



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 bakalaurų rengimui**

FIZ 413 APLINKOS FIZIKA

Laboratorinis darbas

ŠILUMINĖS MAŠINOS EFEKTYVUMO TYRIMAS

1. Darbo tikslas:

Ištirti šiluminės mašinos efektyvumą naudojant TEA (Thermal Efficiency Aparatus).

2. Darbo užduotys:

- 1.1. Susipažinti su šiluminių mašinų tipais ir jas charakterizuojančiais parametrais.
- 1.2. Ištirti Karno ciklo efektyvumą kaip temperatūros funkciją.
- 1.3. Ištirti Karno ciklo efektyvumą su energijos nuostolių kompensavimu.

3. Bendroji teorija

Iš II TD dėsnio seka, kad izoliuotoje šiluminėje mašinoje vykstančio uždaro ciklo metu entropija negali mažėti:

$$\Delta S = \frac{Q - W}{T_C} - \frac{Q}{T_H} \geq 0, \quad (1)$$

kur Q – šilumos kiekis, gaunamas iš T_H šilumos rezervuaro, $Q - W$ yra šilumos kiekis, atiduodamas temperatūros T_C aušintuvui.

Maksimalus darbas gaunamas grįžtamojo proceso metu, kai (1) lygtyje rašome lygybę:

$$W_{\max} = Q \left(1 - \frac{T_C}{T_H} \right). \quad (2)$$

Norint gauti daugiau naudingo darbo, reikia kaitintuvo temperatūrą T_H padidinti kiek įmanoma, o aušintuvo temperatūrą sumažinti iki 0 K. T_H turi būti didesnė už T_C , o kadangi aušintuvo temperatūra T_C paprastai daug didesnė už absoliutų nulį, tai W_{\max} yra gerokai mažesnis už gautą šilumą Q .

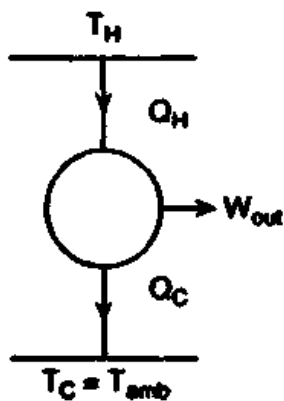
Naudingumo koeficientas η apibrėžimas santykiu

$$\eta = \frac{\text{naudingas darbas}}{\text{sunaudota šiluma}} = \frac{W}{Q}. \quad (3)$$

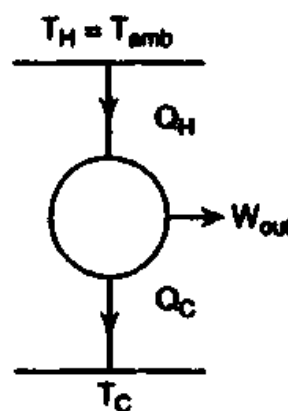
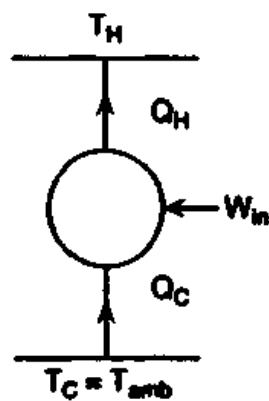
Maksimalus naudingumo koeficientas lygus

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_C}{T_H}. \quad (4)$$

Galima nesunkiai įsivaizduoti dviejų tipų šiluminės mašinos: kai aplinkos temperatūra $T_{\text{amb}} = T_C$ daug mažesnė už kaitintuvo šilumą (**Error! No text of specified style in document.** 1 pav.) ir kai kaitintuvas yra aplinka $T_{\text{amb}} = T_H$ (**Error! No text of specified style in document.** 2 pav.). Greta esančios schemas rodo ciklus, vykstančius priešinga tvarka.



Error! No text of specified style in document. 1 pav.
Šiluminės mašinos, kuriose aušintuvo vaidmenį atlieka aplinka, kurios temperatūra T_{amb} : šiluminė mašina ir šilumos pompa



Error! No text of specified style in document. 2 pav.
Šiluminės mašinos, kuriose kaitintuvo vaidmenį atlieka aplinka, kurios temperatūra T_{amb} : „šaltasis“ variklis, veikiantis žemesnėje temperatūra nei aplinkos, ir šaldytuvas

Šaldytuve darbas W_{in} sunaudojamas šilumos kiekiui Q_C paėmimui iš šaltojo rezervuaro ir atidavimui kaitintuvui. Pagal energijos tvermės dėsnį kaitintuvui atiduodama energija lygi $Q_H = Q_C + W_{\text{in}}$. Pritaikius II TD dėsnį entropijai gauname:

$$W_{\text{in}} = Q_C \left(\frac{T_H}{T_C} - 1 \right). \quad (5)$$

Šaldytuvo veikos efektyvumui nusakyti vartojamas efektyvumo koeficientas (COP – coefficient of performance):

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{W_{in}} = \frac{Q_c}{Q_H - Q_c}. \quad (6)$$

Šilumos pompą gauname tada, kai iš šalto rezervuaro (žiemą oras lauke) perduodame šilumą į šiltesnį kūną (žiemą oras patalpoje). Tada darbas W_{in} paima šilumos kiekį Q_C iš išorės ir sukuria šilumos kiekį $Q_H = Q_C + W_{in}$, kurį perduoda šiltesniam kūnui. Įdomu pastebėti, kad tokios šiluminės mašinos efektyvumo koeficientas gali būti gerokai didesnis už 1

$$\text{COP} = \frac{Q_H}{W_{in}} = \left[1 - \frac{Q_c}{Q_H} \right]^{-1} \leq \left[1 - \frac{T_c}{T_H} \right]^{-1} = \eta_{\max}^{-1} \quad (7)$$

ir siekti 5 – 6.

Turimas darbas

Bendra naudingumo koeficiento apibrėžimas yra toks:

$$\eta = \frac{\text{mašinoje gauta energija}}{\text{tam reikalinga energija}}. \quad (8)$$

Termodinamiškai nagrinėjant didesnio η gavimo būdus turime omeny tik šiluminės mašinos efektyvumą, o ne energijos naudojimo efektyvumą. Norint atsižvelgti dar ir taupų energijos vartojimą, naudingumo koeficientas apibrėžiamas kiek kitaip:

$$\varepsilon = \frac{\text{naudingas mašinoje gautas darbas}}{\text{maksimalus sunaudotam energijos kiekiui}}. \quad (9)$$

ε vadinamas antruoju efektyvumu.

4. Tyrimo metodika

Šiluminio efektyvumo aparato veikimo principas pateiktas priede Nr. 1.

Šiluminė mašina

Šiluminė mašina naudoja temperatūrų skirtumą tarp šalto ir karšto rezervuaro tam, kad atliktų darbą. Paprastai rezervuarai laikomi be galo dideliais, kad temperatūra proceso metu išliktų pastovi nežiūrint sugertos arba išsiskyrusios šilumos kiekių. Šiluminio efektyvumo prietaise (ŠEA) karštuoju rezervuaru laikomas elektrinis kaitintuvas (šilumas, išsiskirianti per varžą tekant elektros srovei).

ŠEA šiluminė mašina atlieka darbą elektrine forma tekant srovei per apkrovos rezistorių: jame, pagal Džaulio Lenco dėsnį, elektrinė energija paverčiama šiluma.

Šiluminės mašinos veikimo schema pateikta ... paveiksle. Pagal energijos tvermės dėsnį (I t/d dėsnį) išplaukia, kad $Q_H = W + Q_C$: gauta šiluma lygi mašinos atlikto darbo ir aušintuvui atiduotos šilumos sumai.

Efektyvumas

Šiluminės mašinos naudingumo koeficientas yra atlikto darbo ir šiluminei mašinai suteikto

šilumos kiekio santykis: $\eta = W/Q_H$.

Didžiausias naudingumo koeficientas yra šiluminės mašinos, veikiančios Karno ciklu:

$$\eta = (T_H - T_C) / T_H \quad (1)$$

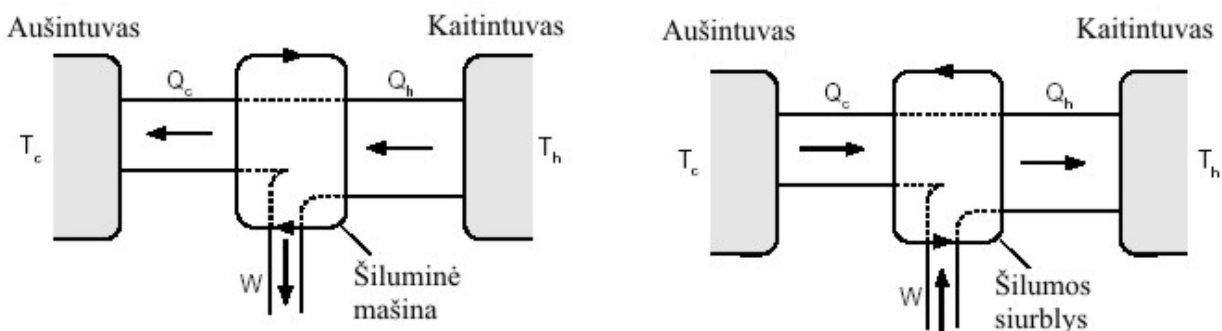
kur temperatūra matuojama kelvinais. Vieninteliu atveju šiluminės mašinos naudingumo koeficientas gali būti lygus 1: kai aušintuvo temperatūra lygi absoliučiam nuliui.

Naudojant ŠEA galima įvertinti energijos nuostolius dėl trinties, šiluminio laidumo apinduliavimo ir t.t.

Šilumos siurblys

Šilumos siurblys yra šiluminė mašina, dirbanti atvirkščia tvarka. Paprastai šiluma perduodama iš šiltesnio kūno šaltesniam. Šilumos siurblys perduoda šilumą iš šaltesnio kūno karštesniam (buitinis šaldytuvas, kondicionierius)

ŠEA atvirkščias ciklas gaunamas tekant srovei priešinga kryptimi nei Peltier įrenginys kuria srovę.



3 pav. Šiluminės mašinos veikimo schema

4 pav. Šilumos siurblio veikimo schema

Šilumos siurblio naudingumas nusakomas efektyvumo koeficientu (Coefficient of Performance) - tai šilumos, paimtos iš šalto rezervuaro, santykis su darbu, reikalingu tam šilumos perdavimui atlikti:

$$\kappa = Q_C / W \quad (2)$$

Efektyvumo koeficientas yra visada didesnis už vienetą. Šilumos siurblio maksimalus efektyvumo koeficientas priklauso tik nuo temperatūros:

$$\kappa_{\max} = T_C / (T_H - T_C) \quad (3)$$

Jeigu išvengtume trinties, šiluminio laidumo, spinduliavimo ir kt., nuostolių, turėtume gauti maksimalias šiluminės mašinos efektyvumo vertes.

ŠEA gali būti matuojami trys dydžiai: temperatūros, galia, atiduodama į kaitintuvą, ir galia, išsklaidoma apkrovos varžoje (atliktas darbas).

Temperatūros matavimas

Kaitintuvo ir aušintuvo temperatūros yra matuojamos termistoriaus elektrinę varžą. Ommetru išmatuotą varžą galima perskaičiuoti į temperatūrą naudojant lentelę (pastaba: didėjant temperatūrai, elektrinė varža mažėja).

Norint gauti tikslią temperatūrą reikia duomenis interpoliuoti. Pavyzdžiui, ommetras rodo 118,7 kΩ, t.y. tarp 120 kΩ (21°C) ir 115 kΩ (22°C). Išmatuota varža yra 120 – 118,7 = 1,3 kΩ virš 21 °C. Perskaičiuojam, kokia laipsnio dalis virš 21 °C: 1,3 kΩ · 1 °C / (120 – 115) = 0,26 °C

kΩ	°C	kΩ	°C	kΩ	°C	kΩ	°C	kΩ	°C
461	-5	146	17	53.2	39	21.7	61	9.76	83
436	-4	139	18	51.0	40	20.9	62	9.43	84
413	-3	133	19	48.9	41	20.1	63	9.12	85
391	-2	126	20	46.8	42	19.3	64	8.81	86
370	-1	120	21	44.9	43	18.6	65	8.52	87
351	0	115	22	43.0	44	17.9	66	8.24	88
332	1	109	23	41.2	45	17.3	67	7.96	89
315	2	104	24	39.6	46	16.6	68	7.70	90
298	3	100	25	37.9	47	16.0	69	7.45	91
283	4	95.4	26	36.4	48	15.5	70	7.21	92
269	5	91.1	27	34.9	49	14.9	71	6.98	93
255	6	87.0	28	33.5	50	14.4	72	6.75	94
242	7	83.1	29	32.2	51	13.8	73	6.53	95
230	8	79.4	30	30.9	52	13.4	74	6.33	96
218	9	75.9	31	29.7	53	12.9	75	6.12	97
207	10	72.5	32	28.5	54	12.4	76	5.93	98
197	11	69.3	33	27.4	55	12.0	77	5.74	99
187	12	66.3	34	26.4	56	11.6	78	5.56	100
178	13	63.4	35	25.3	57	11.2	79	5.39	101
169	14	60.7	36	24.4	58	10.8	80	5.22	102
161	15	58.1	37	23.4	59	10.4	81	5.06	103
153	16	55.6	38	22.5	60	10.1	82	4.91	104

**1 lentelė.
Temperatūros
perskaičiavimo
lentelė**

Šilumos kiekis, atiduodamas kaitintuvui Q_H

Šiluminio efektyvumo aparate matuojamas ne šilumos kiekis, bet energija per laiko vienetą, t.y. galia = $Q_H / \Delta t$. Energija išsiskiria tekant elektros srovei, todėl skaičiuodami šilumą naudojame elektrinės galios formulę:

$$P_H = I_H V_H \quad (4)$$

Šiluma, išsklaidyta apkrovos varžoje

Dėl tos pačios priežasties atliktą darbą W , t.y. šilumos kiekį, išsiskyrusį apkrovos varžoje, įvertiname elektros srovė galia būdu:

$$P_W = V_2 / R \quad (5)$$

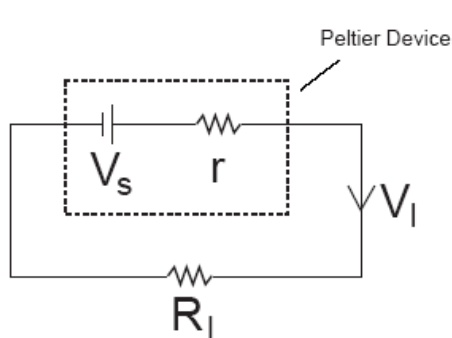
Netiesioginiai matavimai

Eksperimentuose gali reikėti nustatyti trys netiesioginius dydžius: Peltier elemento vidinę varžą; šilumos kiekį, kuris praėjo pro Peltier elementą ir išspinduliuotą šilumos kiekį (šiluminius

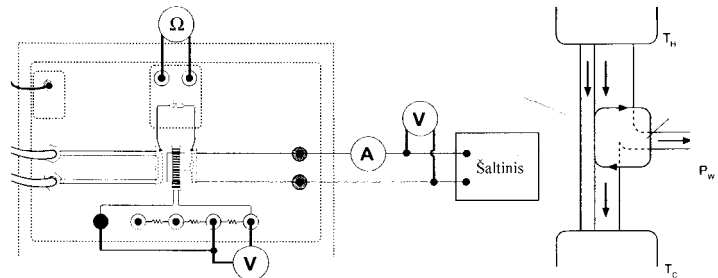
nuostolius); iš šalto rezervuaro „išpumpuotą“ šilumos kiekį.

Vidinė varža

Matuojant efektyvumą reikia apskaičiuoti vidinę varžą. tai daroma matuojant įtampą kritimą Peltier elemente, kai prijungta išorinė apkrova. Pirmiausia paleidžiamas ŠEA su apkrovos varža kaip parodyta



5 pav. Peltier elemento ekvivalentinė schema

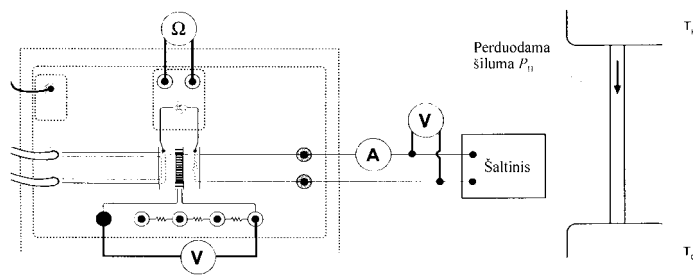


6 pav. Šiluminė mašina įjungta su apkrova

Ekvivalentinė 6 paveiksle pateiktos grandinės schema parodyta 5 paveiksle. Panaudojus Kirchhofo taisyklės gauname:

$$V_s - Ir - IR = 0 \tag{6}$$

Tą patį pakartojame be apkrovos (7 pav.). Dabar neteka jokia srovė per Peltier elementą, todėl matuojame tiesiog elemento kuriamą įtampą V_s .



7 pav. Šiluminė mašina įjungta be apkrovos

Šiluminės mašinos veikimo metu (su apkrova) matuojame įtampą V_w . Tada turime:

$$V_s - (V_w/R)r - IR = 0 \tag{7}$$

arba

$$r = \left(\frac{V_s - V_w}{V_w} \right) R \tag{8}$$

Šiluminis laidumas ir spinduliavimas

Dalis šilumos, kurią galima būtų naudoti šiluminėje mašinoje, išspinduliuojama iš šiltojo rezervuaro arba prateka pro Peltier elementą. Ši šiluma taip pat gali būti apskaičiuojama tokiu pačiu būdu: kai elementas prijungtas prie apkrovos ir kai ne (5 ir 6 paveikslai).

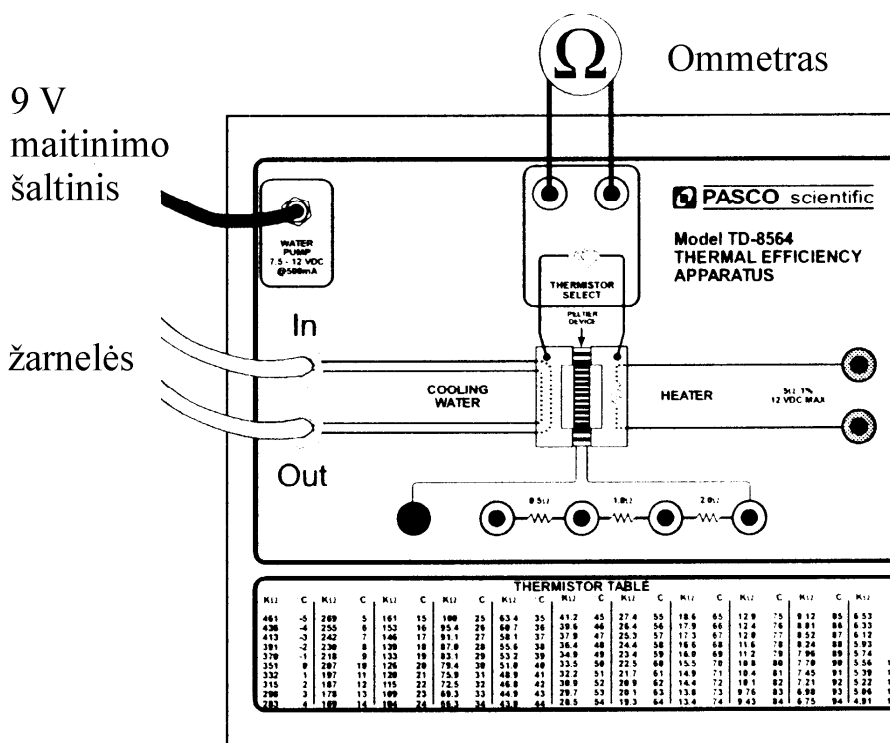
Kai elementas su apkrova įvertiname P_H . Kai apkrova atjungta energijos reikia tik temperatūrų palaikymui. Kadangi nėra apkrovos, karštąjį rezervuarą papildoma šiluma, kuri sunaudojama rezistoriaus šildymui – ši šiluma yra lygi šilumos nuostoliams. Tokie patys nuostoliai turėtų būti ir tuomet, kai šiluminė mašina įjungta.

5. Naudojami prietaisai

1. Thermal efficiency Aparatus (ŠEA).
2. Ommetras.
3. Jungimo laidai.
4. Indas šalto vandens rezervuarui, į kurį merkiamas ledas (3 kg).
5. Įtampos šaltinis (2,5 V – 12 V).
6. Ampermetras.

6. Tyrimo eiga

1. Paruošti ledo-vandens indą ir į jį pamerkti abi langeles nuo ŠEA (7 pav.).
2. Įjungti 9 V maitinimo šaltinį. Turi girdėtis siurblio veikimas, vanduo turi tekėti iš langelės, apžymėtos „out“.
3. Įjungti ommetrą į termistoriaus jungtis.
4. Prijungti DC maitinimo šaltinį, voltmetrą, ammetrą prie kaitintuvo jungčių. Nustatykite apie 11 V. (Neturi būti veikti ilgiau kaip 5 min, kai temperatūra $> 80\text{ }^\circ\text{C}$. Esant $93\text{ }^\circ\text{C}$, automatinis jungiklis uždarys srovę į kaitintuvą).
5. Prijungti $2\ \Omega$ rezistorių su trumpu laidu kaip parodyta 8 paveiksle. Prijunkite voltmetrą prie apkrovos rezistoriaus. (Gali būti naudojamas bet kuris rezistorius.)



8 pav. Šilumos siurblio veikimo schema

1.							
2.							

12. Nubrėškite grafiką $\eta_i(\Delta T)$. T_C laikome pastovia.

13. Parašykite išvadas. Pakomentuokite gautus rezultatus.

7. Kontroliniai klausimai

1. Termodinamikos dėsniai.

2. Idealiosios šiluminė mašinos sąlygos; Karno ciklas.

3. Šiluminių mašinų tipai ir energijos tvermės dėsnis.

4. Šiluminės mašinos darbas ir naudingumo koeficientas.

5. Šilumos siurblys ir jo efektyvumas.

6. Kaitintuvo, aušintuvo, naudingojo darbo atitikmenys šiluminio efektyvumo tyrimo aparate.

7. Literatūra

1. A. Kanapickas. Aplinkos fizika Paskaitų konspektas, 2004.

2. <ftp://ftp.pasco.com/manuals/English/TD/TD-8564/012-05443A/012-05443A.pdf>.

3. E. Boeker, R. van Grodelle. Environmental physics, John Willey & Sons, 1999.

Priedas Nr. 1. Šiluminio efektyvumo aparato veikimo principas.

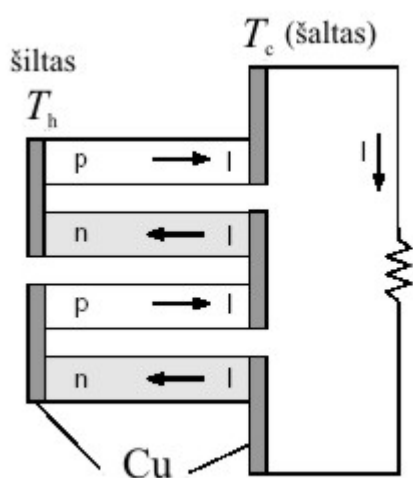
Peltier efektas

Šiluminio efektyvumo aparatas (ŠEA) gali būti naudojamas kaip šiluminė mašina arba kaip šilumos siurblys. Naudojant kaip šiluminę mašiną šiluma iš karšto rezervuaro naudojama atlikti darbui. Darbą atlieka per apkrovą tekanti elektros srovė. Naudojant ŠEA galima gauti realų šiluminės mašinos efektyvumą ir palyginti su teoriniu maksimaliu efektyvumu (Karno ciklo). Taip pat ŠEA galima naudoti kaip šilumos siurblių, kai šiluma pernešama iš šalto į karštą rezervuarą. Tada galima išmatuoti realų naudingumo koeficientas (coefficient of performance) ir palyginti su teoriniu COP.

Aparato veikimas pagrįstas Peltier elemento (termoelektrinio keitiklio) veikimu.

Šiluminio efektyvumo aparato veikimo principas pagrįstas principu, kuris buvo atrastas dar 1800 metais, tačiau praktiniam naudojimui buvo pritaikytas tik puslaidininkų fizikos dėka. 1821 metais buvo atrastas Seebeck efektas, kurio esmė tokia: kai dviejų skirtingų metalų jungtis pakaitinama, sandūra teka elektros srovė. Šiuo principu pagrįstas termoporų veikimas.

Po to 1834 metais buvo atrastas priešingas Seebeck efektas: per skirtingų metalų sandūrą tekant srovei, sandūroje šiluma išsiskiria arba sugerama, priklausomai nuo srovės krypties. Šis efektas buvo pavadintas atradėjo Peltier vardu. Šiluminio efektyvumo aparate esantis termoelektrinis keitiklis sukonstruotas Peltier efekto pagrindu. Be to, aparate naudojamas ir Seebeck efektas.



10 pav. Termoporos veikimo principas

Šių dienų Seebeck efektas gaunamas naudojant ne metalus, o pn sandūrą. Skirtingų puslaidininkų išsidėstymas pavaizduotas 3 paveiksle. Jei kairėje įtaiso pusėje palaikoma didesnė temperatūra negu kairėje, skylės, susidarančių ties sandūra, dreifuoja per sandūrą į p sritį ir elektronai – į n sritį. Jei dešinėje sandūros pusėje temperatūra žemesnė, vyksta toks pats procesas, tik mažesniu greičiu, todėl bendras efektas yra elektronų dreifas iš karštos sandūros srities į šaltesnę. Tuo būdu teka elektros srovė (teigiamų krūvininkų judėjimo kryptimi) iš šaltos pusės į karštesnę n srityje.