



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Šilumos ir masės mainų plastikinėje elektronikos dėžės  
sienelėje tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Aušrinė Grigaliauskaitė**  
Projekto autorė

**Doc. Linas Paukštaitis**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **Šilumos ir masės mainų plastikinėje elektronikos dėžės sienelėje tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Termoinžinerija (6211EX023)

---

**Aušrinė Grigaliauskaitė**  
Projekto autorė

**Doc. Linas Paukštaitis**  
Vadovas

**Doc. dr. Liutauras Vaitkus**  
Recenzentas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas  
Aušrinė Grigaliauskaitė

## **Šilumos ir masės mainų plastikinėje elektronikos dėžės sienelėje tyrimas**

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.

Aušrinė Grigaliauskaitė

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Studijų programa: 6211EX023 Termoinžinerija

## **MAGISTRO BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS**

Studentui (-ei)

**Aušrinei Grigaliauskaitei**

*(Vardas, Pavardė)*

**1. Baigiamojo Projekto tema –**

**Šilumos ir masės mainų plastikinėje elektronikos dėžės sienelėje tyrimas**

*(Lietuvių kalba)*

**Study of Heat and Mass Transfer in Plastic Electronics Enclosure Wall**

*(Anglų kalba)*

Patvirtinta 2022 m. gegužės mėn. 2 d. dekanu potvarkiu Nr. V25-11-2

**2. Darbo tikslas ir uždaviniai –**

Tikslas yra ištirti šilumos ir masės mainus plastikinėje elektronikos dėžutės sienelėje.

Uždaviniai: 1. Naudojamų plastikinių medžiagų elektronikos dėžėse literatūros analizė. 2. Drėgmės absorbcijos sienelėje matematinų modelių analizė. 3. Medžiagos drėgmės įgeriamumo tyrimas. 4. Difuzijos ir tirpumo koeficiento apskaičiavimas. 5. Matematinio modelio taikymas prognozuojant drėgmę elektronikos dėžės sienelėje.

**Studentas**

**Aušrinė Grigaliauskaitė**

**2022-02-01**

*(Vardas, Pavardė)*

*(Parašas)*

*(Data)*

**Baigiamojo  
projekto  
vadovas**

**Linas Paukštaitis**

**2022-02-01**

*(Vardas, Pavardė)*

*(Parašas)*

*(Data)*

Grigaliauskaitė Aušrinė. Šilumos ir masės mainų plastikinėje elektronikos dėžės sienelėje tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Linas Paukštaitis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: Energijos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: polimerai, korpuso sienelė, elektronika, šilumos ir masės mainai, difuzija, drėgmė, Fiko dėsnis, plastikinės elektronikos dėžės.

Kaunas, 2022. 53 p.

### **Santrauka**

Yra pastebima, kad elektroniniai prietaisai pradeda greičiau gesti, jei yra naudojami nepalankiomis klimato sąlygomis. Dažniausiai atsiranda su drėgme susijusios problemos, kaip korozija, per didelė drėgmės koncentracija elektroninių prietaisų korpusuose. Norint užkirsti kelią tokioms pasikartojančioms problemoms yra atliekama daug įvairiausių bandymų, kurių pagrindinis tikslas yra nustatyti, kurios medžiagos yra labiau atsparios pasirinktoms klimato sąlygoms.

Šiame darbe buvo atliekami skaičiavimai pasirenkant iš polikarbonato ir polibutileno tereftalato pagamintas dėžutes bei plokšteles. Šios medžiagos buvo veikiamos nurodytų klimato sąlygų atitinkamą laiką, po kurio buvo pastebėti nagrinėjamų parametrų pakitimai dėžučių viduje ir plokštelių sienelėse.

Grigaliauskaitė Aušrinė. Study of Heat and Mass Transfer in Plastic Electronics Enclosure Wall. Master's Final Degree Project / supervisor doc. Linas Paukštaitis; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area: Energy Engineering.

Keywords: polymers, enclosure wall, electronics, heat and mass transfer, diffusion, humidity, Fick's law, plastic electronics boxes.

Kaunas, 2022. 53.

### **Summary**

It has been observed that electronic devices start to deteriorate more quickly if they are used in harsh climatic conditions. The most common problems are moisture related, such as corrosion, excessive moisture concentration in the housing of electronic devices. In order to prevent such recurring problems, a wide range of tests are carried out, the main objective of which is to determine which materials are more resistant to selected climatic conditions.

In this work, calculations have been carried out on a selection of boxes and plates made of polycarbonate and polybutylene terephthalate. These materials were exposed to the specified climatic conditions for an appropriate period of time, after which changes in the parameters of interest were observed inside the boxes and on the walls of the plates.

## 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. Polimerai naudojami elektronikos dėžutėse .....</b>	<b>12</b>
1.1. Gedimai, kuriuos sukelia drėgmės atsiradimas .....	13
1.2. Drėgmės pernešimas elektronikoje.....	14
<b>2. Šilumos perdavimo pagrindai .....</b>	<b>16</b>
2.1. Laidus šilumos perdavimas kietuosiuose kūnuose .....	16
2.2. Konvekcinis šilumos perdavimas .....	17
2.3. Masės pernašos pagrindai.....	17
2.3.1. Difuzinis masės pernešimas .....	17
2.3.2. Konvekcinis masės pernešimas .....	20
2.3.3. Pusiausvyra aplinkos ir medžiagos bei medžiagos ir medžiagos sąsajose (Henrio dėsnis) ..	21
2.3.4. Nuo temperatūros priklausantis difuziškumas, tirpumas ir pralaidumas kietosiose medžiagose .....	22
2.3.5. Fiko ir ne Fiko difuzija.....	23
2.3.6. Geometrinės varžos koeficientas .....	24
2.3.7. Nuo temperatūros priklausanti sočiųjų vandens garų koncentracija .....	25
2.3.8. Nuo temperatūros priklausanti sklaida ore .....	26
<b>3. Difuzijos matavimas .....</b>	<b>27</b>
3.1. FTIR-ATR spektroskopija.....	27
3.2. Kiti matavimo metodai .....	29
<b>4. Analitiniai drėgmės pernašos elektronikoje sprendimai .....</b>	<b>30</b>
4.1. Analitinis sprendimas, pagrįstas kvazistabilios būsenos modeliu .....	30
4.1.1. Pastovi aplinkos koncentracija .....	31
4.1.2. Svyruojanti aplinkos koncentracija .....	32
4.2. Analizinis antrojo Fiko dėsnio sprendimas .....	34
4.2.1. Plokštelė ant nepralaidaus pagrindo .....	34
4.2.2. Plokštė, kurią iš šonų veikia skirtinga aplinka .....	35
<b>5. Skaičiavimų analizė .....</b>	<b>37</b>
5.1. Pirmoji analizė.....	37
5.1.1. Rezultatų apžvalga esant pastovioms aplinkos sąlygoms .....	37
5.1.2. Rezultatų apžvalga esant B3 Stanag aplinkos sąlygoms .....	39
5.2. Antroji analizė .....	41
5.2.1. Skaičiavimai atlikti su PC plastikine plokštele .....	41
5.2.2. Skaičiavimai atlikti su PBT plastikine plokštele .....	43
<b>Išvados .....</b>	<b>46</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>47</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>53</b>
1 Priedas. Dėžutės pavyzdys, kuris yra naudojama skaičiavimuose. ....	53
2 Priedas. Plokštelės pavyzdys, kuris yra naudojamas skaičiavimuose. ....	53

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Kai kurių ATR prizmių lūžio rodiklis. ....	28
--	----



## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Hidrologinis ciklas gamtoje lyginamas su drėgmės pernešimu elektroniniame korpuse [8, 23].	14
<b>2 pav.</b> Koncentracijos profilis esant (a) pastoviai būsenai ir (b) nepastoviai būsenai [2].	18
<b>3 pav.</b> Tipiško polimero masės pasisavinimo kinetika – (a) $Mt/M^\infty$ kaip $t^{1/2}$ funkcija, (b) $\ln(1 - Mt/M^\infty)$ kaip $t$ funkcija [44].	19
<b>4 pav.</b> $Ct/C^\infty$ dažymo priklausomybė nuo $t$ skirtingam pluošto spinduliui [46].	20
<b>5 pav.</b> Difuzijos kelio per struktūrą schema; (a) homogeninė terpė, (b) heterogeninė terpė [46].	24
<b>6 pav.</b> Difuzija per TFX plėvelę nusistovėjusiomis sąlygomis.	25
<b>7 pav.</b> Difuzijos eksperimento ATR įrangos schema.	27
8 pav. Laiko evoliucijos spektrų seka iš PMMA mėginio, apdoroto 25 °C temperatūroje.	28
<b>9 pav.</b> (a) Korpusas su skylė drėgmei patekti; (b) Aplinkos drėgmės kreivė ( $c_a$ ) ir jos skirstinys į mažus laiko intervalus [100].	30
<b>10 pav.</b> Drėgmės modeliavimas (a) neabsorbuojančioms sienoms, (b) absorbuojančioms sienoms [23].	32
<b>11 pav.</b> (a) Analitinio sprendimo ir modifikuoto QSS modelio palyginimas [100]; b) Vidinė drėgmės koncentracija, kai $T=0,57$ dienos ir $\tau=5,52$ dienos [23].	33
<b>12 pav.</b> a) Vidaus drėgmės koncentracija, kai $T=4,05$ dienos ir $\tau=5,52$ dienos; b) Vidaus drėgmės koncentracija, kai $T=25$ dienos ir $\tau=5,52$ dienos [23].	34
<b>13 pav.</b> (a) plokštelė ant nelaidaus pagrindo; b) plokštelė, kurią iš abiejų pusių veikia skirtinga aplinka [23].	35
<b>14 pav.</b> Vandens garų pasiskirstymas, kai a) plokštelė yra ant nelaidaus pagrindo; b) plokštelę iš abiejų pusių veikia skirtinga aplinka [23].	35
<b>15 pav.</b> Vandens garo koncentracijos kitimas skirtingų medžiagų dėžutėse viduje.	37
<b>16 pav.</b> Drėgmės pasiskirstymas dėžutės viduje kintant laikui.	38
<b>17 pav.</b> Rasos taško temperatūra skirtingų medžiagų dėžutėse.	38
<b>18 pav.</b> Vandens garų koncentracijos kitimas skirtingų medžiagų dėžutėse.	39
<b>19 pav.</b> Drėgmės kitimas dėžutės viduje, kintant laikui.	40
<b>20 pav.</b> Rasos taško priklausomybė kintant laikui skirtingose medžiagose.	40
<b>21 pav.</b> Drėgmės pasiskirstymas PC plastmasinės plokštelės sienelėje.	41
<b>22 pav.</b> Vandens garų masės pasiskirstymas PC plokštelės sienelėje.	42
<b>23 pav.</b> Vandens garų koncentracijos pasiskirstymas PC plokštelės sienelėje.	42
<b>24 pav.</b> Drėgmės pasiskirstymas PBT plokštelės sienelėje.	43
<b>25 pav.</b> Vandens garų koncentracijos pasiskirstymas PBT plokštelės sienelėje.	44
<b>26 pav.</b> Vandens garų masės pasiskirstymas PBT plokštelės sienelėje.	44

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

Doc. – docentas;

Lekt. – lektorius;

Prof. – profesorius.

### Terminai:

*Antipirenas* - cheminė medžiaga, didinanti audinių, medienos, plastikų atsparumą degimui.

*Fluoroplastas* – tai medžiaga gaminama cheminiu būdu, kuri pasižymi cheminiu atsparumu mineralinėms ir organinėms rūgštims, šarmams, organiniams tirpikliams, oksidatoriams ir kitoms agresyvioms terpėms. Cheminis žymėjimas - **PTFE**. Kitaip dar žinomas šiais pavadinimais: politetrafluoretilenas, teflonas, ftoroplastas.

*Sorbicija* - gertis, reiškinys, kai kietasis kūnas arba skystis sugeria iš aplinkos įvairias medžiagas. Sugeriančioji medžiaga vadinama sorbentu, sugeriamoji – sorbatu. Jei sorbentas sugeria medžiagą visu tūriu, vyksta absorbcija, jei sorbatas kaupiamas tik sorbento paviršiuje – adsorbicija. Sorbicija, kurios metu vyksta kietojo sorbento paviršinių sluoksnių cheminė sąveika su sorbatu, vadinama chemisorbcija.

*Spausdintinių plokščių rinkinys (PCBA)* - tai elektros įrangos dalis, kuri palaiko ir sujungia elektrinius ir elektroninius komponentus. Joje naudojami laidūs takeliai, kaladėlės ir elementai, išraižyti iš vario sluoksnių, laminuoti ant nelaidaus pagrindo arba tarp jo lakštinių sluoksnių. Komponentai paprastai lituojami ant spausdintinės plokštės, kad būtų sujungti elektriniu ir mechaniniu būdu.

## Įvadas

Naudojant elektroninius prietaisus klimato požiūriu nepalankioje aplinkoje, atsiranda su drėgme susijusių gedimų, daugiausia korozijos dėl vandens sluoksnio susidarymo, taip pat nuotėkio srovių, trumpųjų ar atvirųjų jungimų dėl elektrocheminės metalų migracijos. Tai yra viena svarbiausių problemų, susijusių su lauko elektronikos prietaisais, pavyzdžiui, automobilių pramonėje ir atsinaujinančiosios energijos sektoriuose. Žinios apie drėgmės pernešimą į elektronikos korpusą aplinkos sąlygomis tampa įdomios siekiant padidinti elektroninių komponentų ir prietaisų patikimumą. Todėl elektronikos projektavime labai naudingos tapo modeliavimo priemonės, padedančios ieškoti optimalių elektronikos projektavimo ir drėgmės kontrolės sprendimų. Tokių modeliavimų pagrindinis tikslas yra apsaugoti elektroniką nuo vandens, nes jo buvimas gali sukelti koroziją ir elektros migraciją, kuri vėliau gali sukelti trumpąjį jungimą ir visišką elektronikos sunaikinimą.

Elektroniniai valdymo blokai paprastai yra uždengti hermetiška metaline arba plastikine dėže, apsaugančia nuo aplinkinių skysčių. Nepaisant to, skysčiai sukelia svarbius medžiagų įtempimus, nes slėgis dėžutėje kinta priklausomai nuo temperatūros.

Šio darbo tikslas yra ištirti šilumos ir masės mainus plastikinėje elektronikos dėžutės sienelėje.

Uždaviniai:

1. Naudojamų plastikinių medžiagų elektronikos dėžėse literatūros analizė.
2. Drėgmės absorbcijos sienelėje matematinių modelių analizė.
3. Medžiagos drėgmės įgeriamumo tyrimas.
4. Difuzijos ir tirpumo koeficiento apskaičiavimas.
5. Matematinio modelio taikymas prognozuojant drėgmę elektronikos dėžės sienelėje.

## 1. Polimerai naudojami elektronikos dėžutėse

Polimeras yra cheminis junginys, kuriame molekulės yra sujungtos ilgomis kartotinėmis grandinėmis. Dėl šių grandinių polimerai turi unikalias savybes ir gali būti pritaikyti atsižvelgiant į jų panaudojimo paskirtį.

Polimerai yra dirbtinai sukuriama ir natūraliai atsirandantys. Tiek dirbtiniai, tiek natūralūs polimerai gali pasižymėti elastingomis savybėmis, tačiau polimerai gali turėti daugybę papildomų naudingų savybių. Atsižvelgiant į norimą panaudojimą sritį, polimerai gali būti tiksliai sureguliuojami, kad būtų panaudotos reikalingos jų savybės.

Šiuo atveju, nagrinėjant elektronikos dėžutes yra atsižvelgiama, kokie veiksniai daugiausiai turės įtakos dėžutei (ar bus naudojama lauke, viduje; ar bus veikiamas aukštu, žemų temperatūrų; ar bus drėgmėje ir t. t.). Toliau yra pateikiami pagrindiniai polimerų junginiai, kurie yra naudojami elektronikos dėžučių gamyboje.

- Akrilnitrilo butadieno stirenas (ABS) – vienas tvirčiausių termoplastinių polimerų. Šie termoplastikai pasižymi tokiomis savybėmis: lankstumu; blizgumu; juose yra poliamido (PA); labai lengvai apdorojami; tinka naudoti uždaroje patalpose; atsparūs smūgiams; suteikia atsparumą elektros srovei; atsparūs daugeliui cheminių medžiagų; gali būti naudojami iki -20 °C temperatūroje; stiklo virsmo temperatūra yra 40,5 °C, o lydymosi temperatūra – 200 °C; atsparus liepsnai pagal UL 94 HB; lengvai nuspalvinamas pagal užsakymą; storis nuo 200 mikronų iki 5 mm, didžiausias plotis – 1600 mm; nėra žinomo kancerogeninio ar kito poveikio sveikatai. Atsižvelgiant į aplinkybes: netinka lauko elektronikos korpusams; neturi atsparumo UV spinduliams, todėl negali atlaikyti saulės spindulių poveikio; praranda tvirtumą, kai sienelių storis plonas.
- Akrilonitrilo stireno akrilesteris ir polikarbonatas (ASA+PC mišinys) – šis mišinys leidžia atlaikyti įvairias apkrovas ir aukštą temperatūrą. Dažniausiai naudojamas nedažytoms automobilių detalėms ir liejimo formoms. Jis taip pat naudojamas kaip antipirenas. Šis mišinys pasižymi tokiomis savybėmis: puikiai tinka naudoti tiek aukštoje, tiek žemoje temperatūroje; yra padidintas atsparumas smūgiams; taip pat geras atsparumas cheminėms medžiagoms; atsparumas UV spinduliams ir drėgmei; iš šios medžiagos pagaminti elektronikos korpusai pasižymi puikiu atsparumu drėgmei; atsparus liepsnai pagal UL 94 V-0, t. y. aukščiausią atsparumo lygį (savaiame užgęsta per 5-10 sekundžių).
- Poliamidas (PA) – natūraliai randami vilnos ir šilko baltymuose. Kabelių rišikliams ir elektrinių įrankių korpusams dažnai yra naudojami dirbtinai pagaminti poliamidiniai plastikai. Šie poliamidai pasižymi: tvirtumu; atsparumu dilimui; gerai slysta; puikūs elektros izoliatoriai. Jie taip pat sugeria drėgmę, nėra atsparūs vandeniui, todėl netinka jei reikia vandeniui atsparios medžiagos. Šiuos poliamidus paveikia alkoholiai ir rūgštys.
- Polibutileno tereftalatas (PBT) – dažnai naudojami, kai veikia aukštos temperatūros (elektrotechnikos korpusams, automobilių konstrukcijos ir kištukinėms jungtims gaminti). Pasižymi atsparumu cheminėms medžiagoms, įtempimams; puikiai tinka esant aukštai temperatūrai.

- Polikarbonatas (PC) – priklauso poliesterių šeimai ir yra labai populiarus termoplastikas, nes dėl savo tvirtumo ir lankstumo naudojamas ten, kur metalas netinka. Polikarbonatas naudojamas įvairiuose gaminiuose - nuo akinių ir neperšaunamo stiklo iki medicinos prietaisų. Jis taip pat paplitęs vamzdžiuose, kuriais vidinė LED šviesa perduodama į išorę. Pasižymi tokiomis savybėmis: yra skaidrus; lengvai dažomas; atsparus smūgiams; didelis ribinis tempiamasis stipris ir takumo riba; 30 kartų tvirtesnis už akrilą ir 250 kartų tvirtesni už stiklą; tinka naudoti lauke; atsparus UV spinduliams; atlaiko temperatūrą nuo -20 °C iki 140 °C; lengvas; reikia mažiau konstrukcinės atramos nei stiklui. Geriausia derinti su ASA+PC-FR, jei reikia nuolatinio plastiko, skirto naudoti lauke; nerekomenduojama naudoti su stipriais šarmais; aliejaus ar alkoholio pagrindu pagaminti chemikalai gali pažeisti polikarbonatą.
- Polikarbonatas + akrilonitrilo-butadieno stirenas (PC+ABS mišinys) – vieni iš dažniausiai naudojamų plastikų elektronikos korpusams gaminti. PC+ABS termoplastinis mišinys sujungia teigiamas PC ir ABS savybes. Dažniausiai naudojami automobilių, elektronikos ir telekomunikacijų pramonėje. Šis mišinys turi labai didelį smūginį stiprį; gali atlaikyti minusinę temperatūrą; turi didelį atsparumą cheminėms medžiagoms; aukščiausias UL 94 V-0 atsparumo liepsnai lygis. Geriausiai tinka naudoti patalpų viduje arba ribotai naudojamiems plastikiniams elektros korpusams lauke. Atlaiko vidutinio sunkumo korozines sąlygas.
- Polimetilmetakrilatas, akrilas, pleksiglasas (PMMA) – dažnai naudojamas elektronikos korpusuose, kai norima skaidrios termoplastinės medžiagos, nenaudojant polikarbonato. Kadangi PMMA yra infraraudonųjų spindulių skaidrus, jis taip pat puikiai tinka optinėms ir nuotolinio valdymo priemonėms. Pasižymi tokiomis savybėmis: skaidrumu; lengvumu; atsparumu dūžiams; septyniolika kartų atsparesnis smūgiams nei stiklas, lengviau tvarkyti ir apdoroti; 200 °C virimo temperatūra. Trūkumai: mažas atsparumas smūgiams; trapesni nei ABS; dažnai naudojama kartu su ABS dalimis, siekiant užtikrinti gaminio tvirtumą.
- Polifenileno eteris ir polistirenas (PPE+PS) – įprastas mišinys. Naudojamas elektrotechnikoje kaip plastikiniai elektronikos korpusai, pavyzdžiui, relių ir transformatorių korpusai. Pasižymi puikiomis mechaninėmis, elektrinėmis ir šiluminėmis savybėmis, įskaitant gerą atsparumą karščio iškraipymams; didelis atsparumas cheminėms medžiagoms. Geriausiai tinka naudoti patalpose, o ne lauko elektronikos gaubtuose. Dėl ultravioletinių spindulių gali pakisti spalva.
- Stirenas etileno butadieno stirenas (SEBS) – termoplastinis elastomeras, kurio elastingumas panašus į gumos. Kadangi jį malonu liesti, SEBS yra puikus pasirinkimas plastikiniams elektronikos korpusams, skirtiems „delninukams“. Jis taip pat yra puiki alternatyva PVC mažiems plastikiniams žaislams. Yra atsparus atmosferos poveikiui, cheminėms medžiagoms [1, 2].

### 1.1. Gedimai, kuriuos sukelia drėgmės atsiradimas

Šiuo metu vis daugiau elektronikos naudojama įvairiuose šiuolaikiniuose technologiniuose prietaisuose, skirtuose naudoti lauke. Tokią elektroniką diegiant klimato požiūriu nepalankioje aplinkoje, atsiranda įvairių su drėgme susijusių gedimų mechanizmų: korozijos pagreitėjimas, nuotėkio srovės, medžiagų savybių kaita, trumpieji arba atvirieji jungimai dėl elektrocheminės metalų migracijos, elektrai laidžių vandeninių takų susidarymas ant paviršių ir sąsajų, taip pat pagrindo varžos sumažėjimas žemiau prijungtų komponentų tolerancijos [3-12]. Šie gedimų mechanizmai yra

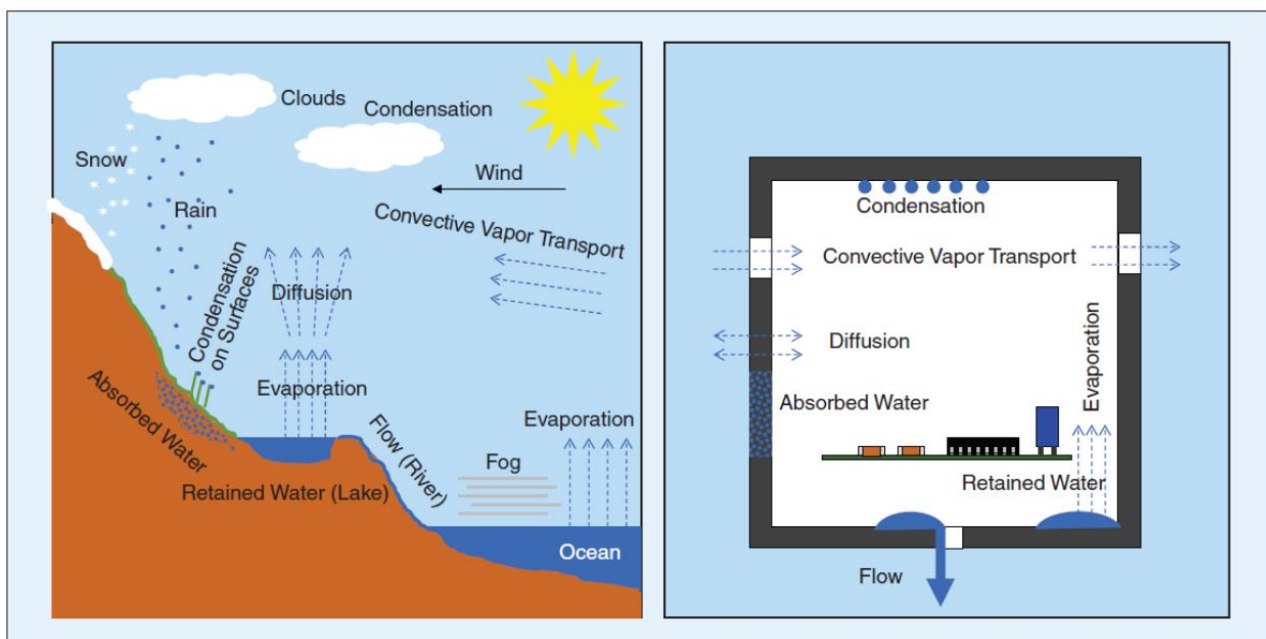
svarbiausios problemos, aptinkamos lauko elektronikos srityse, pavyzdžiui, automobilių pramonėje ir atsinaujinančiosios energijos sektoriuose. Be to, drėgmės problemų svarba didėja dėl nuolatinės elektronikos prietaisų miniatiūrizacijos, mažesnio energijos suvartojimo ir sąnaudų mažinimo [10]. Antra, nekontroliuojamas vietinis klimatas korpusų viduje tampa esminiu veiksnium, lemiančiu elektroninių prietaisų ir jų elektroninių komponentų patikimumą, funkcionalumą ir ilgaamžiškumą. Dėl nekontroliuojamo vietinio korpuso klimato atsirandantys tipiniai su drėgme susiję PCBA gedimai sukelia daugiau kaip 40 % visų elektronikos prietaisų gedimų [3-7, 12].

Iš tikrųjų su drėgme susijusius gedimus dažniausiai lemia vandens sluoksnio susidarymas ant kritinių PCBA ir komponentų paviršių. Tačiau grynas vanduo nesukelia minėtų gedimų ar korozijos elektronikos viduje. Taigi būtent hidroskopinių teršalų patekimas į vandenį sukelia minėtas problemas ir sumažina kritinį santykinės drėgmės arba paviršinės energijos lygį vandens sluoksniui susidaryti [13-20]. Be to, siekiant sumažinti korozijos atsiradimo riziką, santykinė oro drėgmė turi būti mažesnė nei 60 %, o PCBA arba kritinių komponentų temperatūra turi būti atskirta nuo vietinio rasos taško temperatūros bent 8-10 °C [18-22].

## 1.2. Drėgmės pernešimas elektronikoje

Drėgmei patekti į elektronikos korpusus ir pakuotes yra daugybė kelių, pavyzdžiui, įtrūkimai, angos, pralaidžios sienelės, tarpinių medžiagos, kabelių praėjimai [8, 10].

Elektronikos korpusą galima apibūdinti kaip lauko aplinką, nes gamtoje vyksta tie patys drėgmės pernešimo mechanizmai kaip ir elektronikos korpuse [10]. 1 pav. pateiktame pavyzdyje palyginamas hidrologinis ciklas gamtoje ir procesai gaubte. Apskritai drėgmė į elektronikos spintą ir jos vidų pernešama difuzijos, kapiliarinio efekto, susikondensavusių vandens lašelių garavimo, kondensacijos dėl temperatūrų skirtumo tarp šaltų ir šiltų paviršių, konvekcija.



**1 pav.** Hidrologinis ciklas gamtoje lyginamas su drėgmės pernešimu elektroniniame korpuse [8, 23].

Šiuos mechanizmus daugiausia lemia temperatūros gradientai. Be to, pernešant drėgmę vyrauja konvekcija, kuri gali būti kvėpavimo formos, kai oro mainus per angą lemia šiluminis plėtimasis. Antroji forma apibrėžiama kaip natūrali konvekcija arba "kamino efektas", o trečioji - kaip priverstinė konvekcija.

Dabartinėje elektronikoje naudojama daug medžiagų, todėl ji yra labai sudėtinga tiriamoji sistema. Yra dvi elektronikoje naudojamų medžiagų grupės, t. y. nepralaidžios ir pralaidžios. Nelaidžioms medžiagoms priskiriama keramika, stiklai ir metalai, jeigu jie neturi įtrūkimų ir porų. Antroji grupė - polimerinės medžiagos, pavyzdžiui, polikarbonatas, nailonas, poliamidas, epoksidinė derva, kurios labai plačiai naudojamos elektronikoje, ypač pakuotėms ir sudedamosioms dalims, nes yra pigios, masinės gamybos ir lengvesnės. Be to, daugelyje elektronikoje naudojamų polimerinių medžiagų difuzija dažniausiai laikoma Fiko, nes daugelis tyrimų parodė, kad techninėms reikmėms drėgmei šiose medžiagose prognozuoti pakanka Fiko formulės [24-35]. Taigi pralaidžių polimerinių medžiagų naudojimas šiuolaikinėje elektronikoje tapo viena iš pagrindinių problemų, susijusių su drėgme.

Drėgmės absorbcija plastikinėse pakuotėse turi didelę įtaką pakuočių patikimumui, todėl atlikta daug tyrimų, susijusių su drėgmės pernešimu, absorbcija ir desorbcija [24-32]. Ypač drėgmės difuzija polimeruose buvo klasikinė tyrimų tema.

## 2. Šilumos perdavimo pagrindai

Iš esmės šiluminės energijos pasiskirstymą sistemoje lemia trys pagrindiniai mechanizmai: laidumas, konvekcija ir spinduliavimas. Elektronikoje vyraujantys šilumos perdavimo mechanizmai yra laidumas ir konvekcija, todėl šiame skyriuje daugiausia aptariami šie du mechanizmai.

### 2.1. Laidus šilumos perdavimas kietuosiuose kūnuose

Šilumos perdavimas apibrėžiamas kaip šiluminės energijos judėjimas iš aukštos temperatūros srities į žemos temperatūros sritį [36, 37]. Laidų šilumos perdavimą lemia Furjė dėsnis, kuris teigia, kad šilumos srauto greitis per medžiagą yra proporcingas medžiagos plotui, normaliam į šilumos srauto kelią, ir temperatūros gradientui išilgai šilumos srauto kelio [36]. Taigi lygtis apibūdinanti Furjė dėsnį, yra tokia [38]:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x}; \quad (1)$$

čia  $q$  – šilumos srautas statmenai per  $A$  ploto paviršių [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $T$  – temperatūra [ $\text{K}$ ],  $k$  – medžiagos šiluminis laidumas [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ],  $A$  – paviršiaus plotas [ $\text{m}^2$ ],  $x$  – aprašomosios erdvės parametras statmenai paviršiui [ $\text{m}$ ].

Nagrinėjant paprastą vienmatį šilumos srautą per plokščią sienelę ir darant prielaidą, kad šilumos laidumas yra pastovus, Furjė dėsnio integruotoji formulė, esant nusistovėjusioms sąlygoms atitinka [38, 39]:

$$q = -\frac{\Delta T}{R_{th}^{cond}}; \quad (2)$$

$$R_{th}^{cond} = \frac{L}{kA}; \quad (3)$$

čia  $L$  – plokščios sienelės storis, [ $\text{m}$ ],  $R_{th}^{cond}$  – šilumos laidumo varža, [ $\text{K}/\text{W}$ ].

Bendresnę šilumos laidumo lygtį galima sudaryti remiantis pirmuoju termodinamikos dėsniu ir Furjė dėsniu. Pirmasis termodinamikos dėsnis, taikomas kontroliniam tūriui, rodo, kad energijos balansas [39]:

$$\frac{Sukaupta}{energija} = \frac{Gauta}{energija} - \frac{Sunaudota}{energija} + \frac{Pagaminta}{energija}. \quad (4)$$

Taikant energijos balansą ir Furjė dėsnį, gaunama bendroji diferencinė šilumos laidumo lygtis [38]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{Q}_{gen}^m. \quad (5)$$

Atsižvelgiant į pastovias ir homogeniškas medžiagos savybes, galutinė šilumos laidumo forma lygtis yra tokia:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{Q}_{gen}^m}{\rho c_p}; \quad (6)$$



čia  $\rho$  – medžiagos tankis [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $c_p$  – savitoji šiluminė talpa [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ],  $\alpha$  – šiluminė sklaida, lygi  $k/c_p$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $\dot{Q}_{gen}^m$  – generuojama šiluma per tūrio vienetą ir laiko vienetą [ $\text{W}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$ ].

## 2.2. Konvekcinis šilumos perdavimas

Jei kietoji medžiaga yra dujinėje ar skystoje aplinkoje, laidumą visada lydi kitas šilumos perdavimo būdas - konvekcija. Paprastai konvekciją lemia skysčio tūrinis judėjimas [36-39]. Niutono aušinimo dėsnis apibrėžia konvekcinių šilumos perdavimą tarp kietojo kūno ir jo aplinkiniu skysčiu ir yra toks [38]:

$$q = -hA(T_\infty - T_s); \quad (7)$$

čia  $q$  – konvekcinis šilumos srautas [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $h$  – konvekcinis šilumos perdavimo koeficientas [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ],  $T_s$  – paviršiaus temperatūra [ $^\circ\text{C}$  arba  $\text{K}$ ],  $T_\infty$  – skysčio temperatūra [ $^\circ\text{C}$  arba  $\text{K}$ ].

Tada konvekcinę šiluminę varžą galima apibrėžti taip:

$$R_{th}^{cond} = \frac{1}{hA}. \quad (8)$$

Atsižvelgiant į konvekciją kietosios medžiagos paviršiuje kaip kraštinę sąlygą, bendrąjį matematinį modelį galima išreikšti paprasčiausiai kaip šilumos balansą pastovios būsenos sąlygomis pavidalu [36-39]:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = -h \cdot (T_\infty - T_s). \quad (9)$$

Iš tikrųjų konvekcija paviršiuje kaip kraštinė sąlyga yra dažniausia šiluminių sąlygų rūšis. Nors konvekcija gali būti skirstoma į natūralią arba priverstinę, šiame darbe daroma prielaida, kad konvekcija yra natūrali.

## 2.3. Masės pernašos pagrindai

Drėgmės pernaša gali būti difuzinė arba konvekcinė, todėl šiame skyriuje aptariami abu masės pernašos mechanizmai. Tiksliau, šiame skyriuje trumpai aprašoma Fiko difuzija valdoma drėgmės pernaša.

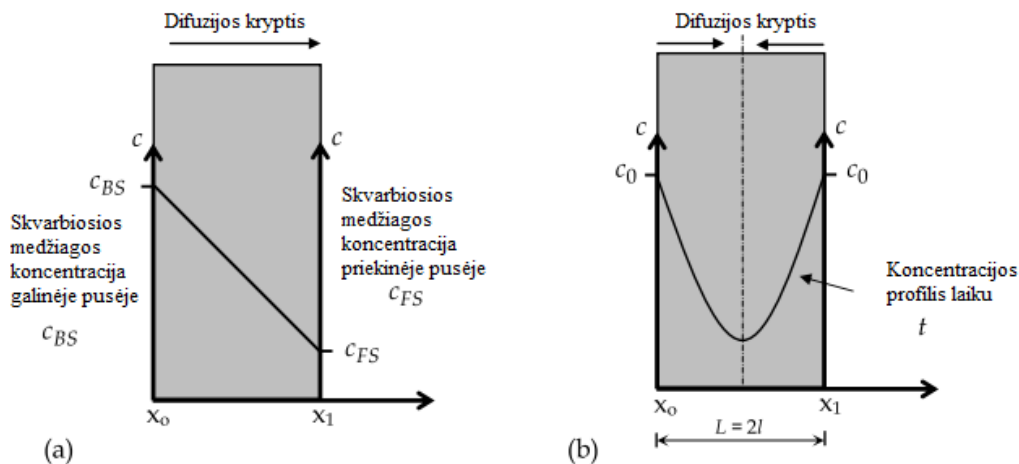
### 2.3.1. Difuzinis masės pernešimas

Difuzinė masės pernaša - tai procesas, kurio metu vienas masės komponentas ar rūšis terpėje pernešama per terpę iš didesnės koncentracijos srities į mažesnės koncentracijos sritį [39]. Difuzinė masės pernaša yra analogiška 2.1. poskyryje aprašytai laidžiajai šilumos pernašai ir, panašiai kaip Furjė dėsnis šilumos pernašai, kurias Fikas pirmą kartą pritaikė, kad apimtų kiekybinę difuziją izotropinėje terpėje [40]. Pirmasis Fiko dėsnis apibrėžia difuzinės masės pernašos greitį. Matematiškai pirmasis Fiko dėsnis apibrėžiamas taip [39, 41]:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x}; \quad (10)$$

$$R_m^{diff} = \frac{L}{DA}; \quad (11)$$

čia  $J$  – masės pernašos greitis pjūvio ploto vienetui, [(kg)/m<sup>2</sup>·s],  $c$  – vandens garų koncentracija medžiagoje [kg/m<sup>3</sup>],  $D$  – medžiagos difuzijos koeficientas tam tikrai temperatūrai, [m<sup>2</sup>/s],  $L$  – plokščios sienelės storis, [m],  $R_m^{diff}$  – difuzinis drėgmės pasipriešinimas, [s/m<sup>3</sup>],  $A$  – paviršiaus plotas [m<sup>2</sup>],  $m$  – drėgmės santrumpa.



**2 pav.** Koncentracijos profilis esant (a) pastoviai būsenai ir (b) nepastoviai būsenai [2].

Paprastas skvarbaus koncentracijos profilio schematiškas vaizdas difuzijos procese tarp dviejų ribų parodytas 1-a pav. Pirmasis dėsnis gali būti tiesiogiai taikomas tik difuzijai esant pastoviai būsenai, tuo tarpu koncentracija laikui bėgant nesikeičia [42].

Difuzinis srautas priklauso nuo koncentracijos gradiento ir proporcingumo koeficiento ( $D$ ), kuris paprastai yra medžiagos parametras, nustatomas eksperimentiškai (išsamiau 2.3.4 skirsnyje).

Taikant masės išsaugojimo dėsnį ir pirmąjį Fiko dėsnį, bendroji koncentracijos lygtis išvedama taip pat, kaip ir šilumos laidumo lygtis, ir vadinama antruoju Fiko dėsniumi [39, 40], kuri dažniausiai yra taikoma, kai aplinkybės yra nepastovios būsenos ir kai skvarba kaupiasi tam tikrame sistemos elemente [42, 40]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + M_{gen}^{\dot{m}}; \quad (12)$$

o esant pastovioms medžiagos savybėms, lygtis gaunama:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + M_{gen}^{\dot{m}}; \quad (13)$$

kur  $c$  – vandens garų koncentracija medžiagoje [kg/m<sup>3</sup>],  $D$  – difuzijos koeficientas tam tikrai temperatūrai [m<sup>2</sup>/s],  $M_{gen}^{\dot{m}}$  – susidariusi masė per tūrio vienetą ir laiko vienetą [kg/(m<sup>3</sup>·s)].

12 lygtis reiškia įsiskverbimo medžiagos koncentracijos pokytį tam tikrame sistemos elemente, atsižvelgiant į laiką ( $t$ ), vienos dimensijos difuzijai, tarkime,  $x$  kryptimi.

Difuzijos koeficientas  $D$  gaunamas tinkamai matematinis kinetinių duomenų apdorojimas. Sorbcijos kinetika yra vienas iš labiausiai paplitusių eksperimentinių metodų tiriant mažų molekulių difuziją

polimeruose. Taikant šį metodą,  $2l$  storio polimerinė plėvelė panardinama į begalinę skvarbios medžiagos vonią, tada koncentracija  $c_t$  bet kuriame plėvelės taške laiko momentu  $t$  gaunama pagal 14 lygtį [42].

$$\frac{c_t}{c_\infty} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp\left[\frac{-D(2n+1)^2\pi^2 t}{4l^2}\right] \cdot \cos\left[\frac{(2n+1)\pi x}{2l}\right]; \quad (14)$$

čia  $c_\infty$  yra susikaupusios skvarbios medžiagos kiekis pusiausvyros būsenoje, t. y. soties pusiausvyros koncentracija sistemoje.  $L = 2l$  – atstumas tarp dviejų ribinių sluoksnių  $x_0$  ir  $x_1$  (žr. 1 pav. b dalį).

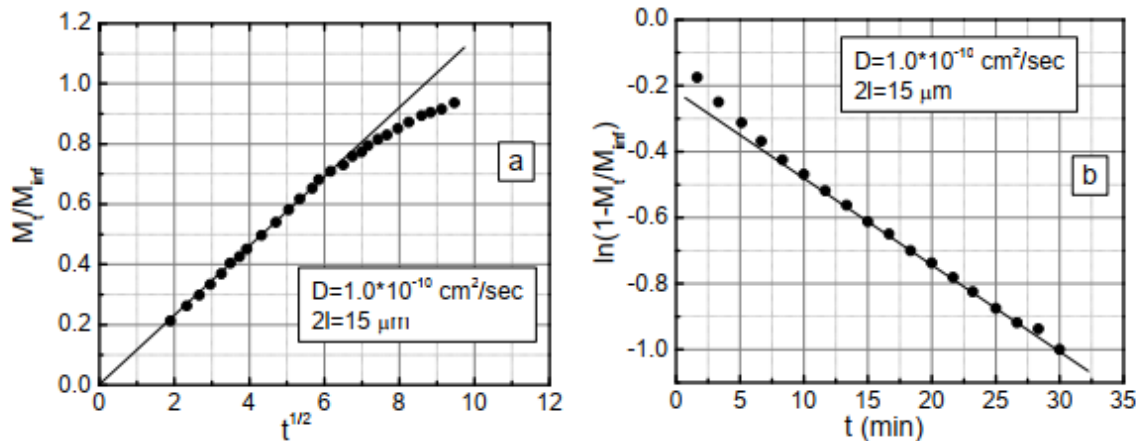
Integravus 14 lygtį, gaunama 15 lygtis, kurioje nurodoma plėvelės sorbuojamo skvarbiojo elemento masė, priklausanti nuo laiko  $t$ ,  $M_t$ , ir palyginama su pusiausvyros mase,  $M_\infty$ .

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2\pi^2} \exp\left[\frac{-D(2n+1)^2\pi^2 t}{4l^2}\right]. \quad (15)$$

Procesams, vykstantiems per trumpą laiką, esant storiui  $L = 2l$ , 15 lygtį galima užrašyti taip:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{2}{l} \left(\frac{D}{\pi}\right)^{1/2} t^{1/2}. \quad (16)$$

Nubrėžus  $M_t/M_\infty$  kaip  $t^{1/2}$  funkcija, difuzijos koeficientą galima nustatyti pagal tiesinę kreivės dalį, kaip parodyta 2 pav. Naudojant 16 lygtį vietoj 15 lygties, paklaida yra 0,1 %, kai  $M_t/M_\infty$  santykis yra mažesnis nei 0,5 [43].



**3 pav.** Tipiško polimero masės pasisavinimo kinetika – (a)  $M_t/M_\infty$  kaip  $t^{1/2}$  funkcija, (b)  $\ln(1 - M_t/M_\infty)$  kaip  $t$  funkcija [44].

Ilgalaikės difuzijos atveju, kai duomenų apie  $M_t/M_\infty \leq 0,5$  gali būti nedaug, 15 lygtį galima užrašyti taip:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-D\pi^2 t}{4l^2}\right]. \quad (17)$$

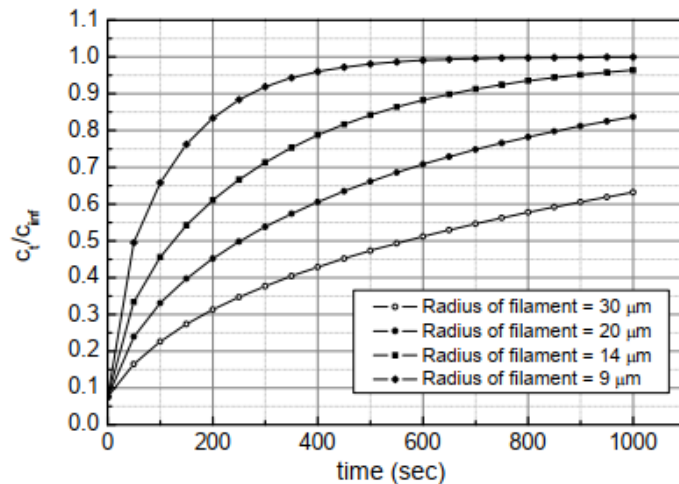
17 lygtis paprastai naudojama 18 lygties pavidalu, kaip nurodyta toliau:

$$\ln\left(1 - \frac{M_t}{M_\infty}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{D\pi^2 t}{4l^2}. \quad (18)$$

Šis įvertinimas taip pat rodo panašiai nereikšmingą 0,1 % paklaidą [43]. Be difuzijos koeficiento, plėvelės storis yra labai svarbus parametras, turintis įtakos difuzijos kinetikai, kaip matyti iš 15 lygties. Dažymo procesas, kurio metu dažiklio molekulės kaupiasi pluošte esant netiesiniam koncentracijos gradientui, vadinamas nestacionaria masės pernaša, nes dažiklio kiekis pluošte nuolat didėja. Toliau, 19 lygtį, aprašydamas dažiklio molekulių difuziją į begalinio ilgio cilindrą arba pluoštą, kurio spindulys  $r$  [41, 45].

$$\begin{aligned} \frac{C_t}{C_\infty} = & 1 - 0,692[\exp(-5,785Dt/r^2)] + 0,190[\exp(-30,5Dt/r^2)] \\ & + 0,0775[\exp(-74,9Dt/r^2)] + 0,0415[\exp(-139Dt/r^2)] \\ & + 0,02580[\exp(-223Dt/r^2)] + \dots \end{aligned} \quad (19)$$

$C_t/C_\infty$  kitimas esant skirtingoms gijų spindulio vėrtėms pateiktas 3 pav. Kaip matyti iš 3 pav., mažėjant gijos spinduliui, didėja soties greitis.



4 pav.  $C_t/C_\infty$  dažymo priklausomybė nuo  $t$  skirtingam pluošto spinduliui [46].

### 2.3.2. Konvekinis masės pernešimas

Konvekinis drėgmės masės pernešimas iš esmės nagrinėjamas taip pat kaip ir konvekinis šilumos pernešimas, ir taip pat apibrėžiamas kaip masės judėjimas judant skysčio masei. Konvekinė masės pernaša kietosios medžiagos paviršiumi išreiškiama taip [39, 47-49]:

$$q_m = h_m A (c_{a,surf} - c_{a,\infty}). \quad (20)$$

Pasipriešinimą konveciniam masės pernešimui galima išreikšti taip:

$$R_m^{conv} = \frac{1}{h_m A}; \quad (21)$$

čia  $q_m$  – masės srautas [kg/s],  $h_m$  – konvekciniis masės perdavimo koeficientas [m/s],  $c_{a,surf}$  – vandens garų koncentracija aplinkos ore, esančiame šalia kietojo kūno paviršiaus ir esančiame pusiausvyroje su oru [kg/m<sup>3</sup>],  $c_{a,\infty}$  – vandens garų koncentracija ore, esančiame toli nuo kietojo kūno paviršiaus [kg/m<sup>3</sup>].

Atsižvelgiant į konvekcinių masės pernašą kietosios medžiagos paviršiuje kaip kraštinę sąlygą, bendrasis drėgmės pernašos paviršiuje matematinis modelis apibrėžiamas taip kaip ir 9 lygtyje, ir yra tokio pavidalo [39]:

$$-D \frac{\partial c_{s,surf}}{\partial x} = -h_m (c_{a,\infty} - c_{a,surf}); \quad (22)$$

čia  $c_{s,surf}$  – vandens garų koncentracija kietojo kūno paviršiuje [kg/m<sup>3</sup>].

Norint įvertinti masės srautą pagal 22 lygtį, reikia atsižvelgti į koncentracijos netolygumą kietosios medžiagos ir oro aplinkos sandūroje. Vandens garų koncentracija kietojo kūno paviršiuje  $c_{s,surf}$  ir vandens garų koncentracija ore  $c_{a,surf}$  prie kietojo kūno paviršiaus yra susijusios Henrio dėsnio, kuris aprašytas kitame 2.3.3 poskyryje. Be to,  $h_m$  taip pat gali turėti skirtingus vienetus, priklausomai nuo išraiškoje naudojamos varomosios jėgos vienetų, pvz. ar kaip lauko kintamasis naudojama koncentracija, ar slėgis.

### 2.3.3. Pusiausvyra aplinkos ir medžiagos bei medžiagos ir medžiagos sąsajose (Henrio dėsnis)

Pusiausvyra kietosios medžiagos ir oro sąsajoje apibrėžiama kaip būklė, kai kietosios medžiagos paviršiaus-aplinkos srityje absorbuotų vandens garų cheminis potencialas yra lygus vandens garų cheminiam potencialui oro aplinkoje [50-52]. Cheminis potencialas nepriklauso nei nuo oro aplinkos, nei nuo kietosios medžiagos ir yra tolydus per oro-medžiagos ir medžiagos-medžiagos sąsają [52], tačiau jis priklauso nuo vandens garų koncentracijos ir nuo temperatūros kiekvienoje iš dviejų fazių (oro aplinkoje ir medžiagoje) [51, 52].

Tokia pusiausvyra tarp oro aplinkos ir kietojo kūno paprastai apibūdinama gerai žinomumu Henrio dėsnio [39, 53-55], kuris teigia, kad kietajame kūne ištirpusių dujų kiekis yra proporcingas jų daliniam slėgiui dujinėje fazėje.

$$c_{s,surf} = H(T)p_a; \quad (23)$$

čia  $p_a$  – vandens garų dalinis slėgis ore [Pa],  $c_{s,surf}$  – vandens garų koncentracija kietosios medžiagos paviršiuje [kg/m<sup>3</sup>],  $H(T)$  – nuo temperatūros priklausanti Henrio konstanta [kg/(m<sup>3</sup>·Pa)]. Henrio dėsnį galima išreikšti įvairiais būdais ir vienetais, tačiau literatūroje plačiai paplitę du sutartiniai dydžiai [33, 56-58], pavyzdžiui, [kg/(m<sup>3</sup>·Pa)] ir [cm<sup>3</sup>(STP)/(cm<sup>3</sup> cmHg)]. Ryšys tarp jų yra toks:

$$1 \frac{kg}{m^3 Pa} = 1658,53 \frac{cm^3 (STP)}{cm^3 cmHg}. \quad (24)$$

Henrio dėsnio koeficientas  $H(T)$  literatūroje labai dažnai naudojamas kaip tirpumo koeficientas  $S(T)$  [18, 59-60], todėl tolesniuose skyriuose  $H(T)$  vadinamas tirpumo koeficientu  $S(T)$ .

Jei aplinka yra kita kietoji medžiaga, sąsajos pusiausvyros būklę gana gerai apibūdina Nernsto pasiskirstymo dėsnis arba pasiskirstymo dėsniu [34, 56, 61], kur pasiskirstymo koeficientas/koeficientas  $K$  gaunamas taip:

$$K_{12} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{S_1}{S_2}; \quad (25)$$

kur  $c_1$  – vandens koncentracija pirmoje kietojoje medžiagoje [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $c_2$  – vandens koncentracija antroje medžiagoje [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].  $K_{12}$  yra be matmenų ir priklauso nuo temperatūros.

Pasiskirstymo koeficientą taip pat galima apibrėžti, kai kietoji medžiaga yra pusiausvyroje su oru aplinka ties sąsaja ir išraiška yra:

$$c_{s,surf} = K_{sg}(T)\rho_g \quad \text{kur} \quad K_{sg}(T) = S(T)R_v T; \quad (26)$$

čia  $\rho_g$  – vandens garų tankis ore, apskaičiuotas pagal idealiųjų dujų dėsnį [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $R_v$  – vandens garų dujų konstanta, lygi  $R_v = R/M_v = 462 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ,  $M_v$  – vandens molinė masė [ $\text{kg}/\text{mol}$ ],  $R$  – universalioji dujų konstanta  $8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ .

#### 2.3.4. Nuo temperatūros priklausantis difuziškumas, tirpumas ir pralaidumas kietosiose medžiagose

Yra žinoma, kad tiek nuo temperatūros priklausanti sklaida, tiek tirpumas kietosiose medžiagose atitinka Arrenijaus priklausomybę [34, 56, 58, 61-63]:

$$D(T) = D_0 e^{\left(-\frac{E_D}{RT}\right)}; \quad (27)$$

$$S(T) = S_0 e^{\left(\frac{E_s}{RT}\right)}; \quad (28)$$

čia  $D_0$  – ikieksponecinis koeficientas/koeficientas, [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $E_D$  – difuzijos aktyvavimo energija, [ $\text{J}/\text{mol}$ ],  $T$  – temperatūra, [ $\text{K}$ ],  $S_0$  – ikieksponecinis koeficientas/koeficientas, [ $\text{kg}/(\text{m}^3\text{Pa})$ ],  $E_s$  – tirpumo aktyvavimo energija [ $\text{J}/\text{mol}$ ].

Difuzijos ikieksponecinis koeficientas nustatomas empiriškai pagal eksperimentinius duomenis ir rankiniu būdu išreiškiamas natūraliuoju logaritmu arba logaritmu iki 10 bazės formos:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E_D}{R} \left(\frac{1}{T}\right); \quad (29)$$

$$\log D = \log D_0 - \frac{E_D}{2,3R} \left(\frac{1}{T}\right). \quad (30)$$

Gaunama tiesinė priklausomybė tarp difuzijos koeficiento logaritmo ( $\log D$ ) ir absoliučios temperatūros ( $1/T$ ), iš kurios gaunama aktyvacijos energija  $E_D$  ir ikieksponecinis koeficientas gali būti apskaičiuotas:

$$E_D = -2,3R \left[ \frac{\log D_1 - \log D_2}{1/T_1 - 1/T_2} \right]. \quad (31)$$

Jei difuzijos ir tirpumo koeficientai nustatomi empiriškai, tada pralaidumas gali būti apibrėžti taip [62]:

$$P(T) = D(T)S(T); \quad (32)$$

čia  $P(T)$  – vandens garų skvarbumas kietoje medžiagoje [ $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$ ]. Skvarbumo koeficientas  $P$  apibrėžiamas kaip skvarbos kiekis, kuris per laiko vienetą praeina pro vieneto storio polimero ploto vienetą, esant vieneto slėgio skirtumui sistemoje. Skvarbumas priklauso nuo tirpumo koeficiento  $S$ , taip pat nuo difuzijos koeficiento  $D$  [64].

### 2.3.5. Fiko ir ne Fiko difuzija

Ankstesnėse dalyse, atsižvelgiant į pagrindinę Fiko dėsnio difuzijos prielaidą, buvo nagrinėjama mažų molekulių tolygiosios ir netolygiosios būsenos difuzija per polimerų sistemą. Tačiau yra atvejų, kai difuzija nevykta pagal aprašytą Fiko dėsnį. Atliekant paprastą eksperimentą, polimerinės plėvelės gabalėlis įdedamas į skvarbią skystąją fazę arba garų atmosferą. Remiantis antruoju Fiko dėsniu, pagrindinę polimerinės plėvelės masės pasisavinimo lygtį galima pateikti 33 lygtimi [65].

$$\frac{M_t}{M_\infty} = kt^n; \quad (33)$$

čia eksponentas  $n$  vadinamas difuzijos mechanizmo tipu, o  $k$  – konstanta, priklausanti nuo difuzijos koeficiento ir plėvelės storio.

Fiko difuzija (I atvejis) dažnai pastebima polimerų sistemoje, kai temperatūra yra gerokai aukštesnė už polimero stiklinio perėjimo temperatūrą ( $T_g$ ). Todėl tikimasi, kad  $M_t/M_\infty$  yra proporcingas kvadratinei šakniai iš laiko, t. y.  $n = 0,5$ . Nustatyti ir kiti difuzijos reiškinių mechanizmai, kurie suskirstyti pagal eksponentą  $n$ , kaip nurodyta toliau [66].

$n > 1$  *antras super atvejis (super atvejis II)*;

$n = 1$  *antras atvejis (atvejis II)*;

$1 > n > \frac{1}{2}$  *anomalija*;

$\frac{1}{2} > n$  *pseudo – Fiko*

Antrojo atvejo difuzija yra antras pagal svarbą polimero difuzijos mechanizmas. Tai judančių ribų procesas ir tiesinė sorbcijos kinetika, kuri yra priešinga Fiko kinetikai. Stebimas staigus skverbimosi frontas, kuriuo jis juda į priekį pastoviu greičiu.

Eksponentas  $n$  nuo 1 iki 0,5 reiškia anomaliją difuziją. Antras atvejis ir anomalioji difuzija paprastai stebimi polimeruose, kurių stiklinio perėjimo temperatūra yra aukštesnė už eksperimentinę temperatūrą. Pagrindinis skirtumas tarp šių dviejų difuzijos būdų yra susijęs su tirpiklio difuzijos greičiu [65].

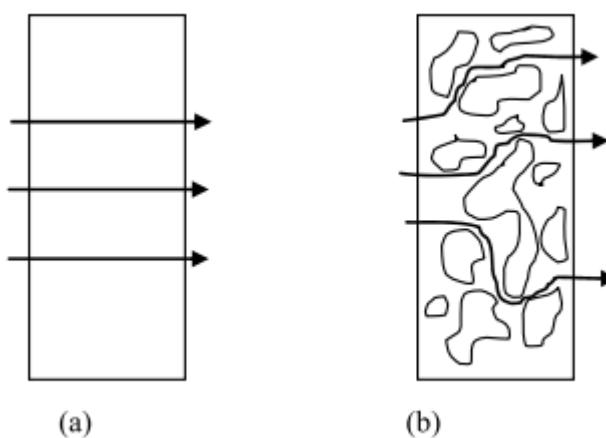
### 2.3.6. Geometrinės varžos koeficientas

Prasiskverbiančios medžiagos išsklaidymą per polimerą labai veikia konstrukcijoje esančios nepralaidžios mikro- arba nanodalelės. Kristalitai ir mikro-, ir nano-užpildai yra nepralaidūs ir veikia kaip kliūtis skvarbiajam agentui judėti, todėl difuzijos kelyje susidaro kreivės (5 pav.). Atsižvelgiant į geometrinę difuzijos proceso aspektą, yra pateikiamas bendro difuzinio našumo ( $D$ ) ir amorfinio komponento difuzinio našumo ( $D_a$ ) santykis [67-69].

$$D = \frac{D_a}{\tau\beta}; \quad (34)$$

čia  $\beta$  yra „imobilizacijos“ koeficientas ir  $\tau$  – „geometrinės varžos“ koeficientas.  $\beta$  yra beveik lygus 1 heliui, t. y. labai mažo atominio spindulio difuzoriui. Buvo pripažinta, kad didėjant nepraeinamų dalelių koncentracijai  $\tau$  – „geometrinės varžos“ koeficientas labai sparčiai didėja, ir kad abu veiksniai daug sparčiau didėja didelėse molekulėse nei mažose [67].

Užpildytas polimeras su nanodalelėmis turi mažesnę difuzijos koeficientą nei neužpildytas. Pavyzdžiui, polimetilmetakrilatas (PMMA) yra stikliškas polimeras, pasižymintis ne Fiko vandens difuzija, kurios  $D = 3,35 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ . Vandens difuzijos koeficientas sumažėja iki  $D = 3,15 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ , kai polimeras užpildomas *Cloisite 15A* silikatiniais nanosluoksniais [70]. Geometriniai matmenys, užpildų dydžio pasiskirstymas ir kiekis bei jų dispersijos polimerinėje matricoje lygis yra svarbūs veiksniai, kontroliuojantys masės pernašos per užpildytą polimerą greitį, ypač nanokompozitų.

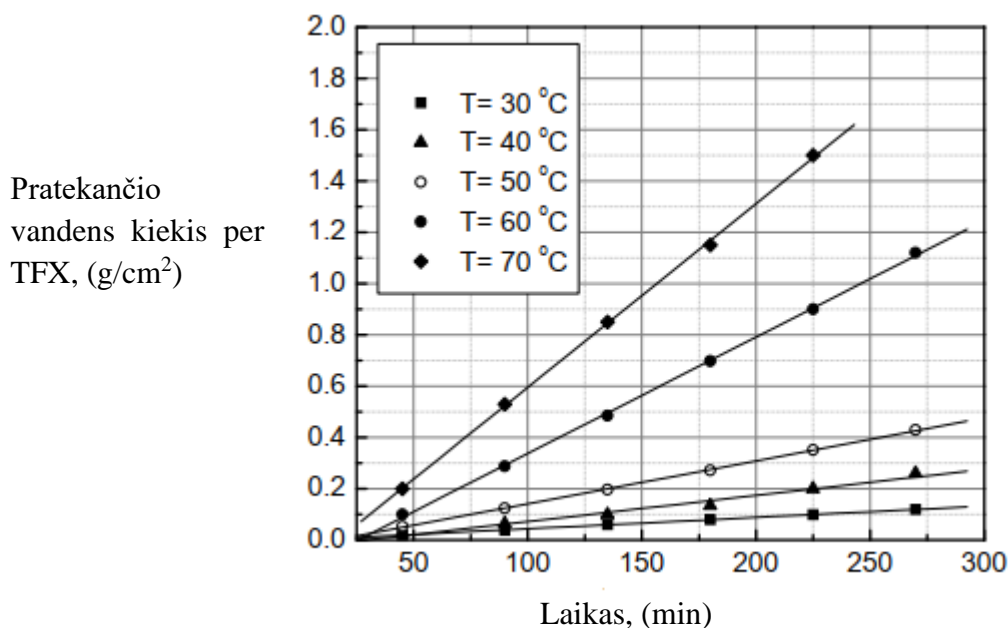


**5 pav.** Difuzijos kelio per struktūrą schema; (a) homogeninė terpė, (b) heterogeninė terpė [46].

Kaip paaiškinta, difunduojantys skvarbiosios medžiagos per homogeninę polimero struktūrą juda tiesia linija, o per heterogeninę polimero struktūrą, pavyzdžiui, nanokompozitą, jos vingiuoja. Polimerų nanokompozitai (PNC) susidaro disperguojant kelis svorio procentus nanometrinių dydžio užpildų, kurie yra vamzdelio, sferos ir sluoksnio pavidalo. Lyginant su grynu polimeru, polimerų nanokompozitai (PNC) turi tendenciją mažinti skvarbiosios medžiagos difuzijos koeficientą, nes padidėja kelio ilgis, kurį patiria difunduojanti molekulė dėl to, kad masės pernašos metu yra labai daug barjerinių dalelių. Didžiausią įmanomą molekules difuzijos per gryną polimerą ( $D$ ) ir tos pačios molekules difuzijos per užpildytą polimerą ( $D_e$ ) [71].



Blokiniai kopolimerai ir polimišiniai yra kitos įdomios medžiagos. Šie polimerai turi daugiafazę struktūrą, sudarytą iš įvairių tekstūrų. Sorbcija ir pernaša abiejuose polimeruose buvo nagrinėjama pirmiau aptartomis kryptimis. *Tecoflex EG72D (TFX)*, tam tikros rūšies poliuretanai, gali būti naudojamas medicinoje. Dėl šio kopolimero dvifazės struktūros skverbimosi į *TFX* kelias yra ne tiesus, o vingiuotas. Paprastai tokios medžiagos turi dvi skirtingas fazių perėjimo temperatūras, todėl jos yra jautrios temperatūrai ir pralaidžios vandens garams. 6 pav. parodytas vandens kiekis, prasiskverbiantis pro *TFX* membraną, kaip laiko funkcija, esant skirtingoms temperatūroms pastovios būsenos [72]. Pastebima, kad pralaidumas didėja, kai temperatūra viršija 40 °C, t. y. iki minkštosios



6 pav. Difuzija per TFX plėvelę nusistovėjusiomis sąlygomis.

fazės stiklėjimo temperatūros. Kontroliuojant šių daugiafazių sistemų mikrostruktūrą, galima reguliuoti pralaidumo dydį. Didelis pasaulinis susidomėjimas temperatūrai jautrių medžiagų naudojimu rodo, kad šios medžiagos gali būti naudojamos tekstilės pramonėje, medicinoje ir aplinkosaugos srityse. Pavyzdžiui, derinant šias medžiagas su įprastiniais audiniais, galima keisti jų pralaidumą orui, priklausomai nuo įvairios temperatūros.

### 2.3.7. Nuo temperatūros priklausanti sočiųjų vandens garų koncentracija

Literatūroje [39, 73-78] aptariama daug empirinių išraiškų, skirtų nuo temperatūros priklausomam soties vandens slėgiui  $p_{sat}$  ore apskaičiuoti, pavyzdžiui, Tetenso, Antoine'o, Bucko lygtys. Dauguma išraiškų išvestos oro sąlygoms iki 50 °C. Tačiau elektronikos prietaisuose gali būti aukštesnė nei 50 °C temperatūra. Ardeno Bako lygtys [73, 74] gali veikti esant aukštesnei nei 50 °C temperatūrai ir duoti tikslesnius vandens garų slėgio iki 100 °C rezultatus [78] nei Tetenso ir Antuano lygtys. Taigi empirinės koreliacijos, susijusios su vandens garų slėgiu ir temperatūra, yra būtent šios, kurias pateikiamos toliau:

$$p_{sat}(T[^\circ\text{C}]) = 0,61121 \cdot e^{\left(18,678 - \frac{T}{234,5}\right) \cdot \left(\frac{T}{257,14 + T}\right)} \quad T > 0^\circ\text{C}; \quad (35)$$

$$p_{sat}(T[^\circ\text{C}]) = 0,61115 \cdot e^{\left(23,036 - \frac{T}{333,7}\right) \cdot \left(\frac{T}{279,82 + T}\right)} \quad T < 0^\circ\text{C}; \quad (36)$$

čia  $T$  – išreiškiamas Celsijaus vienetais, °C, o  $p_{sat}$  – kPa.

Sočiųjų vandens garų koncentracija ore išreiškiama taip:

$$c_{sat}(T[°C]) = 0,0021645 \cdot p_{sat} / (T[°C] + 273,15) \quad (37)$$

37 lygtis išvesta taikant idealiųjų dujų dėsnį.

### 2.3.8. Nuo temperatūros priklausanti sklaida ore

Drėgnas oras laikomas dvimačiu sauso oro ir vandens garų mišiniu. Dvinarinio dujų mišinio difuzijos koeficientą, esant mažam dujų tankiui, galima apskaičiuoti taikant kinetinę teoriją [38].

$$D_{AB} = p^{-1} T^{3/2}; \quad (38)$$

čia  $D_{AB}$  – dviejų dujų A ir B mišinio difuzijos koeficientas,  $T$  – temperatūra [K],  $p$  – atmosferos slėgis [Pa].

Remiantis kinetine teorija, literatūroje pateikiama nemažai pusiau empirinių difuzijos koeficiento formulių [39, 79-88]. Temperatūros pokyčio įtaką vandens garų difuziniam koeficientui ore galima išreikšti šia pusiau empirine formule [86, 87]:

$$D = 2,16 \cdot 10^{-5} (T/273,15)^{1,8}; \quad (39)$$

čia  $T$  – temperatūra Kelvinais.

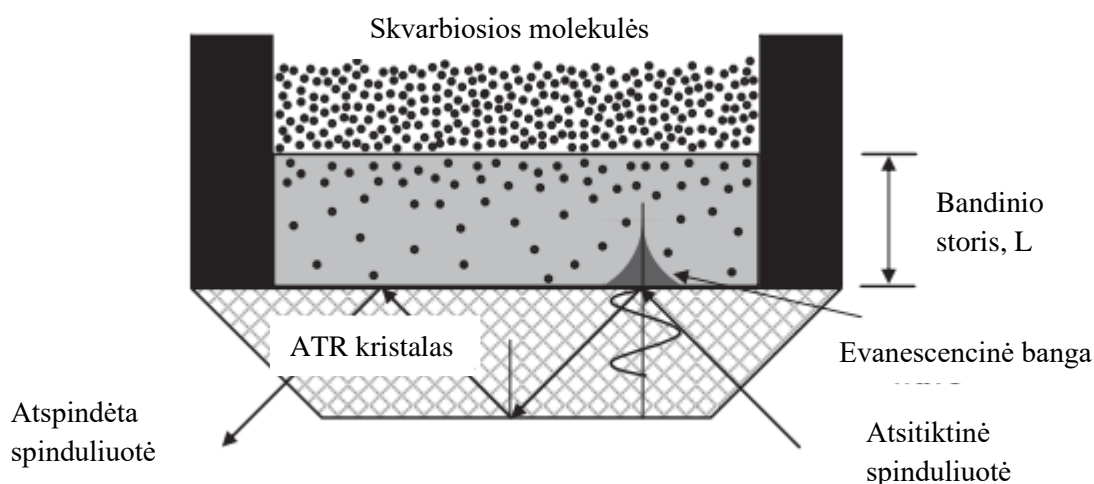
### 3. Difuzijos matavimas

#### 3.1. FTIR-ATR spektroskopija

Mažų molekulių difuzijos polimeruose matavimas naudojant Furjė transformacijos infraraudonųjų spindulių spektroskopiją (FTIR-ATR) yra perspektyvus metodas, leidžiantis tirti skysčių difuziją plonose polimerų plėvelėse vietoje. Šis metodas vis dažniau naudojamas sorbcijos kinetikai polimeruose tirti ir pasirodė esąs labai tikslus ir patikimas. 7 pav. pateikta ATR difuzijos eksperimento schema. Mėginys užliejamas ant vienos ATR prizmės (optiškai tankaus kristalo) pusės, tada ant jo pilami difunduojantys skvarbieji skysčiai. Kamerasi sandarinti naudojamos įvairios medžiagos, pavyzdžiui, PTFE. Pagal ATR metodo principą [89], kai bandinys, kaip retesnė terpė, liečiasi su visiškai atspindinčiu ATR kristalo paviršiumi (kaip sklindančia terpe), evanescencinė banga susilpnėja infraraudonųjų spindulių spektro srityse, kuriose bandinys sugeria energiją. Evanescencinės bangos elektrinio lauko stipris  $E$ , eksponentiškai mažėja tolstant nuo sąsajos, kaip parodyta 7 pav. Dėl atstumo, kuris yra mikrometrų eilės, ATR apskritai yra nejautri bandinio storii, todėl galima atlikti dinaminis matavimus tam tikro storio sluoksnyje. Infraraudonųjų spindulių pluošto prasiskverbimo į mėginį gylį galima apskaičiuoti pagal 40 lygtį.

$$dp = \frac{\lambda}{2\pi(n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2)^{1/2}}; \quad (40)$$

čia evanescencinės bangos skvarbos gylis žymimas  $dp$ ,  $\lambda$  – infraraudonosios spinduliuotės bangos ilgis,  $n_1$  ir  $n_2$  – plokščiųjų kristalų ir polimero tirpalų lūžio rodikliai atitinkamai, o  $\theta$  – spindulio kritimo kampas. Didinant ATR kristalo lūžio rodiklį, skvarbos gylis mažės. Dėl to sumažės efektyviojo kelio ilgis, todėl sumažės spektro absorbcijos intensyvumas. Didelio indekso kristalai reikalingi analizuojant didelio indekso medžiagas. Kai kurių ATR kristalų lūžio rodiklis yra išvardyti 1 lentelėje.

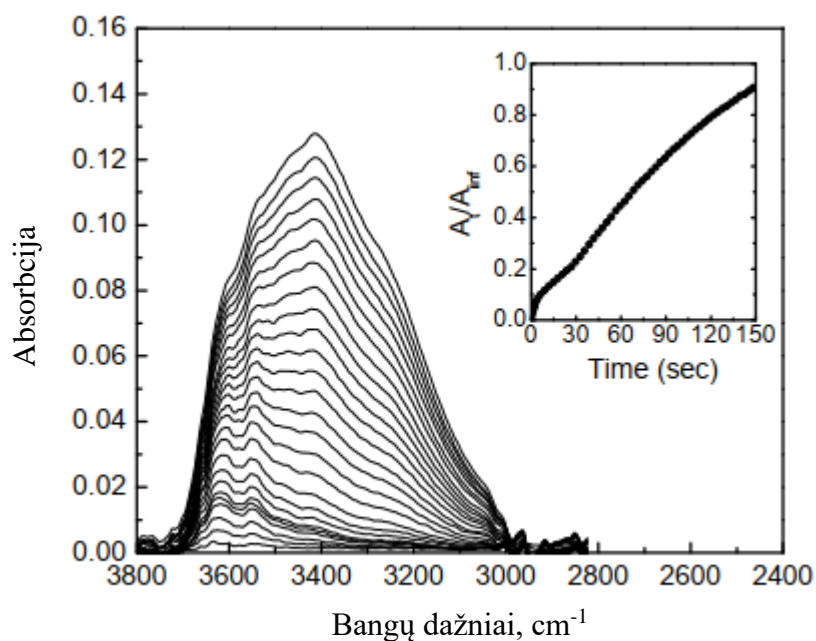


7 pav. Difuzijos eksperimento ATR įrangos schema.

**1 lentelė.** Kai kurių ATR prizmių lūžio rodiklis.

ATR prizmės	Atspindžio / Lūžio rodiklis
ZnSe	2,4
Ge	4
ZnS	2,2
AMTIR	2,5
Si	3,4

Kadangi infraraudonųjų spindulių spektroskopijos taikymo tikslas – nustatyti konkrečioje medžiagoje esančią cheminę funkcinę grupę, galima išmatuoti tokių funkcinių grupių turinčių komponentų dinaminis pokyčius, kai jie sudaro mišinį. Atsižvelgiant į tai, kad vandens molekulės skverbiasi į polimero rūšį, didėjant vandens koncentracijai apatiniame polimero sluoksnyje, besiliečiančiame su ATR prizme, turėtų padidėti charakteringa vandens smailė srityje tarp  $3800\text{ cm}^{-1}$  ir  $2750\text{ cm}^{-1}$ . Reizentatyvus užfiksuotų spektrų pavyzdys parodytas 8 pav. Tai dinaminis vandens difuzijos į PMMA tolygiai ploną plėvelę, kontaktuojančią su ATR prizme.



8 pav. Laiko evoliucijos spektrų seka iš PMMA mėginio, apdoroto 25 °C temperatūroje.

Vandens koncentracijai kiekybiškai įvertinti galima taikant paprasčiausią kiekybinį metodą, t. y. Beer-Lamberto dėsnį. Beer-Lamberto dėsnis teigia, kad maksimalus intensyvumas ne tik priklauso nuo mėginio koncentracijos, bet šis ryšys yra tiesinis, kaip parodyta toliau pateiktoje lygtyje.

$$A = abc; \quad (41)$$

čia  $a$  – komponento sugerties geba matuojamuoju dažniu,  $b$  – komponento ilgis, o  $c$  – komponento koncentracija. Absorbcinės gebos dydis  $a$  nustatomas remiantis tam tikrais kalibravimo modeliais. Nežinomi komponentų koncentracijai kiekybiškai nustatyti yra įvairių kalibravimo modelių. Šie

modeliai yra paprastas Beer-Lamberto dėsnis, klasikinė mažiausiųjų kvadratų (CLS), pakopinė daugialypė tiesinė regresija (SMLR), dalinė mažiausiųjų kvadratų (PLS) ir pagrindinių komponentų regresija (PCR).

Todėl Fiko difuzijos koncentracijos profilį galima sudaryti pagal 42 lygtį [33].

$$\frac{A_t}{A_\infty} = 1 - \frac{8\gamma}{\pi[1 - \exp(-2\gamma l)]} \cdot \left[ \frac{\exp\left(\frac{-D\pi^2 t}{4l^2}\right) \left(\frac{\pi}{2l} \exp(-2\gamma l) + (2\gamma)\right)}{\left(\frac{\pi^2}{4l^2} + 4\gamma^2\right)} \right]; \quad (42)$$

čia  $\gamma = 1/dp$ .

42 lygtyje daroma prielaida, kad  $\gamma$  vertė yra pastovi. Tai nėra visiškai teisinga, nes ji priklauso nuo polimero lūžio rodiklio, kuris gali kisti didėjant skvarbiosios medžiagos koncentracijai. 42 lygtį būtų galima supaprastinti, jei eksperimente būtų nustatyta tokia sąlyga [90]:

$$4\gamma^2 \gg \frac{\pi^2}{4l^2}, \quad \text{ir } 1 \gg \exp(-2\gamma l) \quad (43)$$

Tada gauname:

$$\ln\left(1 - \frac{A_t}{A_\infty}\right) = \ln\left(\frac{4}{\pi}\right) - \frac{D\pi^2}{4l^2} t. \quad (44)$$

Pagal 44 lygtį absorbcijos duomenų logaritmas nubraižomas kaip laiko funkcija, tada difuzijos koeficientas  $D$  nustatomas pagal tiesinės mažiausiųjų kvadratų regresijos nuolydį. Tai visiškai panašu į 18 lygties naudojimą difuzijos koeficientui nustatyti gravimetriniuose sorbcijos eksperimentuose per ilgą laiką. Pastaraisiais metais šis metodas taikomas vis dažniau [90-95].

### 3.2. Kiti matavimo metodai

Be FTIR-ATR metodo, yra daug įvairių metodų, skirtų skvarbos koeficientams į polimerines sistemas matuoti. Sorbcijos kinetikai tirti dažnai yra naudojami gravimetriniai metodai, kuriais tiesiogiai stebimi masės pokyčiai laikui bėgant [96-98]. Tai labiau tinka beveik kondensuojamoms dujoms ir garams. Polimero plonoji plėvelė pakabinama ant kalibruotų magnetinių pakabos svarstyklių; jos abi dedamos į tam tikroje temperatūroje palaikomą kamerą. Sorbcijos kinetika gaunama registruojant mėginio svorį kaip laiko funkciją po to, kai garai patenka į kamerą.

Jei sorbcijos kinetikai stebėti naudojamos nekondensuojamos dujos, pavyzdžiui, anglies dioksidas, azotas ir metanas, dažnai taikomi slėgio mažėjimo metodai [99]. Polimero mėginys įdedamas į indą, kondicionuojamą tam tikroje temperatūroje. Tada į indą įleidžiamos skvarbiosios dujos, kurių slėgis iš anksto nustatytas. Vykstant dujų sorbcijai, aptiktas sistemos slėgis palaipsniui mažėja, lyginant su pradiniu rodmeniu. Soties būseną pasiekama, kai nepastebima jokių slėgio svyravimų.

#### 4. Analitiniai drėgmės pernašos elektronikoje sprendimai

Šiame skyriuje aptariami analitiniai sprendiniai, atspindintys tipinius elektronikoje pasitaikančius atvejus. Aptariami trys atvejai, atitinkantys uždarą arba atvirą elektronikos korpusą, sienelę ir (arba) plokštę, iš abiejų pusių veikiamą skirtingų aplinkų, ir plokštę, pritvirtintą prie nelaidaus pagrindo. Pirmojo atvejo sprendiniai grindžiami kvazistabilios būsenos modeliu (QSS), o pastarųjų dviejų atvejų sprendiniai grindžiami antruoju Fiko dėsniumi. Analitiniai difuzinio masės perdavimo sprendiniai šiame skyriuje nagrinėjami esant izoterminėms sąlygoms, nors sprendžiant neizoterminius atvejus jie galėtų būti susieti su analitiniais šilumos perdavimo sprendiniais. Be to, analitiniai masės perdavimo sprendiniai yra panašūs į šilumos perdavimo sprendinius, todėl šiame skyriuje jie nenagrinėjami.

##### 4.1. Analitinis sprendimas, pagrįstas kvazistabilios būsenos modeliu

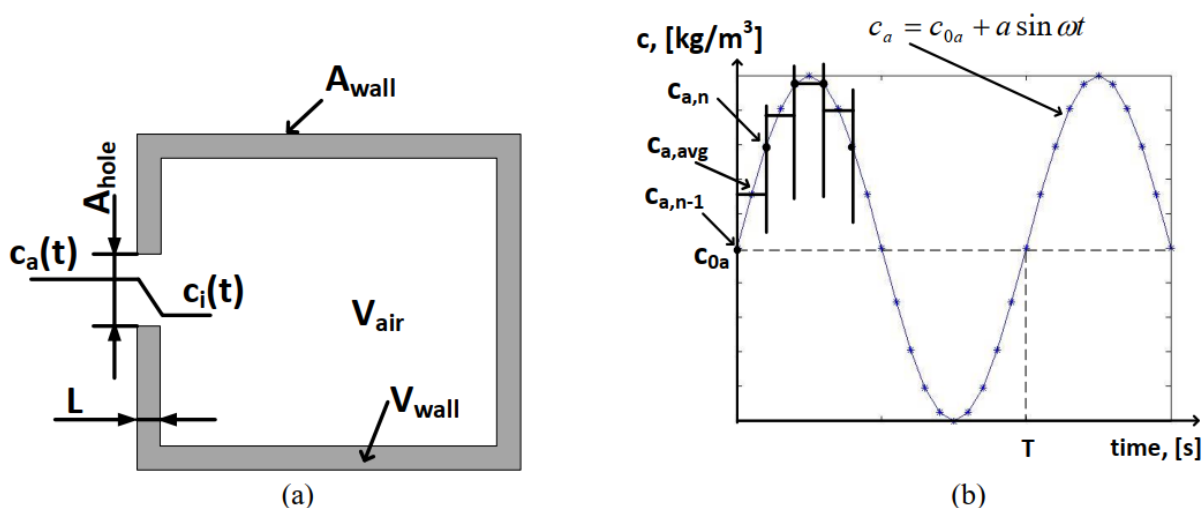
Remiantis masės išsaugojimo dėsniumi, analitinė kvazistabilios būsenos (QSS) Fiko antrojo dėsnio [8] aproksimacija apibrėžiama toliau pateiktoje lygtyje [100]:

$$V_{air} \frac{dc(t)}{dt} = \frac{c_i(t) - c_a}{R_{hole,m}}; \quad (45)$$

čia  $V_{air}$  – ertmės tūris [ $m^3$ ].

Pirmiau pateikta valdančioji paprastoji diferencialinė lygtis (ODE – ordinary differential equation) gaunama dviem drėgmės pernešimo į ertmę atvejais (9-a pav.):

- 1) kai pradinė vandens garų koncentracija viduje  $c_{0i}$  ir pastovi aplinkos vandens garų koncentracija  $c_a$  yra skirtingos vertės;
- 2) kai  $c_a$  nėra pastovi, o  $c_{0i}$  turi pradinę vertę.



9 pav. (a) Korpusas su skylė drėgmei patekti; (b) Aplinkos drėgmės kreivė ( $c_a$ ) ir jos skirstinys į mažus laiko intervalus [100].

Norint modeliuoti drėgmės patekimą į gaubtą, galima taikyti vadinamąjį QSS modelį, laikantis šių prielaidų:

- Į oro advekciją per angą neatsižvelgiama, todėl masė pernešama tik difuzijos būdu.
- Temperatūros pasiskirstymas yra vienalytis ir drėgmės pernešimo metu nekinta.
- Difuzinis srautas angoje arba prie sienos tam tikru metu yra vienalytis ir izotropinis.
- Vidinė vandens garų koncentracija  $c_i$  oro ertmėje uždaroje patalpoje  $V_{air}$  yra vienalytė visoje ertmėje.

#### 4.1.1. Pastovi aplinkos koncentracija

Pirmiausia panagrinėkime iš metalinės medžiagos, pavyzdžiui, aliuminio, pagamintą elektroninį korpusą su anga (9-a pav.). Korpuso tūris užpildytas oru ir per angą sujungtas su pastovia aplinkos atmosfera. Kadangi metalinė medžiaga nepralaidi vandens garams, drėgmė difunduoja tik per angą. Vidinių vandens garų koncentracijos sprendimas ertmėje yra toks:

$$c_i(t) = c_a - (c_a - c_{oi})e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (46)$$

kur laiko konstanta yra

$$\tau = \frac{V_{air}L}{A_{hole}D_{air}} = V_{air}R_{hole,m}; \quad (47)$$

čia  $D_{air}$  – oro difuzijos koeficientas [ $m^2/s$ ],  $V_{air}$  – ertmės tūris [ $m^3$ ],  $c_a$  – vandens garų koncentracija aplinkoje [ $kg/m^3$ ],  $c_i$  – vandens garų koncentracija patalpoje [ $kg/m^3$ ],  $c_{oi}$  – pradinė vandens garų koncentracija patalpoje [ $kg/m^3$ ].

Kai korpusas pagamintas iš polimerinės medžiagos, masės perdavimas vyksta ir per sienes. Šiuo atveju nagrinėjamos neabsorbuojančios sienos, todėl atsiranda papildoma masės pernešimo per sieną varža, kuri prijungiama lygiagrečiai su angos varža. Henrio dėsnis turi būti taikomas siekiant susieti koncentraciją sienelių paviršiuje ir garų koncentraciją ore. Šį ryšį apibrėžia beasmenis pasiskirstymo koeficientas  $K_{sg}$  ir jis yra vienodas abiejose sienos pusėse izoterminėmis sąlygomis. Atsižvelgiant į pralaidžias sienas, efektyviosios laiko konstantos lygtis yra tokia:

$$\tau = V_{air}R_{tot} = \frac{V_{air}L}{A_{hole}D_{air} + A_{wall}K_{sg}D_{wall}}; \quad (48)$$

$$R_{tot} = \frac{R_{wall,m}R_{hole,m}}{R_{wall,m} + R_{hole,m}}, \quad kur \quad R_{wall,m} = \frac{L}{K_{sg}A_{wall}D_{wall}}. \quad (49)$$

Jei sienos yra absorbuojančios, bendroji varža ( $R_{tot}$ ) išlieka tokia pati kaip 49 lygtyje, tačiau tūris 48 lygtyje pasikeis. Darant prielaidą, kad vandens garų koncentracija sienelėje pasiskirsčiusi tiesiškai, bendras tūris yra lygus [23]:

$$V_{tot} = \left( V_{air} + \frac{K_{sg}V_{wall}}{2} \right). \quad (50)$$

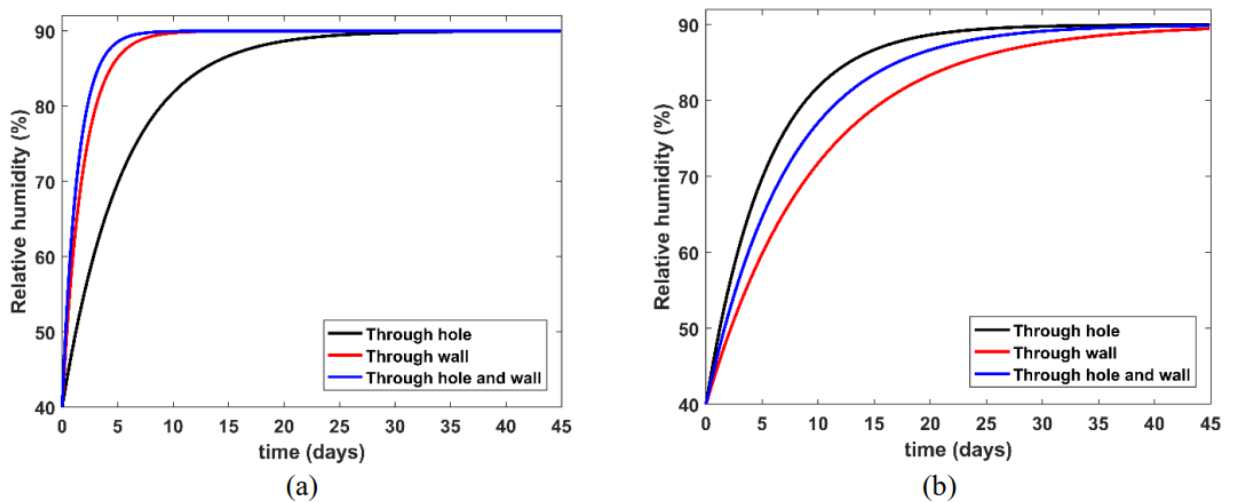
Taigi laiko konstantos lygtis tampa tokia:

$$\tau = V_{tot}R_{tot} = \frac{L(V_{air} + 0,5K_{sg}V_{wall})}{A_{hole}D_{air} + A_{wall}K_{sg}D_{wall}}. \quad (51)$$

Išvedus laiko konstantas pirmiau aptartiems atvejams, drėgmės pernešimo modeliavimas į uždara patalpą. Drėgmės patekimas buvo nagrinėjamas dviem atvejais:

- Neabsorbuojančios vandens garų sienelės.
- Vandens garus sugeriančios sienelės [23].

Abu atvejai pateikiami esant trimis sąlygoms, atitinkančioms drėgmės patekimą tik per angą, tik per sieną ir per angą kartu su siena. Kadangi nagrinėjamų sienelių modeliavimas atliktas izoterminiu atveju, temperatūra visur buvo vienoda (25 °C) [23].



**10 pav.** Drėgmės modeliavimas (a) neabsorbuojančioms sienoms, (b) absorbuojančioms sienoms [23].

Palyginus 10 pav. pateiktus du atvejus matyti, kad drėgmė lėčiausiai patenka per skylę (neabsorbuojančią sienelę) ir elgiasi priešingai nei 10 pav. b) punkte. Iš tikrųjų tai paaiškinama absorbuojančių sienų poveikiu, nes drėgmės skverbimasis yra greitesnis, kai sienoje yra daugiau takų ir joje nesusikaupia vandens garai. Absorbuojančių sienų atveju drėgmės patekimas per sieną yra lėtesnis, nes ji turi sugerti tam tikrą kiekį vandens garų prieš išleisdama juos į vidaus tūrį. Todėl šiuo atveju drėgmė per kiaurymę patenka greičiau nei per abu kelius, t. y. per sieną ir skylę.

#### 4.1.2. Svyruojanti aplinkos koncentracija

Šiame poskyryje nagrinėjama drėgmės koncentracijos uždaroje patalpoje ( $c_i$ ), kurią veikia kintanti aplinkos drėgmė ( $c_a$ ), elgsena. Tikrovėje aplinkos drėgmės pokyčius imituojanti kreivė yra sudėtinga. Taigi, siekiant išvengti sudėtingo modeliavimo, koncentracijos kreivę galima suskirstyti į nedidelius laiko intervalus, kai daroma prielaida, kad koncentracija aplinkoje yra pastovi per nedidelį laiko intervalą ir taip sukuriama kvazistabilios būsenos (QSS) modelis. Siekiant įvertinti drėgmės reakciją į aplinkos drėgmės svyravimus, drėgmei apibūdinti pasirenkama paprasta sinusoidinė funkcija (9-b pav. mėlyna kreivė). Taip galima įvertinti vidutinę pastovią koncentracijos vertę kiekviename laiko intervale kaip [23]:



$$c_{a,avg} = \frac{c_{a,n} + c_{a,n-1}}{2}. \quad (52)$$

Naudojant šią vidutinę koncentraciją, drėgmės pernašos analitinė lygtis šiek tiek modifikuojama į:

$$c_i(t) = c_{a,avg} - (c_{a,avg} - c_{oi,n-1}) e^{\frac{-(t-t_{n-1})}{\tau}}; \quad (53)$$

čia  $c_{a,avg}$  – vidutinė vertė tarp dviejų laiko intervalo taškų [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $c_{oi,n-1}$  – pradinė ankstesnio intervalo koncentracija [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $t_{n-1}$  – bendras laikas po ankstesnio intervalo [s],  $\omega$  – virpesių kampinis dažnis (rad/s),  $a$  – virpesių amplitudė,  $c_{oa}$  – pradinė poslinkio amplitudė [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

Paprasta sinusoidinė funkcija taip pat buvo pasirinkta dėl jos paprastumo ir dėl to, kad egzistuoja 45 lygties uždarnosios formos analitinis sprendinys, kuris naudojamas 53 lygtyje pateiktam modifikuotam analitiniam sprendiniui patvirtinti. Analitinis sprendinys, taikomas aplinkos drėgmės sinusiniam svyravimui, yra toks:

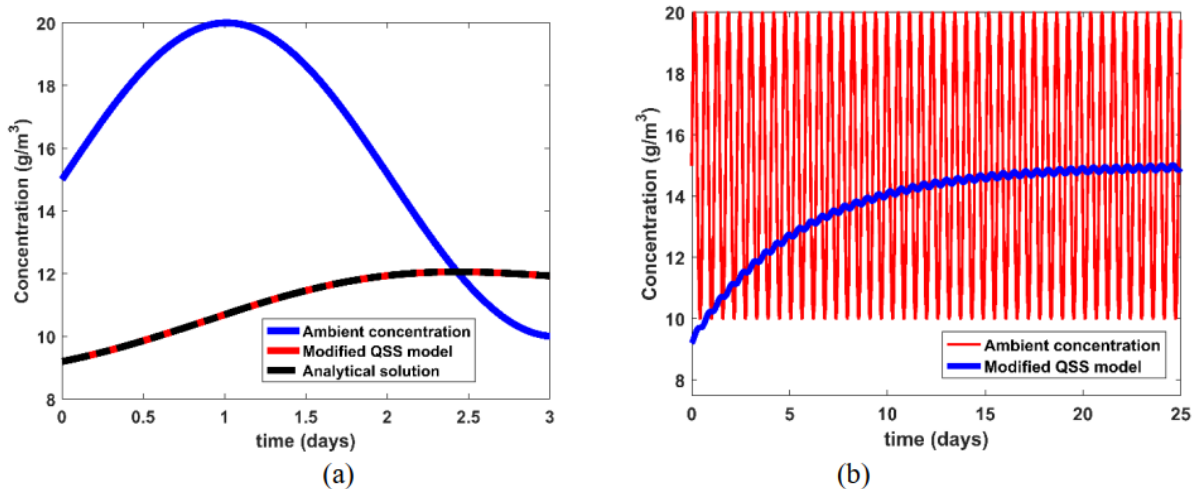
$$c_i(t) = c_{oa} + ((c_{oi} - c_{oa}) + a \sin \varphi \cos \varphi) e^{(-t/\tau)} + a \cos \varphi \sin(\omega t - \varphi). \quad (54)$$

54 lygtį sudaro du nariai: eksponentinis ir trigonometrinis. Ilgo laikotarpio ( $t$ ) atveju eksponentinis narys išnyksta ir 54 lygtis tampa:

$$c_i(t) = c_{oa} + a \cos \varphi \sin(\omega t - \varphi). \quad (55)$$

Tai rodo, kad vidinė koncentracija svyruos tokiu pat dažniu kaip ir aplinkoje, tačiau fazė bus pasislinkusi nuo aplinkos kampu (kitaip tariant, vėlavimas drėgmės reakcija):

$$\varphi = \arccos \frac{1}{\tau \sqrt{\omega^2 + \frac{1}{\tau^2}}} = \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}. \quad (56)$$



**11 pav.** (a) Analitinio sprendimo ir modifikuoto QSS modelio palyginimas [100]; b) Vidinė drėgmės koncentracija, kai  $T=0,57$  dienos ir  $\tau=5,52$  dienos [23].

53 lygtyje pateiktas modifikuotas analitinis sprendimas, kuris buvo patvirtintas 54 lygtyje pateiktu analitiniu sprendimu. Iš 11-a pav. matyti, kad modifikuoto QSS modelio rezultatai ir analitinio sprendinio gerai sutampa [23].

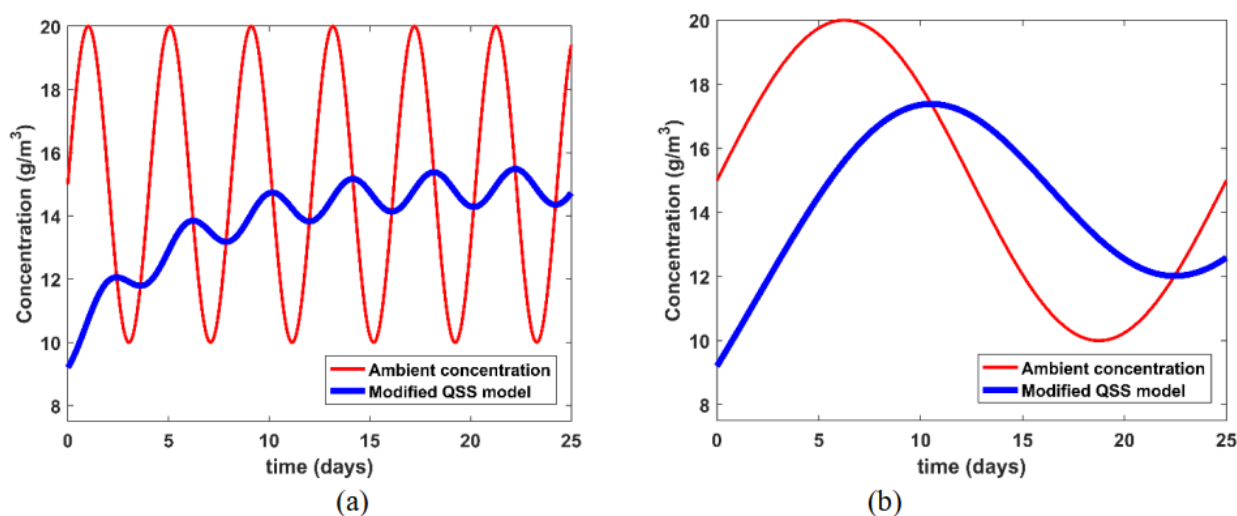
Remiantis (56) lygtimis, kai dažnis yra didelis, palyginti su sistemos laiko konstanta ( $\omega \gg 1/\tau$ ), vidaus drėgmės svyravimai yra labai maži (11-b pav.). Tačiau kai drėgmės pokyčiai yra labai lėti ( $\omega \ll 1/\tau$ ), vidaus drėgmė atitinka aplinkos drėgmės kreivę (12-b pav.). Taigi fazės poslinkis  $\varphi$  kinta nuo 0 iki  $90^\circ$  ir atspindi vidaus drėgmės reakciją, palyginti su aplinkos drėgme [23].

## 4.2. Analizinis antrojo Fiko dėsnio sprendimas

Fiko antrajam dėsnui ir (arba) šilumos laidumo lygčiai spręsti galima taikyti daugelį metodų, pavyzdžiui, kintamųjų atskyrimo metodą, Laplaso transformaciją, konforminį atvaizdavimą ir kt. Šių metodų taikymas sprendžiant antrąjį Fiko dėsnį čia nebus rodomas, nes jie pateikti kitur literatūroje [39, 41]. Šiame poskyryje bus trumpai aprašyti analitiniai sprendiniai, kurie yra naudojami skaitiniams sprendiniam izoterminėmis sąlygomis patvirtinti [23].

### 4.2.1. Plokštelė ant nepralaidaus pagrindo

Nagrinėjant difuzijos uždavinį pusiau begaliniame kietajame kūne su pradine koncentracija  $c_i$  ir pastovia paviršine koncentracija  $c_s$  ir darant prielaidą, kad medžiagos duomenys yra pastovūs, pateikiamas analitinis sprendinys [39-41]:

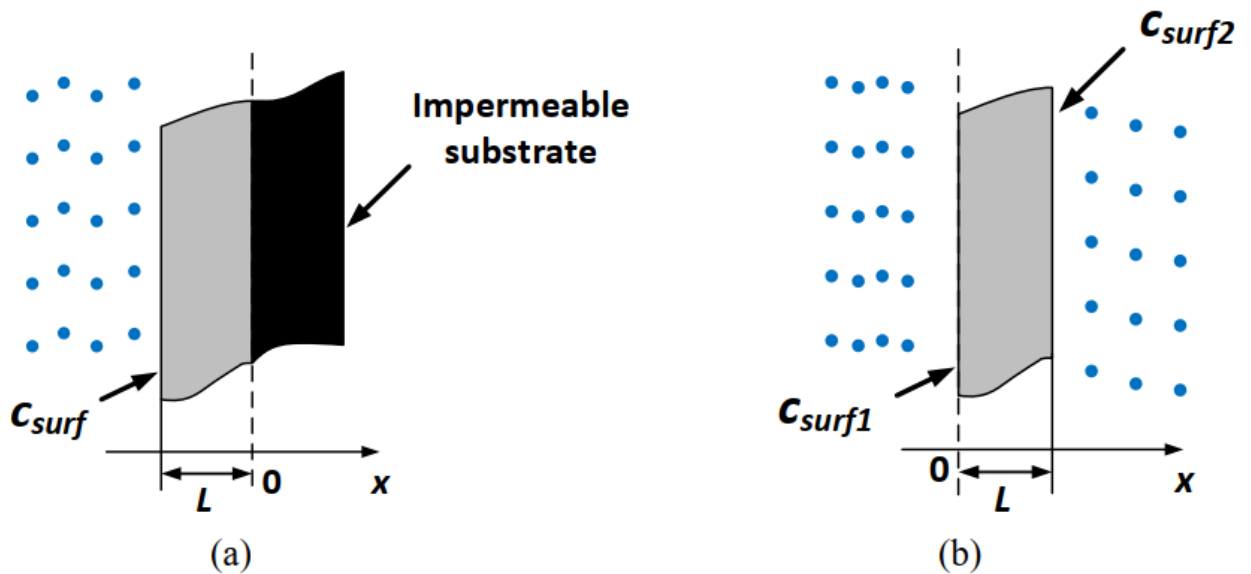


12 pav. a) Vidaus drėgmės koncentracija, kai  $T=4,05$  dienos ir  $\tau=5,52$  dienos; b) Vidaus drėgmės koncentracija, kai  $T=25$  dienos ir  $\tau=5,52$  dienos [23].

$$c(x, t) = c_{surf} + (c_i - c_{surf}) \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right); \quad (57)$$

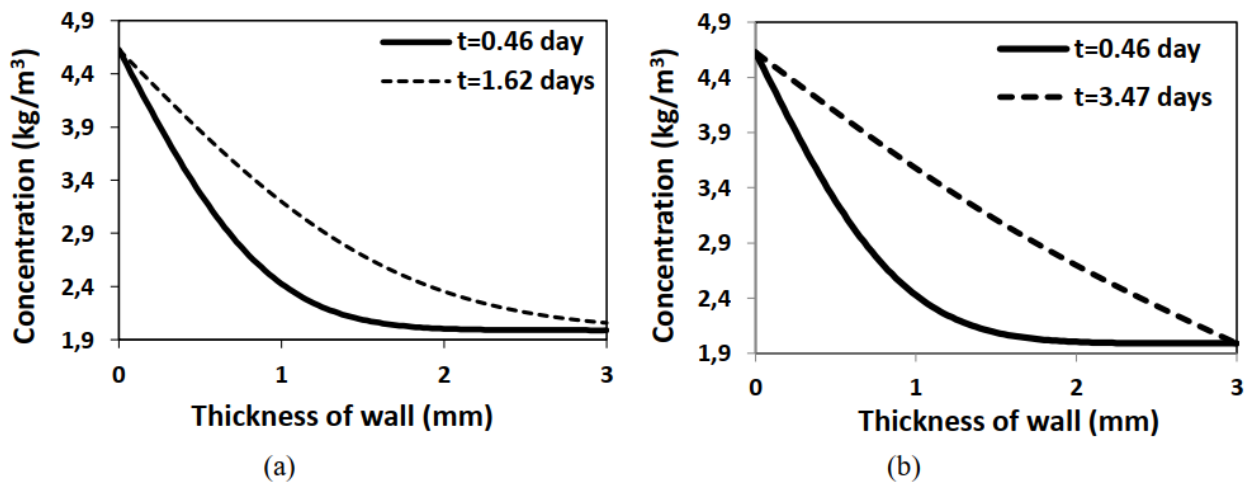
čia  $c_i$  – pradinė koncentracija kietoje medžiagoje [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $t$  – laikas [s],  $x$  – aprašomosios erdvės parametras [m].

Naudojant 57 lygtį apskaičiuojamas koncentracijos pasiskirstymas bet kurioje kietojo kūno vietoje kaip erdvės ir laiko funkcija. Toks analitinis sprendimas gali būti taikomas ir elektronikoje, kai nagrinėjama plokščia plokštelė ant nelaidaus pagrindo (14-a pav.), pvz. pritvirtinta prie varinės plokštelės.



13 pav. (a) plokštelė ant nelaidaus pagrindo; b) plokštelė, kurią iš abiejų pusių veikia skirtinga aplinka [23].

Be to, vandens garų koncentracijos skaičiavimas atliktas 3 mm plokštei, pagamintai iš polikarbonato medžiagos ir pritvirtintai prie nelaidaus pagrindo (14-a pav.) [23].



14 pav. Vandens garų pasiskirstymas, kai a) plokštelė yra ant nelaidaus pagrindo; b) plokštelę iš abiejų pusių veikia skirtinga aplinka [23].

#### 4.2.2. Plokštė, kurią iš šonų veikia skirtinga aplinka

Nagrinėjant 13-b pav. pavaizduotą plokštelę, kuri atskiria dvi aplinkas (dujines atmosferas) su pastoviomis sąlygomis (paprastai abiejose jos pusėse yra begaliniai tūriai su fiksuota paviršiaus koncentracija), antrojo Fiko dėsnio analitinis sprendinys yra toks [41]:

$$c(x, t) = c_{surf1} + (c_{surf2} - c_{surf1}) \frac{x}{L} + (c_{surf2} - c_{surf1}) \frac{2}{\pi} \sum \frac{1}{n} \sin\left(n\pi \frac{x}{L}\right) \exp\left(-n^2\pi^2 \frac{Dt}{L^2}\right). \quad (58)$$

Čia pusiausvyra niekada nepasiekama ir nagrinėjamos nusistovėjusios sąlygos su pastoviu srautu. Vienas iš pavyzdžių, aptinkamų elektronikos srityje, yra kai drėgmei sugerti korpuse naudojamas sausiklis. Šiuo atveju vandens garų koncentracijos skaičiavimai taip pat buvo atlikti tam pačiam atvejui, kaip ir 4.2.1 skirsnyje, tačiau iš dviejų pusių veikiamam dviejų skirtingų aplinkų (14-b pav.) [23].

## 5. Skaičiavimų analizės

Buvo atliekamos dvi analizės. Pirmosios analizės metu paskaičiuotos vandens garo koncentracijos ir rasos taško temperatūros dėžutės viduje, esant nustatytoms aplinkos sąlygoms. Antros analizės metu paskaičiuotos santykinės drėgmės, vandens garo koncentracijos ir masės pasiskirstymai sienelėje kintant laikui.

Visi skaičiavimai buvo atliekami naudojantis Matlab programine įranga.

### 5.1. Pirmoji analizė

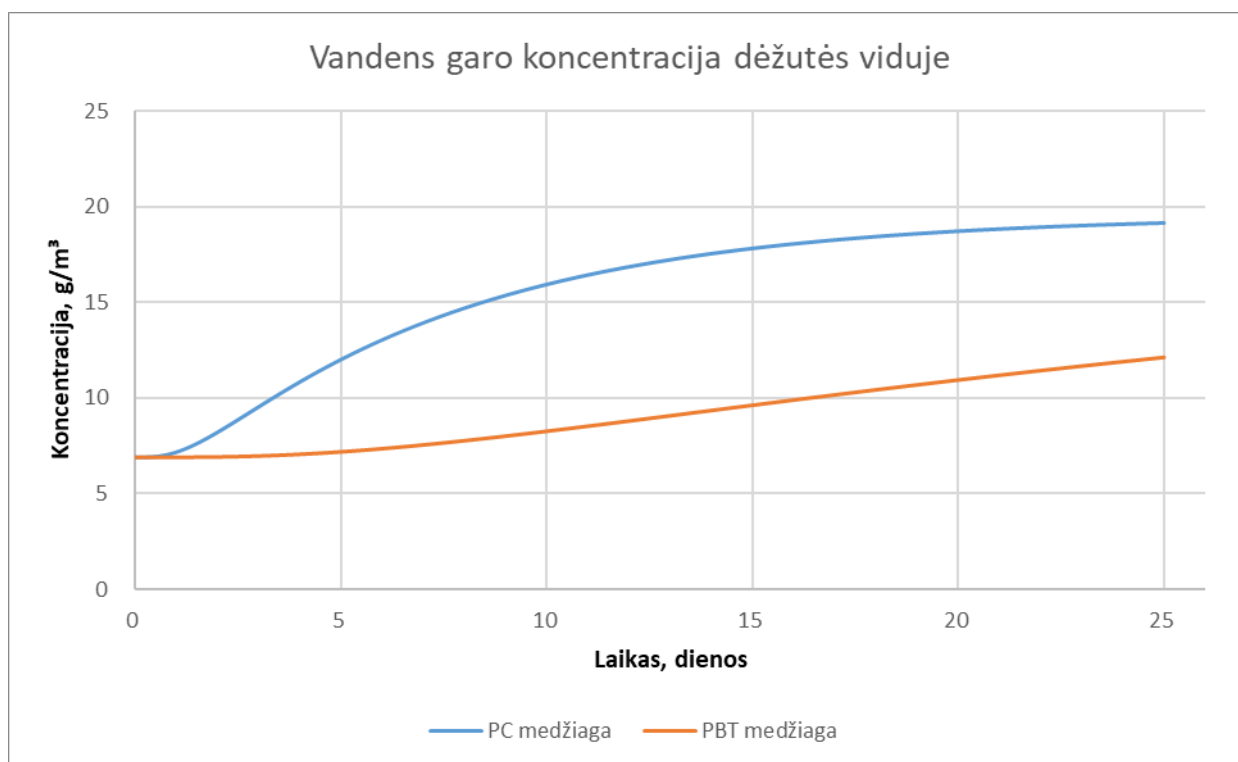
Analizės metu buvo tirtos dvi dėžutės, kurių matmenys yra 10 cm x 10 cm x 10 cm, sienelės storis yra 3 mm. Viena dėžutė yra pagaminta iš PC (polikarbonato), o kita iš PBT (polibutileno tereftalatas) (dėžutės pavyzdys yra pateikiamas 1 priede).

Pradinės skaičiavimo sąlygos: temperatūra 25 °C, drėgmė dėžutės viduje ir sienelėse 30%.

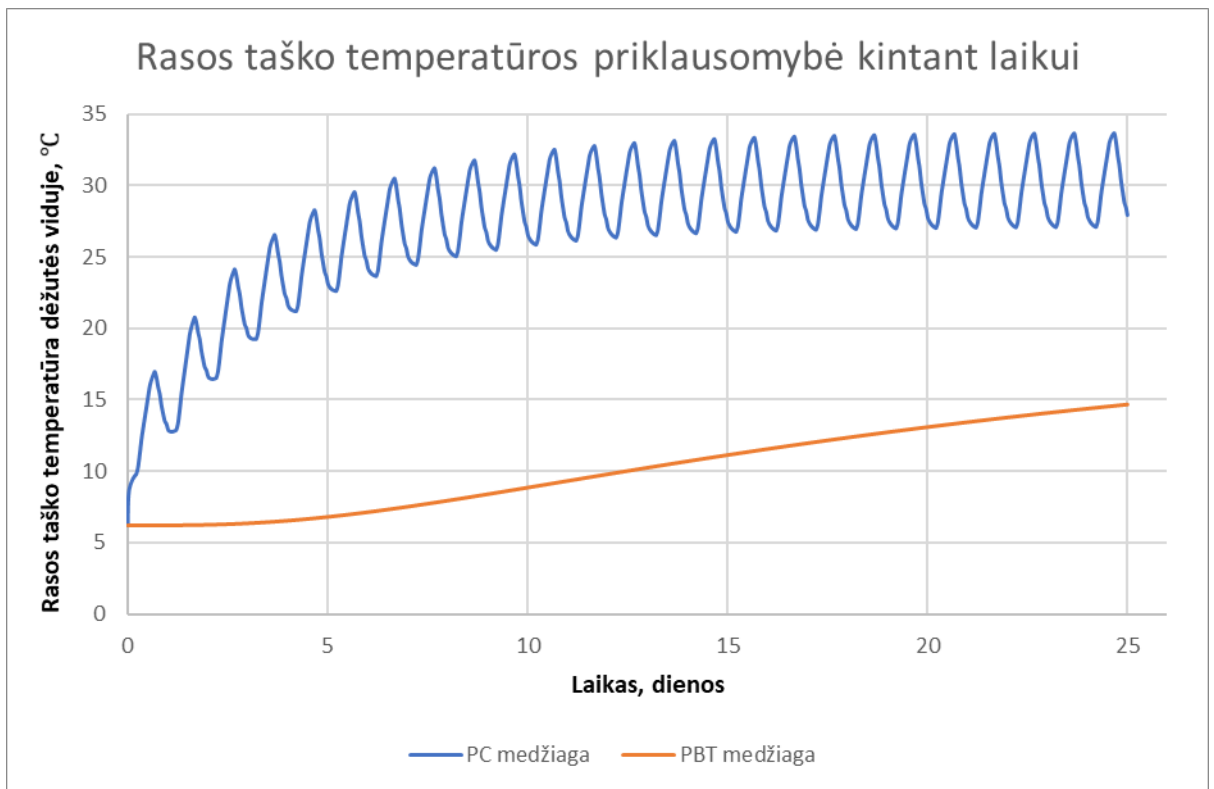
Skaičiavimai buvo atliekami dviem atvejais. Pirmuoju skaičiavimo atveju aplinkos sąlygos yra pastovios (temperatūra 25 °C ir santykinė drėgmė 85 %), o antruoju atveju aplinkos sąlygos yra paimitos iš B3 Stanag [101] klimatinių sąlygų (temperatūra 31 °C, santykinė drėgmė 88 %).

#### 5.1.1. Rezultatų apžvalga esant pastovioms aplinkos sąlygoms

Atsižvelgiant į gautus rezultatus 15 pav., pastebime, kad kintant laikui didėja vandens garo koncentracija kiekvienoje dėžutėje. Tačiau dėžutės pagamintos iš PC medžiagos tiesė didėja pagal logaritminę kreivę ir ties 25 diena pasiekia 19,16 g/m<sup>3</sup> vandens garo koncentraciją medžiagoje. Dėžutės, kuri yra pagaminta iš PBT medžiagos, vandens garo koncentracijos didėjimo koncentracija yra labiau tiesiška ir 25 dieną ji siekia 12,12 g/m<sup>3</sup>.

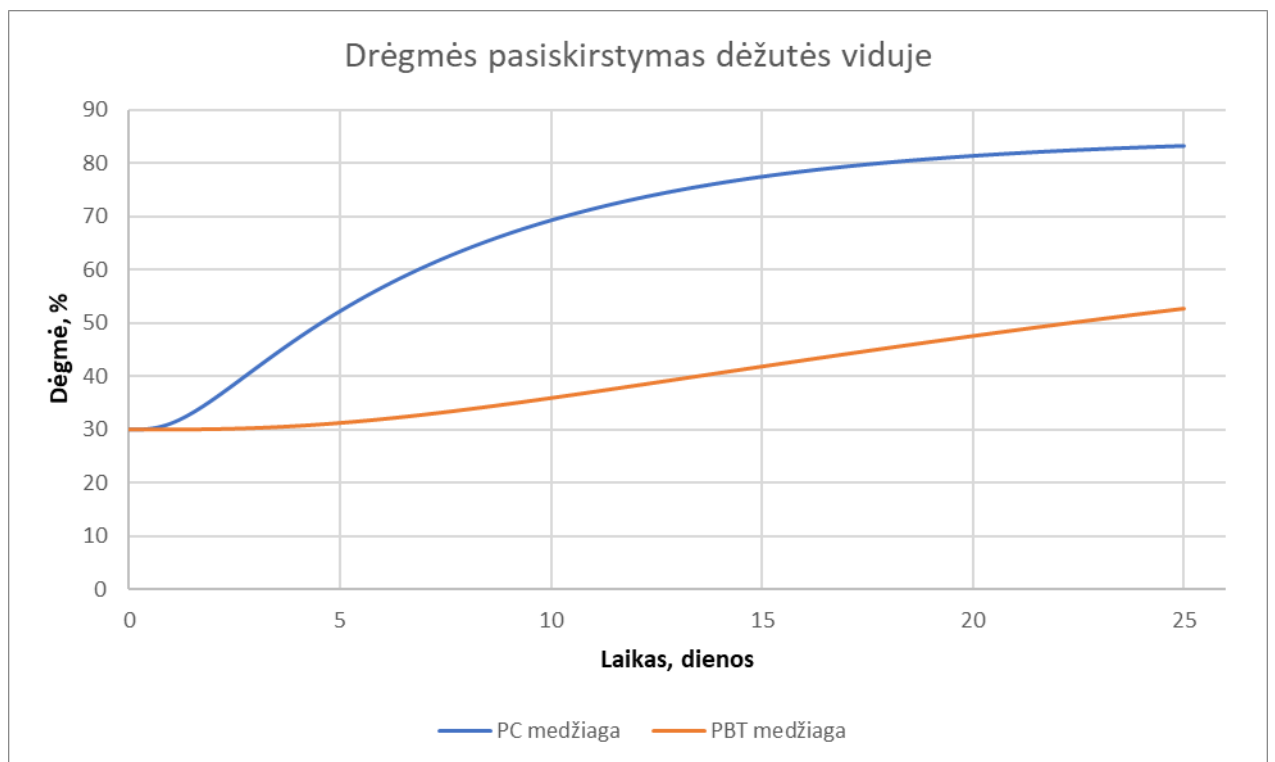


15 pav. Vandens garo koncentracijos kitimas skirtingų medžiagų dėžučių viduje.



**16 pav.** Rasos taško temperatūra skirtingų medžiagų dėžutėse.

16 paveikslėlyje matome kaip kita rasos taško temperatūra skirtingų medžiagų dėžutėse kintant laikui. Kaip ir 15 pav. pastebime, kad iš PC medžiagos pagamintoje dėžutėje kinta pagal logaritminę kreivę, tačiau turi ir svyravimų. Iš gautų rezultatų galime išskirti maksimalią rasos taško temperatūrą, kuri



**17 pav.** Drėgmės pasiskirstymas dėžutės viduje kintant laikui.

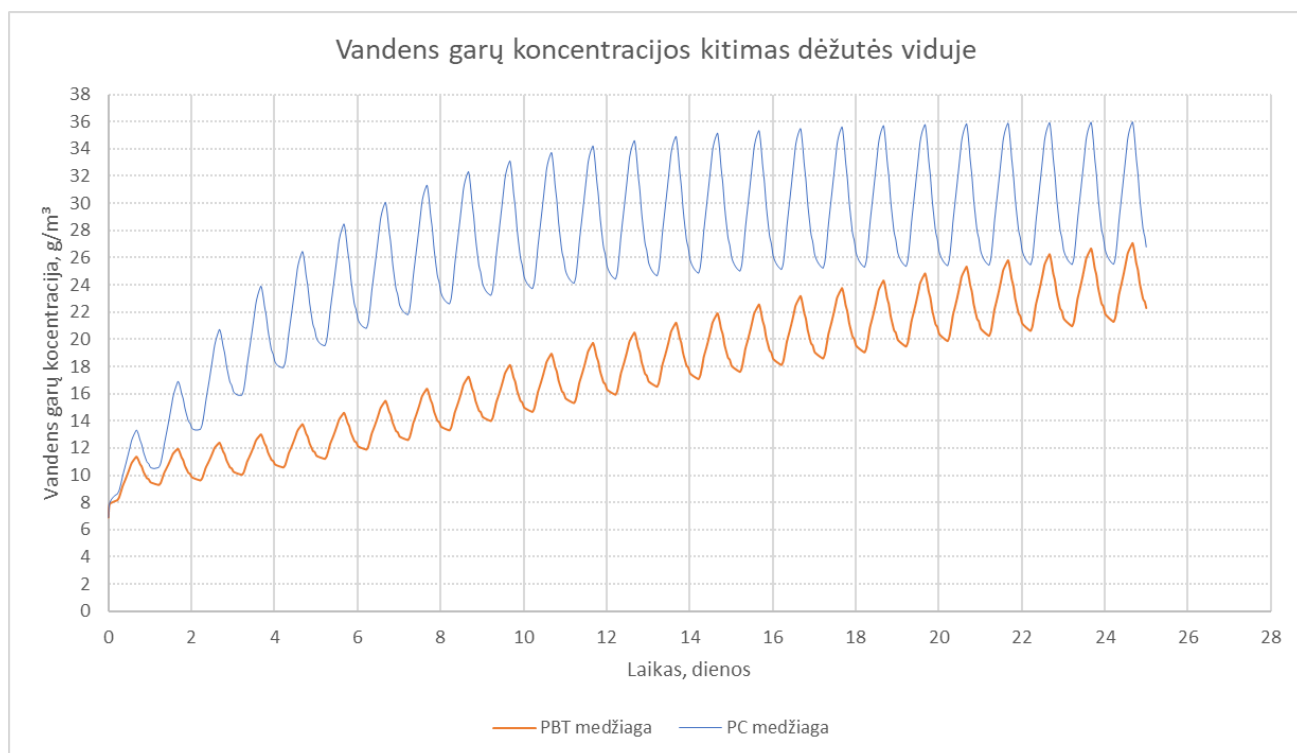
yra lygi 33,59 °C. O iš PBT medžiagos pagamintoje dėžutėje rasos taško temperatūra kinta beveik tiesiškai ir maksimali gauta temperatūra yra lygi 14,67 °C.

Nors pradinėse sąlygos buvo paminėta, kad drėgmė dėžutės viduje ir sienelėse yra 30 %, tačiau skaičiavimų metu ji kito. Tai gerai yra atvaizduojama 17 pav.

17 paveikslėlyje matome, kad santykinė drėgmė, iš PC pagamintos medžiagos, dėžutėje padidėja nuo 30 % iki 83,3 %, o iš PBT medžiagos pagamintoje dėžutėje padidėja nuo 30 % iki 52,7 %. Toks žymus santykinės drėgmės skirtumas tarp medžiagų yra dėl to, kad tiek PC medžiagos, PBT medžiagos savybės yra skirtingos.

### 5.1.2. Rezultatų apžvalga esant B3 Stanag aplinkos sąlygoms

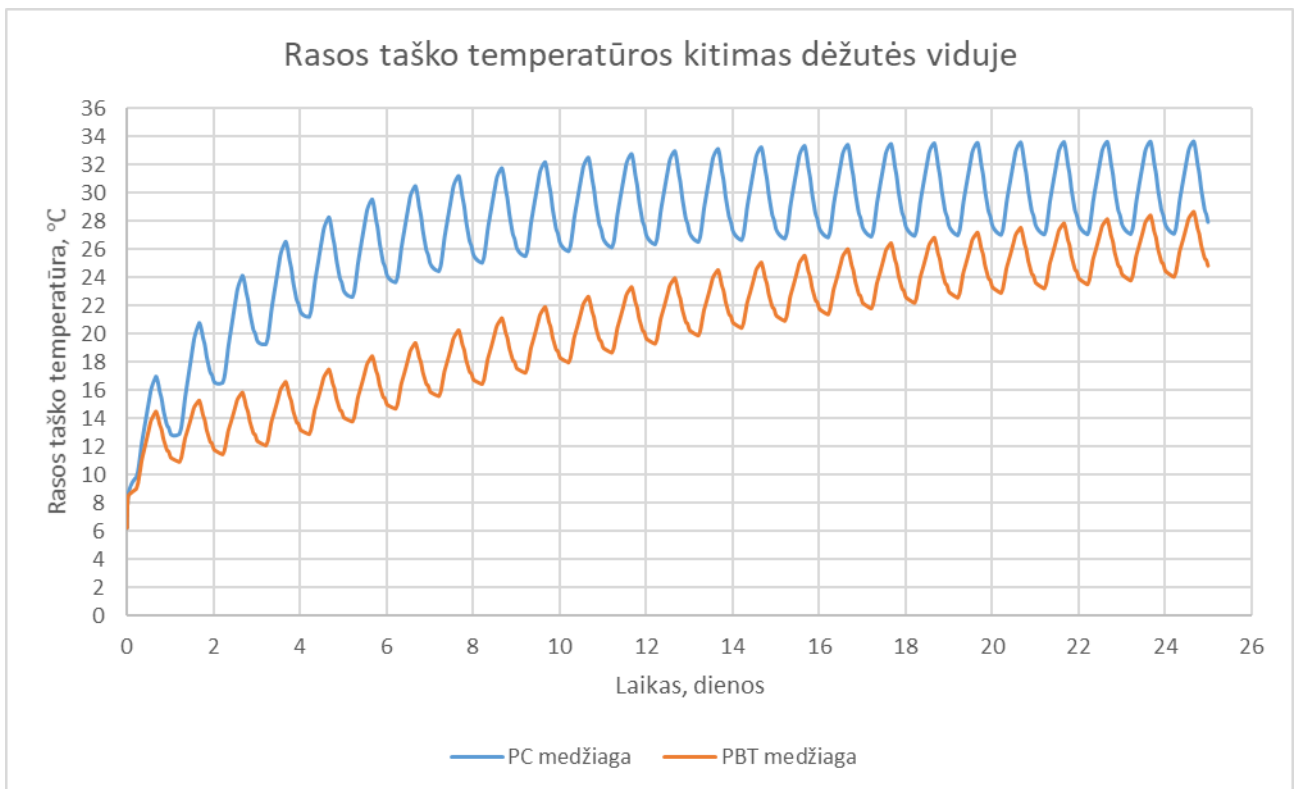
18 paveikslėlyje yra pateikiama vandens garų koncentracija skirtingos medžiagos dėžutėse esant 31 °C temperatūrai ir 88 % aplinkos santykinėi drėgmei. Matome, kad gauti rezultatai yra panašūs į 15 pav. pateiktus, nes kreivių kitimo priklausomybės lieka tokios pačios (logaritminė ir tiesinė), tik atsiranda kreivių bangavimai, kas leidžia suprasti, kad vandens garų koncentracija per parą pasiekia ir maksimumą, ir minimumą.



**18 pav.** Vandens garų koncentracijos kitimas skirtingų medžiagų dėžutėse.

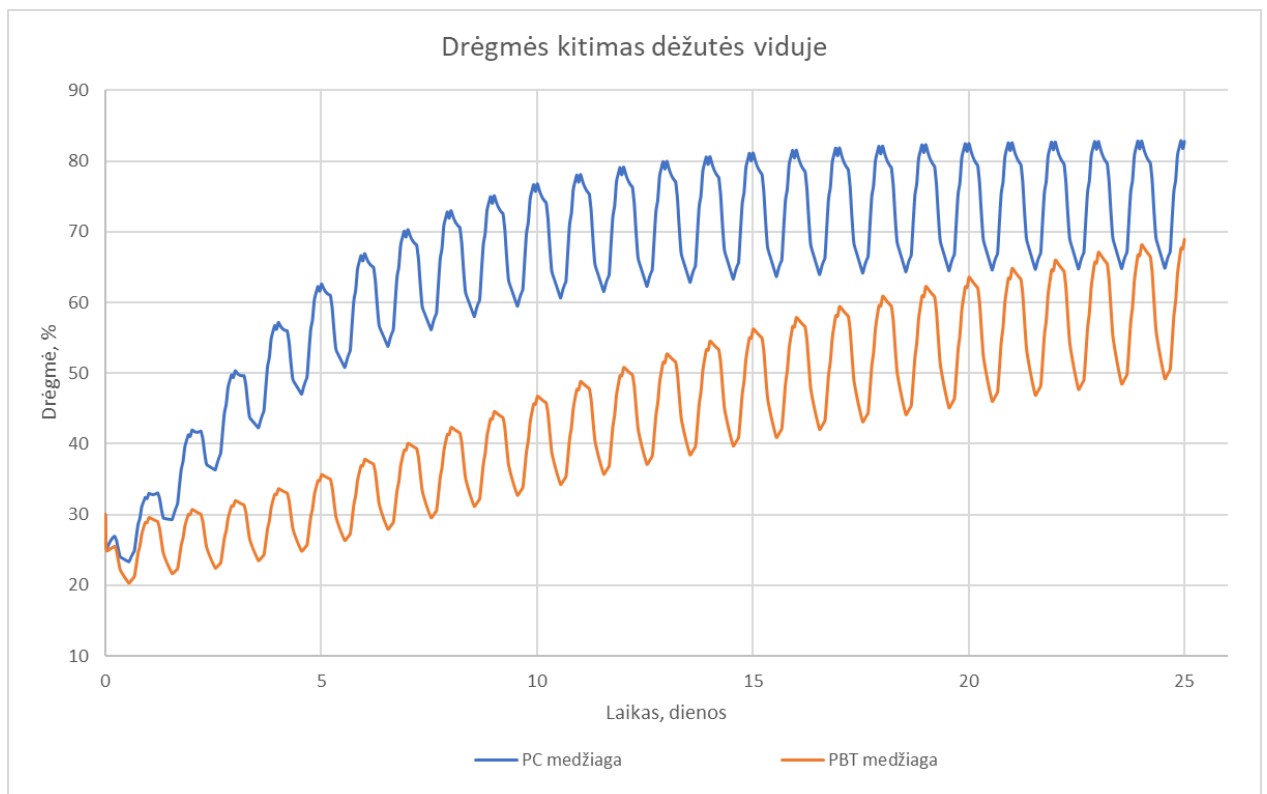
Rasos taško priklausomybė nuo laiko yra pateikiama 19 pav. Šiame grafike yra pastebima panaši tiesių kitimo tendencija kaip ir 18 pav. Iš PC medžiagos pagamintos dėžutės rasos taško temperatūra viduje pakinta nuo 6 °C iki 32,98 °C, o iš PBT pagamintos medžiagos – pakinta nuo 6 °C iki 27,65 °C.

20 paveikslėlyje yra pateikiama drėgmės kitimas dėžučių viduje. Pradinėse sąlygos buvo paminėta, kad drėgmė dėžutės viduje ir sienelėse yra 30 %, tačiau eksperimento metu ji kito, kaip yra atvaizduota 20 pav.



**19 pav.** Rasos taško priklausomybė kintant laikui skirtingose medžiagose.

20 paveikslėlyje matome, kad drėgmė, iš PC pagamintos medžiagos, dėžutėje padidėja nuo 30 % iki 82,77 %, o iš PBT medžiagos pagamintoje dėžutėje padidėja nuo 30 % iki 68,92 %. Toks žymus



**20 pav.** Drėgmės kitimas dėžutės viduje, kintant laikui.



drėgmės skirtumas tarp medžiagų yra dėl to, kad tiek PC medžiagos, PBT medžiagos savybės yra skirtingos.

## 5.2. Antroji analizė

Antrosios analizės metu yra paskaičiuota vandens garų absorbcija į plastikinę plokštelę, kurios matmenys yra 5 cm x 5 cm, sienelės storis yra 3 mm (plokštelės pavyzdys pateikiamas 2 priede).

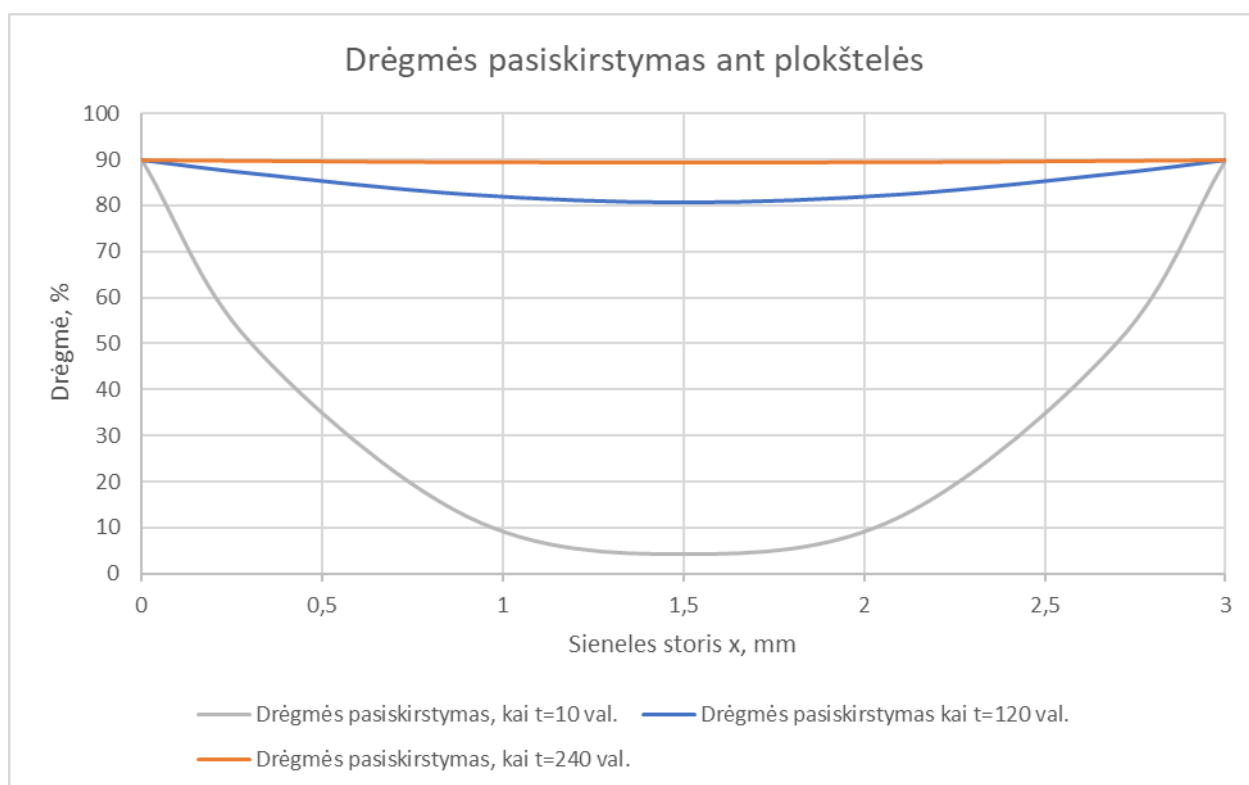
Aplinkos sąlygos buvo 25 °C temperatūra ir santykinė drėgmė aplinkoje yra 90 %.

Pradinės sąlygos: sienelė laikoma sausa pradžioje, todėl pradžioje drėgmė yra lygi 0 %. Pradinė temperatūra buvo taip pat lygi 25 °C.

Toks skaičiavimas buvo taikomas jau mūsų anksčiau aptartoms ir skaičiavimuose naudotoms medžiagoms PC ir PBT.

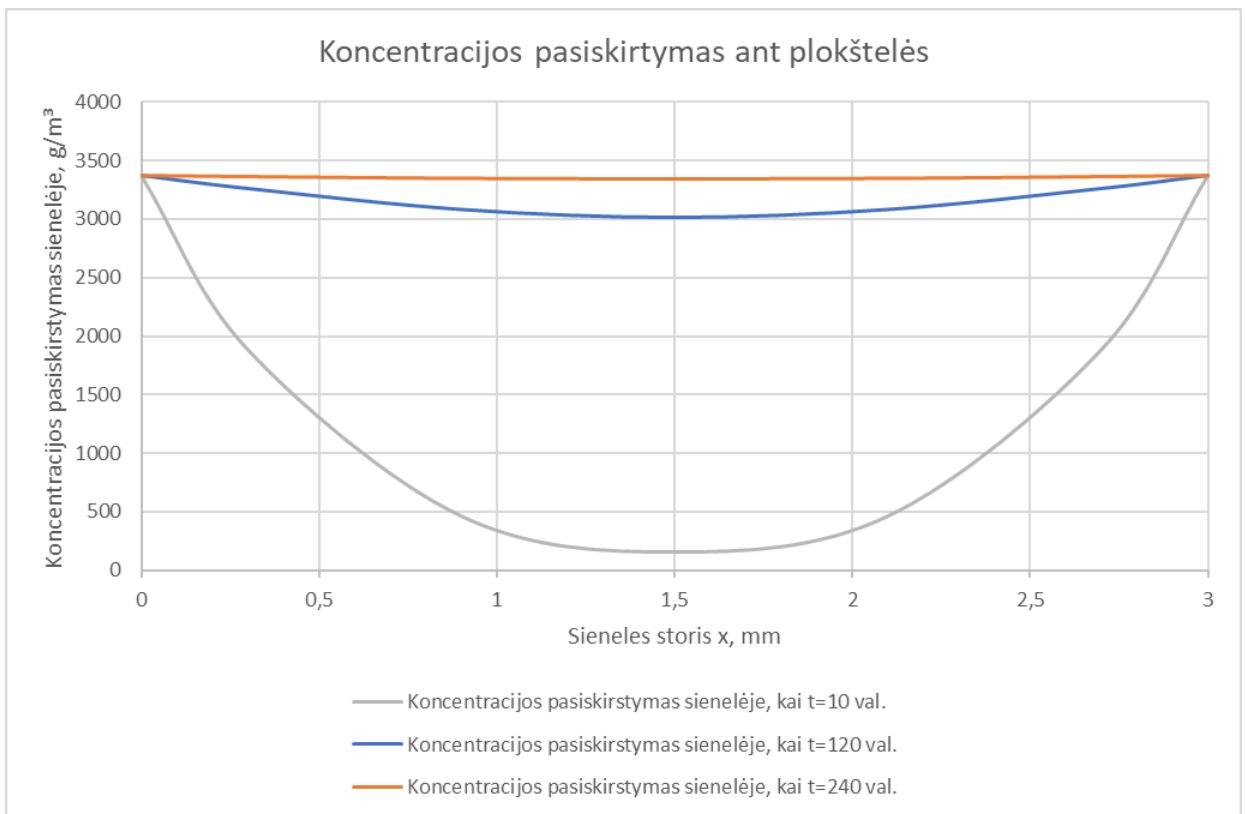
### 5.2.1. Skaičiavimai atlikti su PC plastikine plokšte

21 paveikslėlyje yra pateikiamas drėgmės pasiskirstymas ant PC plastikinės plokštelės tam tiktu laiku.



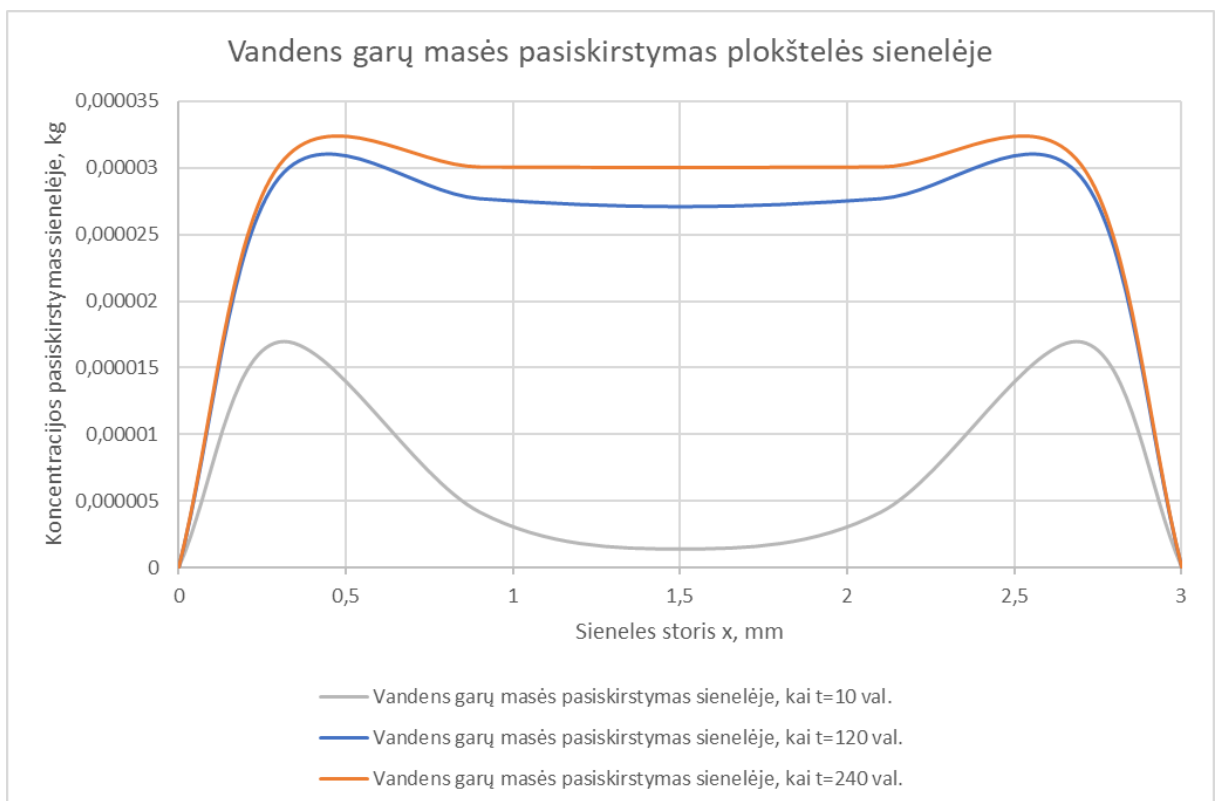
**21 pav.** Drėgmės pasiskirstymas PC plastmasinės plokštelės sienelėje.

Iš 21 pav. matome, kad didžiausia drėgmė yra ant visos plokštelės, kai plokštelė, mūsų aprašytoje aplinkoje, prabūna ilgiausiai, 240 valandų. Kai plokštelė, mūsų jau minėtomis aplinkos sąlygomis, praleidžia 10 val., matome, kad didžiausią drėgmę turi plokštelės kraštai. O plokštelės vidurys lieka mažiausiai paveiktas drėgmės. Todėl galime daryti prielaidą, kad kuo ilgiau laiko plokštelė praleidžia tam tikroje aplinkoje, šiuo atveju 90 % santykinės drėgmės aplinkoje, tuo labiau ji yra veikiamą aplinkos ir pakinta jos savybės.



22 pav. Vandens garų koncentracijos pasiskirstymas PC plokštelės sienelėje.

22 paveikslėlyje yra pateikiama vandens garų koncentracijos pasiskirstymas PC plokštelėje. Iš pateikto grafiko matome, kad kai plokštelė, nurodytoje aplinkoje, išbūna 240 valandų vandens garų koncentracija yra vienoda visos plokštelės storįje ( $3345 \text{ g/m}^3$ ). Kai plokštelė išbūna 10 valandų,



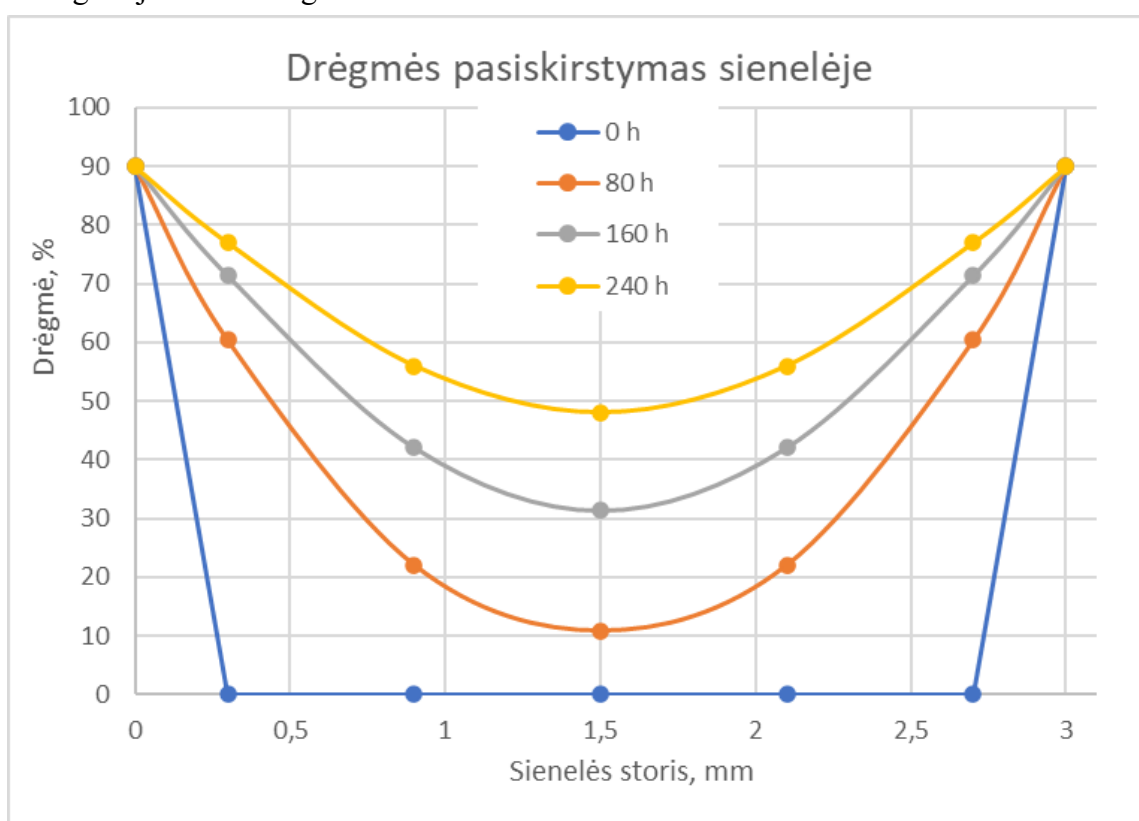
23 pav. Vandens garų masės pasiskirstymas PC plokštelės sienelėje.

plokštelės kraštuose koncentracija yra didžiausia ( $3345 \text{ g/m}^3$ ), o ties plokštelės viduriu išlieka mažiausia vandens garų koncentracija ( $153,5 \text{ g/m}^3$ ).

23 paveikslėlyje pateikiama vandens garų masės pasiskirstymas PC plokštelės sienelėje. Šis grafikas yra kitokios tendencijos nei prieš tai aptarti. Pastebima, kad kuo ilgiau plokštelė praleidžia nurodytoje aplinkoje, tuo labiau ji yra paveikiama aplinkos. Šiuo atveju, visais laiko intervalais, ties plokštelės kraštais yra matomas vandens garų masės padidėjimas, nei plokštelės viduryje. Kai PC plokštelė praleidžia nurodytoje aplinkoje 240 val., ties plokštelės kraštais vandens garų masė yra lygi  $0,0325 \text{ g}$ , o plokštelės viduryje –  $0,03 \text{ g}$ . Kai PC plokštelė praleidžia nurodytoje aplinkoje 10 val., ties plokštelės kraštais vandens garų masė yra lygi  $0,017 \text{ g}$ , o plokštelės viduryje –  $0,002 \text{ g}$ .

### 5.2.2. Skaičiavimai atlikti su PBT plastikine plokštele

Pradinės skaičiavimo sąlygos išlieka tokios pačios, kaip yra aprašyta 5.2. poskyryje, tik šiuo atveju keičiasi nagrinėjama medžiaga.

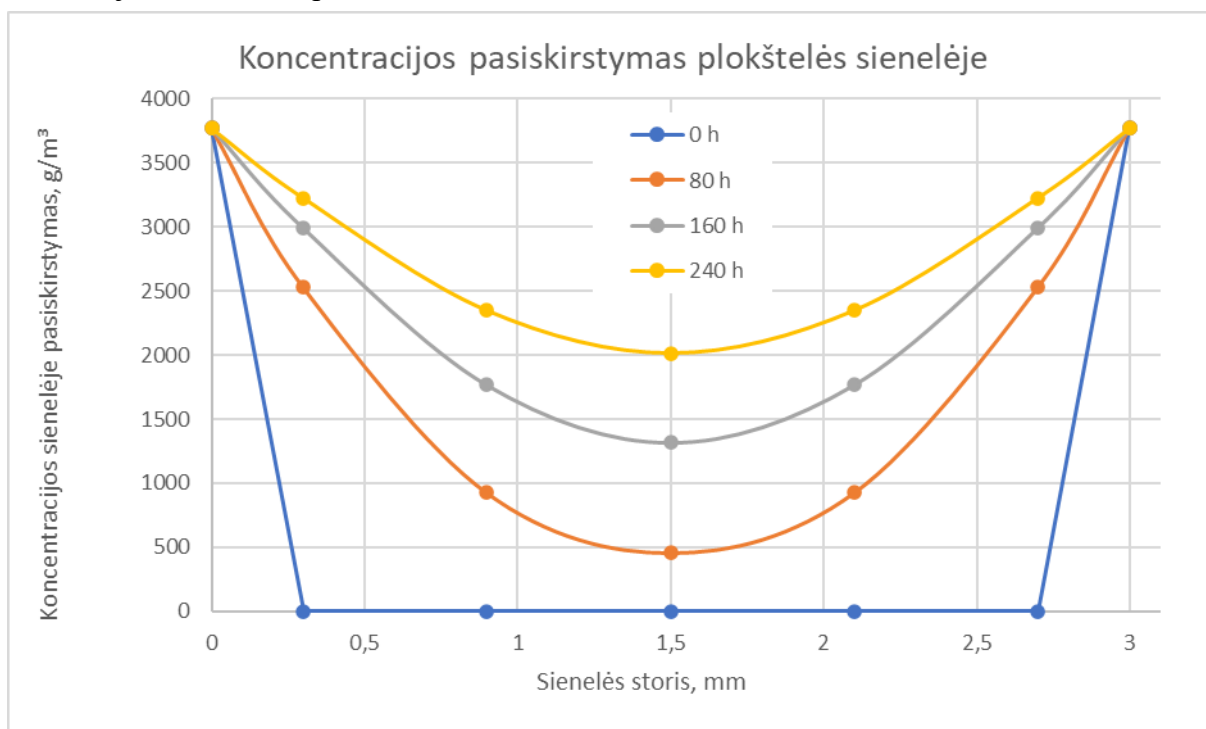


24 pav. Drėgmės pasiskirstymas PBT plokštelės sienelėje.

24 paveikslėlyje yra pateikiamas drėgmės pasiskirstymas PBT plokštelės sienelėje. Iš pateikto grafiko matome, kad kai plokštelė išbūna ilgiausiai nurodytoje aplinkoje, 240 val., didžiausia drėgmės koncentracija išlieka ties plokštelės kraštais (90 %), o artėjant ties plokštelės viduriu, drėgmė mažėja (48 %).

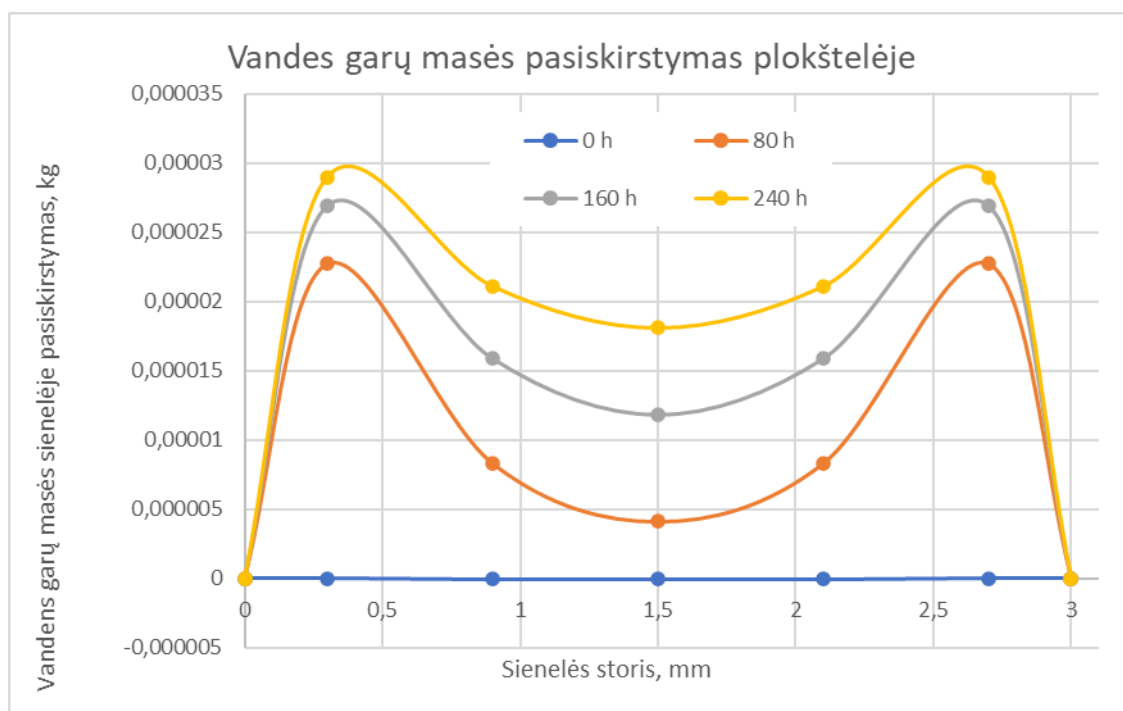
25 paveikslėlyje yra pateikiama vandens garų koncentracijos pasiskirstymas PBT plokštelėje. Iš pateikto grafiko matome, kad kai plokštelė, nurodytoje aplinkoje, išbūna 240 valandų vandens garų koncentracija Ties plokštelės kraštais yra didžiausia ir siekia  $3771 \text{ g/m}^3$ , o viduryje ji yra mažiausia –  $2011,9 \text{ g/m}^3$ . Galime pastebėti, kad kuo plokštelė trumpiau išbūna nurodytoje aplinkoje, tuo

mažesnė vandens garų koncentracija plokštelės viduryje, nes plokštelės kraštuose visais laiko tarpais koncentracija išlieka tokia pati.



25 pav. Vandens garų koncentracijos pasiskirstymas PBT plokštelės sienelėje.

26 paveikslėlyje pateikiama vandens garų masės pasiskirstymas PBT plokštelės sienelėje. Pastebima, kad kuo ilgiau plokštelė praleidžia nurodytoje aplinkoje, tuo labiau ji yra paveikiama aplinkos. Šiuo atveju, visais laiko intervalais, ties plokštelės kraštais yra matomas vandens garų masės padidėjimas, o plokštelės viduryje – žymus sumažėjimas. Kai plokštelė praleidžia nurodytoje aplinkoje 240 val., plokštelės kraštuose vandens garų masė yra lygi 0,03 g, o plokštelės viduryje – 0,018 g.



26 pav. Vandens garų masės pasiskirstymas PBT plokštelės sienelėje.

Iš atliktų skaičiavimų galime daryti prielaidą, jog iš PBT medžiagos pagaminta plokštelė yra labiau atspari drėgmei, nei iš PC medžiagos pagaminta plokštelė. Nes PBT medžiaga sugeria mažiau vandens garų (0,03 g ir 0,018 g), nei PC medžiaga (0,0325 g ir 0,03 g), kaip parodyta 23 ir 26 paveikslėliuose. Lyginant dėžutes, matome, kad PBT medžiagos pagaminta dėžutė yra labiau tinkamesnė naudoti elektronikos prietaisams, nes vandens garų koncentracija dėžutės viduje yra mažesnė (12,12 g/m<sup>3</sup> ir 27 g/m<sup>3</sup>), nei iš PC medžiagos pagamintoje dėžutėje (19,16 g/m<sup>3</sup> ir 36 g/m<sup>3</sup>), kaip parodyta 15 ir 18 paveikslėliuose.

## Išvados

Darbo metu buvo lyginamos dvi polimerinės medžiagos PC ir PBT. Pirmu atveju skaičiavimams buvo naudojamos dėžutės pagamintos iš PC ir PBT medžiagų. Antru atveju skaičiavimams buvo naudojamos plastikinės plokštelės iš PC ir PBT medžiagų.

1. Tirtose dėžutėse, esant pastovioms aplinkos sąlygoms, vandens garų koncentracija PC medžiagos dėžutės viduje padidėjo nuo  $6,9 \text{ g/m}^3$  iki  $19,16 \text{ g/m}^3$ , o PBT – nuo  $6,9 \text{ g/m}^3$  iki  $12,12 \text{ g/m}^3$ . Esant B3 Stanag klimato sąlygoms vandens garų koncentracija kito panašiai, PC medžiagos dėžutėje padidėjo nuo  $6,9 \text{ g/m}^3$  iki  $36 \text{ g/m}^3$ , o PBT – nuo  $6,9 \text{ g/m}^3$  iki  $27 \text{ g/m}^3$ .
2. Esant pastovioms aplinkos sąlygoms, rasos taško temperatūra PC medžiagos dėžutės viduje padidėjo nuo  $6,2 \text{ }^\circ\text{C}$  iki  $33,59 \text{ }^\circ\text{C}$ , o PBT – nuo  $6,2 \text{ }^\circ\text{C}$  iki  $14,67 \text{ }^\circ\text{C}$ . Esant B3 Stanag klimato sąlygoms rasos taško temperatūra kito panašiai, PC medžiagos dėžutėje padidėjo nuo  $6,2 \text{ }^\circ\text{C}$  iki  $32,98 \text{ }^\circ\text{C}$ , o PBT – nuo  $6,2 \text{ }^\circ\text{C}$  iki  $27,65 \text{ }^\circ\text{C}$ .
3. Tirtose dėžutėse, esant pastovioms aplinkos sąlygoms, drėgmė PC medžiagos dėžutėje padidėjo nuo 30 % iki 83,3 %, o PBT – nuo 30 % iki 52,7 %. O esant B3 Stanag klimato sąlygoms drėgmė kito panašiai, PC medžiagos dėžutėje padidėjo nuo 30 % iki 82,77 %, o PBT – nuo 30 % iki 68,92 %.
4. Naudojant skaičiavimams plokšteles buvo pastebėta, kad drėgmės pasiskirstymas PC plokštelės sienelėje, praėjus maksimaliam tyrimo laikui (240 val.), yra lygus nustatytos aplinkos santykinei drėgmei, 90 %. Drėgmės pasiskirstymas PBT plokštelės sienelėje, praėjus maksimaliam tyrimo laikui (240 val.), plokštelės kraštuose yra lygus 90 %, o plokštelės viduryje – 48 %.
5. Vandens garų koncentracijos pasiskirstymas PC plokštelės sienelėje, praėjus maksimaliam tyrimo laikui (240 val.), per visą plokštelės storį yra vienodas –  $3345 \text{ g/m}^3$ . PBT plokštelės sienelėje vandens garų koncentracijos pasiskirstymas nėra toks pat, kaip PC plokštelėje. Čia plokštelės kraštuose yra maksimali koncentracija –  $3771 \text{ g/m}^3$ , o viduryje ji yra lygi  $2011,9 \text{ g/m}^3$ .
6. Vandens garų masė PC plokštelės sienelės kraštuose yra lygis  $0,0325 \text{ g}$ , o plokštelės viduryje –  $0,03 \text{ g}$ . PBT plokštelės sienelės kraštuose vandens garų masė –  $0,03 \text{ g}$ , o plokštelės viduryje –  $0,018 \text{ g}$ .

## Literatūros sąrašas

1. *A&C Plastics, INS* [interaktyvūs]. 2022 [žiūrėta 2022-04-04.]. Prieiga per: <https://www.acplasticsinc.com/informationcenter/r/guide-to-plastics-for-electronic-enclosures>
2. *Baytech plastics* [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-04-04.]. Prieiga per: [https://www-baytechplastics-com.translate.google.com/most-common-compounds-used-for-plastic-electronic-enclosure-manufacturing/?x\\_tr\\_sl=en&x\\_tr\\_tl=lt&x\\_tr\\_hl=lt&x\\_tr\\_pto=sc](https://www-baytechplastics-com.translate.google.com/most-common-compounds-used-for-plastic-electronic-enclosure-manufacturing/?x_tr_sl=en&x_tr_tl=lt&x_tr_hl=lt&x_tr_pto=sc)
3. Ambat, R., Jensen, S. G., Møller, P., *J. Electrochem. Soc.* 6(24), 17-28 (2008).
4. Hoge, C.E. Corrosion Criteria for Electronic Packaging. Part I - A framework for Corrosion of Integrated Circuits. *IEEE Trans. Comp. Hybrids Manu. Techn. Vol.* 13. nr. 4, 1990.
5. Minzari, D., Jellesen, M. S., Møller, P., Ambat, R. On the mechanism of electrochemical migration of tin. *Corrosion Science.* 2010, nr. 53, 3366.
6. Jellesen, M. S., Minzari, D., Rathinavelu, U., Møller, P., and Ambat, R. Investigation of electronic corrosion at devices level. *ECS Transactions.* 2010, 25, 1-14.
7. Jellesen, M. S., Minzari, D., Rathinavelu, U., Møller, P., and Ambat, R. Solder flux residue induced corrosion failure of an electronic add-on device. *Engineering Failure Analysis.* 2010, nr. 17, 1263.
8. Tencer, M. Moisture ingress into Nonhermetic enclosures and packages. A quasi-steady state model for diffusion and attenuation of ambient humidity variations. In *Proceedings of the 44th International Conference on Electronic Components and Technology.* 1994, 196-209.
9. Punch, J., Grimes, R., Heaslip, G., Galkin, T., Vakevainen, K., Kyhkynen, V., Elonen, E. Transient hygrothermal behavior of portable electronics. In *Proceedings of the 6th International Conference on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and MicroSystems, EuroSimE.* 2005, 398-405.
10. Jacobsen, J. B., Peter Krog, J., Hjarbæk Holm, A., Rimestad, L., Riis, A. Climate protective Packaging. *IEEE Industrial Electronics Magazine.* 2014, 8, 51-59.
11. Qi, H., Ganesan, S., Pecht, M. No-fault-found and intermittent failures in electronics products. *Microelectronics Reliability.* 2008, 48, 663.
12. Hal Greenhouse. Hermeticity of Electronic Packages. 2nd Edition. 2011, 360.
13. Perkins, K. L., Licari, J. J., Buckelew, R. L. Investigation of moisture effects on selected microelectronic devices. In: *Proc. 1978ISHM Symposium.*
14. Luo and Wong, C, P. Fundamental study on moisture absorption in epoxy for electronic application. *Proc. Of 2001 International Symposium on Advanced Packaging Materials.* 293.
15. Meinhardt, M., Leonavicius, V., Flannery, J., OA Mathuna, S. C. Impact of power electronics packaging on the reliability of grid connected photovoltaic converters for outdoor. *Microelectronics Reliability.* 1999, nr. 39, 1461.
16. Sinclair, J. D., Psota-kelty, L. A., Peins, G. Indoor/Outdoor relationships of airborne ionic substances: comparison of electronic equipment room and factory environments. *Atmos. Environ.* 1992, nr. 26A, 871.
17. Tencer, M. Deposition of aerosol (“hygroscopic dust”) on electronics – mechanism and risk. *Microelectronics Reliability.* 2008, nr. 48, 584.
18. Tencer, M. and Moss, J. S. Humidity management of outdoor electronic equipment: Methods, pitfalls, and Recommendations. *IEEE Transactions of components and packaging technologies.* 2002, nr. 25, 66.
19. Gil, H., Calderon, J. A., Buitrago, C. P., Echavarria, A., Echverria, F. Indoor atmospheric corrosion of electronic materials in tropical-mountain environments. *Corrosion Science.* 2010, nr. 52, 327.

20. Tencer, M. Deposition of aerosol (“hygroscopic dust”) on electronics – mechanism and risk. *Microelectronics Reliability*. 2008, nr. 48, 584.
21. Belov, I., Lindgren, M., Rydén, J., Alavizadeh, Z., Leisner, P. CFD Assisted Design Evaluation and Experimental Verification of a Logic Controlled Local PCB Heater for Humidity Management in Electronics Enclosure. *Thermal, Mechanical and Multi-physics Simulation and experiments in Microelectronics and Micro-systems*. 2010. 11th International Conference.
22. Belov, I., Rydén, J., Lindeblom, J., Zhang, Z., Hansson, T., Bergner, F., Leisner, P. Application of CFD Modelling for Energy Efficient Humidity Management of an Electronics Enclosure in Storage under Severe Climatic Conditions. *Thermal, Mechanical and Multi-physics Simulation and experiments in Microelectronics and Micro-systems*. 2008. International Conference.
23. Staliulionis, Z. *Developing semi-empirical models for predicting climate inside electronic device enclosures*. Technical University of Denmark, 2017.
24. Ma, X., Jansen, K. M. B., Ernst, L. J., W. D van Driel, O. van der Sluis, Zhang, Z. Q. Moisture Diffusion Model Verification of Packaging Materials. 2008 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging.
25. Fan, X. Mechanics of Moisture for Polymers: Fundamental Concepts and Model Study. 9th. Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in MicroElectronics and Micro-Systems. EuroSimE. 2008
26. Wong, E. H., Teo, Y. C., Lim, T. B. Moisture Diffusion and Vapour Pressure Modeling of IC Packaging. Electronic Components and Technology Conference. 1998.
27. Galloway, J. E. and Miles, B. M. Moisture Absorption and Desorption Predictions for Plastic Ball Grid Array Packages. *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING, AND MANUFACTURING TECHNOLOGY – PART A*. 1997, VOL. 20, NO. 3.
28. Wong, E. H., Koh, S. W., Lee, K. H., Rajoo, R. Advanced Moisture Diffusion Modeling & Characterisation for Electronic Packaging. Electronic Components and Technology Conference. 2002.
29. Wong, E. H., Koh, S. W., Lee, K. H., Lim, K. M., Lim, T. B. Advances in Vapor Pressure Modeling for Electronic Packaging. *IEEE TRANSACTIONS ON ADVANCED PACKAGING*. 2006, VOL. 29, NO. 4.
30. Fan, X. J., Suhir, E. Moisture Sensitivity of Plastic Packages of IC Devices. New York. Springer, 2010, chap. 4.
31. Peter, N., Toth, P., Kovacs, B., Kristof, G. Implementation of moisture diffusion model in multi-material system including air cavities. *22nd International Workshop on Thermal investigations of ICs and Systems (THERMINIC 2016)*. 2016, 21-23.
32. Braun, T., Bauer, J., Georgi, L., Becker, K.-F., Koch, M., Aschenbrenner, R., Lang, K.-D. Enhancement of Barrier Properties of Encapsulants for Harsh Environment Applications. Electronic Components and Technology Conference (ECTC). 2012.
33. Yoon, S., Han, B., Wang, Z. On Moisture Diffusion Modeling Using ThermalMoisture Analogy. *Journal of Electronic Packaging*. 2007, Vol. 129 / 421.
34. Han, B., Kim, D.-S. Moisture Ingress, Behavior, and Prediction Inside Semiconductor Packaging. *Journal of Electronic Packaging*. 2017, Vol. 139 / 010802-1.
35. Markus, D., Schmidt, M., Lunz, K., Becker, U. A New Method to Model Transient Multi-Material Moisture Transfer in Automotive Electronics Applications. 2016 17th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems.



36. Kraus, A. D. and Bar-Cohen, A. 1983. *Book in Thermal Analysis and Control of Electronic Equipment*. Washington, 1983.
37. Frank P. Incropera. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th edition, ISBN: 9780471457282, published Hoboken, NJ : John Wiley, 2007.
38. Hattel, J. *Fundamentals of Numerical Modelling of Casting Processes*. 1 edition. Denmark, 2005, Polyteknisk Forlag, Chap. 3.
39. Datta, A. K. *Biological and Bioenvironmental Heat and Mass Transfer*. New York, 2002.
40. Crank, J. and Park, G. S. *Diffusion in Polymer* (First Edition). Academic Press. 1968. ISBN 0-12-197050-7, USA.
41. Crank, J. *The Mathematics of Diffusion*. 2nd ed. Oxford University Press, 1975.
42. Comyn J. Introduction to Polymer Permeability and the Mathematics of Diffusion. In: *Polymer Permeability*. J. Comyn, 1-10, Elsevier Applied Science. 1985. ISBN 0-85334-322 5, Northern Ireland.
43. Vergnaud, J. M. *Liquid Transport Processes in Polymeric Materials: Modeling and Industrial Applications*. Prentice Hall. 1991. 0-13-538315-3, USA.
44. Fieldson, G. T. and Barbari, T. A. The Use of FTi.r.-a.t.r Spectroscopy to Characterize Penetrant Diffusion in Polymers. *Polyme*. 1993, Vol. 34, No. 6, 1146-1153. ISSN 0032-3861.
45. Jones, F. Diffusion and Rate of Dyeing, In: *The Theory of Coloration of Textiles*. 1989, 373-427. ISBN 0-901956-48-1.
46. Karimi, M. Diffusion in Polymer Solids and Solutions. *Mass Transfer in Chemical Engineering Processes*. 2011, 18-40, ISBN 978-953-307-619-5.
47. Morikawa, A., Keii, T., Aonuma, T. Change in interfacial tension during mass transfer. III. *Surface temperature of water during vaporization*. Volume 40, Issue 3. 1972, 349-359.
48. Lorenzini, G., Saro, O. Thermal fluid dynamic modelling of a water droplet evaporating in air. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2013, 323–335.
49. Neale, A., Derome, D., Blocken B. and Carmeliet, J. Determination of surface convective heat transfer coefficients by CFD. *11th Canadian Conference on Building Science and Technology Banff*. Alberta, 2007.
50. Alberty, R. A. *Physical Chemistry*, 7th ed. 1987.
51. Cussler, E. L. *Diffusion, mass transfer in fluid systems*, 2nd ed. Cambridge University Press, 1997.
52. Wong, E. H., Park, S. B. Moisture diffusion modeling – A critical review. Article in press Baierlein, R. *Thermal Physics*. Cambridge University Press, 2003.
53. Carroll, J. *What is Henry's law*. Chem. Eng. Prog. 87. 1991, 48–52.
54. Gibbs, J. The Scientific Papers of J Willard Gibbs, Vol 1. *Thermodynamics*. Dover, New York, 1961.
55. Job, G., Herrmann, F. *Chemical potential—a quantity in search of recognition*. Eur. J. Phys. 27. 2006, 353.
56. Jang, C., Park, S., Han, B., Yoon, S. Advanced Thermal-Moisture Analogy Scheme for Anisothermal Moisture Diffusion Problem. *Journal of Electronic Packaging*. Vol. 2008, 130.
57. Moon, S. I., Extrand, C. V. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48. 2009, 8961-8965.
58. Chen, X. Zhao, S., Zhai, L. Moisture Absorption and Diffusion Characterization of Molding Compound. *Journal of Electronic Packaging*. 2005, 460 / Vol. 127.
59. Gil, H., Calderon, J.A., Buitrago, C. P., Echavarria, A., Echverria, F., Indoor atmospheric corrosion of electronic materials in tropical-mountain environments. *Corrosion Science*. 2010, 327.

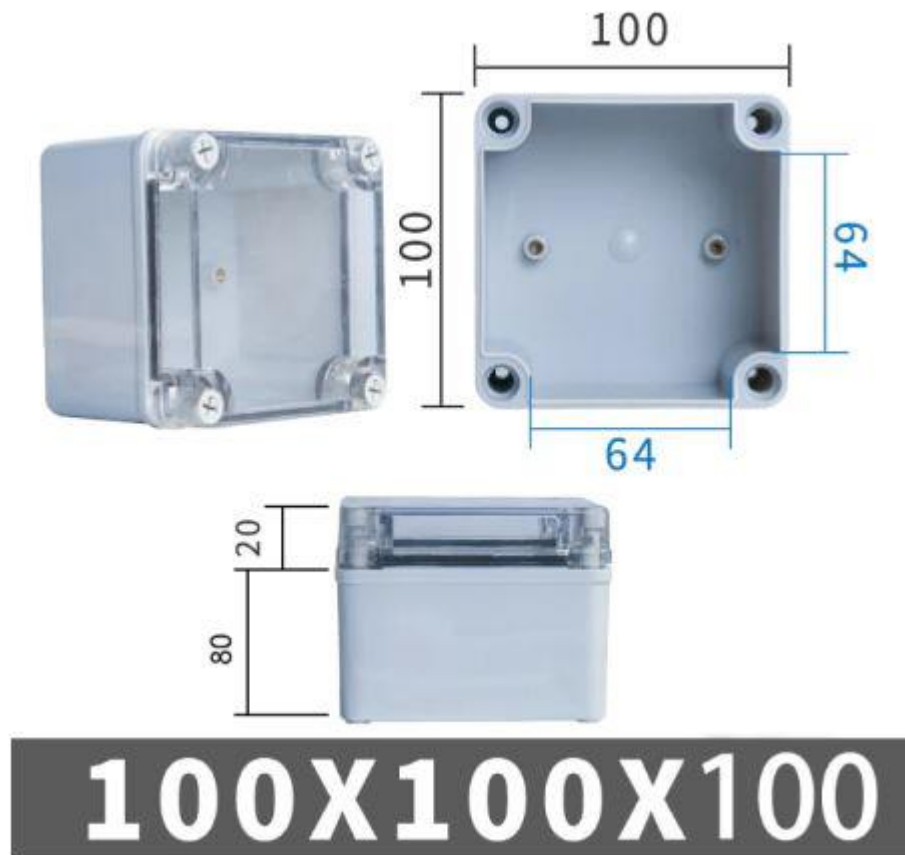
60. Tencer, M. Deposition of aerosol (“hygroscopic dust”) on electronics – mechanism and risk. *Microelectronics Reliability*. 2008, 584.
61. Jost, W. *Diffusion in Solids, Liquids, Gases, 3rd ed.*, Academic Press, New York, 1960.
62. Moon, S. I., Extrand, C. W. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009, 48, 8961-8965.
63. Staliulionis, Z., Jabbari, M., Hattel, J. H. Mathematical Modelling of Coupled Heat and Mass Transport into an Electronic Enclosure. *22nd International Workshop on Thermal Investigation of ICs and Systems*. Hungary, 2016, 21-23.
64. Ashley, R. J. Permeability and Plastics Packaging. In: *Polymer Permeability*, J. Comyn. Elsevier Applied Science, Northern Ireland, 1985, 269-308. ISBN 0-85334-322-5.
65. Massaro, L. & Zhu, X. X. P. Physical Models of Diffusion for Polymer Solutions, Gels and Solids. *Progress in Polymer Science*, 1999, Vol. 24, No. 5, 731-775. ISSN 0079-6700.
66. Sperling, L. H. *Introduction to Physical Polymer Science* (Fourth Edition), Wiley-Interscience, USA, 2006.
67. Moisan, J. Y. Effects of Oxygen Permeation and Stabiliser Migration on Polymer Degradation. In: *Polymer Permeability*. J. Comyn, (Ed.). Northern Ireland, 1985, 11-73, Elsevier Applied Science. ISBN 0-85334-322-5.
68. Hadgett, P. M., Goldbeck-Wood, G., Windle, A. H. Lattice Modelling of Penetrant Diffusion Through Heterogeneous Polymers. *Polymer*. 2000, Vol. 41 No. 16, 6151-6160. ISSN 0032-3861.
69. Mattozzi, A., Hedenqvist, M. S., Gedde, U. W. Diffusivity of n-hexane in Poly(ethylene-stat-octene)s Assessed by Molecular Dynamics Simulation. *Polymer*. 2007, Vol. 48, No. 17, 5174-5180. ISSN 0032-3861.
70. Eyvazkhani, A. & Karimi M. Influence of Silica Nanolayers on the Water Diffusion through PMMA/Layered Silicate Nanocomposites. *Proceedings of the International Conference on Textile Engineering*. Rasht, Iran, 2009.
71. Sridhar, L. N., Gupta, R. K. & Bhardwaj, M. Barrier Properties of Polymer Nanocomposites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2006, Vol. 45, No. 25, 8282-8289. ISSN 0888-5885.
72. Hajiagha, S., Karimi, M. & Ahmadzadeh, R. Use Different Solvents for Preparation of Temperature-Sensitive Polyurethane Membrane for Smart Textile, *Proceedings of the International Conference on Intelligent Textiles*. Seoul, Korea, 2010, 125-126. ISBN 978-89-92265-14-0.
73. Barink, M., Mavinkurve, A., Janssen, J. Predicting non-Fickian moisture diffusion in EMCs for application in micro-electronic devices. *Microelectronics reliability*. 2016, 45-49.
74. Buck Research Instruments LLC. Model CR-1A hygrometer with autofill operating manual. Application 1. 2010.
75. Tetens, O. Über einige meteorologische Begriffe. *Z. Geophys* 6. 1930, 207-309.
76. Murray, F.W. On the computation of saturation vapour pressure. *J. Applied Meteorology* 6. 1967, 203-204.
77. Thomson, G.-Wm. The Antoine Equation for Vapor-pressure Data. *Chem. Rev.* 1946, 38 (1), 1-39.
78. Lide, D. R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton, Florida: CRC Press. 2005, 6-8.
79. Wilke C. R. and Lee, C. Y. Estimation of Diffusion Coefficients for Gases and Vapors. *Ind. Eng. Chem.* 1955, 47 (6), 1253-1257.

80. Medvedev, O. O, Shapiro, A. A. Modeling diffusion coefficients in binary mixtures. *Fluid Phase Equilibria*. 2004, 13–22.
81. Marrero, T. R. and Mason, E. A.. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1, 1, 1972.
82. Skelland, A. H. P. *Diffusional Mass Transfer*. Krieger, Malabar, FL, 1985, (Table A.8).
83. Poling, B. E., Prausnitz, J. M. and O'Connell, J. *The Properties of Gases and Liquids*, 5th ed. McGraw-Hill. New York, 2001.
84. Bird, R. B. *Adv. Chem. Eng.* 1, 170, 1956.
85. Marrero, T. R., Mason, E. A. Correlation and prediction of gaseous diffusion coefficients. *Aiche journal*. Vol. 19, No. 3.
86. Vargaftik, N. B. *Tables on Thermophysical Properties of Liquids and Gases*, 2nd Ed., Washington, 1975, Chapter 11.
87. Zhang, Z., Kim, C. S. & Kleinstreuer, C. Water Vapor Transport and Its Effects on the Deposition of Hygroscopic Droplets in a Human Upper Airway Model. *Aerosol Science and Technology*. 2007.
88. Peter, N., Toth, P., Kovacs, B., Kristof, G. Implementation of moisture diffusion model in multi-material system including air cavities. *Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)*. 2016.
89. Urban, M. W. *Attenuated Total Reflectance Spectroscopy of Polymers: Theory and Practice*, American Chemical Society. USA. 1996. ISBN 13: 9780841233458.
90. Fieldson, G. T. & Barbari, T. A. The Use of FTi.r.-a.t.r Spectroscopy to Characterize Penetrant Diffusion in Polymers. *Polymer*. 1993, Vol. 34, No. 6, 1146-1153. ISSN 0032-3861.
91. Sammon, C., Yarwood, J. & Everall, N. A FTIR-ATR Study of Liquid Diffusion Processes in PET Films: Comparison of Water with Simple Alcohols. *Polymer*. 2000, Vol. 41 No. 7, 2521-2534. ISSN 0032-3861.
92. Yi, X., & Pellegrino, J. Diffusion Measurements with Fourier Transform Infrared Attenuated Total Reflectance Spectroscopy: Water Diffusion in Polypropylene. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*. 2002, Vol. 40, No. 10, 980-991. ISSN 0887-6266.
93. Hua, H., Rivard, T. & Dube, M. A. Off-line Monitoring of Styrene/Butyl Acrylate Copolymerizations in Toluene Using ATR-FTIR Spectroscopy. *Polymer*. 2004, Vol. 45, No. 2, 345-354. ISSN 0032-3861.
94. Pereira, A. M., Lopes, M. C., Timmer, J. M. K. & Keurentjes, J. T. F. Solvent Sorption Measurements in Polymeric Membranes with ATR-IR Spectroscopy. *Journal of Membrane Science*. 2005, Vol. 260, No. 1-2, 174-180. ISSN 0376-7388.
95. Doppers, L. M., Sammon, C., Breen, C. & Yarwood, J. FTIR-ATR Studies of the Sorption of Acetone/Water Mixtures in Poly(vinyl alcohol). *Polymer*. 2006, Vol. 47, No. 8, 2714-2722. ISSN 0032-3861.
96. Chandra, P. & Koros, W. J. Sorption and Transport of Methanol in Poly(ethylene terephthalate). *Polymer*. 2009, Vol. 50, No. 1, 236-244. ISSN 0032-3861.
97. Karimi M., Albrecht, W., Heuchel, M., Kish M. H., Frahn, J., Weigel, Th., Hofmann, D., Modaress, H. & Lendlein, A. Determination of Water/Polymer Interaction Parameter for Membrane-Forming Systems by Sorption Measurements and Fitting Techniques. *Journal of Membrane Science*. 2005, Vol. 265, No 1-2, 1-12. ISSN 0376-7388.
98. Cotugno, S., Maio, E. D., Mensitieri, G., Iannace, S., Roberts, G. W., Carbonell, R. G. & Hopfenberg, H. B. Characterization of Microcellular Biodegradable Polymeric Foams

- Produced from Supercritical Carbon Dioxide Solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2005, Vol.44, No. 6, 1795-1803. ISSN 0888-5885.
99. Liu, D. & Tomasko, D. L. Carbon Dioxide Sorption and Dilation of Poly(lactide-coglycolide). *Journal of Supercritical Fluids*. 2007, Vol. 39, No. 3, 416-425. ISSN 0896-8446.
  100. Staliulionis, Z., Jabbari, M., Hattel, J. H. Moisture ingress into electronics enclosure under isothermal conditions. *Theoretical, Experimental, and Computational Mechanics (TECM 2015)*. 2015.
  101. *The Climatic and Environmental Conditions Affecting the Design of Military Material*. Australia. 2009, 18.

## Priedai

1 Priedas. Dėžutės pavyzdys, kuris yra naudojama skaičiavimuose.



2 Priedas. Plokštelės pavyzdys, kuris yra naudojamas skaičiavimuose.

