



2004-2006 m. Bendrojo programavimo dokumento 2 prioriteto „Žmogiškųjų išteklių plėtra“ 4 priemonė „Mokymosi visą gyvenimą sąlygų plėtra“

Projekto sutarties numeris: ESF/2004/2.4.0-K01-160/SUT-261

Projekto pavadinimas: **Inovatyvūs mokymosi metodai ir naujausios technologijos gamtos mokslų bakalauro rengimui**

FIZ 121 MOLEKULINĖ FIZIKA IR TERMODINAMIKA

Laboratorinis darbas

MEDŽIAGŲ ŠILUMINIO LAIDUMO KOEFICIENTO NUSTATYMAS

1. Darbo tikslas:

Nustatyti pateiktų medžiagų šiluminio laidumo koeficientus.

2. Darbo uždutis:

2.1. Susipažinti su medžiagų šiluminio laidumo mechanizmais bei šilumos perdavimo kiekybiniu aprašymu.

2.2. Atlikti eksperimentą ir apskaičiuoti nurodytų medžiagų šiluminio laidumo koeficientus. Tiriamas medžiagas parenka dėstytojas.

3. Bendroji teorija

Šilumos perdavimo mechanizmai.

Naudojant šilumą susiduriame su dviem gana priešingomis problemomis. Viena susijusi su poreikiu išlaikyti šilumą kokioje nors uždaroje vietoje – name, gamykloje. Šiuo atveju šilumos pernešimas į supančią aplinką turi būti kuo mažesnis.

Antroji problema tampa reikšminga tada, kai šilumos perdavimas turi būti kuo didesnis, pavyzdžiui, šiluminėse mašinose (tame tarpe, ir vidaus degimo varikliuose), kaitintuvuose, saulės

energijos kolektoriuose ir kt. Dėl to dabar panagrinėsime pačius bendriausius šilumos perdavimo dėsnis.

Šiluma visada perduodama iš didesnės temperatūros kūno šiltesniai. Egzistuoja trys šilumos perdavimo mechanizmai: *šiluminis laidumas, konvekcija ir spinduliavimas*.

Šiluminis laidumas vyksta tada, kai kūnus sudarančios dalelės šiluminio judėjimo metu susiduria ir perduoda savo kinetinę energiją. Kadangi karštesnio kūno dalelės turi vidutiniškai daugiau energijos negu šaltesnio, tai aišku, kad susidūrimų metu karštesnio kūno dalelės perduos 'šaltesnėms' dalelėms. Šilumos srauto tankis \mathbf{q}'' apibrėžiamas kaip energijos kiekis [J], kuris pro vienetinį paviršiaus plotą [1 m^2] jam statmenai per 1 s (dimensija [$\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]). Per 1 s perneštas šilumos kiekis \mathbf{q} per plotą A apskaičiuojamas taip:

$$\mathbf{q} = A \mathbf{q}'' \quad (1)$$

Pagal Fourier dėsnį šilumos srautas \mathbf{q}'' susijęs su temperatūros gradientu vienalytėje aplinkoje taip:

$$\mathbf{q}'' = -k \nabla T \quad (2)$$

k yra šiluminio laidumo koeficientas [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$]; jis priklauso nuo medžiagos, jos temperatūros, tankio ir drėgmės. Nevienalytės terpės šiluminis laidumas dar priklauso ir nuo orientacijos.

Kai šilumos mainai vyksta tarp kietosios medžiagos ir skysčio arba dujų, tai dažniausiai šiluma perduodama *konvekcijos* būdu. Nuo šiluminio laidumo konvekcija skiriasi tuo, kad su paviršiumi susidūrusios skysčio dalelės 'atvėsta' ('įkaista') ir tą pat akimirka susimaišo su skysčiu, t.y. 'išnyksta'. Tai taip vadinama *priverstinė konvekcija*. Jeigu skystis (dujos) iš pradžių yra pusiausvyroje, tačiau dėl šilumos perdavimo pasikeičia jo tankis, todėl skystis (dujos) pradeda judėti – šis procesas vadinamas *laisvąja konvekcija*.

Trečiasis šilumos perdavimo būdas yra *spinduliavimas*. Kūnas negali išspinduliuoti daugiau kaip tokios temperatūros juodasis kūnas (kūnas, kuris sugeria visą kritusią spinduliuotę, absorbcijos koeficientas $\alpha = 1$, atspindžio $\rho = 0$). *Kirchhofo dėsnis* išreiškia juodojo kūno spinduliavimo intensyvumą, kuris priklauso tik nuo jo temperatūros:

$$\mathbf{q}'' = \sigma T^4 \quad (3)$$

Jeigu kūnas nevisiškai juodas, tai toks kūnas tik dalį savo spinduliuotės išspinduliuoja kaip juodas kūnas, t.y.

$$\mathbf{q}'' = \varepsilon \sigma T^4 \quad (4)$$

kur ε yra apibrėžiamas kaip sugertos ir kritusios spinduliuotės santykis. Toks kūnas vadinamas *pilkuoju*. Supaprastintu atveju α ir ε nepriklauso nuo bangos ilgio λ ; kitaip į pastarąsias formules reikia įvesti priklausomybes $\alpha(\lambda)$ ir $\varepsilon(\lambda)$.

Šiluminis laidumas dujose.

Šiluminis laidumas pasireiškia tada, kai dujose būna kokių nors išorinių priežasčių sukeltas *temperatūrų skirtumas*. Įvairiose tūrio vietose dujų molekulių vidutinės kinetinės energijos nevienodos. Vykstant netvarkingam molekulių šiluminiam judėjimui, molekulės, patekusios iš šiltesnių dujų dalių į šaltesnes, atiduoda savo energijos perteklių gretimoms dalelėms. Atvirkščiai, lėčiau judančių molekulių, patekusių iš šaltesnių dalių į šiltesnes, energija padidėja, joms susidūrus su greičiau judančiomis molekulėmis.

Vidinė energija šilumos pavidalu perduodama taip, kad pro plotą ΔS pernešamas šilumos kiekis ΔQ per laiko vienetą, t.y. srautas $\Delta q = \Delta Q/dt$ yra tiesiog proporcingas temperatūros kitimo greičiui ilgio vienetu z :

$$\Delta q = - \left(\frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle \rho c_v \right) \frac{dT}{dz} \Delta S, \quad (5)$$

kur dydis κ

$$\kappa = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle \rho c_v \quad (6)$$

vadinamas šiluminio laidumo koeficientu.

Formulę (6) gavo Ž.Furjė, ir ji vadinama Furjė **šilumos laidumo** dėsnio. Šioje formulėje minuso ženklas reiškia, kad energija pernešama temperatūros mažėjimo kryptimi. Šilumos laidumo koeficientas parodo, koks šilumos kiekis pernešamas pro ploto vienetą per laiko vienetą, kai temperatūros gradientas lygus vienetui.

Vidinės trinties ir šilumos laidumo koeficientai nepriklauso nuo dujų slėgio. Šį faktą galima paaiškinti taip. Didėjant slėgiui, impulsą ir vidinę energiją perneša *didesnis molekulių skaičius*, tačiau kiekviena molekulė be susidūrimo pralekia *mažesnę atstumą*, ir bendras impulso ir energijos pernešimas nepakinta.

Pernešimo reiškiniai skysčiuose.

Skysčiuose, kaip ir dujose, atsiradus erdviniam tankio, temperatūros arba tvarkingo judėjimo greičio nevienalytiškumui, atsiranda pernešimo reiškiniai - difuzija, šiluminis laidumas arba vidinė trintis. Šie procesai yra glaudžiai susiję su skysčio molekulių šiluminiu judėjimu ir vyksta pagal tuos pačius Fiko, Furjė ir Niutono dėsnius, kaip ir atitinkami procesai dujose. Skysčių šiluminio judėjimo specifinės ypatybės atsispindi tik pernešimo koeficientuose ir jų priklausomybėje nuo būvio parametrų.

Chemiškai vienalyčio skysčio difuzijos koeficiento D formulė panaši į atitinkamą dujų formulę:

$$D = \frac{1}{6} \langle v \rangle \langle \delta \rangle, \text{ t.y. } D = \frac{1}{6} \frac{\langle \delta \rangle^2}{\tau_0} e^{-\frac{W}{kT}}. \quad (7)$$

Kai temperatūros yra daug žemesnės už kritinę, skysčių difuzijos koeficientai, palyginus su atitinkamų įprastų slėgių garų arba dujų difuzijos koeficientais, yra labai maži. Pavyzdžiui,

kambario temperatūroje vandens difuzijos koeficientas $D \sim 1,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, o tos pačios temperatūros ir atmosferos slėgio oro vandens garų $D \sim 2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Iš formulės (7) matyti, kad, kylant temperatūrai, difuzijos koeficientas greitai didėja, nes labai sutrumpėja relaksacijos laikas τ . Be to, temperatūrai kylant, šiek tiek padidėja ir vidutinis atstumas δ tarp pusiausvyros padėčių.

Iš šios priklausomybės matyti, kad, temperatūrai didėjant, ypač žemų temperatūrų srityje, skysčių klampumas greitai mažėja, o tuo tarpu dujų η didėja proporcingai $T^{1/2}$.

Didelių slėgių srityje jam didėjant, skysčių klampumas greitai didėja, nes didėja aktyvacijos energija ir atitinkamai didėja relaksacijos trukmė.

Šiluminis kietųjų kūnų laidumas.

Geras šiluminis laidumas - būdingas metalų bruožas. Kitų tipų kietųjų kūnų (pavyzdžiui, kristalinių dielektrikų) šiluminio laidumo koeficientai žymiai mažesni, negu metalų. Buvo pastebėta, kad metalų šiluminis laidumas tuo didesnis, kuo didesnis jų elektrinis laidumas, todėl natūralu spėti, kad, vykstant šiluminio laidumo procesui metaluose, energiją iš esmės perneša laisvieji elektronai.

Metalų šiluminio laidumo koeficientą K galima apskaičiuoti pagal formulę

$$K = \frac{1}{3} c_v \rho \lambda \langle v \rangle, \quad (8)$$

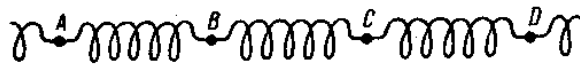
kur λ - vidutinis elektronų laisvojo kelio ilgis, o $\langle v \rangle$ - jų šiluminio judėjimo vidutinis greitis. Laikydami, kad laisvieji elektronai metale elgiasi taip pat, kaip vienatomės dujos, gauname:

$$c_v \rho = \frac{3}{2} k n_0, \quad (9)$$

kur k - Bolcmano konstanta, o n_0 - laisvųjų elektronų tankis.

Be elektroninio šiluminio laidumo, metaluose šiluma perduodama per kristalinę gardelę (gardelinis šiluminis laidumas). Tačiau ji žymaus vaidmens bendrame metalų šiluminiame laidume nevaizina. Daugelio grynų metalų šiluminis laidumas lėtai mažėja, kylant jų temperatūrai.

Kietųjų kūnų, **kurie neturi laisvų elektronų**, kristalinių gardelių šiluminio laidumo mechanizmas iš pagrindų skiriasi nuo metalų šiluminio laidumo mechanizmo. Tokių kietųjų kūnų šiluminis laidumas glaudžiai susijęs su jų kristalinę gardelę sudarančių dalelių šiluminio judėjimo pobūdžiu, nes šios dalelės yra surištos sąveikos jėgomis, priklausančiomis nuo atstumo tarp dalelių. Todėl vienu dalelių šiluminiai virpesiai perduodami kitoms. Pavyzdžiui, tamprūs dalelių virpesiai vienmatėje gardelėje, kurią galima schemiškai atvaizduoti spyruoklėmis surištomis dalelėmis bus perduodami gretimoms dalelėms B, C, D ir t. t. Tuo būdu, kristale plinta tampriosios bangos, pernešančios šiluminių virpesių energiją nuo vienu mazgų prie kitų. Tokios tampriosios bangos, atitinkančios kietajame kūne plintančius tvarkingus jo dalelių virpesius, yra fizikinė **garso** prigimtis ir vadinamos garso, arba akustinėmis, bangomis.



1 pav. Paprasčiausias kietojo kūno modelis – atomus surišančias jėgas atvaizduoti spyruoklėmis.

Garso greitis kietuosiuose kūnuose maždaug lygus keliems kilometrams per sekundę. Atrodytų, kad tokiu greičiu turėtų plisti kietajame kūne ir temperatūros pokyčiai, t.y. kristalų gardelinis šiluminis laidumas turėtų būti labai didelis. Tačiau bandymuose pastebima, kad kristalinių dielektrikų šiluminio laidumo koeficientai yra palyginti maži ir priklauso nuo temperatūros; jie mažėja, temperatūrai didėjant. Tik labai žemose temperatūrose šiluminio laidumo koeficientas yra gana didelis. Tampriausias bangas, kurias sukelia kietojo kūno dalelių aukšto dažnumo šiluminiai virpesiai, skirtingai nuo žymiai žemesnių dažnumų akustinių bangų, sklaido ir susilpnina sutiktos kelyje anharmoningai virpančios dalelės.

Šio proceso esmė yra tokia. Didėjant temperatūrai dalelių svyravimų amplitudė taip pat didėja, o esant dideliems nukrypimams pasireiškia anharmoniškumas, t.y., dalelių suderintinis svyravimas išsiderina, o tai ir reiškia, kad tampriosios bangos išsklaidomos. Tada kūno *šiluminis laidumas mažėja*.

Į tampriųjų bangų išbarstymą galima atsižvelgti, įvedant tų bangų vidutinį laisvojo kelio ilgį kristale – panašiai kaip ir dujų molekulėms. Tada viską galima paaiškinti taip, tarytum banga, nuėjusi tam tikrą kelią, nutrūksta, o jos vietoje atsiranda nauja, kita kryptimi plintanti banga – dujų atveju tai atitiktų dujų molekulių susidūrimą, jo metu perduodama energija ir pasikeičia molekulių lėkio kryptis. Tuo būdu, energijos pernešimas iš įšilusios kristalo dalies į šaltąją yra žymiai sunkesnis.

4. Tyrimo metodika

Šiluma iš vieno taško į kitą gali būti perduota trim būdais: laidumu, konvekcija ir spinduliavimu. Kiekvienas perdavimo būdais aprašomas atskiru matematiniu sąryšiu. Šiame darbe naudojama tyrimo įranga leidžia nustatyti šiluminio laidumo koeficientą, matavimams naudojamos penkios medžiagos, dažnai sutinkamos statybinėse konstrukcijose.

Perduotos šilumos kiekį galima įvertinti tokia lygtimi:

$$\Delta Q = \frac{kA\Delta T\Delta t}{h}, \quad (10)$$

kur ΔQ yra per medžiagą perduotos energijos kiekis, A – yra plotas, per kurį perduodama šiluminė energija, ΔT – temperatūrų skirtumas tarp priešingų medžiagos sienelių, tarp kurių vyksta šilumos perdavimas; Δt – laikas, kurio metu vyksta šilumos perdavimas; h – tiriamos medžiagos storis. Paskutinis dydis, šiluminio laidumo koeficientas k , gali būti surastas naudojant tą pačią formulę:

$$k = \frac{\Delta Q h}{A\Delta T\Delta t}. \quad (12)$$

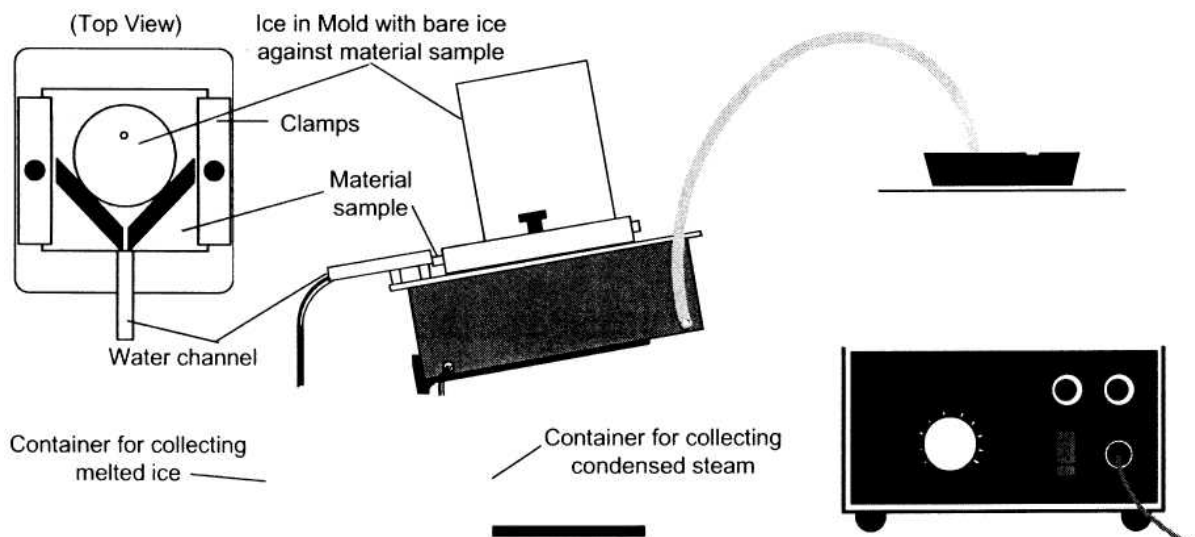
Šiluminio laidumo matavimas yra nesudėtingas: tiriamos medžiagos plokštelė yra tarp garų

kameros, kuriame palaikoma pastovi 100 °C temperatūra, ir ledo, kurio temperatūra 0 °C. Tarp priešingų medžiagos paviršių yra pastovus temperatūrų skirtumas 100 °C. Perduotos šilumos kiekis nustatomas matuojant ištirpusio ledo kiekį: susidaręs vanduo surenkamas indu.

Šiluminio laidumo prietaisą sudaro tokios dalys: stovas, garų kamera su jungimo žarnelėmis, indas ledui laikyti su dangteliu, tyrimo medžiagos: stiklas, medis, organinis stiklas, tekstolitas, kalnų uoliena. Medienos, tekstolito ir uolienos plokštelės padengtos aliuminio folija, kuri apsaugo šias plokšteles nuo drėgmės prasiskverbimo.

5. Prietaisai ir medžiagos

1. Garų kamera su stovu.
2. Garų generatorius (TD-8556A) (turi du garų išėjimus, kurių vienas naudojamas laboratoriniam darbui Nr. 7 „Kūnų šiluminio plėtimo koeficiento nustatymas“).
3. Tiriamos medžiagos.
4. Šaldiklis ledo šaldymui.
5. Indas susidariusio vandens surinkimui.
6. Svarstyklės surinktam vandeniui pasverti arba graduotas indas vandens tūriui nustatyti.
7. Indas surinkti susikondensavusiems garams.
8. Tepimo priemone garų kameros ir tiriamai medžiagai kontaktui.



2 pav. Šiluminio laidumo koeficiento tyrimo schema. Garų generatoriuje susidarę garai patenka į garų kamerą, kuri uždengta tiriamos medžiagos plokštele (material sample). Ji įtvirtinama ir prispaudžiama tam pritaikytais laikikliais (clamps). Ant plokštelės uždėtas ledo gabalas. Ledo pusėje plokštelės temperatūra 0°C, o garų kameros pusė įkaista iki 100°C. Dėl šilumos, praėjusios plokštele, ledas tirpsta, ir vandens latakų (water channel) išbėga į indą.

6. Tyrimo eiga

1. Pripildykite indą ledui vandeniu ir jį užšaldykite. (Nešaldykite uždengto indo.)

8. Kontroliniai klausimai

1. Šilumos perdavimo būdai.
2. Šiluminio laidumo perdavimo mechanizmai.
3. Tyrimo metodo paaiškinimas ir skaičiavimams naudojamos formulės pagrindimas.
4. Šilumos perdavimo kietaisiais kūnais mechanizmai.
5. Furjė šiluminio laidumo dėsnis.

9. Literatūra

1. <ftp://ftp.pasco.com/manuals/English/TD/TD-8561/012-03349D/012-03349D.pdf>.
2. K.Lipskis, R.Lukošius, Z.Pocius, A.Urbelis. Molekulinė fizika ir termodinamika. Fizikos laboratoriniai darbai. Vilnius, 1979.
3. A.Tamašauskas. Fizika 2. V, Mokslas, 1987, 224 p.