



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
ENERGETIKOS KATEDRA

**Šilumos ir masės mainų procesų elektronikos sistemoje rezultatų ataskaita**

Podoktoratūros stažuotojas: dr. Žygimantas Staliulionis

Podoktorantūros vadovas: prof. Gintautas Miliauskas

KAUNAS, 2022

# 1 Įvadas

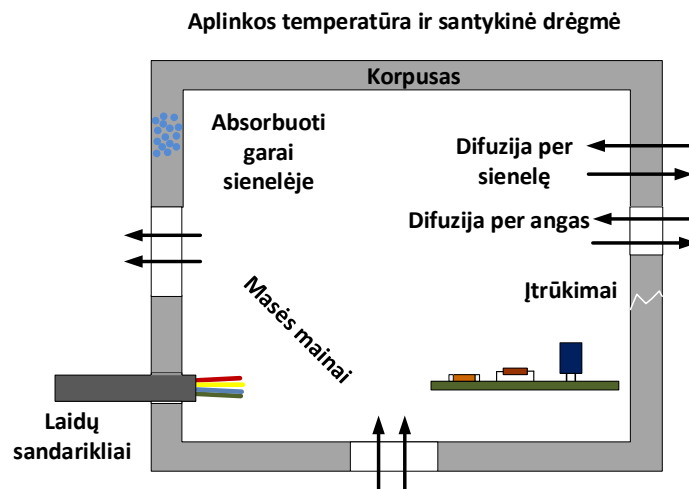
Ši ataskaita apžvelgia trumpai naudotą teoriją ir modelius temperatūros ir masės mainams analizuoti bei modeliuoti. Ataskaita apima atliktus eksperimentus drėgmės ir šiluminių laukų srityje bei pateikia jų rezultatus.

## 2 Teorija

Teorijos skyriuje pateikiama trumpai teorija apie masės mainus, kuri reikalinga norint analizuoti atliktus eksperimentus ir modeliavimams atlikti. Šiluminiai laukai ir fazinių virsmų procesai buvo aptarti matematinio modelio ataskaitoje. Modeliavimams atlikti, pateikiamas resistorių-kondensatorių (RC) metodas, kuris naudojamas išspręsti šilumos ir masės mainų formules.

### 2.1 Masės mainai

Vykstantys drėgmės procesai elektronikos korpusuose arba paprasčiau kalbant, dėžėse, yra labai sudėtingi. Drėgmė gali patekti elektronikos korpusą per esančias angas skirtas ventiliacijai [1-3], per plastikinės medžiagos naudojamas korpusų sienelėms [1-3], per tarpines, laidų sandariklius esančius sienelėse bei per pačius laidus. Korpusuose vyksta įvairūs procesai ir drėgmė per sienelę yra perduodama difuzijos būdu, o konvekcijos būdu per ventiliacijos angas bei korpusų viduje ir išorėje. Vandens garai gali kondensuotis korpusuose, kai temperatūra pasiekia rasos tašką. Priklausomai nuo temperatūros kitimo greičio kondensacija gali būti paviršinė (dažniausias atvejis) ir tūrinė. Susikondensavę vandens garai gali garuoti esant temperatūrai aukštesnei negu rasos taško temperatūra. Vienas labai svarbių ir sudėtingų fizikinių procesų vykstančių korpusuose yra vandens garų absorbcija ir desorbcija plastikinėse medžiagose, kurios naudojamos korpuso sienelėms ar spausdintinio montažo plokštėms ir komponentams gaminti.



**Pav. 1** Drėgmės patekimo keliai per elektronikos korpusą [1]

Šiame darbe koncentruojamasi labiausiai į vykstančius procesus kaip difuzija, konvekcinis masės perdavimas ir kondensacija, todėl apžvelgiama teorija naudojama šiems procesams apibūdinti. Adsorbcija ir desorbcija analizuojama pagal Fiko dėsnį.

### 2.1.1 Difuzija

Difuzija yra pernašos procesas kai medžiaga tam tikroje terpėje yra pernešama iš didesnės koncentracijos link mažesnės koncentracijos vietos. Difuzijos pernašos procesas yra analogiškas šilumos perdavimo procesui per sienelę aprašomam Furjė dėsnium. Taigi, medžiagos kiekis pernešamas per sienelę yra aprašomas pirmu Fiko dėsnium, kuris aprašomas taip [4-5]:

$$g = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

$$R_g^{dif} = \frac{L}{DA} \quad (2)$$

čia  $J$  – masės srauto tankis, [(kg)/m<sup>2</sup>·s],  $c$  – vandens garų koncentracija [kg/m<sup>3</sup>],  $D$  – komponento, t.y. vandens garų difuzija tam tikrai terpei, [m<sup>2</sup>/s],  $L$  – sienelės storis, [m],  $R_m^{dif}$  – varža komponento pernašai tam tikroje terpėje, [s/m<sup>3</sup>],  $A$  – paviršiaus plotas [m<sup>2</sup>],  $g$  – vandens garo sutrumpinimas.

Masės srautas pratekantis per sienelę yra proporcingas koncentracijos gradientui ir difuzijos koeficientui, kuris apibūdina medžiagos pralaidumo savybę tam tikram komponentui ir yra nustatomas eksperimentiškai. Taikant masės tvermės dėsnį ir Fiko pirmąjį dėsnį, bendroji masės mainus aprašanti diferencialinė lygtis yra panaši į diferencialinę energijos lygtį ir išreiškiama taip [4-5]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (3)$$

Ši diferencialinė lygtis yra vadinama Fiko antruoju dėsnium.

### 2.1.2 Konvekcinis masės pernešimas

Konvekcinis masės atidavimas yra analogiškas šilumos atidavimui aprašomam Niutono dėsnium. Masės mainai tarp kieto paviršiaus ir jį apiplaunančio fluideo srauto yra aprašomi tokia lygtimi [4] [6]:

$$G_g = \alpha_g A (c_{g,pav} - c_{g,\infty}) \quad (4)$$

Konvekcinė masės atidavimo varža yra išreiškiamą [4]:

$$R_g^{konv} = \frac{1}{\alpha_g A} \quad (5)$$

čia  $G_g$  – vandens garų masės srautas [kg/s],  $\alpha_g$  – vandens garų masės atidavimo koeficientas [m/s],  $c_{g,pav}$  – vandens garų koncentracija oro mišinyje ties kieto kūno paviršiumi esant pusiausvyrai su oro mišiniu [kg/m<sup>3</sup>],  $c_{g,\infty}$  – vandens garų koncentracija oro mišinyje toli nuo kieto kūno paviršiaus [kg/m<sup>3</sup>].

Piimant, jog kovenkcinis masės atidavimas gali būti, kaip kraštinė sąlyga ties kietos medžiagos paviršiumi, bendras matematinis modelis masės mainams yra išreiškiamas taip [4] [7]:

$$-D \frac{\partial c_{s,pav}}{\partial x} = -h_m \cdot (c_{a,\infty} - c_{a,pav}) \quad (6)$$

čia  $c_{s,pav}$  – vandens garų koncentracija tie kietos medžiagos paviršiumi, [kg/m<sup>3</sup>]. Ši kraštinė sąlyga yra viena iš dažniausiai sutinkamų, kadangi praktikoje daug taikymų, kai fluidas apiplauna kietos medžiagos paviršiu, tokiu būdu jį šaldydamas ar šildydamas.

Vandens garų masės atidavimo koeficientas gali būti apskaičiuotas naudojant Lewis lygtį [8]:

$$\alpha_g = \frac{\alpha}{Le \rho c_p} \quad (7)$$

čia  $\alpha$  – šilumos atidavimo koeficientas [W/(m<sup>2</sup>K)],  $\rho$  – medžiagos tankis [kg/m<sup>3</sup>],  $c_p$  – medžiagos savitoji šiluma [J/(kg K)]. Remiantis literatūra ir supaprastinimo tikslais, Lewis skaičius yra lygus 1.

### 2.1.3 Pusiausvyra ties aplinkos-medžiagos ir medžiagos-medžiagos sandūra (Henrio dėsnis)

Pusiausvyra ties kieto kūno ir oro mišinio sandūra įvyksta tada kai cheminis potencialas vandens garų absorbuotų kietos medžiagos pačiame paviršiuje yra lygus cheminiam potencialui vandens garų esančių oro mišinyje [9-12]. Tokia pusiausvyra tarp dujinės aplinkos t.y. oro ir kietos medžiagos yra aprašomas Henrio dėsniu [11] [13-14], kuris teigia, kad ištirpusių dujų kiekis kietoje medžiagoje ar tirpale yra tiesiogiai proporcingas daliniam tų dujų slėgiui dujinėje būsenoje prie pat kietos medžiagos ir aprašomas formule.

$$c_{s,pav} = H(T) p_a \quad (8)$$

čia  $p_a$  – dalinis vandens garų slėgis oro mišinyje [Pa],  $c_{s,pav}$  – vandens garų koncentracija ties kietos medžiagos paviršiumi [kg/m<sup>3</sup>],  $H(T)$  – nuo temperatūros priklausanti Henrio konstanta [kg/(m<sup>3</sup>·Pa)]. Henrio konstanta yra dažnai išreiškiamą ir naudojama kaip tirpumo koeficientas, todėl tekste daugiau kalbama apie tirpumo koeficientą ir žymima  $S(T)$ .

Difuzijos ir tirpumo koeficientų priklausomybė nuo temperatūros kietoje medžiagoje yra aprašomi Arenijaus dėsniais ir išreiškiami taip [15-17]:

$$D(T) = D_0 e^{\left(\frac{-E_D}{RT}\right)} \quad (10)$$

$$S(T) = S_0 e^{\left(\frac{E_S}{RT}\right)} \quad (11)$$

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

Drėgnojo oro, t.y. vandens garo ir oro mišinio difuzijos koeficientas yra apskaičiuojamas pagal pagal tokią lygtį [4]:

$$D = \frac{2.28}{p} \left(\frac{T}{273}\right)^{1.8} \quad (12)$$

čia  $p$  – absoliutinis mišinio slėgis, [ $\text{Pa}$ ],

Daug ir įvairių empirinių formulių yra naudojama apskaičiuoti garų soties slėgį ore esant skirtingam slėgiui kaip pvz. Tetens, Antoine, Arden Buck, Magnus equations [18-23]. Šios empirinės išraiškos gali būti taikomos skirtinguose temperatūrų ruožuose tačiau dauguma yra skirtos iki  $50^\circ\text{C}$ , išskyrus Arden Buck išraišką [18-19]:

$$p_{sat}(t [^\circ\text{C}]) = 0.61121 \cdot e^{\left(\frac{18.678 - t}{234.5}\right) \left(\frac{t}{257.14 + T}\right)} \quad t > 0^\circ\text{C} \quad (13)$$

$$p_{sat}(t [^\circ\text{C}]) = 0.61115 \cdot e^{\left(\frac{23.036 - t}{333.7}\right) \left(\frac{t}{279.82 + T}\right)} \quad t < 0^\circ\text{C} \quad (14)$$

arba August Roche Magnus lygtį [24] [25]:

$$p_s(t) = 610.94 e^{\left(\frac{17,625 t}{T+243.12}\right)} \quad (15)$$

čia  $p_s$  – garų soties slėgis [ $\text{Pa}$ ];  $t$  – oro temperatūra, [ $^\circ\text{C}$ ]. Darbe daugiausia naudota Magnus išraiška, ir remiantis ja galime apskaičiuoti rasos taško temperatūrą [25]:

$$t_{Dp}(t_a, RH) = \frac{243,12 \left( \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17,625 t_a}{243,12 + t_a} \right)}{17,625 - \left( \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17,625 t_a}{243,12 + t_a} \right)} \quad (16)$$

čia  $t_{Dp}$  – rasos taško temperatūra, [°C],  $t_a$  – oro temperatūra, [°C].

#### 2.1.4 Dalinio slėgio metodas

Koncentracijos netolygumas ties daugiasluoksnių medžiagų sandūromis gali būti eliminuotas naudojant dalinį vandens garų slėgį kaip varančiąją jėgą (kitaip kintamąjį) formulėse 1 ir 3. Šis būdas buvo pristatytas viename straipsnyje publikuotame Galloway ir Miles [26] panaudojant Henrio dėsnį. Esant kietai medžiagai apsuptai dujinės aplinkos, šiuo atveju oro, santykis tarp koncentracijos ir dalinio slėgio yra išreiškiamas taip:

$$c = Sp \Rightarrow p = \frac{c}{S} \quad (17)$$

čia  $S$  – vandens garų tirpumas kietoje medžiagoje [ $\text{kg}/(\text{m}^3 \text{ Pa})$ ],  $p$  – dalinis vandens garų slėgis ore ties oro ir kietos būsenos medžiagos sandūra [Pa],  $c$  – vandens garų koncentracija kietos medžiagos paviršiuje, kuris yra sąlytyje su oro aplinka, [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]. Kadangi dalinis vandens garų slėgis yra tolygus per skirtingu medžiagų sandūrą, todėl remiantis Galloway ir Miles straipsniu, Henrio dėsnio išraiška gali būti pritaikoma, esant sąlyčiui tarp dviejų skirtingų kietųjų medžiagų. Taigi, galima teigti, jog koncentracija yra normalizuojama tirpumo koeficiento atžvilgiu.

Kai formulė (8) yra įstatoma į pirmą ir antrą Fiko dėsnius, gauname išraiškas [27]:

$$J = -DS\nabla p - Dp\nabla S \quad (18)$$

$$S \frac{\partial p}{\partial t} + p \frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} \quad (19)$$

Dvi prielaidos yra priimamos:

- 1) Tirpumas yra pastovus medžiagoje arba diskretizuotame elemente per laiko vieneta (nekintantis laike)

$$\frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad (20)$$

- 2) Tirpumas yra pastovus visoje kietoje medžiagoje arba diskretizuotame elemente:

$$\frac{\partial S}{\partial x} = 0 \quad (21)$$

Tuomet, taikant aptartas prielaidas, formulės 18 ir 19 gali būti sutrauktos iki šių išraiškų:

$$J = -DS\nabla p \quad (22)$$

$$S \frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial x} \quad (23)$$

Varžos ir talpos formulės vandens garams kietos būsenos medžiagoje yra:

$$R_{mat,g} = \frac{l}{P_{mat} \cdot A} \quad (24)$$

$$P_{mat} = D_{mat} \cdot S_{mat} \quad (25)$$

$$C_{mat,g} = V_{mat} \cdot S_{mat} \quad (26)$$

čia  $R_{mat,g}$  – varža vandens garams kietoje medžiagoje, kai dalinis slėgis yra varančioji jėga arba kitaip kintamasis [s·Pa/kg],  $C_{mat,g}$  – kietos medžiagos talpa vandens garams [kg/Pa].

Šios varžos ir talpumo ir pralaidumo išraiškos šiek tiek yra kitokios kai masės mainai nagrinėjami oro mišinyje. Taikant idealiųjų dujų dėsnį pirmam Fiko dėsniai ir darant prielaidą, jog turime izotermines sąlygas, gauname:

$$c_g = \frac{P_{H_2O}}{R_v \cdot T_{air}} \quad (27)$$

$$J = - \frac{D_{air}}{R_v T_{air}} \frac{\partial p_{H_2O}}{\partial x} \quad (28)$$

Masės tvermės dėsnis vandens garams oro mišinyje yra aprašomas taip:

$$\frac{dM_v}{dt} = G_{v,in} - G_{v,out} \quad (29)$$

Taikant idealiųjų dujų dėsnį vandens garų slėgiui išreikšti ir panaudojant išraišką 29 formulei, gauname:

$$\frac{V_{air}}{R_v T_{air}} \frac{dp_{H_2O}}{dt} = - \frac{D_{air}}{R_v T_{air}} \frac{\partial p_{H_2O}}{\partial x} \quad (30)$$

Čia  $m_g$  – vandens garų masė oro mišinyje, [kg].

Iš 30 formulės seka, jog tirpumas ir pralaidumas vandens garams oro mišinyje yra aprašomi:

$$S_{in\_air}(T) = \frac{1}{R_v \cdot T_{air}} \quad (31)$$

$$P_{in\_air}(T) = \frac{D_{air}}{R_v \cdot T_{air}} = D_{air} \cdot S_{in\_air} \quad (32)$$

Varžos ir talpos vandens garams oro mišinyje yra išreiškiami taip:

$$R_{in\_air} = \frac{l}{P_{in\_air} \cdot A} \quad (33)$$

$$C_{in\_air} = V_{air} \cdot S_{in\_air} = \frac{V_{air}}{R_v \cdot T_{air}} \quad (34)$$

Šiame skyrelyje aptartos formulės naudojamos masės mainų modeliavimui.

### 3 Rezultatai

Šis skyrius apibendrina glaustai atliktus eksperimentus ir masės mainų bei temperatūros modeliavimus, todėl skyrius yra išskaidytas į dvi dalis, t.y. eksperimentinę ir modeliavimo. Eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai remiasi jau paskelbtais konferencijos straipsniais ir tam tikrais rezultatais naudojamais dviems moksliniams straipsniams, kurie dar nėra publikuoti.

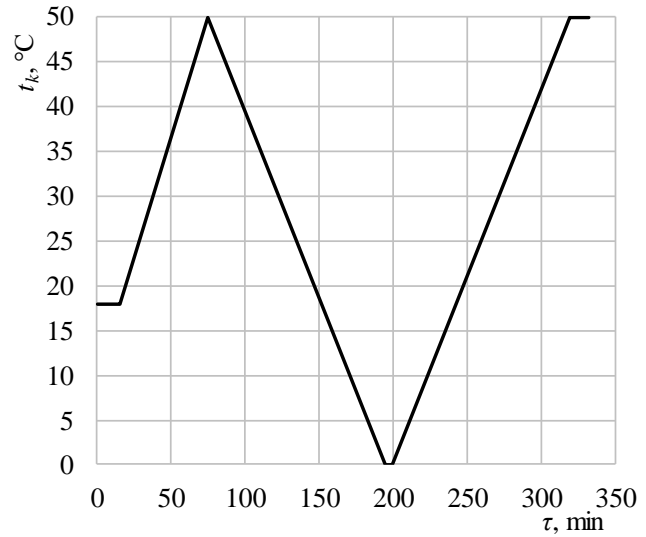
#### 3.1 Eksperimentiniai rezultatai

Atlikti eksperimentai su skirtingomis dėžėmis ir skirtingomis aplinkos sąlygomis. Buvo atliekami eksperimentai pagal dvi skirtingas aplinkos sąlygas ir naudojamos dvi skirtingos dėžės, t.y. viena jų elektronikos aliuminio dėžė, o kita – paprastas stiklainis Pav. 1 (a). Šios dvi dėžės pasirinktos dėl to, jog turi jų sienelės pagamintos iš medžiagos nepralaidžios vandens garams ir dėl to neįgeria drėgmės. Pagal straipsnį konferencijos straipsnį [28] publikuotą, šios dvi dėžės buvo nagrinėtos klimatinėje kameroje, kai aplinkos sąlygos buvo taikomos pagal Pav. 2 (b). Buvo tiriama kaip kinta drėgmė ir temperatūrą dviejų dėžių viduje. Analizuojama drėgmės kitimas ir dėl naudojamos skirtingos sienelės medžiagos esamame temperatūros kitimo intervale, kai viena aliuminio dėžės medžiaga yra labai laidus, o kita (stiklainis) yra kaip izoliatorius, turintis mažą laidumo koeficientą. Šis eksperimentas buvo naudojamas taip pat ištirti ir suprasti geriau vykstančius šilumos ir masės mainų procesus ir galimą kondensaciją bei garavimą, kurie turi nemažą įtaką drėgmės pokyčiui. Dėl to temperatūrinis režimas buvo pasirinktas toks kaip pavaizduota Pav. 2 (b).



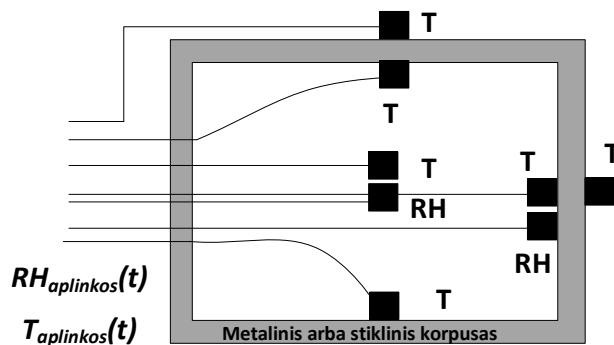


(a)

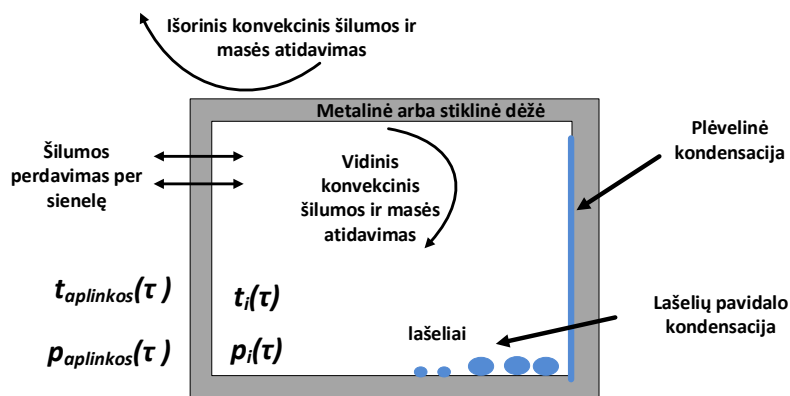


(b)

**Pav. 2** (a) tiriamos dvi dėžės klimatiniėje kameroje (b) Aplinkos temperatūra, kuri užduodama klimatinei kamerai [28]



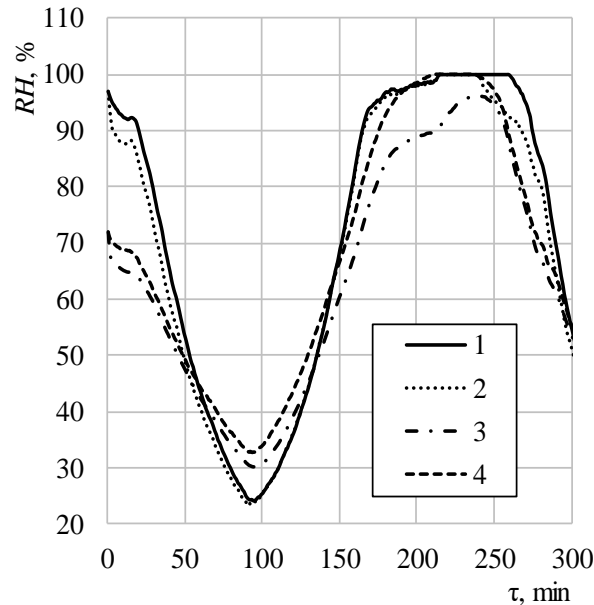
(a)



(b)

**Pav. 3** (a) tiriamo objekto brėžinys (b) Sensorių pozicijos temperatūros ir santykinės drėgmės matavimui [28]

Drėgmės ir temperatūros pokyčiams matuoti, termoporos ir santykinės drėgmės sensoriai buvo naudojami pozicijose, kaip pavaizduota Pav. 3 (a). Atliekant eksperimentą, buvo analizuojami šie vykstantys procesai (pav. 3 (b)) dėžės viduje, kaip vidinė ir išorinė konvekcijos, šilumos laidumas per sienelę, bei galima kondensacija ir garavimas. Taigi, temperatūra buvo keliama iki 50 °C ir po to aušinama iki 0 °C ir vėl šildoma iki 50 °C. Sekančiuose paveikslėliuose yra pavaizduoti keli tyrimų rezultatai.



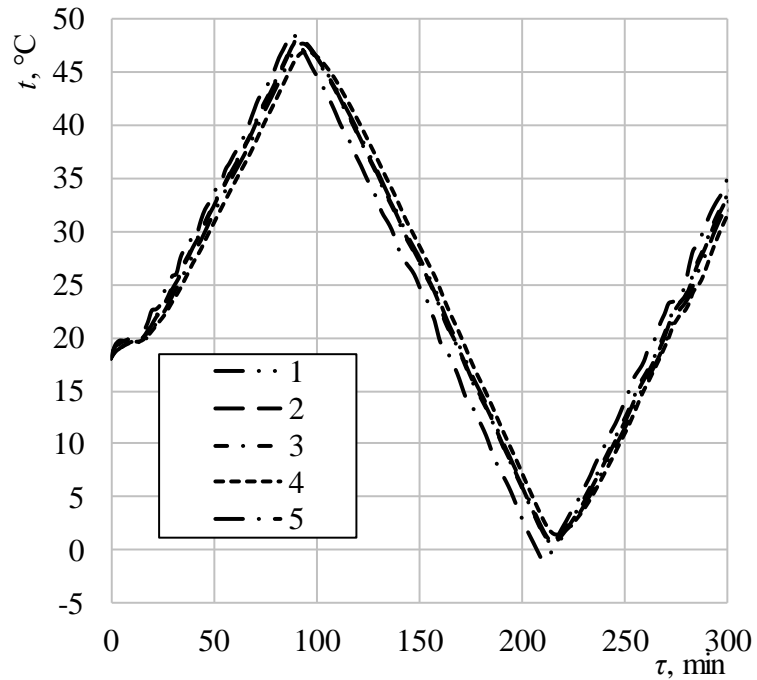
**Pav. 4** Santykinės drėgmės ( $RH$ ) matavimai stiklainyje ir aliuminio dėžėje: (1) stiklainio oro centre (2) šalia stiklainio sienelės (3) aliuminio dėžės oro centre (4) šalia aliuminio dėžės sienelės [28]

Pravestas eksperimentas klimatinėje kameroje, pagal pateiktą temperatūrinį režimą šildant/aušinant 18°C pradinės temperatūros stiklainį ir aliumininę dėžę su apibrėžto pradinio santykinio drėgnumo  $RH=97\%$  ir  $RH=72\%$  atitinkamai oru. Išmatuotas oro santykinio drėgnumo kitimas dėžės ir stiklainio centre (Pav. 4 kreivės 1 ir 3) ir prie šoninės sienelės (Pav. 4 kreivės 2 ir 4). Oro santykinės drėgmės ( $RH$ ) dinamika ryškiai priklauso nuo šildymo/aušinimo režimo (Pav. 4): šildymo režime  $RH$  mažėja, o aušinimo režime didėja ir gali išaugti net iki  $RH=100\%$ , kas liudija vykstantį garo kondensacijos procesą.

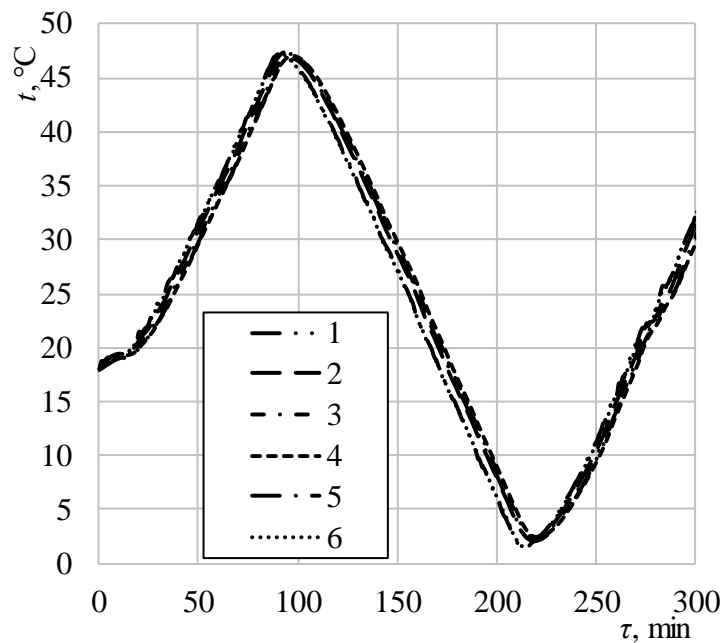
Eksperimentuose galima išskirti nuoseklius pirmąjį šildymo, antrąjį aušinimo ir trečiąjį šildymo režimus:

$$\tau \equiv 0 \rightarrow \tau_1 \rightarrow \tau_2 \rightarrow \tau_3 \quad (35)$$

Oro parametrų dinamika yra apibrėžta dėžėje ir stiklainyje vykstančių šilumokaitos ir fazinių virsmų procesų, kurie yra glaudžiai susiję su tiriamosios sistemos terminė būsena. Analizuojant santykinės drėgmės kitimą, matyti, jog stiklainyje santykinė drėgmė prie sienelės ir oro centre yra labai arti vienas kito, o aliuminio dėžės atveju skirtumas yra didesnis. Taipogi, iš temperatūrų grafikų matyti, jog aliuminio dėžės atveju temperatūrų kreivės yra arčiau viena kitos negu stiklainyje. Tai yra dėl daug didesnio aliuminio laidumo koeficiento negu stiklas.



**Pav. 5** Temperatūros matavimai stiklainyje (1) stiklainio oro centre (2) viduje ant stiklainio šoninės sienelės (3) viduje ant stiklainio dangčio (4) viduje ant stiklainio dugno (5) išorėje ant stiklainio šoninės sienelės [28]



**Pav. 6** Temperatūros matavimai stiklainyje (1) aliuminio dėžės oro centre (2) viduje ant aliuminio dėžės šoninės sienelės (3) viduje ant aliuminio dėžės dangčio (4) viduje ant aliuminio dėžės dugno (5) išorėje ant aliuminio dėžės šoninės sienelės (6) išorėje ant aliuminio dėžės dangčio [28]

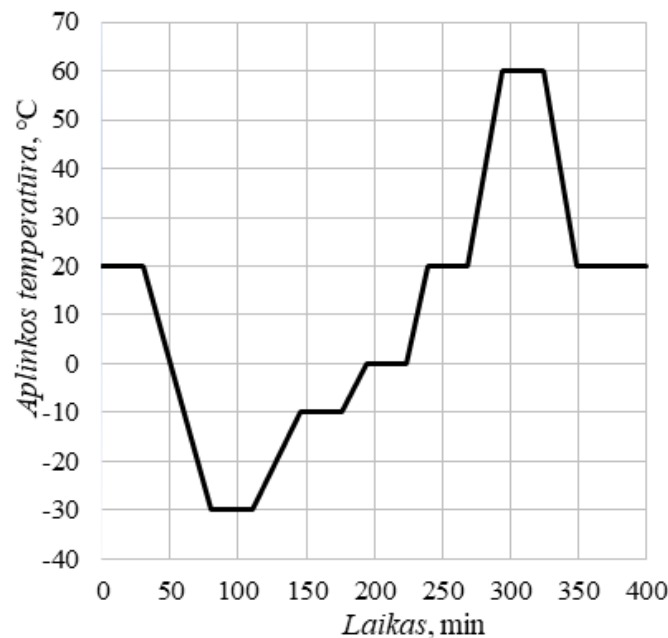
Elektronikos dėžėje oro terminę ir energinę būseną lemia jos eksploatacinė sąlygos. Terminės būsenos kitimą apibrėžia oro temperatūros dinamika. Energinės būsenos kitimą apibrėžia drėgno oro entalpijos dinamika, kuri entalpijos fizinei ir garo fazinių virsmų dedamosioms yra savita. Entalpijos fizinę dedamąją apibrėžia oro masės vidutinė temperatūra, o garo fazinių virsmų dedamąją apibrėžia garo masinė koncentracija oro dujų mišinyje.

Galima išskirti dėžės šildymo ir aušinimo būdingus režimus, kuriuose drėgno oro būseną apibūdinančiųjų parametrų kitimas yra specifinis. Tai lemia dėžės sistemoje vykstančių šilumokaitos ir vandens/garo fazinių virsmų sudėtiniai procesai. Šildymo režime aplinkos oras per dėžės atitvaras/barjerus (šonines sienes, dugną ir dangtį) perduoda šilumą orui dėžėje. Šilumos perdavimą apibrėžia atitvarų išorinės ir vidinės konvekcinei šilumokaitos ir šilumos laidumo jose procesų visuma.

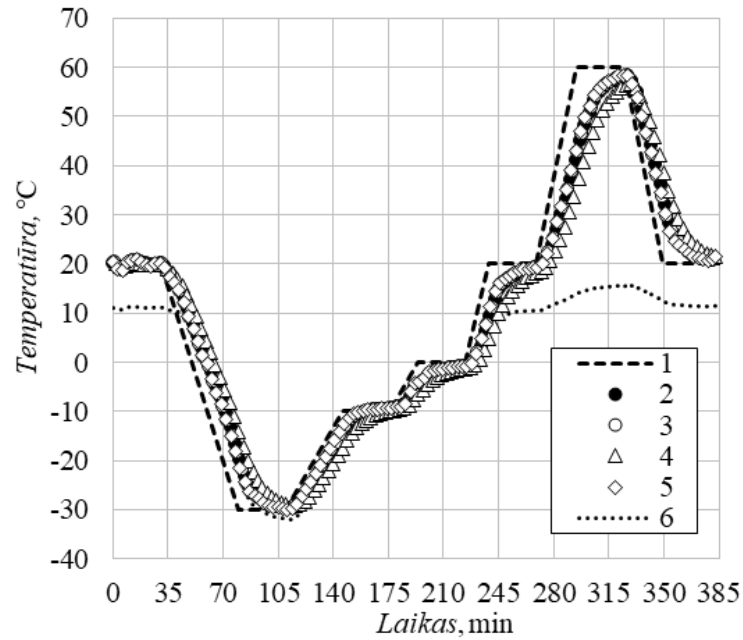
Šildymo režime konvekcinių šilumos atidavimą gali lydėti paviršinės vandens garavimo procesas (jei paviršius padengtas kondensato plėvele), o aušinimo režime kartu gali vykti ore esančio garo kondensacijos procesas (kai paviršiaus temperatūra yra žemesnė už rasos taško temperatūrą).

### 3.2 Eksperimentas pagal MIL-STD-810F standarto temperatūrinį režimą

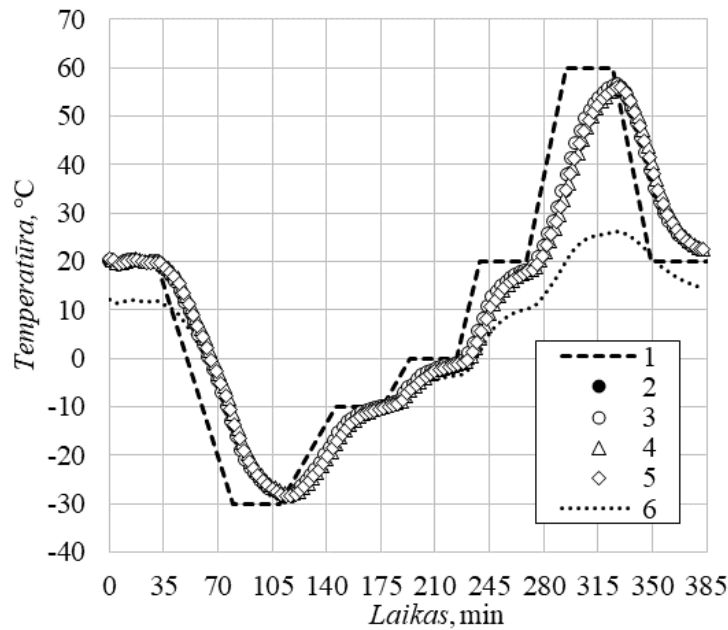
Sekantys eksperimentai buvo taip pat atliekami klimatinėje kameroje, tik su skirtinga aplinkos temperatūra, kuri yra aprašoma pagal MIL-STD-810F. Šis standartas naudojamas testuoti medžiagas naudojamas elektronikai ir kaip jos atlaiko temperatūrinį ciklavimą. Šis ciklavimas taip pat naudingas drėgmės analizavimui ir kaip ji keičiasi vykstant skirtingiems temperatūriniais režimams. Temperatūrinis režimas pagal šį standartą yra pateiktas pav. 7.



**Pav. 7** Aplinkos temperatūra, kuri užduodama klimatinei kamerei pagal MIL-STD-810F



(a)

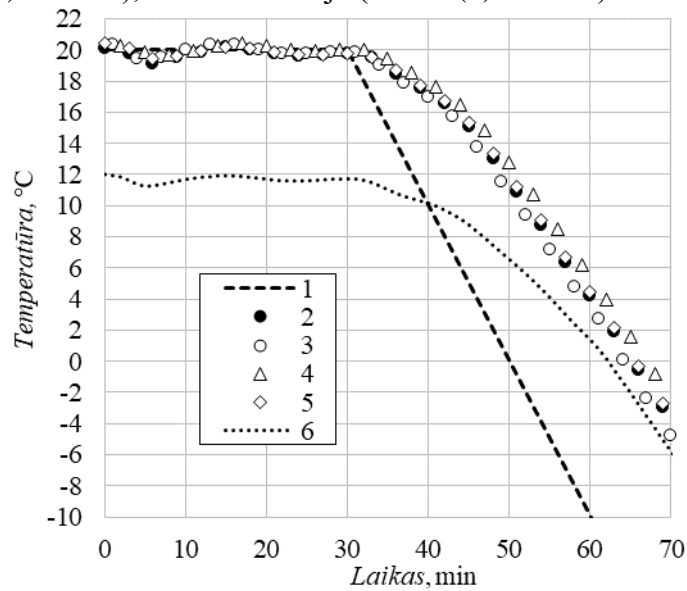


(b)

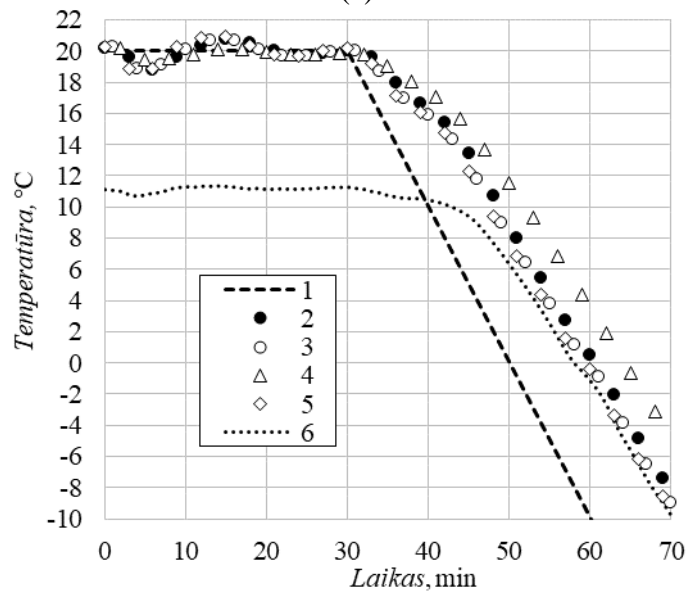
**Pav. 8** Alumīnija (a) ir stiklainio (b) elektronikos dėžės terminės būsenos dinamika: (1) klimatinės kameros teorinė oro temperatūra, (2) išmatuota oro temperatūra elektronikos dėžės centre, (3) išmatuota šoninės sienelės vidinio paviršiaus temperatūra, (4) išmatuota dugno vidinio paviršiaus temperatūra, (5) išmatuota dangčio vidinio paviršiaus temperatūra, (6) apskaičiuota rasos taško temperatūra.

Pirmajame 110 min trukmės aušinimo režime numatytas 20 °C pradinės temperatūros aplinkos oras ir oras abiejose elektronikos dėžėse ataušinimas iki -30 °C temperatūros (Fig. 4). Į šį aušinimo režimą įtraukti ir oro pradinės temperatūros nusistovėjimo bei ataušinto oro temperatūros

nusistovėjimo 30 min trukmės laikotarpiai. Antrajame 214 min trukmės šildymo režime aplinkos oras pašildomas iki 60 °C temperatūros (Pav. 4. kr. 1), o oras iki šios temperatūros nespėja pašilti apytiksliai 2 °C stiklainyje (Pav. 8 (b) tšk. 2) ir apytiksliai 1 °C aliuminio dėžėje (Pav. 8 (a) tšk. 2). Į šį šildymo režimą įtraukti ir keturi aplinkos oro temperatūros (-10 °C, 0 °C, 20 °C ir apytiksliai 60 °C) nusistovėjimo 30 min trukmės laikotarpiai. Trečiajame 55 min trukmės aušinimo režime aplinkos oras ataušinimas iki buvusios pradinės 20 °C temperatūros. Baigiamajame 30 min trukmės nusistovėjimo laikotarpyje nusistovi pradinę 20 °C temperatūrą atitinkanti terminė būsena tiek aliumininėje (Pav. 8 (a) tšk. 2-5), tiek ir stiklinėje (Pav. 8 (b) tšk. 2-5) dėžėse.



(a)



(b)

**Pav. 9.** Stiklainio (a) ir aliuminio (b) elektronikos dėžės terminės būsenos dinamika nusistovėjimo režime ir pradinėje aušinimo stadijoje. Žymėjimai kaip paveiksle 8.

Labai svarbi yra išmatuoto santykinio drėgnumo dinamika elektronikos dėžėse, pagal kurią apskaičiuojamas rasos taško  $t_{Dp}$  temperatūros kitimas (Pav. 8 kr. 6). Rasos taško temperatūros eksperimento pabaigoje  $t_{Dp,\infty}$  neatitikimas eksperimento pradžioje buvusiais rasos taško temperatūrai  $t_{Dp,0}$  apibrėžia vandens garo pritekėjimo/nutekėjimo pro tiriamųjų elektronikos dėžių tarpines įtaką, kadangi aliumininėse ir stiklinėse dėžėse pritekėjimas per sienelės yra paneigtinas. Stiklinėje dėžėje (stiklainyje) pritekėti/nutekėti garui pro tarpinę sąlygos yra nepalankios, nes guminė tarpinė yra santykinai maža ir ją glaudžiai pridengia metalinis dangtelis). Todėl oro stiklainyje rasos taško temperatūros eksperimento pradžioje ir pabaigoje praktiškai nesiskiria ir yra apytiksliai 11 °C (Pav. 8 (b) kr. 6). Tuo tarpu aliumininėje dėžėje rasos taško temperatūra  $t_{Dp,\infty}$  eksperimento pabaigoje yra apytiksliai 3°C aukštesnė už  $t_{Dp,0}$  temperatūrą (Pav. 8 (a) kr. 6). Tai patvirtina, jog vandens garo pritekėjimas pro aliuminio dėžių tarpines jų eksploatacinėje praktikoje gali daryti ženkliai įtaką mikroklimatui jose (šis pastebėjimas liečia ir plačiai pritaikomas plastmasines dėžes, kuriose papildomai turės įtakos ir garo pritekėjimas/nutekėjimas per laidžias sienelės).

Aplinkos oro tikroji temperatūra klimatinėje kameroje skirsis nuo teoriškai užduotosios (aušinimo režime bus kiek aukštesnė, o šildymo režime bus kiek tai žemesnė). Savaime aišku, jog oro dėžėje temperatūros kitimas bus dar inertiškesnis. Todėl palyginamajam įvertinimui yra labai svarbūs terminės būsenos nusistovėjimo laikotarpiai, kadangi praveistame eksperimente išlaikyta sudėtingos MIL-STD-810F standartu apibrėžtos eksploatacinės sąlygos.

Kitas labai svarbus faktorius yra oro dėžėje ir jos atitvarų (sienelių) temperatūros priartėjimas prie rasos taško temperatūros, kas sudaro prielaidas ore esančio garo tūrinei ir paviršinei daliai ore esančio garo kondensacijai įvykti. Susidarę kondensato lašeliai ore ar jo plėvelė vidiniuose ir išoriniuose atitvarų paviršiuose aušinimo režime pasiekus minusinę temperatūrą gali sušalti į ledą. Tai sudaro prielaidas sublimacijos procesui vykti, o šildymo režime prasidės ir ledo atitirpimo procesas.

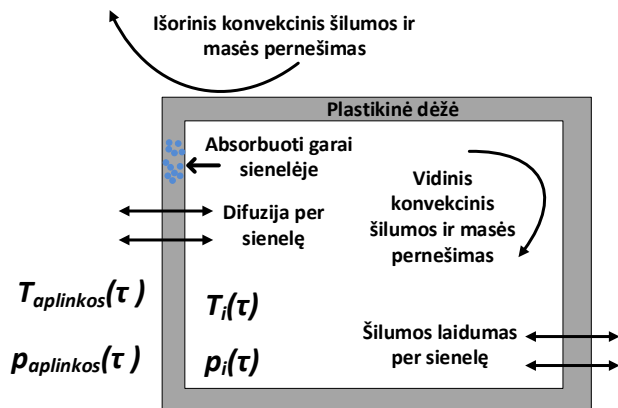
Kai dėžės aušinimo ar šildymo procese fazinių virsmų procesai nevyksta, tuomet dėžės atitvarų skirtingą terminės būsenos kitimą apibrėžia auštančio/šylančio oro savita savaiminio judėjimo dinamika prie dėžės dangčio ir dugno iššaukianti šilumos vidinio atidavimo proceso lokalinius intensyvumo pokyčius.

### **3.2 Modeliavimo rezultatai – drėgmės prognozavimas esant neizoterminėms sąlygoms**

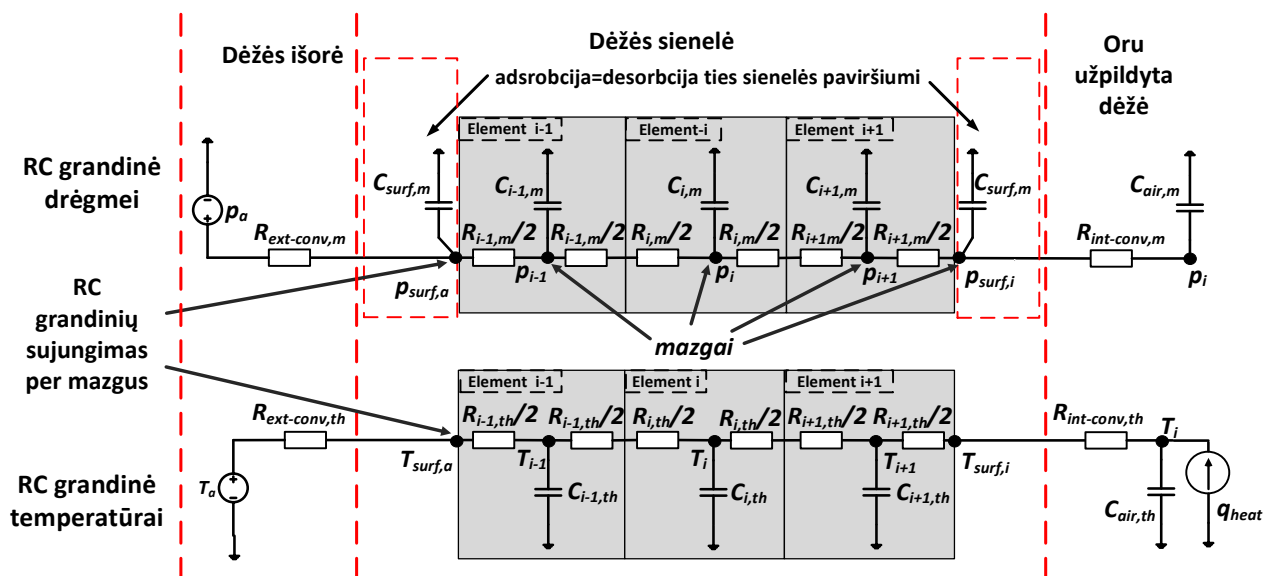
Šiluminių laukų ir drėgmės modeliavimui naudojama teorija aptarta šioje ataskaitoje ir pirmoje ataskaitoje su pavadinimu matematinio modelio ataskaita, kurioje detalai aptariamas šiluminių laukų skaičiavimas ir matematinis modelis.

Drėgmės ir šiluminių laukų prognozavimui ir modeliavimui pasirenkama tuščia elektronikos plastikinė dėžė (pav. 10). Modeliuojami ir analizuojami sudėtiniai šilumos ir masės mainai, kuriuos sudaro išorinis ir vidinis konvekcinis šilumos ir masės pernešimas, masės pernešimas difuzija per sienelės, šilumos perdavimas per sienelę laidumu ir vidinis dėžės pašildymas naudojant kaitinimo elementą. Šiame darbe šiluminis spinduliavimas nėra vertinamas. Prieš sudarant modelį, sudaromos šios prielaidos:

- Temperatūra ir vandens garų slėgis per visą vidinį ir išorinį paviršių yra vienodas.
- Vandens garų slėgis dėžės ore ir išorėje yra konvekcijos vienodai paskirstytas.



Pav. 10 Elektronikos plastikinės dėžės brėžinys su joje vykstančiais ir analizuojamais procesais



Pav. 11 RC grandinė šilumianiam ir masės (drėgmei) mainams modeliuoti

Naudojamas RC metodas išspręsti ir modeliuoti šiluminį ir drėgmės uždavinį. RC metodas, iš tikro, yra analogiškas kontroliuojamų tūrių - baigtinių skirtumų metodui (angl. the control-volume Finite difference method (CV-FDM)) ir turi tokias pačias lygtis varžoms ir talpoms apibūdinti kaip CV-FDM metodas [29]. Daugiau galima rasti publikuotame straipsnyje [29]. Plastikinėje dėžėje modeliuojami procesai panaudojant sujungtą RC grandinę, kuri apjungia RC šiluminę ir drėgmės (arba kitaip masės mainų) grandines (11 pav.). Abi RC grandinės apjungia 1-D vienmatę diskretizaciją sieniei (angl. one-dimensional description) ir bemačią 0-D, priklausantį tik nuo laiko, (angl. lumped analysis arba 0-D) aprašymą esančiam orui dėžės viduje ir išorėje. Norint modeliuoti kintamas drėgmės ir temperatūros sąlygas, RC grandinėse naudojama talpa (arba kitaip, kondensatorius), kuri charakterizuoja adsorbciją ir desorbciją ties sienelės paviršiumi, kadangi šie procesai yra gana greitai (11 paveikslėlis) keičiantis temperatūrai. Šiuo atveju, sienelės storis naudojamas talpai apskaičiuoti yra apie 0,1 mm. Šildymo efektui modeliuoti panaudojamas šilumos



šaltinis, kuris pavaizduotas grandinėje kaip srovės šaltinis. Aplinkos temperatūra atvaizduojama įtampos šaltiniu. Pateiktoje RC grandinėje drėgmės ir šiluminė grandinės yra sujungtos per mazgines temperatūras ir vandens garų slėgius, kaip pavaizduota 11 paveikslėlyje. Mazginės temperatūros naudojamos kaip įvesties duomenys vandens garų mazguose (RC drėgmės grandinė) difuzijos ir tirpumo koeficientams paskaičiuoti, kurie naudojami varžos ir talpos dydžiams apskaičiuoti.

Varžos ir talpos drėgmės laukui modeliuoti apskaičiuoti buvo aptartos teorijos 2 skyrelyje, o šiluminėms varžoms ( $R_{mat,th}$ ) ir talpoms ( $C_{mat,th}$ ) atitinkamai naudojami yra šios:

$$R_{mat,th} = \frac{\Delta x_i}{A \lambda_i} \quad (36)$$

$$R_{th}^{konv} = \frac{1}{\alpha A} \quad (37)$$

$$C_{i,th} = \Delta x_i (A \rho c_p)_i = V_i (\rho c_p)_i \quad (38)$$

čia  $V_i$  – medžiagos užimamas tūris arba diskretizuotas elementas, [m<sup>3</sup>],  $\Delta x_i$  – diskretizuoto elemento ilgio vienetą x ašyje, [m],  $th$  – sutrumpinimas žodžio šiluminis,  $i$  – žymi diskretizuoto elemento numerį,  $\lambda$  – šilumos laidumo koeficientas [W/(m·k)],  $\alpha$  – šilumos atidavimo koeficientas [W/(m<sup>2</sup>K)],  $\rho$  – medžiagos tankis [kg/m<sup>3</sup>].

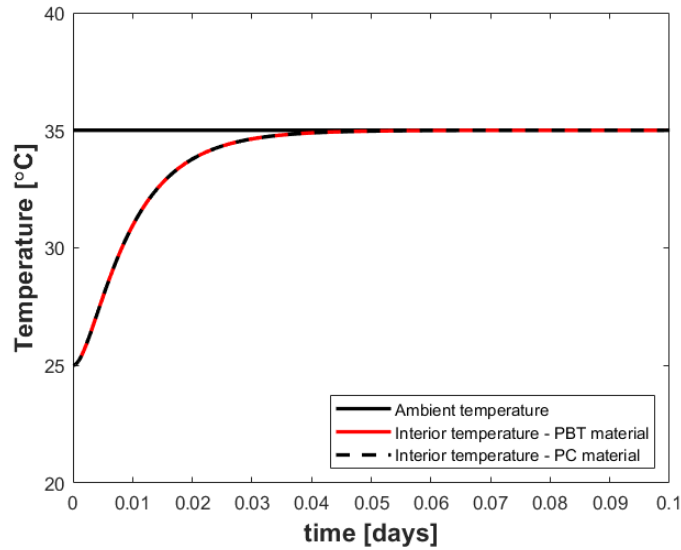
**LENTELĖ 1.** PBT-30GF ir PC medžiagų savybės [29], [30]

	Sienelės medžiaga	
	PBT-30GF	PC
Proporcingumo koeficientas, $D_0$ [m <sup>2</sup> /s]	$1.25 \cdot 10^{-4}$	$1.36 \cdot 10^{-5}$
Difuzijos aktyvacijos energija, $E_D$ [J/mol]	$45.95 \cdot 10^3$	$36.5 \cdot 10^3$
Proporcingumo koeficientas, $S_0$ [kg/(m <sup>3</sup> ·Pa)]	$8.61 \cdot 10^{-10}$	$5.37 \cdot 10^{-10}$
Tirpumo aktyvacijos energija, $E_S$ [J/mol]	$35.31 \cdot 10^3$	$36.2 \cdot 10^3$
Laidumo koeficientas, $\lambda$ [W/(m·k)]	0.25	0.2
Tankis, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1310	1200
Specifinė savitoji šiluma, $c_p$ [J/(kg·K)]	1000	1200

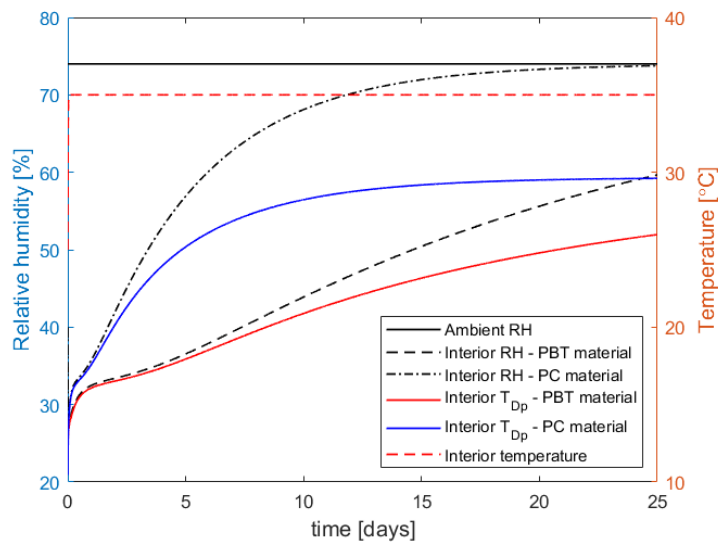
Temperatūros ir drėgmės modeliavimas atliekamas kai plastikinė dėžė yra naudojama aplinkoje, kurios temperatūra yra 35 °C, o santykinė drėgmė - 74 %. Dėžės sienelės storis yra 3 mm, ir tiriamos dvi skirtingos medžiagos iš kurių yra pagaminta dėžės sienelės. Šios dvi medžiagos yra polikarbonatas (PC) ir PBT-30GF, o jų savybės yra pateiktos lentelėje 1 [29]. Dėžės matmenys – 280 mm x 190 mm x 130 mm. Dėžės viduje ir sienelėse pradinė temperatūra buvo 25 °C, o santykinė drėgmė - 40 %. Šilumos atidavimo koeficientas viduje ir išorėje laikomas toks pat ir pastovus ir yra

lygus  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , o masės atidavimo koeficientas lygus  $0.0041 \text{ m/s}$ . Masės atidavimo koeficientas yra apskaičiuojamas pagal Lewis lygties išraišką 7 formulėje [29]. Aptarta RC grandinė 11 pav. naudojama modeliuoti temperatūrą bei drėgmę dėžės viduje.

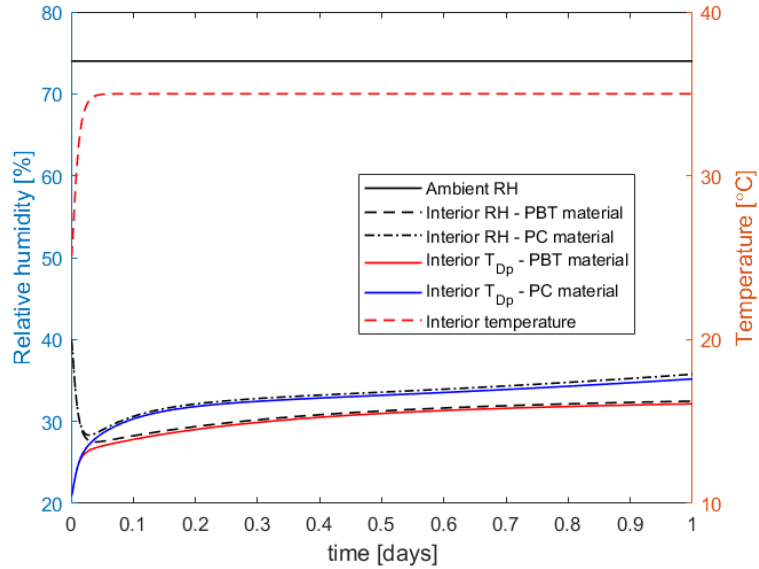
Pirmas modeliavimas atliekamas be šildymo dėžėje, o simuliacija buvo atliekama 25 dienoms. Modeliavimo rezultatai pristatyti ir pavaizduoti žemiau esančiuose paveikslėliuose. Rezultatų aiškesniam atvaizdavimui kai kurie grafikų laiko masteliai padidinti.



**Pav. 12** Temperatūros kitimas dėžės viduje lyginant skirtingas medžiagas. Temperature yra temperatūra, time – laikas, days – dienos, ambient – aplinkos, Interior – viduje dėžės, material - medžiaga

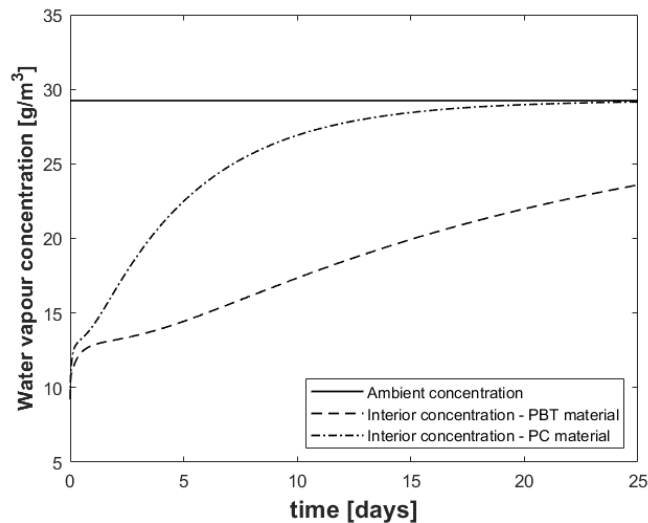


(a)



(b)

**Pav. 13** Santykinės drėgmės kitimas dėžės viduje lyginant skirtingas medžiagas. Relative humidity (RH) – santykinė drėgmė. (a) pilnas laiko mastelis (b) sumažintas laiko mastelis.



**Pav. 14** Garo koncentracijos kitimas dėžės viduje, lyginant skirtingas medžiagas. Water vapour concentration – vandens garų koncentracija, concentration - koncentracija.

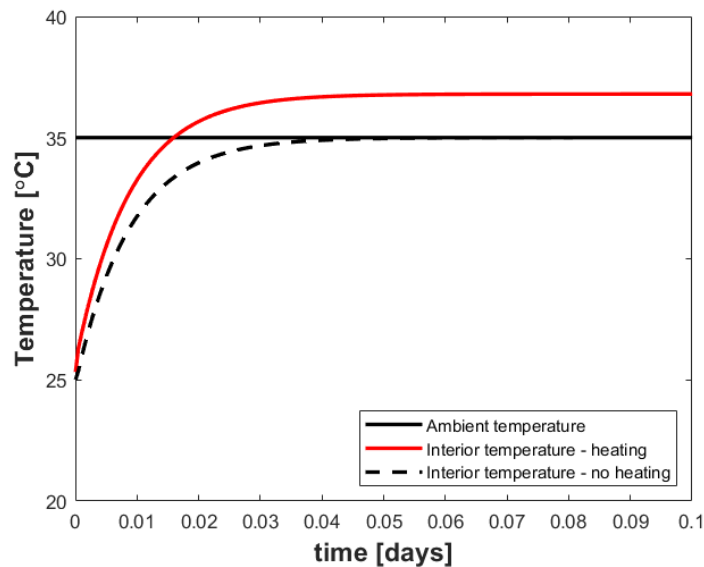
Dėl mažos šiluminės laiko konstantos, temperatūra viduje pasiekia aplinkos 35 °C temperatūrą labai greitai per maždaug 2,4 valandas ir po to procesas tampa izoterminis ( $T=\text{const}$ ) (Pav. 12). Temperatūros kitimas, naudojant skirtingas medžiagas, yra beveik vienodas, nes laidumo koeficientai, savitosios šiluminės talpos yra labai panašios.

Garų pokytis dėžės viduje yra daug lėtesnis negu temperatūros, dėl to, jog dėl nedidelio difuzijos koeficiento sienelė elgiasi kaip buferis. Galima išskirti du intervalus garų kitimo kreivėje, kai turime

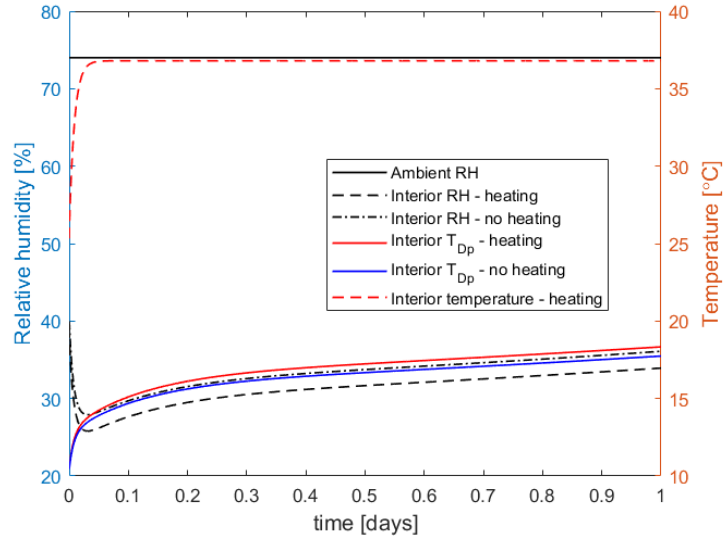
neizotermine ir izotermine būsenas. Esant neizoterminei būsenai ir temperatūrai didėjant, santykinė drėgmė nukrenta žemiau 30 %. Šiuo atveju, mažesnė santykinė drėgmė apie 27,5 % buvo esant PBT-30GF medžiagai, o 28,33 % - polikarbonatui. Mažesnė santykinė drėgmė esant PBT-30GF medžiagai buvo dėl to, jog ši medžiaga turi mažesnę difuzijos koeficientą, todėl masės pernešimas yra lėtesnis iš aplinkos per sienelę. Kita vertus, nors ir vyksta staigus santykinės drėgmės sumažėjimas, tačiau jį seka ir tam tikras greitesnis padidėjimas, kuris tam tikrą laiką sulėtėja (0,2 - 0,8 dienos pav. 13 (b)), kai procesas tampa izotermis ir toliau didėja eksponentiškai nuo 0,8 dienos (pav. 13 (a) ir (b)). Pradžioje matomas  $RH$  staigus padidėjimas atsiranda dėl to, jog dėl temperatūrų skirtumų sukeltos greitesnės desorbcijos garas iš sienelės yra atiduodamas į dėžės orą ir tas labai matyti koncentracijos kreivės pokytyje (pav. 14). Stebint vandens garo koncentracijos kitimą, pradžioje dėl minėtos desorbcijos taip pat matyti staigus koncentracijos padidėjimas esant neizoterminei būsenai, kuris vėliau kyla lėtai ir nusistovėjus izoterminei būsenai, eksponentiškai.

Rasos taško temperatūra yra labai panaši į koncentracijos kitimo kreivę, kadangi rasos taškas priklauso nuo esamo garo kiekio dėžės ore (Pav. 13 ir 14). Esant izoterminei būsenai, rasos taško temperatūra padidėjo nuo 10,45 °C iki 29,66 °C ir buvo lygi aplinkos rasos taško temperatūrai.

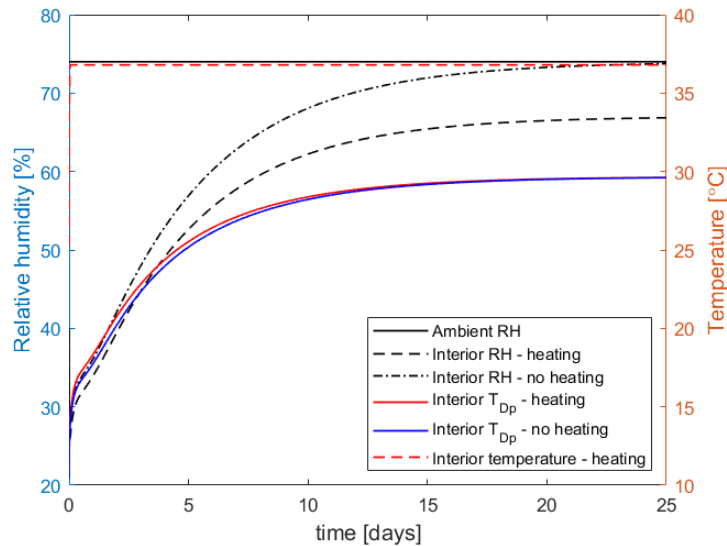
Antras modeliavimas buvo atliekamas esant 1 W šildymui dėžės viduje. Visos sąlygos išlieka tos pačios kaip ir pirmam modeliavimo atvejui. Esant šildymui, temperatūra pakilo ir buvo apie 36,79 °C, t.y. beveik keliais laipsniais daugiau negu be šildymo (pav. 15). Kadangi temperatūros panašios abiem medžiagoms, dėl patogumo 15 paveikslėlyje rodoma tik PBT-30GF medžiagos temperatūros kitimas. Kai nusistovi pastovios sąlygos, tuomet šiluma yra perduodama iš vidaus į aplinką per dėžės sienelę.



**Pav. 15** Temperatūros kitimo palyginimas dėžės viduje esant ir nesant šildymui. Temperature yra temperatūra, time – laikas, days – dienos, ambient – aplinkos, Interior – viduje dėžės, heating – šildymas, no heating – be šildymo



(a)



(b)

**Pav. 16** Santykinės drėgmės kitimo dėžės viduje palyginimas esant ir nesant šildymui. (a) pilnas laiko mastelis (b) sumažintas laiko mastelis.

Esant šildymui, santykinė drėgmė yra mažesnė negu be šildymo, dėl to, jog santykinė drėgmė yra labai priklausoma nuo temperatūros (Pav. 16). Svarbu atkreipti dėmesį, jog rasos taško temperatūra yra aukštesnė esant šildymui dėžės viduje, todėl, jog dėl greitesnės difuzijos vyksta greitesnis garo pernešimas iš aplinkos į vidų. Kadangi aplinkos garo kiekis aplinkoje yra toks pat kaip ir nesant šildymui, todėl galutiniame taške rasos taško temperatūra išlieka ta pati abiem atvejais.

Apibendrinant galima pasakyti, jog RC metodas yra labai lankstus naudoti modeliuojant drėgmę ir temperatūros elektronikos dėžėse. Šis metodas tinka skirtingų fizikos sričių apjungimui ir galima

derinti modeliuojant vienmatėje, bematėje ar dvimatėje sistemoje. Jis naudingas ir tuo, jog gali duoti greitą modeliavimą, nagrinėjant daug skirtingų elektronikos konfigūracijų prieš pradėdant projektuoti elektroniką.

Matome, jog šiluminė laiko konstanta yra daug mažesnė, negu laiko konstanta garui arba kitaip masės mainams, todėl, kad jis yra žymiai ilgesnis procesas negu šilumos perdavimas. Dėl to šilumos perdavimas įvyksta gana greitai, kai masės mainams reikia laiko dienomis. Kitas svarbus faktorius absorbcija ir desorbicija sienelėse, kuri gana greitai gali kisti dėl besikeičiančios temperatūros, todėl svarbu šio efekto neignoruoti, norint kontroliuoti drėgmę.

Lyginant polikarbonato (PC) ir PBT-30GF medžiagas, matyti, jog polikarbonatas yra labiau laidesnė medžiaga vandens garams, tačiau norint išgarinti vandens garus ir labiau praleidžia drėgmę į aplinką. Dėl mažesnio difuzijos koeficiento, naudojant PBT-30GF medžiagą, santykinė drėgmė nukrenta labiau dėl temperatūros padidėjimo, negu esant PC medžiagai. Palyginimui PC medžiaga turi 4,92 kartus didesnę difuzijos koeficientą negu PBT-30GF medžiaga ties 25 °C temperatūrai. Labai svarbu atsižvelgti kiek pati medžiaga gali absorbuoti į save vandens garų, kadangi nuo to priklauso esamas garo kiekis ore keičiantis temperatūroms.

## Literatūra

1. J. B. Jacobsen, J. P. Krog, L. Rimestad, A. Riis and A. H. Holm, "Climate-Protective Packaging: Using Basic Physics to Solve Climatic Challenges for Electronics in Demanding Applications," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, no. 3, pp. 51-59, Sept. 2014.
2. Staliulionis, Ž., Conseil-Gudla, H., Mohanty, S., Jabbari, M., Ambat, R., and Hattel, J. H. (May 10, 2018). "Modeling of Moisture Transport Into an Electronic Enclosure Using the Resistor-Capacitor Approach." *ASME. J. Electron. Packag.* September 2018; 140(3): 031001. <https://doi.org/10.1115/1.4039790>
3. M. Tencer, "Moisture ingress into Nonhermetic enclosures and packages. A quasi-steady state model for diffusion and attenuation of ambient humidity variations," in *Proceedings of the 44<sup>th</sup> International Conference on Electronic Components and Technology*, (IEEE, 1994), pp. 196-209.
4. Ashim K. Datta, *Biological and Bioenvironmental Heat and Mass Transfer*, New York, 2002.
5. J. Crank: *The Mathematics of Diffusion*, 2nd ed., Oxford University Press, 1975.
6. G. Gimbutis, K. Kajutis, V. Krukonis, A. Pranckūnas, P. Švenčianas. *Šiluminė technika*, Vilnius "Mokslas" 1983. ISBN 5-420-00751-7.
7. Neale, D. Derome, B. Blocken, J. Carmeliet, "Determination of surface convective heat transfer coefficients by CFD", 11th Canadian Conference on Building Science and Banff, Alberta, 2007.
8. Mihajlo N. Golubovic, H.D. Madhawa Hettiarachchi, William Belding, William M. Worek, "A new method for the experimental determination of Lewis relation", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33 (2006) 929–935.
9. Robert A. Alberty: *Physical Chemistry*, 7th ed., John Wiley & Sons, 1987.
10. E. L. Cussler: *Diffusion, mass transfer in fluid systems*, 2nd ed., Cambridge University Press, 1997.
11. E. H. Wong, S.B. Park, Moisture diffusion modeling – A critical review. Article in press R. Baierlein, *Thermal Physics*, Cambridge University Press, 2003.
12. J. Carroll, What is Henry's law, *Chem. Eng. Prog.* 87 (1991) 48–52
13. J. Gibbs, *The Scientific Papers of J Willard Gibbs, Vol I, Thermodynamics*, Dover, New York, 1961
14. G. Job, F. Herrmann, Chemical potential—a quantity in search of recognition, *Eur. J. Phys.* 27 (2006) 353.
15. S. I. Moon, C. W. Extrand, Water Vapor Permeation Resistance of Polycarbonate at Various Temperatures *Ind. Eng. Chem. Res.* 48, 8961-8965 (2009).
16. Xu Chen, Shufeng Zhao, Linda Zhai, "Moisture Absorption and Diffusion Characterization of Molding Compound", *Journal of Electronic Packaging*, 460 / Vol. 127, DECEMBER 2005
17. Jost, W., 1960, *Diffusion in Solids, Liquids, Gases*, 3rd ed., Academic Press, New York
18. M. Barink, A. Mavinkurve, J. Janssen, "Predicting non-Fickian moisture diffusion in EMCs for application in micro-electronic devices", *Microelectronics reliability* 62 (2016) 45-49.
19. Buck Research Instruments LLC, Model CR-1A hygrometer with autofill operating manual, Application 1 (2010).
20. Tetens, O. 1930. Über einige meteorologische Begriffe. *Z. Geophys* 6: 207-309.
21. Murray, F.W. 1967. "On the computation of saturation vapour pressure", *J. Applied Meteorology* 6: 203-204.
22. George Wm. Thomson, "The Antoine Equation for Vapor-pressure Data", *Chem. Rev.*, **1946**, 38 (1), pp 1–39
23. *David R. Lide, ed. (2005). CRC Handbook of Chemistry and Physics. Boca Raton, Florida: CRC Press. p. 6-8.*
24. Sonntag D.: Important New Values of the Physical Constants of 1986, Vapour Pressure Formulations based on the IST-90 and Psychrometer Formulae; *Z. Meteorol.*, 70 (5), pp. 340-344, 1990.
25. Application note Dew-point calculation, SHTxx Humidity & Temperature Sensmitter, Sensirion, the sensor company, online: [http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~tcs3/tcs3/Misc/Dewpoint\\_Calculation\\_Humidity\\_Sensor\\_E.pdf](http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~tcs3/tcs3/Misc/Dewpoint_Calculation_Humidity_Sensor_E.pdf)
26. J. E. Galloway and B. M. Miles, "Moisture absorption and desorption predictions for plastic ball grid array packages," in *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, vol. 20, no. 3, pp. 274-279, Sept. 1997.

27. Daniel Markus, Manuel Schmidt, Karin Lunz, Ulrich Becker, "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.
28. Z. Staliulionis, L. Paukštaitis and G. Miliauskas, "Experimental study of transient heat transfer and temperature dynamics in the electronics enclosures," *2022 23rd International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*, 2022, pp. 1-7, doi: 10.1109/EuroSimE54907.2022.9758845.
29. Z. Staliulionis, S. Mohanty, J. H. Hattel and G. Miliauskas, "Numerical Modelling of Humidity Behaviour in the Electronics Housing," *2022 26th International Conference Electronics*, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEEECONF55059.2022.9810469.
30. H. Conseil-Gudla, G. Hamm, L. Müller, M. Hain and R. Ambat, "Experimental Study of Moisture Ingress in First and Second Levels of Electronic Housings," in *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 8, no. 11, pp. 1928-1937, Nov. 2018.