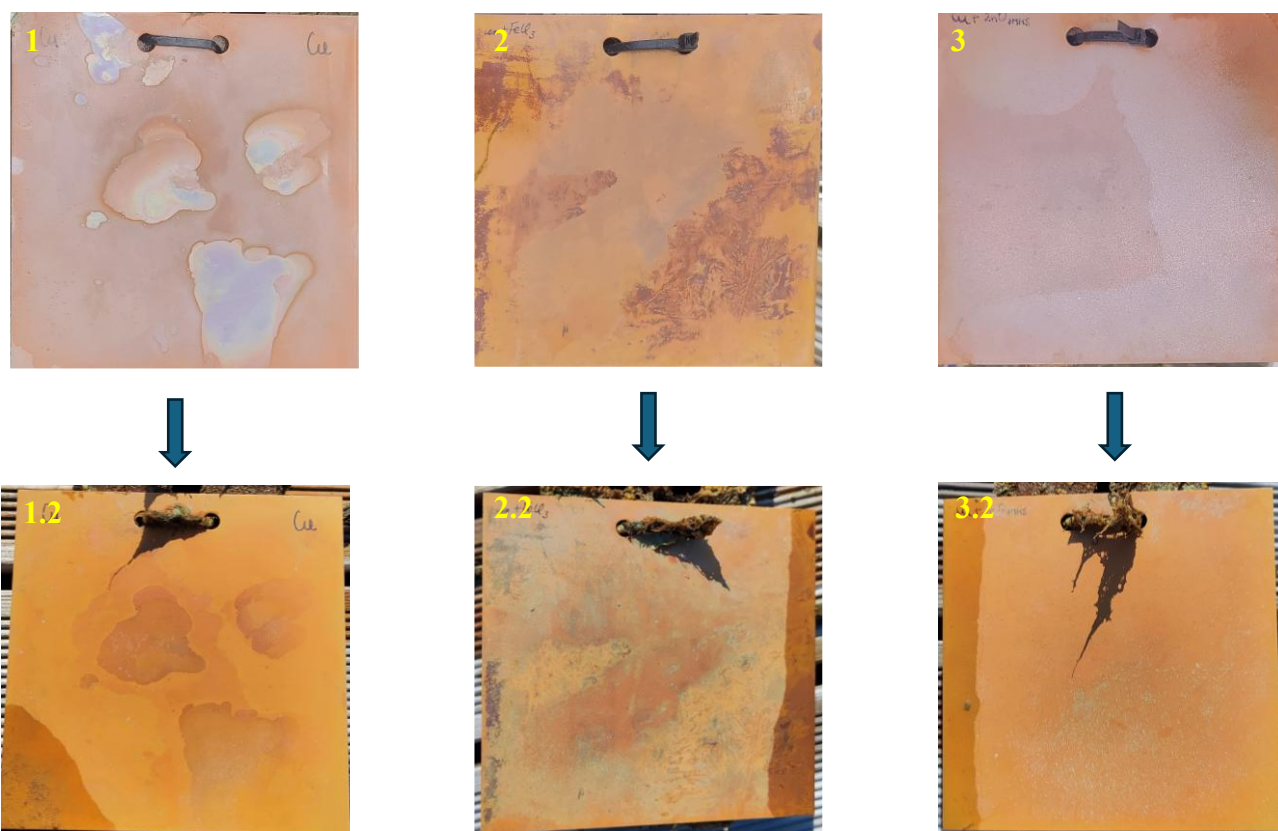
3.10 pav. Biologinio apaugimo tyrimo rezultatai naudojant skirtingo paviršiaus aliuminio plokšteles



3.11 pav. Aliuminio plokštelės prieš merkimą į Kuršių marias: 1) Al 2) Al-NaOH 3) Al+ZnO<sub>PMHS</sub> ir jų biologinis apaugimas po 5 mėnesių 1.2) Al 2.2) Al-NaOH 3.2) Al+ZnO<sub>PMHS</sub>

Nustatyta, (3.10 pav.) jog didžiausiu biologiniu apaugimu pasižymėjo aliuminio plokštelė (65 g.) prie kurios labiausiai prisitvirtinusios dominavo nevietinės rūšys: *Amphibalanus improvisus*, *Dreissena polymorpha*, *Cordylophora caspia* ir *Dreissena sp.* Šiek tiek mažesniu prisitvirtinusių organizmų kiekiu pasižymėjo tekstūruoto aliuminio plokštelė, ant kurios taip pat buvo rasta *Amphibalanus improvisus*, *Dreissena polymorpha* ir *Cordylophora caspia*, organizmų, tačiau nebuvo rasta *Dreissena sp.* organizmų. Žemiausiu biologiniu apaugimu pasižymėjo Al+ZnO<sub>PMHS</sub> plokštelė, (biologinis apaugimas 42 g.), pasižyminti antibakteriniu efektu. Ant jos buvo rasta tokių pačių nevietinių rūšių, kaip ir ant Al plokštelių. Aliuminio plokštelių vizualus apaugimas gali būti matomas 3.11 pav.

### 3.4.2. Tekstūravimo ir superhidrofobinės dangos ant Al bandinių įtaka biologiniam apaugimui



**3.12 pav.** Vario plokštelės prieš merkimą į Kuršių marias: 1) Cu 2) Cu-FeCl<sub>3</sub> 3) Cu+ZnO<sub>PMHS</sub> ir jų biologinis apaugimas po 5 mėnesių 1.2) Cu 2.2) Cu-FeCl<sub>3</sub> 3.2) Cu+ZnO<sub>PMHS</sub>

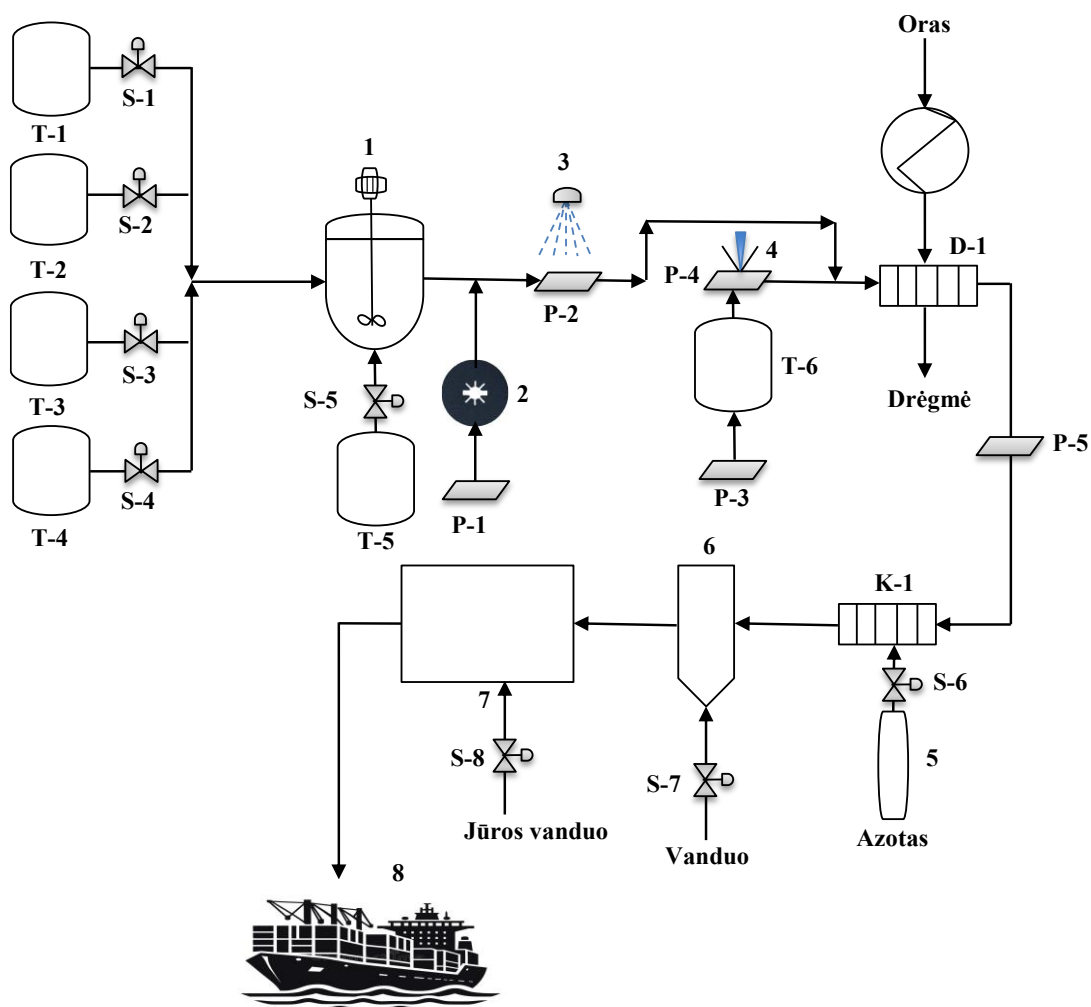
Vario jonai yra labai toksiški daugumos makroapnašų organizmų lervų stadijoms. Vario jonai trikdo fermentinius procesus, susijusius su lervų metamorfoze, ir slopina lipniųjų baltymų sekreciją, kuri būtina nuolatiniam prisitvirtinimui prie paviršiaus [119]. Tiriamųjų plokštelių atveju visiškai organizmų nebūvimas gali būti paaiškinamas tuo, kad vario toksiškumas viršijo tiek mikro-, tiek makroapnašų organizmų biologinės tolerancijos ribas, o derinys su superhidrofobiniais sluoksniais dar labiau sustiprino organizmų prisitvirtinimo prevenciją [120]. Vario plokštelių vizualūs rezultatai yra matomi 3.12 paveiksle.

#### 4. Rekomendacijų dalis

Šiame darbe rekomenduojama aparatūrinė schema, skirta superhidrofobinėms dangoms formuoti ir jas pritaikyti hidrodinaminiam pasipriešinimui mažinti bei biologinio apaugimo prevencijai, naudojant Leidenfrost efektą. Rekomenduojama sistema apima dangų paruošimą, paviršiaus modifikavimą, eksperimentinį testavimą bei pritaikymą realiomis sąlygomis.

Žaliavos (T-1, T-2, T-3, T-4) yra laikomos atskirose talpose, kuriose saugomi TEOS, PMHS polimerai, ZnO nanodalelės, bei tirpikliai. Iš šių talpų komponentai sklendėmis (S-1, S-2, S-3, S-4) tiekiami į maišymo reaktorių (1), į kurį, sklende S-5 iš talpos T-5 yra paduodamas tirpiklis propanolis. Reaktoriuje pradedama ruošti paruošiama superhidrofobinė kompozicija. Iš pradžių ruošiamas TEOS tirpalas, tada ZnO tetrapodų ir PMHS. Tuo tarpu, plokštė, kuria bus dengiama laivo korpusas (P-1) yra šlifuojama ir poliruojama šlifuokliu (2), tam kad būtų paruoštas lygus paviršius prieš dengimą. Paruošta medžiaga tiekiamas į paviršiaus paruošimo įrenginį (3), kuriame ant plokštės (P-2) yra užpurškiamas superhidrofobinė kompozicija. Kol yra dengiama superhidrofobinė danga, plokštė P-3 yra laikoma geležies chlorido (T-6) talpoje esančiame tirpale apie 30 minučių, kol pilnai išsitemstūruos plokštelės paviršius (4). Tiek superhidrofobine danga dengta plokštė, tiek tekstūruota yra dedamos į džiovyklą (K-1), tam kad būtų pašalinamas tirpalo perteklius ir būtų stabilizuojama superhidrofobinė struktūra prie plokštės paviršiaus.

Po kaitinimo paruošta plokštė yra dedama kaitinti į krosnį (K-2) iki tam tikros kritinės Leidenfrost temperatūros. Į krosnį sklende S-6 iš dujų baliono (5) yra pradedamos tiekti azoto dujos, tam kad plokštės mažiau oksiduotųsi. Pakaitinta plokštė eina į trinties matavimo sistemos kanalą (6), kuris yra užpildomas cirkuliuojančiu vandeniu sklende S-7. Lygiagrečiai atliekamas biologinio apaugimo tyrimas biologinėje kameroje (7), kuri sklende S-8 yra pripildoma jūros vandens, kurioje paviršius veikiamas vandens mikroorganizmų. Gauti rezultatai leidžia įvertinti dangos efektyvumą ir jos tinkamumą praktiniam pritaikymui. Galutiniame etape (8) technologija gali būti pritaikoma laivo korpuso paviršiui, siekiant sumažinti hidrodinaminį pasipriešinimą ir biologinį apaugimą eksploatacijos metu.



4.1 pav. Aparatūrinė schema superhidrofobinėms dangoms formuoti ir jų pritaikymas hidrodinaminiam pasipriešinimui mažinti bei biologinio apaugimo prevencijai

4.1 lentelė. Aparatūrinėje schemoje naudojami prietaisai

Prietaiso žymėjimas	Prietaisas
T-1; T-2; T-3; T-4; T-5; T-6	Talpos, kuriose laikomos cheminės medžiagos
S-1; S-2; S-3; S-4; S-5; S-6; S-7; S-8	Sklendės
1	Reaktorius
2	Šlifuoklis
P-1; P-2; P-3; P-4; P-5	Plokštės
3	Purškiklis
4	Cheminis tekstūravimas
D-1	Džiovykla
K-1	Terminė krosnis
5	Azoto dujų balionas
6	Trinties matavimo sistemos kanalas
7	Biologinio apaugimo tyrimo kamera
8	Technologija, kuri gali būti pritaikyta laivo korpuso paviršiui, siekiant sumažinti hidrodinaminį pasipriešinimą ir biologinį apaugimą eksploatacijos metu

## Išvados

1. Eksperimentiniai tyrimai, nagrinėjant Leidenfrosto reiškinių susidarymą, suteikė svarbių ar rezultatų apie garų plėvelės formavimąsi ir jos įtaką hidrodinaminėms savybėms skirtingose vandens temperatūrose. Vandens lašelio kontakto kampo matavimai parodė, kad geriausi rezultatai buvo pasiekti su  $\text{Al}+\text{ZnO}_{\text{PMHS}}$  ir  $\text{Cu}+\text{ZnO}_{\text{PMHS}}$  bandiniais, kurie pasižymėjo superhidrofobiškumu (kontaktinis kampas  $180^\circ$ ).
2. Didžiausią antibakterinį aktyvumą prieš gramteigiamas *Bacillus subtilis* bakterijas turėjo varinės plokštelės, kurios buvo dengtos superhidrofobine  $\text{ZnO}_{\text{PMHS}}$  danga (2,5 cm slopinimo skersmuo) tiriamasis bandinys, o prieš gramneigiamas *E. coli* bakterijas - superhidrofobine danga dengtu ( $\text{ZnO}_{\text{PMHS}}$ ) aliuminio ir vario (1,9 cm slopinimo skersmuo) plokštelių tiriamieji bandiniai.
3. Biologinio apaugimo jūros vandenyje tyrimo metu buvo nustatyta, jog įvairių tipų vario plokštelėse ( $\text{Cu}$ ,  $\text{Cu-FeCl}_3$  ir  $\text{Cu}+\text{ZnO}_{\text{PMHS}}$ ) dėl esančių vario jonų biologinio apaugimo nepastebėta, tačiau lyginant aliuminio plokšteles pastebėta, jog aliuminio paviršiaus tekstūravimas gali sumažinti biologinį apaugimą 27,7%, o padengimas superhidrofobine  $\text{ZnO}_{\text{PMHS}}$  danga – 35,4%.
4. Atlikus aušinimo dinamikos eksperimentus su aliuminio ir vario bandiniais nustatyta:
  - poliruoto aliuminio bandiniai pradėjo formuoti trumpai išsilaikančią garų plėvelę (0,5 s) 25 – 40 °C vandens temperatūroje, ir 300 °C bandinio temperatūrai. Ištekstūravus bandinių paviršių su NaOH ir pakaitinus iki 300 °C temperatūros, buvo pastebėta, jog 30 – 40 °C vandens temperatūrose, garų plėvelės gyvavimo trukmė siekė 1-2 s. Padengus bandinius superhidrofobine  $\text{ZnO}_{\text{PMHS}}$  danga, pastebėta, jog garų plėvelė formuojasi prie 200 °C bandinio ir 25 °C vandens temperatūros išsilaiko apie 12 s.
  - poliruoto vario bandiniai pradėjo formuoti garų plėvelę (gyvavimo trukmė ~1 s) 20 °C vandens temperatūroje ir 240 °C bandinio temperatūroje. Ištekstūravus bandinio paviršių  $\text{FeCl}_3$  tirpale pastebėta, jog tekstūra garų plėvelės susidarymo kritinę temperatūrą gali sumažinti iki 200 °C ir gyvavimo trukmę prailginti iki 1 s. Padengus bandinius superhidrofobine danga buvo nustatyta, jog šios dangos panaudojimas ant vario metalo gali sumažinti Leidenfrost efekto temperatūrą iki 160 °C (2 s). Pakėlus šio bandinio paviršiaus temperatūrą iki 200-240 °C buvo fiksuotas maksimalus garų plėvelės gyvavimo laikas >14 s.
5. Nustačius Leidenfrost efekto kritines temperatūras ir atlikus hidrodinaminio pasipriešinimo eksperimentus su aliuminio ir vario bandiniais nustatyta, jog:
  - mažiausias hidrodinaminis pasipriešinimas nustatytas iki 300 °C įkaitintiems Al mėginiams esant visoms tirtoms vandens temperatūroms, o kritimo greitis pasiekė net 1,021 m/s, kai vandens temperatūra buvo 40 °C, kai tuo tarpu Al-NaOH mėginio – 0,925 m/s, o  $\text{Al}+\text{ZnO}_{\text{PMHS}}$  – 0,968 m/s.
  - mažiausias hidrodinaminis pasipriešinimas nustatytas iki 280°C įkaitintiems  $\text{Cu}+\text{ZnO}_{\text{PMHS}}$  mėginiams esant 20 °C vandens temperatūrai, o kritimo greitis pasiekė net 2,152 m/s, kai tuo tarpu  $\text{Cu-FeCl}_3$  mėginio – 2,057 m/s, o poliruoto Cu mėginio – 2,128 m/s.

## Literatūros sąrašas

1. ELKAFAS, A.G., et al. Numerical study on the hydrodynamic drag force of a container ship model. *Alexandria Engineering Journal* [interaktyvus]. 2019. 58, 849–859 p. [žiūrėta 2026-04-07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.07.004>.
2. SCHULTZ, M.P. Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. *Biofouling* [interaktyvus]. 2007. 23, 331–341 p. [žiūrėta 2026 04 07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/08927010701461974>.
3. STENZEL, V., et al. Drag-reducing paints for the reduction of fuel consumption in aviation and shipping. *Progress in Organic Coatings* [interaktyvus]. 2011. 70, 224–229 p. [žiūrėta 2026 04 07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2010.09.026>.
4. WANG, H., et al. Drag reduction by gas lubrication with bubbles. *Ocean Engineering* [interaktyvus]. 2022. 258 [žiūrėta 2026 04 07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111833>.
5. JIANG, C.-X., et al. Numerical study on axisymmetric ventilated supercavitation influenced by drag-reduction additives. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2017, 115, 62–76 p. [žiūrėta 2026 04 07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.015>.
6. LU, Y. Molecular-continuum simulation of elevated temperature drag reduction by nanostructure-induced vapor layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2020, 148 [žiūrėta 2026 04 07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119100>.
7. KANO, T., et al. Hydrophobicity and Leidenfrost point of ZnO nanorod array combined with nanoscale roughness on the topmost surface. *Materials Chemistry and Physics* [interaktyvus]. 2018, 217, 192–198 p. [žiūrėta 2026 04 07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.06.075>.
8. FAN, A., et al. A review of ship fuel consumption models. *Ocean Engineering* [interaktyvus]. 2022. 264 [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112405>.
9. GHAEMI, M.H., et al. Analysis of the correlation between instantaneous resistance-increase in waves and ship motion for reducing fuel consumption. *Ships and Offshore Structures* [interaktyvus]. 2025. 1–14 p. [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/17445302.2025.2452069>.
10. ZHOU, T., et al. An adaptive hyper parameter tuning model for ship fuel consumption prediction under complex maritime environments. *Journal of Ocean Engineering and Science* [interaktyvus]. 2022. 7, 255–263 p. [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.joes.2021.08.007>.
11. GHAEMI, M.H., et al. Impact of propeller emergence on hull, propeller, engine, and fuel consumption performance in regular head waves. *Polish Maritime Research* [interaktyvus]. 2022. 29, 56–76 p. [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0044>.
12. PAN, D., et al. A review on drag reduction technology: Focusing on amphibious vehicles. *Ocean Engineering* [interaktyvus]. 2023. 280 [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114618>.
13. SONG, K., et al. Influence of energy-saving devices on the hydrodynamic characteristics of a waterjet-propelled ship: Experimental and numerical investigation. *Ocean Engineering* [interaktyvus]. 2024. 313 [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119451>.

14. CHEN, X., et al. Multi-objective shape optimization of autonomous underwater vehicle by coupling CFD simulation with genetic algorithm. *Ocean Engineering* [interaktyvus]. 2023. 286 [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.11572>.
15. BRANDFELLER, L., et al. Quantitative description of polymer drag reduction: Effect of polyacrylamide molecular weight distributions. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* [interaktyvus]. 2024. 325 [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2024.105185>.
16. HE, P., et al. Study on the construction of durable superhydrophobic coatings using simple spray coating method and their underwater drag reduction performance. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [interaktyvus]. 2024. 701 [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134858>.
17. KARTHIK, M.S., et al. Computational investigation on drag coefficient and pressure distribution of the truck with add-on. *Ain Shams Engineering Journal* [interaktyvus]. 2025. 16 [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103332>.
18. WANG, H., et al. Drag reduction by gas lubrication with bubbles. *Ocean Engineering* [interaktyvus]. 2022. 258 [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111833>.
19. CHENG, Y., et al. Polymer-based lubricating drag reducing materials: Design and applications. *Applied Materials Today* [interaktyvus]. 2025. 42 [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2025.102624>.
20. LYU, S., et al. Experimental drag reduction study of super-hydrophobic surface with dual-scale structures. *Applied Surface Science* [interaktyvus]. 2013. 286, 206–211 p. [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.048>.
21. MOURITZ, A.P., et al. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2001. 53, 21–42 p. [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(00\)00175-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00175-6)
22. SINGH, D., et al. Evaluate mechanical behavior of alumina coated aluminum alloy using slow strain rates test in 3.5% NaCl solution. *Materials Science Forum* [interaktyvus]. 2019. 969, 242–246 p. [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.969.242>.
23. SINGH, D., et al. Corrosion performance of nano-alumina coatings over anodized aluminum alloy by dip coating method. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* [interaktyvus]. 2019. 55, 436–442 p. [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3103/S1068375519040148>.
24. SINGH, D., et al. Oxime-modified aluminum(III) isopropoxide: A promising sol–gel precursor for corrosion resistive nano-alumina coating on an aluminum alloy. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces* [interaktyvus]. 2019. 55, 682–688 p. [žiūrėta 2026 01 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1134/S2070205119040245>.
25. Copper-nickel alloys for seawater corrosion resistance and anti-fouling – a state of the art review [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2026 01 26].
26. SCHLEICH, W., POWELL, C. CuNi 90/10: How to avoid typical failures of seawater tubing systems and marine biofouling on structures. In: *Corrosion Behaviour and Protection of Copper*

- and Aluminium Alloys in Seawater [interaktyvus]. Elsevier, 2007, 73–94 p. [žiūrėta 2026 01 26]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1533/9781845693084.2.73>.
27. KALMAN, H., PORTNIKOV, D. Acceleration length and time of falling spherical particles. Powder Technology [interaktyvus]. 2023. 425 [žiūrėta 2026 01 26]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118612>.
  28. BHARADISHETTAR, N., et al. Coating technologies for copper based antimicrobial active surfaces: A perspective review. Metals [interaktyvus]. 2021. 11 [žiūrėta 2026 01 26]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/met11050711>.
  29. PUNNIYAKOTTI, P., et al. Anti-bacterial and anti-biofilm properties of green synthesized copper nanoparticles from *Cardiospermum halicacabum* leaf extract. Bioprocess and Biosystems Engineering [interaktyvus]. 2020. 43, 1649–1657 p. [žiūrėta 2026 01 26]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00449-020-02357-x>.
  30. GOMES, I.B., et al. Copper surfaces in biofilm control. Nanomaterials [interaktyvus]. 2020. 10 [žiūrėta 2026 01 26]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/nano10122491>.
  31. MITRA, D., et al. Antimicrobial copper-based materials and coatings: Potential multifaceted biomedical applications. ACS Applied Materials and Interfaces [interaktyvus]. 2020. 12, 21159–21182 p. [žiūrėta 2026 01 26]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1021/acsaami.9b17815>.
  32. WARNES, S.L., et al. Mechanism of copper surface toxicity in *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* involves immediate membrane depolarization followed by slower rate of DNA destruction which differs from that observed for Gram-positive bacteria. Environmental Microbiology [interaktyvus]. 2012. 14, 1730–1743 p. [žiūrėta 2026 01 26]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2011.02677.x>.
  33. GOMEZ-BANDERAS, J. Marine natural products: A promising source of environmentally friendly antifouling agents for the maritime industries. Frontiers in Marine Science [interaktyvus]. 2022. 9 [žiūrėta 2026 01 26]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.858757>.
  34. AN, H., et al. Research progress of air lubrication drag reduction technology for ships. Fluids [interaktyvus]. 2022. 7 [žiūrėta 2026 02 02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/fluids7100319>.
  35. MIN, T., et al. Drag reduction by polymer additives in a turbulent channel flow. Journal of Fluid Mechanics [interaktyvus]. 2003. 486, 213–238 p. [žiūrėta 2026 02 02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1017/S0022112003004610>.
  36. VAKARELSKI, I.U., et al. Drag reduction by Leidenfrost vapor layers. Physical Review Letters [interaktyvus]. 2011. 106 [žiūrėta 2026 02 02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.214501>.
  37. ZHU, R., et al. Flow-drag reduction performance of a resident electrolytic microbubble array and its mechanisms. Ocean Engineering [interaktyvus]. 2023. 268 [žiūrėta 2026 02 02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113496>.
  38. KUMAGAI, I., et al. Experiments on bubble generation by a hydrofoil moving beneath the water surface for reducing ship drag. In: [interaktyvus]. 2014, 322–328 p. [žiūrėta 2026 02 02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1063/1.4872122>.
  39. ALBERS, M., et al. Drag reduction and energy saving by spanwise traveling transversal surface waves for flat plate flow. Flow, Turbulence and Combustion [interaktyvus]. 2020. 105, 125–157 p. [žiūrėta 2026 02 02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s10494-020-00110-8>.

40. ZHOU, Y., et al. A neural network approach to optimize flow rate for micro-bubble drag reduction. *Ocean Engineering* [interaktyvus]. 2025. 316 [žiūrėta 2026 02 02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119903>.
41. Garų sluoksniu sudarymas aplink laivo korpusą, siekiant sumažinti trinties pasipriešinimą [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2026 02 02].
42. ZHANG, Y., et al. Drag reduction mechanisms and cavitation inhibition effect of coupling bionic design on pressure relief valve. *Flow Measurement and Instrumentation* [interaktyvus]. 2025. 102 [žiūrėta 2026 02 02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102796>.
43. BUTTERWORTH, J., et al. Experimental analysis of an air cavity concept applied on a ship hull to improve the hull resistance. *Ocean Engineering* [interaktyvus]. 2015. 110, 2–10 p. [žiūrėta 2026 02 02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.10.022>.
44. VAKARELSKI, I.U., et al. When superhydrophobicity can be a drag: Ventilated cavitation and splashing effects in hydrofoil and speed-boat models tests. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [interaktyvus]. 2021. 628 [žiūrėta 2026 02 02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127344>.
45. JIANG, C.-X., et al. Numerical study on axisymmetric ventilated supercavitation influenced by drag-reduction additives. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2017. 115, 62–76 p. [žiūrėta 2026 02 02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.015>.
46. LU, Y. Molecular-continuum simulation of elevated temperature drag reduction by nanostructure-induced vapor layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2020. 148 [žiūrėta 2026 02 02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119100>.
47. PUZINA, Y.Y., et al. Evolution of liquid–vapour interface during film boiling on sphere. *International Journal of Thermal Sciences* [interaktyvus]. 2024. 196 [žiūrėta 2026 02 02]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108683>.
48. TSAI, H.Y., et al. Fast spreading of liquid on Leidenfrost vapor layer surface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [interaktyvus]. 2023. 677 [žiūrėta 2026 02 06]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132311>.
49. SAHOO, N., et al. Post impact droplet hydrodynamics on inclined planes of variant wettabilities. *European Journal of Mechanics - B/Fluids* [interaktyvus]. 2020. 79, 27–37 p. [žiūrėta 2026 02 06]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2019.08.013>.
50. CAI, C., MUDAWAR, I. Review of the dynamic Leidenfrost point temperature for droplet impact on a heated solid surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2023. 217 [žiūrėta 2026 02 06]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124639>.
51. VAKARELSKI, I.U., et al. Leidenfrost vapor layers reduce drag without the crisis in high viscosity liquids. *Physical Review Letters* [interaktyvus]. 2016. 117 [žiūrėta 2026 02 06]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.114503>.
52. ARRIETA, J., SEVILLA, A. On the flow separation mechanism in the inverse Leidenfrost regime. *Journal of Fluid Mechanics* [interaktyvus]. 2020. 897 [žiūrėta 2026 02 06]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.380>.
53. BOURRIANNE, P., et al. The cold Leidenfrost regime. *Science Advances* [interaktyvus]. 2019. 5 [žiūrėta 2026 02 06]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw0304>.

54. KIM, E., et al. Effect of thermal properties and thickness for various metals on the Leidenfrost temperature. *International Journal of Thermal Sciences* [interaktyvus]. 2024. 196 [žiūrėta 2026 02 06]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108697>.
55. CAI, C., et al. Theoretical Leidenfrost point (LFP) model for sessile droplet. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2020. 146 [žiūrėta 2026 02 06]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118802>.
56. LIM, E., et al. Graphene-mediated suppression of Leidenfrost effect for droplets on an inclined surface. *International Journal of Thermal Sciences* [interaktyvus]. 2022. 174 [žiūrėta 2026 02 09]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107426>.
57. KODANCHA, P., et al. Investigation of droplet boiling on superhydrophilic CuO multiscale hierarchical structured surfaces. *International Journal of Thermal Sciences* [interaktyvus]. 2024. 201 [žiūrėta 2026 02 09]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109057>.
58. DU, J., et al. Dynamics and heat transfer of water droplets impacting on heated surfaces: The role of surface structures in Leidenfrost point. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2023. 212 [žiūrėta 2026 02 09]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124241>.
59. PANG, C., et al. Inhibiting Leidenfrost phenomenon with granulated polymer film. *Materials Today Physics* [interaktyvus]. 2024. 46 [žiūrėta 2026 02 09]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2024.101497>.
60. LEE, G.C., et al. Zirconium-silicide coating on zircaloy-4 substrate for accident tolerance: Effects on oxidation resistance and boiling. *Annals of Nuclear Energy* [interaktyvus]. 2019. 126, 350–358 p. [žiūrėta 2026 02 09]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.11.019>.
61. Leidenfrost efektas [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2026 01 20].
62. SKVORČINSKIENĖ, R., et al. Magnesium hydride: Investigating its capability to maintain stable vapor film. *Energies* [interaktyvus]. 2024. 17 [žiūrėta 2026 02 09]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/en17030661>.
63. AULIANO, M., et al. Water droplet impacting on overheated random Si nanowires. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2018. 124, 307–318 p. [žiūrėta 2026 02 09]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.042>.
64. YE, H., et al. On drag force and boiling heat transfer of a high-temperature sphere entering water. *International Communications in Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2024. 156 [žiūrėta 2026 02 09]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107638>.
65. QI, H., et al. Experimental investigation on heated spheres entering water vertically at different temperatures. *Experimental Thermal and Fluid Science* [interaktyvus]. 2025. 162 [žiūrėta 2026 02 09]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2024.111360>.
66. ZHANG, M., et al. Asymmetric wettability fibrous membranes: Preparation and biologic applications. *Composites Part B: Engineering* [interaktyvus]. 2024. 269 [žiūrėta 2026 03 10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111095>.
67. LIU, K., et al. Study on the thermal performance of three-dimensional oscillating heat pipe with super-hydrophobic/super-hydrophilic surface for thermal management application. *International Journal of Thermal Sciences* [interaktyvus]. 2025. 215 [žiūrėta 2026 03 10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2025.110007>.

68. VAKARELSKI, I.U., et al. When superhydrophobicity can be a drag: Ventilated cavitation and splashing effects in hydrofoil and speed-boat models tests. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [interaktyvus]. 2021. 628 [žiūrėta 2026 03 10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127344>.
69. SUN, R., et al. Wettability/anti-icing properties of hierarchical micro/nanostructured copper surface prepared by micro milling and chemical etching. *Sustainable Materials and Technologies* [interaktyvus]. 2024. 42 [žiūrėta 2026 03 10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01136>.
70. ZHANG, L., et al. Fabrication of sericite-TiO<sub>2</sub>/HDTMS superhydrophobic self-cleaning coatings by hydrothermal method. *Journal of Alloys and Compounds* [interaktyvus]. 2025. 1014 [žiūrėta 2026 03 10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.178677>.
71. LI, X., et al. Fabrication of superhydrophobic surfaces on a glass substrate via hot embossing. *Ceramics International* [interaktyvus]. 2023. 49, 26338–26347 p. [žiūrėta 2026 03 10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.05.169>.
72. HE, Q., et al. Superhydrophobic flexible sensors: A review of fabrication methods and applications. *Materials Today Chemistry* [interaktyvus]. 2025. 47 [žiūrėta 2026 03 10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2025.102824>.
73. GIANG, H.N., et al. Fabrication of superhydrophobic surface using one-step chemical treatment. *Surfaces and Interfaces* [interaktyvus]. 2020. 21 [žiūrėta 2026 03 10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100673>.
74. LI, J., et al. Two-step fabrication of superhydrophobic surfaces with anti-adhesion. *Optics and Laser Technology* [interaktyvus]. 2019. 113, 273–280 p. [žiūrėta 2026 03 10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.12.045>.
75. ZHANG, W., et al. Study on the corrosion resistance and self-cleaning of the superhydrophobic NiCoAl-LDH film on anodic aluminum surface. *Surface and Coatings Technology* [interaktyvus]. 2025. 501 [žiūrėta 2026 03 10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.131956>.
76. WANG, C., et al. Spray-coated superhydrophobic surfaces with wear-resistance, drag-reduction and anti-corrosion properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [interaktyvus]. 2017. 514, 236–242 p. [žiūrėta 2026 03 10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.11.059>.
77. KHAJAVIAN, E., et al. Tuning surface wettability of aluminum surface and its correlation with short and long term corrosion resistance in saline solutions. *Surface and Coatings Technology* [interaktyvus]. 2022. 429 [žiūrėta 2026 03 12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127950>.
78. MARDOSAITĖ, R., et al. Superhydrophobic ZnO Nanowires: Wettability Mechanisms and Functional Applications. *Crystal Growth & Design* [interaktyvus]. 2021. 21 4765–4779 p. [žiūrėta 2026 03 12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.1c00449>.
79. SELIM, M.S., et al. Silicone/ZnO nanorod composite coating as a marine antifouling surface. *Applied Surface Science* [interaktyvus]. 2019. 466 40–50 p. [žiūrėta 2026 03 12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.10.004>.
80. TAMULEVIČIENĖ, A., et al. Highly-hydrophobic, transparent, and durable coatings based on ZnO tetrapods with diamond-like carbon nanocomposite. *Surface and Coatings Technology*

- [interaktyvus]. 2023. 470 [žiūrėta 2026 03 12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129863>.
81. LIU, E., et al. Drag reduction through self-texturing compliant bionic materials. *Scientific Reports* [interaktyvus]. 2017. 7 [žiūrėta 2026 03 12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1038/srep40038>.
  82. WANG, M., et al. ZnO Nanorod Array Modified PVDF Membrane with Superhydrophobic Surface for Vacuum Membrane Distillation Application. *ACS Applied Materials & Interfaces* [interaktyvus]. 2018. 10 13452–13461 p. [žiūrėta 2026 03 12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1021/acsami.8b00271>.
  83. SHARMA, M., et al. Efficient oil removal from wastewater based on polymer coated superhydrophobic tetrapodal magnetic nanocomposite adsorbent. *Applied Materials Today* [interaktyvus]. 2019. 17 130–141 p. [žiūrėta 2026 03 12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.07.007>.
  84. MAWIGNON, F.J., et al. Highly strong bio-inspired ZnO/PDMS superhydrophobic surface with drag reduction and antibacterial properties. *Tribology International* [interaktyvus]. 2023. 189 [žiūrėta 2026 03 12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109003>.
  85. WANG, M., et al. A novel flexible micro-ratchet/ZnO nano-rods surface with rapid recovery icephobic performance. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [interaktyvus]. 2018. 62 52–57 p. [žiūrėta 2026 03 12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.01.024>.
  86. MIRANDA, I., et al. Properties and Applications of PDMS for Biomedical Engineering: A Review. *Journal of Functional Biomaterials* [interaktyvus]. 2021. 13 [žiūrėta 2026 03 14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/jfb13010002>.
  87. ZHAO, Z., et al. Relationship between hydrophobicity and drag reduction of SiO<sub>2</sub>/HLR-Si coatings. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [interaktyvus]. 2022. 642 [žiūrėta 2026 03 14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128668>.
  88. CUI, X., et al. Functionalized super-hydrophobic nanocomposite surface integrating with anti-icing and drag reduction properties. *Chemical Engineering Journal* [interaktyvus]. 2024. 499 [žiūrėta 2026 03 14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156093>.
  89. ZHAO, J., et al. Application of ZnO/epoxy resin superhydrophobic coating for buoyancy enhancement and drag reduction. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [interaktyvus]. 2022. 651 [žiūrėta 2026 03 14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129714>.
  90. SUN, R., et al. Study of the drag reduction performance on steel spheres with superhydrophobic ER/ZnO coating. *Materials Science and Engineering: B* [interaktyvus]. 2023. 288 [žiūrėta 2026 03 14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.116144>.
  91. LIU, L., et al. Flow boiling heat transfer enhancement via micro-pin-fins/ZnO nanorods hierarchical surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2023. 203 [žiūrėta 2026 03 14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123810>.
  92. CHEN, Q., et al. Periodically oriented superhydrophobic microstructures prepared by laser ablation-chemical etching process for drag reduction. *Applied Surface Science* [interaktyvus]. 2023. 615 [žiūrėta 2026 03 14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.156403>.
  93. HE, Z., et al. Multilevel superhydrophobic fin-like microstructure with excellent abrasion resistance and drag reduction via high-accuracy femtosecond laser etching. *Surface and Coatings*

- Technology [interaktyvus]. 2025. 498 [žiūrėta 2026 03 14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.131813>.
94. ZHANG, Q., et al. Friction reducing behavior of stearic acid film on a textured aluminum substrate. *Applied Surface Science* [interaktyvus]. 2013. 280 545–549 p. [žiūrėta 2026 03 14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.05.024>.
95. KANO, T., et al. Hydrophobicity and Leidenfrost point of ZnO nanorod array combined with nanoscale roughness on the topmost surface. *Materials Chemistry and Physics* [interaktyvus]. 2018. 217 192–198 p. [žiūrėta 2026 03 14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.06.075>.
96. TAMULEVIČIUS, T., et al. Antireflection Coatings Based on Randomly Oriented ZnO Nanowires. *Solar RRL* [interaktyvus]. 2023. 7 [žiūrėta 2026 03 14]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1002/solr.202201056>.
97. Biologinis apaugimas laivyboje [interaktyvus]. n.d. [žiūrėta 2026 03 15]. Prieiga per:
98. SELIM, M.S., et al. Superhydrophobic silicone/graphene oxide-silver-titania nanocomposites as eco-friendly and durable maritime antifouling coatings. *Ceramics International* [interaktyvus]. 2024. 50 452–463 p. [žiūrėta 2026 03 15]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.10.121>.
99. CHAKRABORTY, A., et al. Sustainable antifouling coating technologies for the maritime industry: An evolutionary overview. *Progress in Organic Coatings* [interaktyvus]. 2026. 212 [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109853>.
100. DA SILVA, A.L.N., et al. Biofouling growth study in offshore mooring ropes. *Marine Pollution Bulletin* [interaktyvus]. 2026. 223 [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118948>.
101. MADUKA, M., et al. Hydrodynamic effects of biofouling-induced surface roughness – Review and research gaps for shallow water offshore wind energy structures. *Ocean Engineering* [interaktyvus]. 2023. 272 [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113798>.
102. GU, Y., et al. Research Strategies to Develop Environmentally Friendly Marine Antifouling Coatings. *Marine Drugs* [interaktyvus]. 2020. 18 [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/md18070371>.
103. WANG, L., et al. Research progress of environmentally friendly degradable marine antifouling coatings. *Journal of Ocean Engineering and Science* [interaktyvus]. 2025. 10 1192–1218 p. [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.joes.2025.08.011>.
104. PENG, C., et al. Solvent-free room-temperature curable organic/silicone hybrid coating with high transparency and durable antifouling ability. *Reactive and Functional Polymers* [interaktyvus]. 2024. 205 [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2024.106078>.
105. DAHER, E.A., et al. Engineered transparent ZnO coatings with hierarchical porosity for self-cleaning applications. *Surfaces and Interfaces* [interaktyvus]. 2026. 83 [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2026.108489>.
106. WU, Z., et al. Synthesis and sustainable application of fluorosilicon-based superhydrophobic coatings for high-salt wastewater treatment: A short two-step method. *Energy & Environmental*

- Sustainability [interaktyvus]. 2025. 1 [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.eesus.2025.100055>.
107. AZIZAH, D.A., et al. Developing UV-light driven photocatalytic PSf/Ni-doped ZnO/PDA membrane with superior antifouling, self-cleaning, and self-protecting performances for handmade batik wastewater treatment. *Materials Today Sustainability* [interaktyvus]. 2024. 26 [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100721>.
  108. TAN, J., et al. Synergistic antifouling behaviors between zwitterions and ZnO nanoparticles in moisture-curable polyacrylate coatings. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [interaktyvus]. 2023. 669 [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131499>.
  109. SHARMA, D.K., et al. A review on ZnO: Fundamental properties and applications. *Materials Today: Proceedings* [interaktyvus]. 2022. 49 3028–3035 p. [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.238>.
  110. LI, X., et al. In-situ grown ZnO-nanorods of slippery liquid-injected porous surface coating on Mg alloy with hydrophobic, durable, and anti-corrosion properties. *Surface and Coatings Technology* [interaktyvus]. 2024. 487 [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131033>.
  111. SHEN, F., et al. Reversible polydimethylsiloxane coatings for Anti-Fouling and lubrication of medical metals. *Chemical Engineering Journal* [interaktyvus]. 2025. 516 [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.163934>.
  112. VOULVOULIS, N., et al. Alternative antifouling biocides. *Applied Organometallic Chemistry* [interaktyvus]. 1999. 13 135–143 p. [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0739\(199903\)13:3<135::AID-AOC831>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0739(199903)13:3<135::AID-AOC831>3.0.CO;2-G).
  113. LAGERSTRÖM, M., et al. Investigation of critical copper release rates for dose optimization of antifouling coatings. *Progress in Organic Coatings* [interaktyvus]. 2025. 198 [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108928>.
  114. MARDOSAITĖ, R., et al. Superhydrophobic ZnO Nanowires: Wettability Mechanisms and Functional Applications. *Crystal Growth & Design* [interaktyvus]. 2021. 21 4765–4779 p. [žiūrėta 2026 03 20]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.1c00449>.
  115. GAO, Y., et al. Mechanism for friction reduction of aluminum alloy at high-pressure and ultra-low temperature. *Journal of Materials Research and Technology* [interaktyvus]. 2024. 28 1538–1556 p. [žiūrėta 2026 03 28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.074>.
  116. RACKAUSKAS, S., et al. A Novel Method for Continuous Synthesis of ZnO Tetrapods. *The Journal of Physical Chemistry C* [interaktyvus]. 2015. 119 16366–16373 p. [žiūrėta 2026 03 28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b03702>.
  117. JIMENEZ, H., et al. Invasions in Marine Communities: Contrasting Species Richness and Community Composition Across Habitats and Salinity. *Estuaries and Coasts* [interaktyvus]. 2018. 41 484–494 p. [žiūrėta 2026 03 28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s12237-017-0292-4>.
  118. VOROTINSKIENĖ, L., et al. Effect of hydrophobicity of ZnO tetrapods coating on vapour film formation and friction reduction: A study using complex approach. *International Journal of Thermal Sciences* [interaktyvus]. 2026. 220 [žiūrėta 2026 03 28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2025.110372>.

119. QIAN, P.-Y., et al. Marine biofilms: diversity, interactions and biofouling. *Nature Reviews Microbiology* [interaktyvus]. 2022. 20 671–684 p. [žiūrėta 2026 03 28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00744-7>.
120. SUBBAIYAN, R., et al. Bioprospecting and Exploration of the Natural Antifouling Approaches against Marine Foulers. *Journal of Pure and Applied Microbiology* [interaktyvus]. 2023. 17 1374–1390 p. [žiūrėta 2026 03 28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.22207/JPAM.17.3.02>.