

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGIJOS, FIZINIŲ IR BIOMEDICINOS MOKSLŲ  
FAKULTETAS  
ELEKTRONIKOS IR ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Matas Bivainis

MAŽOS GALIOS INFRARAUDONŲJŲ SPINDULIŲ  
ŠILDYMO PLOKŠČIŲ EFEKTYVUMO ANALIZĖ

Magistro darbas

**Vadovas**

lekt. A. Stuknys

ŠIAULIAI, 2016

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGIJOS, FIZINIŲ IR BIOMEDICINOS MOKSLŲ  
FAKULTETAS  
ELEKTRONIKOS IR ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU:

Katedros vedėjas,

dr. D. Balbonas \_\_\_\_\_

(parašas)

MAŽOS GALIOS INFRARAUDONŲJŲ SPINDULIŲ  
ŠILDYMO PLOKŠČIŲ EFEKTYVUMO ANALIZĖ

Magistro darbas

**Vadovas**

\_\_\_\_\_ lekt. A. Stuknys

(parašas)

2016.06.

**Atliko**

**Recenzentas**

\_\_\_\_\_ EM-14 gr. stud.

(parašas)

M. Bivainis

2016.06

\_\_\_\_\_  
(parašas)

ŠIAULIAI, 2016

## **Santrauka**

Mažosios galios infraraudonųjų spindulių šildytuvai yra puikus pasirinkimas buitinių ar komercinių patalpų šildymui. Lyginant su įprastais konvecinio tipo šildytuvais jie turi eilę privalumų tokių kaip ekonomiškumas, efektyvumas, greitas veikimo laikas. Šis tyrimas buvo atliktas analizuojant šiuo metu rinkoje siūlomus mažos galios infraraudonųjų bangų šildytuvus. Tyrimo metu buvo nustatyti šildytuvų techniniai parametrai bei jų šilumos perdavimo charakteristikos. Kadangi gauti rezultatai prasilenkė su infraraudonųjų spindulių teorija, buvo siekiama iširti to priežastis. Įvertinus gautus rezultatus, kitoje tyrimo dalyje buvo sukonstruotas infraraudonųjų spindulių šildytuvas, kuriam buvo panaudota anglies pluošto plėvelė. Nustatyti jo techniniai parametrai bei atliktas spinduliavimo tyrimas, kurio rezultatai buvo palyginti su vienos iš komercinių plokščių.

## **Summary**

A low power infrared heating panels are one of the best options for domestic or commercial space heating. Infrared heating has a lot of benefits comparing to a standart convectional heating, such as economy, efficiency, fast working time. The subjects of investigation are heating panels, which are available in the market. During investigation it was measured technical and IR radiant characteristics of the panels. Since, results haven't met an infrared theory, some further measures were taken, which led to construction of IR heating panel based on a carbon film. During next investigation technical and radiant characteristics were found for the carbon IR heating panel. These results were compared with one of the commercial heating panels.

## Turinys

<b>1. Teorinė dalis.....</b>	<b>8</b>
1.1. Įžanga .....	8
1.2. Elektrinio infraraudonųjų spindulių šildymo metodo privalumai lyginant su alternatyviais kondukcinio tipo šildymo metodais. ....	9
1.3. Infraraudonasis spinduliavimas .....	10
1.4 Pagrindiniai šiluminio spinduliavimo dėsniai .....	11
1.5 Šilumos mainai spinduliavimu .....	15
1.6 Lamberto kosinuso dėsnis .....	17
1.7 Niūtono atvirkštinio kvadrato dėsnis.....	18
1.8 Infraraudonųjų spindulių šildytuvų tipai .....	19
<i>Artimasis infraraudonųjų spindulių ruožas</i> .....	19
<i>Vidutinis infraraudonųjų spindulių ruožas</i> .....	20
<i>Tolimasis infraraudonųjų spindulių ruožas</i> .....	20
1.9. Rinkoje esančių tolimojo spektro infraraudonųjų šildytuvų palyginimas .....	20
<i>Keramikiniai šildymo elementai</i> .....	20
<i>Metaliniai šildymo elementai</i> .....	21
<i>Kvarciniai šildymo elementai</i> .....	22
<i>Anglies pluošto šildytuvai</i> .....	23
<i>Tolimojo spektro šildytuvų parametrų palyginimas</i> .....	23
Apibendrinimas .....	23
<b>2. Tyriamasis darbas I dalis .....</b>	<b>25</b>
2.1 Infraraudonųjų šildymo plokščių tyrimo tikslai ir uždaviniai.....	25
2.2 Eksperimentinio tyrimo metodika .....	25
2.3 I dalies eksperimentinio tyrimo eiga. ....	26
2.4 I dalies tyrimo rezultatai.....	28
<i>I. Šildymo plokštė BANDINYS A</i> .....	28
<i>II. Šildymo plokštė BANDINYS B</i> .....	32
<i>III. Šildymo plokštė Bandinys C</i> .....	36
<i>IV. Šildymo plokštė BANDINYS D (prototipas)</i> .....	40
<i>V. Šildymo plėvelė BANDINYS E</i> .....	44
2.5 Plokščių charakteristikų palyginimas .....	48
2.6 Kitų charakteristikų palyginimas.....	51
2.7 Infraraudonųjų spindulių plokščių spinduliavimo tyrimas.....	52
2.8 Rezultatai ir išvados.....	60
<b>3. Tyriamasis darbas II dalis.....</b>	<b>62</b>
3.1 Infraraudonųjų spindulių šildymo plokštės gamyba.....	62
<i>Šildymo plokštės surinkimas</i> .....	64
3.2 Eksperimentinio tyrimo metodika .....	65
2.4 II dalies eksperimentinio tyrimo eiga.....	66
<b>Tyrimo išvados.....</b>	<b>72</b>



## Lentelių sąrašas

1 lentelė. Tolimojo spektro infraraudonųjų spindulių šildytuvų palyginimas [10].....	23
2 lentelė. Plokštės BANDINYS A energetiniai duomenys ( $U_t = 230 \text{ V}$ ).....	28
3 lentelė. Plokštės BANDINYS B energetiniai duomenys ( $U_t = 230 \text{ V}$ ).....	32
4 lentelė. Plokštės BANDINYS C energetiniai duomenys ( $U_t = 230 \text{ V}$ ).....	36
5 lentelė. Plokštės BANDINYS D energetiniai duomenys ( $U_t = 230 \text{ V}$ ).....	40
6 lentelė. BANDINIO E energetiniai duomenys ( $U_t = 230 \text{ V}$ ).....	44
7 lentelė. Šildymo plokštės BANDINYS A spinduliavimo termografinės nuotraukos.....	53
8 lentelė. Šildymo plokštės BANDINYS B spinduliavimo termografinės nuotraukos.....	54
9 lentelė. Šildymo plokštės BANDINYS C spinduliavimo termografinės nuotraukos.....	55
10 lentelė. Šildymo plokštės BANDINYS D spinduliavimo termografinės nuotraukos.....	56
11 lentelė. Šildymo plėvelės BANDINYS E spinduliavimo termografinės nuotraukos.....	57
12 lentelė. Bandinys X ir Bandinys C šildymo plokščių techniniai parametrai.....	63
13 lentelė. Pagamintos plokštės BANDINYS X energetiniai duomenys ( $U_t = 230 \text{ V}$ ).....	67
14 lentelė. BANDINYS X šildymo plokštės spinduliavimo tyrimas ( $U_t = 230 \text{ V}$ ).....	69
15 lentelė. Termografinės spinduliavimo tyrimo nuotraukos ( $U_t = 230 \text{ V}$ ).....	70

## Paveikslų sąrašas

1 pav. Elektromagnetinių bangų spektras [1].....	11
2 pav. Spinduliavimo gebos spektrinis skirstinys skirtingose temperatūrose [2] .....	12
3 pav. Spinduliavimo gebos pasiskirstymo priklausomybė nuo bangos ilgio, kur punktyrinė linija žymi Vyno paslinkį.[3].....	13
4 pav. Krintančios į kūną energijos balansas. Krintanti energija lygi sugertos, atspindėtos ir praleistos energijos sumai .....	15
6 pav. Spindulių srauto krintančio į plokštumą apšvietos priklausomybė nuo kampo $\theta$ [5].....	18
7 pav. Taškinių šviesos šaltinio apšvietos priklausomybė nuo atstumo [6].....	19
8 pav. Artimųjų, vidutinių ir tolimųjų infraraudonųjų spindulių diapazonas elektromagnetinių bangų spektro ruože. ....	19
9 pav. keramikinis infraraudonųjų spindulių šildymo elementas [8].....	21
10 pav. Infraraudonųjų spindulių šildytuvo su metaliniu paviršiumi elementas [8].....	22
11 pav. Kvarcinis infraraudonųjų bangų šildytuvas [8].....	22
12 pav. Infraraudonųjų spindulių plokščių vertikaliojo spinduliavimo eksperimento vykdymas .....	26
13 pav. Plokštės BANDINYS A termonuotrauka po 40 min. nuo įjungimo pradžios ir plokštės natūralus vaizdas .....	28
14 pav. Plokštės BANDINYS A temperatūrų kreivės linijose L0 ir L1 po 40 min. nuo įjungimo pradžios .....	29
15 pav. Plokštės BANDINYS A įšilimo/vėsimo eksperimento duomenys .....	29
16 pav. Plokštės BANDINYS A elektrinės varžos kitimas plokštei kaistant .....	30
17 pav. Plokštės BANDINYS A elektrinės galios ir varžos priklausomybė nuo tinklo įtampos .....	30
18 pav. Plokštės BANDINYS A temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios .....	31
19 pav. Plokštės BANDINYS B termonuotrauka po 46 min. nuo įjungimo pradžios ir plokštės natūralus vaizdas. ....	32
20 pav. Plokštės BANDINYS B temperatūrų kreivės linijose L0 ir L1 po 46 min. nuo įjungimo pradžios .....	33
21 pav. Plokštės BANDINYS B įšilimo/vėsimo eksperimento duomenys.....	33
22 pav. Plokštės BANDINYS B elektrinės varžos kitimas plokštei kaistant.....	34
23 pav. Plokštės BANDINYS B elektrinės galios ir varžos priklausomybė nuo tinklo įtampos.....	34
24 pav. Plokštės BANDINYS B temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios .....	35
25 pav. Plokštės Bandinys C termonuotrauka po 50 min. nuo įjungimo pradžios ir plokštės natūralus vaizdas .....	36
26 pav. Plokštės Bandinys C temperatūrų kreivės linijose L0 ir L1 po 50 min. nuo įjungimo pradžios .....	37
27 pav. Plokštės Bandinys C įšilimo/vėsimo eksperimento duomenys .....	37
28 pav. Plokštės Bandinys C elektrinės varžos kitimas plokštei kaistant .....	38
29 pav. Plokštės BANDINYS C elektrinės galios ir varžos priklausomybė nuo tinklo įtampos.....	38
30 pav. Plokštės Bandinys C temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios .....	39
31 pav. Plokštės BANDINYS D termonuotrauka (vaizdas iš priekio ir galo) po 50 min. nuo įjungimo pradžios ir plokštės natūralus vaizdas.....	40
32 pav. Plokštės BANDINYS D temperatūrų kreivės linijose L0 ir L1 po 50 min. nuo įjungimo pradžios .....	41
33 pav. Plokštės BANDINYS D įšilimo/vėsimo eksperimento duomenys .....	41
34 pav. Plokštės BANDINYS D elektrinės varžos kitimas plokštei kaistant .....	42
35 pav. Plokštės BANDINYS D elektrinės galios ir varžos priklausomybė nuo tinklo įtampos .....	42
36 pav. Plokštės BANDINYS D temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios .....	43
38 pav. BANDINIO E termonuotrauka po 20 min. nuo įjungimo pradžios ir plevelės natūralus vaizdas .....	44
39 pav. BANDINIO E temperatūrų kreivės linijose L0 ir L1 po 20 min. nuo įjungimo pradžios.....	45
40 pav. BANDINIO E įšilimo/vėsimo eksperimento duomenys .....	45

41 pav. BANDINIO E elektrinės varžos kitimas plokštei kaistant .....	46
42 pav. BANDINIO E elektrinės galios ir varžos priklausomybė nuo tinklo įtampos .....	46
43 pav. Bandinio E temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios .....	47
44 pav. Plokščių įšilimo eksperimento duomenys .....	48
45 pav. Plokščių vėsimo eksperimento duomenys .....	48
46 pav. Plokščių elektrinės galios ir varžos priklausomybė nuo tinklo įtampos .....	49
47 pav. Plokščių vidutinės ir maksimalios temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos .....	49
48 pav. Plokščių vidutinės ir maksimalios temperatūros priklausomybė nuo šildytuvo galios .....	50
49 pav. Plokščių šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo tinklo įtampos .....	50
50 pav. Plokščių efektyvaus šildymo ploto palyginimas .....	51
51 pav. Plokščių elektrinės galios palyginimas .....	51
52 pav. Plokščių galios tankio palyginimas .....	51
53 pav. Plokščių vidutinės temperatūros palyginimas .....	51
54 pav. Plokščių centro temperatūros palyginimas .....	51
55 pav. Plokščių maksimalios temperatūros palyginimas .....	51
56 pav. Plokščių galinės dalies vidutinės temperatūros palyginimas .....	51
57 pav. Plokščių kraštinės dalies vidutinės temperatūros palyginimas .....	51
58 pav. Šildytuvų horizontalaus ir vertikalaus spinduliavimo vidutinė temperatūra 7x7 (0,89 m <sup>2</sup> ) plokštelių ekrano plote .....	58
59 pav. Šildytuvų horizontalaus ir vertikalaus spinduliavimo vidutinė temperatūra 5x5 (0,44 m <sup>2</sup> ) plokštelių ekrano plote .....	58
60 pav. Šildytuvų horizontalaus ir vertikalaus spinduliavimo vidutinė temperatūra 3x3 (0,15 m <sup>2</sup> ) plokštelių ekrano plote .....	58
61 pav. Šildytuvų horizontalaus ir vertikalaus spinduliavimo vidutinė temperatūra 1x1 (0,01 m <sup>2</sup> ) plokštelių ekrano plote .....	58
62 pav. Šildytuvo Bandinys A įšildomo ploto (slenkstinė temperatūra - 21°C) ekrane priklausomybė nuo atstumo šildytuvai-ekranas .....	59
63 pav. Šildytuvo Bandinys B įšildomo ploto (slenkstinė temperatūra - 21°C) ekrane priklausomybė nuo atstumo šildytuvai-ekranas .....	59
64 pav. Šildytuvo Bandinys C įšildomo ploto (slenkstinė temperatūra – 21°C) ekrane priklausomybė nuo atstumo šildytuvai – ekranas .....	59
65 pav. Šildytuvo Bandinys D įšildomo ploto (slenkstinė temperatūra – 21°C) ekrane priklausomybė nuo atstumo šildytuvai – ekranas .....	59
66 pav. Šildymo plėvelės Bandinys E įšildomo ploto (slenkstinė temperatūra – 21°C) ekrane priklausomybė nuo atstumo šildytuvai – ekranas .....	59
67 pav. Vertikalaus ir horizontalaus spinduliavimo efektyvumo palyginimas .....	60
68 pav. Horizontalaus spinduliavimo vidutinis plotas .....	61
69 pav. Vertikalaus spinduliavimo vidutinis plotas .....	61
71 pav. Felix infraraudonųjų spindulių šildymo plėvelės sandara [12] .....	64
72 pav. Marbet “Termostop” šilumos ekranas .....	65
73 pav. infraraudonųjų spindulių plokščių spinduliavimo eksperimento vykdymas .....	66
74 pav. Pagamintos šildymo plokštės termonuotrauka po 4 min. nuo įjungimo pradžios .....	66
75 pav. BANDINYS X šildymo plokštės įšilimo temperatūros priklausomybė nuo laiko .....	67
76 pav. Pagamintos šildymo plokštės galios priklausomybė nuo tinklo įtampos. Esant tinklo įtampai 230 V šildytuvo galia yra 800 W. ....	68
77 pav. Šildomų plokštelių skaičiaus priklausomybė nuo atstumo .....	68
78 pav. Kūno temperatūros priklausomybė nuo atstumo .....	71

## 1. Teorinė dalis

### 1.1. Įžanga

Šiais laikais, kai žmonija pasižymi vartotojiškumu ir jos poreikiai kelis kartus viršija žemės turimus išteklius, yra svarbu net tik kuo daugiau energijos gauti pasinaudojant atsinaujinančiais energijos šaltiniais, tačiau ir mažinti taršą. Šių abiejų tikslų galima pasiekti naudojantis švariomis technologijomis, energijos gamybai renkantis atsinaujinančius išteklius bei buities ir pramonės veiklą organizuojant pasitelkus efektyvaus energijos valdymo bei taupymo principus. Vieni tokių šio laikmečio padiktuotas sąlygas ir principus atitinkančių įtaisų yra šiame tiriamajame darbe nagrinėjami mažos galios infraraudonųjų spindulių šildytuvai.

Projektuojant efektyvią šildymo sistemą yra labai svarbu tinkamai pasirinkti šildytuvą, kuris atitiktų jam keliamus reikalavimus, nes kitu atveju, pasirinkus netinkamą šildytuvo tipą ar galingumą, tikėtina, jog sistema neatitiks vartotojo lūkesčių. Pirmu atveju parinkus netinkamą šildytuvo tipą rizikuojame žmogaus gera savijauta: artimojo infraraudonųjų bangų spektro šildytuvus naudojamas vidaus patalpose vargins vartotoją, šilumos pojūtis bus nemalonus, o naudojant tolimojo ir vidutinio spektrų šildytuvus atvirose vietovėse tiesiog nebus gaunamas norimas efektas. Parinkus per didelės ar per menkos galios šildytuvą atitinkamai turėsime išaugusius energetinius nuostolius arba nepakankamą šildymą. Tam, kad išvengti tokių klaidų, turime ne tik aiškiai ir tiksliai suformuluoti projektuojamos šildymo sistemos tikslus, bet ir puikiai išmanyti sistemoje naudojamų šildymo šaltinių veikimo charakteristikas.

Šio eksperimentinio tyrimo metu bus atlikta mažos galios infraraudonųjų šildymo plokščių (natūralaus šildymo plokščių) efektyvumo analizė. Tai padės įvertinti tyrimų šildymo šaltinių pagrindines charakteristikas. Pasinaudojant gautomis charakteristikomis šildymo sistemų projektuotojams taps lengviau parinkti optimalų šių plokščių taikymą ir paskirtį, o jų gamintojams technologijų tobulinimo kryptis siekiant efektyviai šildyti patalpas ar kitus namų ūkio objektus. Tam, kad gauti platesnį vaizdą apie šiuo metų rinkoje esančių šildymo plokščių efektyvumą, tyrimo metu bus analizuojami 5 skirtingų gamintojų gaminiai. Pirmos dalies tyrimas susidės iš trijų pagrindinių etapų: šildymo plokščių įšilimo trukmės nustatymo, elektrinių parametrų nustatymo kiekvienai ploštei ir infraraudonųjų spindulių plokštės spinduliavimo tyrimo. Antroje dalyje šie tyrimai bus pakartoti su pagaminta bandomąja šildymo plokšte, o gauti rezultatai palyginti.

## **1.2. Elektrinio infraraudonųjų spindulių šildymo metodo privalumai lyginant su alternatyviais kondukcinio tipo šildymo metodais.**

Nors jau kuris laikas infraraudonųjų spindulių šildytuvai yra nepakeičiami juos pritaikant pramonės poreikiams, tačiau jų panaudojimas buityje vis dar nėra toks paplitęs lyginant su alternatyviais šildymo būdais. Tačiau žmonėms ieškant vis efektyvesnių, ekologiškesnių bei ekonomiškesnių šildymo būdų infraraudonieji šildytuvai neabejotinai taps vienu iš labiausiai paplitusių šildymo būdų. Pastarojo teiginio pagrįstumas labiausiai išaiškėja lyginant elektrinius infraraudonųjų spindulių šildytuvus su alternatyviais konvencinio tipo šildytuvais. Juos palyginus galima išskirti eilę privalumų:

- Infraraudonųjų spindulių šildytuvai suteikia galimybę šildyti objektus be tiesioginio kontakto su juo. Tai naudinga, kai reikalinga perduoti šilumą judantiems objektams arba kai fizinis kontaktas galėtų užteršti produkto paviršių (pvz. dažų, lako džiovinimas).
- Greitas veikimas, kurį lemia žemas terminis inertiškumas. Infraraudonųjų spindulių šildymo sistemoms nėra reikalingas ilgas įšilimo procesas. Paprastai šio tipo šildymo elementams pakanka kelių minučių pasiekti darbinę temperatūrą. Tai padeda saugoti energiją, nes tokius šildytuvus galima įjungti / išjungti atsiradus ar dingus nors ir trumpalaikiam poreikiui.
- Infraraudonųjų spindulių šiluminio poveikio laikas maždaug trečiadaliu karto yra trumpesnis nei konvencinio, nes šiluminė energija objektą šildo tiesiogiai, o ne per tarpinę terpę (dujos, skysčiai). Konvencinio tipo šildytuvai pirma sušildo terpę, paprastai objektus supantį orą, kuris savo ruožtu tik tada šilumą perduoda šildomiems kūnams.
- Didesnis efektyvumas, kurį lemia tai, jog šildytuvo skleidžiamos elektromagnetinės bangos pataikiusios į kūną yra absorbuojamos ir tiesiogiai paverčiamos į šilumą. Kadangi tokio tipo šildytuvai nebūtinai turi sušildyti objektus supantį orą ar kitą terpę, tai didina tokių šildytuvų efektyvumą.
- Spinduliuojama energija taip pat gali būti koncentruojama, fokusuojama, nukreipiama ir atspindėta tokiu pat būdu kaip ir šviesa. Šios infraraudonųjų spindulių savybės puikiai pasitarnauja mažinant energijos nuostolius, pritaikant sistemą kiekvienam individualiam tikslui.
- Tikslus valdymas. Infraraudonųjų spindulių šildytuvai yra lengvai ir tiksliai valdomi. Jie gali sudaryti sekcijas tam, kad užtikrinti tolygų šildymą arba atskirą galios tankio pasiskirstymą reikiamam ploto vienetui. Infraraudonųjų spindulių sensoriai gali matuoti tikrą šildomo kūno temperatūrą ir valdyti šildymo procesus.
- Žema įdiegimo kaina. Infraraudonųjų spindulių šildytuvų sistemos yra paprastos, lengvos bei mažų gabaritų. Jų įdiegimui nereikalingi konstrukciniai darbai kaip ortakių ar kitų vamzdinių tiesimas.

- Švarus šildymas. Priešingai nei vidaus degimo krosnys, elektriniai šildytuvai nesukuria degimo produktų, o šilumos perdavimui nereikalingas oro srauto judėjimas. Tokiu būdu pašalinamas neigiamas poveikis ne tik gamtai, bet ir vidinei aplinkai.

### 1.3. Infraraudonasis spinduliavimas

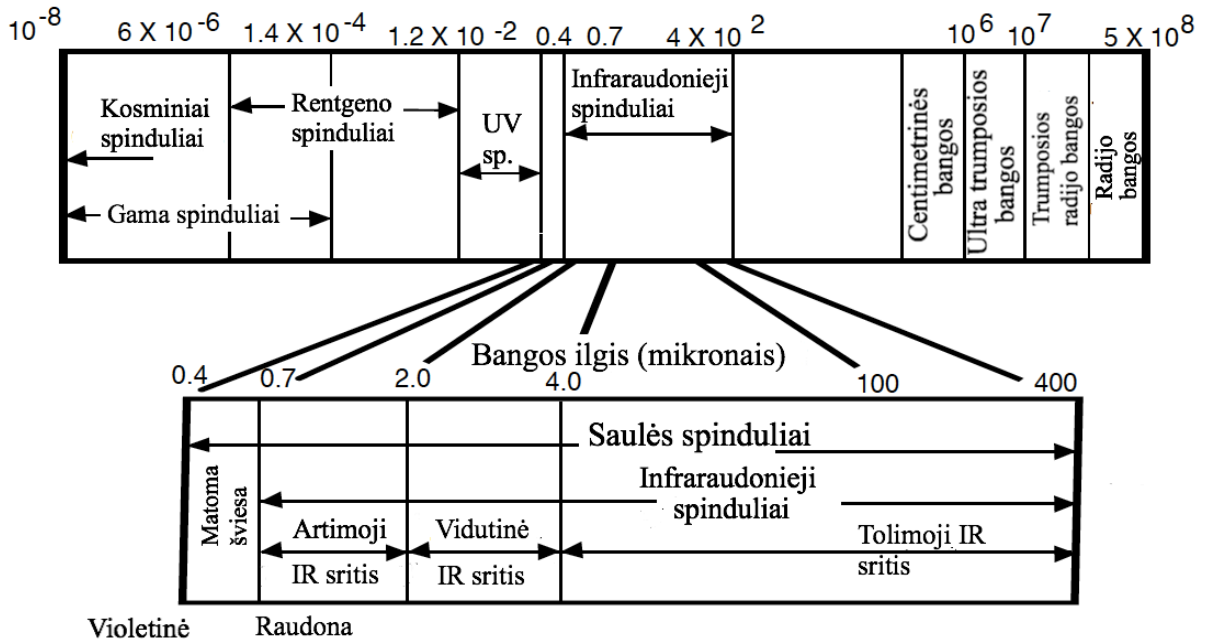
Visos medžiagos yra sudarytos iš judančių atomų. Tuo atveju, kai kūnas sugeria energiją, jį sudarančių atomų vibracijų greitis didėja. Kūno temperatūrą, arba kitaip tariant šilumą, parodo atomo vibracijų greitis. Absoliutus nulis ( $0K = -273C^0$ ) yra žemiausia galima temperatūra, kuriai esant sustoja atomų ir molekulių šiluminis judėjimas bei nutrunka šiluminis spinduliavimas.

Atomai yra sudaryti iš teigiamą ir neigiamą krūvį turinčių dalelių, atitinkamai protonų ir elektronų. Kiekviena krūvį turinti dalelė sudaro elektrinį lauką apie save, o judėdama dar ir sukūria magnetinį lauką [1]. Atomai esantys karštame kūne stipriai vibruoja, dėl to atomų sudarančios ir elektrinį krūvį turinčios dalelės atomui osciliuojant įgauna teigiamą ir neigiamą pagreičius. Kiekvieną kartą atomui sujudėjus elektrinis ir magnetinis laukai, sukurti dalelių, pasikeičia. Toks elektrinio ir magnetinio laukų sutrigdymas yra vadinamas elektromagnetine banga. Taigi karšti objektai spinduliuoja elektromagnetines bangas.

Kai elektromagnetinė banga pasiekia šaltą objektą, ji sutrigdo jame esančių dalelių elektrinius ir magnetinius laukus, kurie įtakoja krūvius turinčių dalelių elgseną. Atsiradusi jėga lemia atomo osciliacijas ir verčia juos vibruoti. Didėjant atomų šiluminei vibracijai, tuo pačiu didėja ir šalto kūno temperatūra [1]. Tokiu būdu šalto objekto atomai sugeria elektromagnetines bangas, kurias sukūrė atomai esantys karštame kūne nutolusiame per tam tikrą atstumą. Elektromagnetinių bangų pagalba energija yra perduodama iš karšto kūno į šaltą be jokio tiesioginio sąlyčio ar tarpinės terpės.

Elektromagnetinės bangos yra panašios į kitas bangas ir jos charakterizuojamos tais pačiais parametrais: judėjimo greičiu, dažniu bei bangos ilgiu [1]. Priešingai bangoms susidarančioms vandens paviršiuje arba garso bangoms, elektromagnetinių bangų sklidimui nėra reikalinga terpė. Jos gali keliauti vacuumu, Saulės skleidžiamos bangos yra puikus pavyzdys: Saulės spinduliuojamos elektromagnetinės bangos prieš pasiekdamos žemę keliauja 150,000,000 kilometrų beore erdve.[1]

Elektromagnetinių bangų spektrą sudaro: matoma šviesa, mikrobangos, radijo bangos, rentgeno spinduliai ir infraraudonieji spinduliai ( $\lambda=760 - 1400$  nm) [1]. Vienintelis skirtumas tarp visų šių bangų kategorijų yra bangos ilgis ir dažnis. Jos visos sklinda tuo pačiu greičiu, kuris vadinamas šviesos greičiu –  $c=2,998 \times 10^8$  m/s. Elektromagnetinių bangų spektre matome kaip šios bangos skirstomos pagal bangos ilgį.



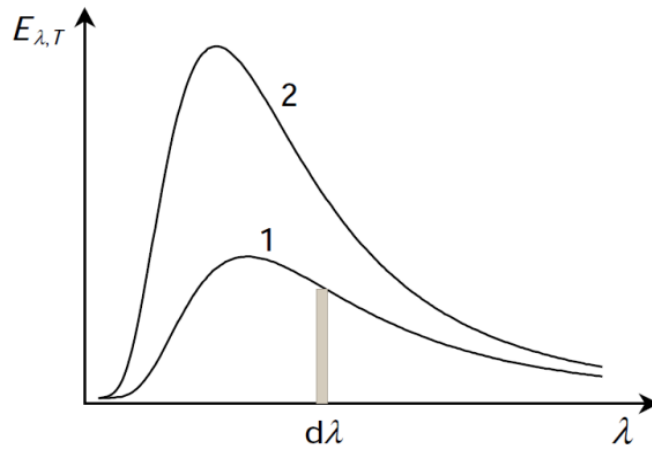
1 pav. Elektromagnetinių bangų spektras [1]

#### 1.4 Pagrindiniai šiluminio spinduliavimo dėsniai

Kūno šiluminė spinduliuotė yra apibrėžiama jo temperatūra. Jeigu sudarytume uždara sistemą, kurioje būtų du skirtingų temperatūrų kūnai, po tam tikro laiko sistemoje nusistovėtų stacionari būseną (šiluminė pusiausvyra), o abu kūnai įgytų vienodą temperatūrą. Tai atsitiktų todėl, kad kūnas turintis didesnę temperatūrą, spinduliuotų didesnę energijos kiekį nei sugertų per laiko vienetą ir imtų vėsti, o mažesnę temperatūrą turintis kūnas sugertų didesnę energijos kiekį nei išspinduliuotų per laiko vienetą ir dėl to imtų kaisti. Tokie energijos mainai vyktų tol, kol abu kūnai taptų vienodos temperatūros ir jų sugertos bei išspinduliuotos energijos kiekiai per laiko vienetą būtų vienodi. [2]

Kūno *spinduliavimo geba*  $E$  yra energijos srautas, kurį skleidžia kūno vienetinis paviršius visomis kryptimis:  $E = d\Phi / dS$ . Jei į vienetinį paviršių krinta šviesos srautas  $d\Phi$ , tai jo dalį  $d\Phi'$  kūnas sugeria. Santykis  $A = d\Phi' / d\Phi$  vadinamas kūno *sugerties geba*. Spinduliavimo geba priklauso ne tik nuo bangos ilgio, bet ir nuo spinduliuojančio kūno temperatūros  $T$ . Spektrinis šiluminio spinduliavimo gebos skirstinys pavaizduotas 2 pav. [2]

Plotas, kurį apriboja  $d\lambda$ ,  $x$  ašis ir kreivė nr. 1, atitinka energiją  $dE_T$ . Šiame skirstinyje kreivėmis 1 ir 2 apriboti plotai atitiktų pilnutinę spinduliavimo gebą priklausomai nuo spinduliuojančio kūno temperatūros. Kreivė nr. 2 žymi kūno, kurio temperatūra didesnė, skirstinį. Iš to galime matyti, kad didėjant temperatūrai, spinduliuojama energija taip didėja kaip ir skirstinio kreivės ribojamas plotas, t. y. didėja pilnutinė kūno spinduliavimo geba. Kūno sugerties geba kaip ir spinduliavimo geba priklauso nuo bangos ilgio ir temperatūros. Kūnas, kurio sugerties geba  $A_{\nu, T} = 1$ , vadinamas juodoju kūnu. [2]



2 pav. Spinduliavimo gebos spektrinis skirstinys skirtingose temperatūrose [2]

Sąryšį tarp kūno spinduliavimo gebos ir sugerties gebos nusako **Kirchhofo** (*Kirchhoff*) **dėsnis**: *spinduliavimo ir sugerties gebos dalmuo nepriklauso nuo kūno prigimties*. Santykis  $E_{v,T}/A_{v,T}$  yra vienodas visiems kūnams ir yra universalioji dažnio ir temperatūros funkcija, nors įvairių kūnų  $E_{v,T}$  ir  $A_{v,T}$  gali gerokai skirtis. Juodajam kūnui (jo sugerties geba lygi vienetui) santykis:[2]

$$\frac{E_{v,T}}{A_{v,T}} = \varepsilon_{v,T}; \quad (1.1)$$

čia:  $E_{v,T}$  – kūno spinduliavimo gebos priklausomybė nuo dažnio ir temperatūros;  
 $A_{v,T}$  – juodojo kūno sugerties gebos priklausomybė nuo dažnio ir temperatūros;  
 $\varepsilon_{v,T}$  – universalioji dažnio ir temperatūros funkcija.

Taigi universalioji Kirchhofo funkcija yra juodojo kūno spinduliavimo geba. Ne idealių kūnų sugerties geba kinta priklausomai nuo kūno storio, temperatūros ir sugeriamų bangų ilgio, o paviršiaus sugerties koeficientas yra mažesnis už 1. Tokie kūnai vadinami *pilkaisiais*.

Tiriant šiluminį spinduliavimą buvo suformuluotas **Stefano ir Bolcmano dėsnis**, kuris teigia, kad *juodojo kūno visuminė* (visų ilgių bangų) *spinduliavimo geba proporcinga temperatūrai ketvirtuoju laipsniu*: [2]

$$\varepsilon_T = \int_0^{\infty} \varepsilon_{v,T} dv = \sigma T^4; \quad (1.2)$$

čia:  $\varepsilon_T$  – juodojo kūno pilnutinė spinduliavimo geba;  
 $\varepsilon_{v,T}$  – universalioji dažnio ir temperatūros funkcija;  
 $\sigma$  – Stefano ir Bolcmano konstanta, kuri lygi  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ;  
 $T$  – Temperatūra, °K.



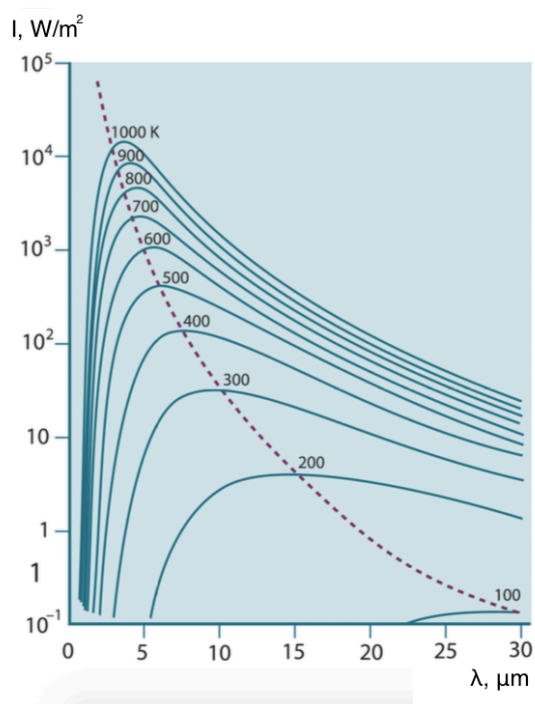
Pasinaudojant **Vyno poslinkio dėsniu**, kuris teigia, kad *didėjant temperatūrai juodojo kūno spinduliavimo gebos maksimumas slenka į trumpesniųjų bangų sritį*, galima gauti didžiausią bangos ilgį  $\lambda_{max}$ , kurį atitinka didžiausia funkcijos  $\epsilon_{\lambda,T}$  vertė, ir temperatūros  $T$  sąryšį:[2]

$$T\lambda_{max} = bT I_{-max} = b \quad (1.3)$$

čia  $T$  – Temperatūra °K

$\lambda_{max}$  – Maksimalus spinduliuojamos šviesos bangos ilgis, m;

$b$  – Vyno konstanta, nepriklausanti nuo temperatūros ( $b = 0,29 \text{ cm}\cdot\text{K}$ ).



3 pav. Spinduliavimo gebos pasiskirstymo priklausomybė nuo bangos ilgio, kur punktyrinė linija žymi Vyno paslinkį.[3]

Dž.Reilis (*J.Rayleigh*) ir Dž. Džinsas (*J.Jeans*), pasinaudoję klasikinės statistikos teorema apie energijos tolygų pasiskirstymą pagal laisvės laipsnius, pateikė tokią išraišką, **Reilio ir Džinsso formulė**:[2]

$$\epsilon_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{C^2} kT = \frac{2\pi c^2}{\lambda^4} kT; \quad (1.4)$$

čia:  $\epsilon_{\nu,T}$  – universalioji dažnio ir temperatūros funkcija;

$\pi$  – matematinė konstanta  $\approx 3,14$ ;

$\nu$  – bangos dažnis, Hz;

$c$  – šviesos greitis vakuume;  $c=3\cdot 10^8 \text{ m/s}$ ;

$k$  – Bolcmano konstanta,  $k = 1,380\ 6505 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ;

$T$  – Temperatūra, °K.

Reilio ir Džino formulė galėjo atspindėti spinduliavimo gebą tik ilgųjų bangų ruože, tačiau temperatūrai didėjant, eksperimentinių duomenų rezultatai vis labiau tolsta nuo teorinių. Praktinius ir teorinius rezultatus atitinkančią matematinę priklausomybę (1.7), aprašančią trumpesnių bangų ruožą pateikė Viljamas Vynas:

$$\varepsilon_{\lambda,T} = \frac{A}{\lambda^5} = \exp\left(-\frac{B}{\lambda T}\right); \quad (1.7)$$

čia:  $\varepsilon_{\lambda,T}$  – bangos ilgio ir temperatūros funkcija;

$A$  ir  $B$  – konstantos, kuri iš dalies tinka trumpesnėms bangoms, bet netinka ilgesnėms;

$\lambda$  – bangos ilgis, m;

$T$  – temperatūra, °K.

Reilio ir Džino formulė kartu su Vyno matematine išraiška kokybiškai apibūdino tik optinius reiškinius, kuriems elementarieji šviesos sąveikos su medžiaga procesai neturi esminio poveikio ir neatitiko šiluminio spinduliavimo dėsnų. Nagrinėjant šiluminį spinduliavimą šie procesai svarbūs. Išeitį rado M. Plankas (*Planck*), 1900 m. iškėlęs mintį, kuri iš esmės prieštaravo klasikinės statistinės fizikos ir elektrodinamikos įvaizdžių sistemai. Jo hipotezė teigia, kad *elektromagnetinė spinduliuotė spinduliuojama ne tolygiai, o atskiromis porcijomis (kvantais)*, kurių energijos dydis proporcingas dažniui:[2]

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda}; \quad (1.8)$$

čia  $\varepsilon$  – elektromagnetinė spinduliuotė;

$h$  – universalioji konstanta,  $h=6,622 \cdot 10^{-34}$  J·s;

$c$  – šviesos greitis vakuume;  $c=3 \cdot 10^8$  m/s;

$\lambda$  – bangos ilgis, m;

$\nu$  – bangos dažnis, Hz.

Planko hipotezė prieštarauja klasikinės fizikos dėsniams, nes teigia, kad visi dydžiai (energija, judėjimo kiekis) gali laisvai įgyti bet kurias kiek norima mažas vertes ir gali kisti tolygiai. Pagal klasikinius dėsnius  $\nu$  dažnio osciliatorius gali būti įvairios energijos, proporcingos amplitudei kvadratu. Tai reiškia, kad osciliatorius per vienetinį laiką gali spinduliuoti bet kurią energijos kiekį. Teoriškai modeliuojant juodąjį kūną, kaip begalinę harmoninių osciliatorių visumą, kurių kiekvienas skleidžia atskirą monochromatinę bangą, o visi kartu – ištisinio spektro spinduliuotę (juodojo kūno spinduliuotę), ir naudojantis dėsniais, valdančiais šių osciliatorių veikimą, galima nustatyti tokios sistemos (juodojo kūno) spinduliavimo dėsnį. Tačiau toks būdas nedavė norimų

rezultatų. Tik M. Planko teiginys, kad *harmoninis v dažnio osciliatorius gali turėti tokį energijos kiekį, kuris yra elementariojo dydžio  $h\nu$  kartotinis ( $E_n = n h\nu$ )*, pateikė teisingą rezultatą. Reikia nagrinėti ne medžiagos osciliatorius – spinduličius, o spinduliuotės osciliatorius, atitinkančius elektromagnetines bangas; atliekamas vadinamasis „skleidimas osciliatoriais“. Remiantis naujaisiais kvantiniais įvaizdžiais ir statistiniais metodais, M. Plankas pateikė spinduliavimo gebos išraišką, atitinkančią eksperimentų rezultatus:[2]

$$\varepsilon_{\nu,T} = \frac{2\pi h\nu^2}{C^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}; \quad (1.9)$$

čia  $\varepsilon_{\lambda,T}$  – bangos ilgio ir temperatūros funkcija;

$\varepsilon_{\nu,T}$  – bangos ilgio ir dažnio funkcija;

$\pi$  – matematinė konstanta,  $\pi \approx 3,14$ ;

$h$  – universalioji konstanta,  $h=6,622 \cdot 10^{-34}$  J·s;

$\nu$  – bangos dažnis, Hz;

$c$  – šviesos greitis vakuume;  $c=3 \cdot 10^8$  m/s;

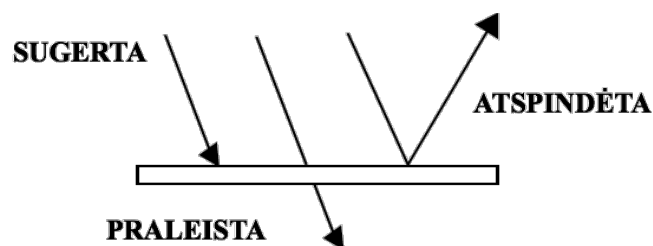
$k$  – Bolcmano konstanta,  $k=1.380658 \cdot 10^{-23}$  J/K;

$T$  – Temperatūra, °K;

$\lambda$  – bangos ilgis, m.

## 1.5 Šilumos mainai spinduliavimu

Kaip buvo aptarta ankstesniuose skyriuose, šilumos mainai gali vykti ne tik konvenciniu būdu, bet ir elektromagnetinių bangų, kurios priklauso infraraudonųjų bangų ruožui, pagalba. Ne visa išspinduliuota energija, kuri pasiekia kūną yra absorbuojama. Dalis šios energijos gali būti atspindėta, o taip pat ir pereiti kūną kiaurai. Tikrai sugerta energija bus panaudota kūno šilumai. Sugertos energijos kiekis priklauso nuo kūno, į kurį krenta infraraudonųjų spindulių srautas, fizikinių savybių. Tos pačios fizikinės savybės nusprendžia kaip kūnas atiduoda ir kaip sugeria šiluminę energiją.



4 pav. Krintančios į kūną energijos balansas. Krintanti energija lygi sugertos, atspindėtos ir praleistos energijos sumai

Bendras spindulinės energijos balansas:

$$Q = Q_s + Q_a + Q_p;$$

čia  $Q$  – ant kūno paviršiaus patenkantis šiluminių spindulių srautas,  $W$ ;

$Q_s$  – sugeriamas šiluminių spindulių srautas,  $W$ ;

$Q_a$  – atspindimų šiluminių spindulių srautas,  $W$ ;

$Q_p$  – praėjusių pro kūną šiluminių spindulių srautas,  $W$ .

Padalijus abi lygybės puses iš  $Q$  ir priėmus, kad

$$\frac{Q_s}{Q} = S, \frac{Q_a}{Q} = A, \frac{Q_p}{Q} = P; \quad (1.12)$$

gauname:

$$S + A + P = 1; \quad (1.13)$$

čia:  $S$  – sugėrimo koeficientas;

$A$  – atspindėjimo koeficientas;

$P$  – praleidimo koeficientas.

Priklausomai nuo kūno savybių  $S$ ,  $A$  ir  $P$  gali kisti nuo 0 iki 1.

Kai  $S = 1$ , o  $A = 0$  ir  $P = 0$  – kūnas sugeria visus ant jo krintančius spindulius. Toks kūnas vadinamas absoliučiai juodu kūnu.

Kai  $S = 0$ , o  $A = 1$  ir  $P = 0$  – kūnas atspindi visus ant jo krintančius spindulius. Tai veidrodinis arba absoliučiai baltas kūnas.

Kai  $S = 0$ , o  $A = 0$  ir  $P = 1$  – kūnas praleidžia visus spindulius. Tai absoliučiai skaidrus kūnas. [4]

Absoliučiai juodų, baltų ir skaidrių kūnų gamtoje nėra. Tačiau žinoma, kad naftos suodžiai sugeria iki 98 % visų krintančių šiluminių spindulių. Jų  $S = 0,98$ . Poliruoto aukso  $A = 0,97-0,98$ , o vienatomių ir dviatomių dujų  $P$  artimas vienetui. [4]

Nuo absoliučiai juodo kūno, kurio paviršiaus temperatūra –  $T_p$ , išspinduliuotos energijos kiekis apskaičiuojamas pagal Stefano – Bolcmano dėsnio matematinę išraišką:

$$E_0 = C_0 \left( \frac{T_p}{100} \right)^4; \quad (1.14)$$

čia:  $E_0$  – absoliučiai juodo kūno išspinduliuotos energijos srautas,  $W/m^2$ ;

$T_p$  – kūno paviršiaus temperatūra,  $^{\circ}K$ ;

$C_0$  – absoliučiai juodo kūno spinduliavimo koeficientas,  $C_0 = 5,67 W/(m^2 \cdot K^4)$ .

Realių (pilkų) kūnų išspinduliuojamos energijos kiekis:

$$E = \varepsilon \cdot E_0; \quad (1.15)$$

Čia:  $E$  – realaus kūno išspinduliuotos energijos srautas,  $W/m^2$ ;

$\varepsilon$  – kūno juodumo laipsnis.

Kūno juodumo laipsnis:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}; \quad (1.16)$$

čia:  $C$  – realaus kūno spinduliavimo koeficientas.

Pernešant šilumą spinduliavimo būdu nuo vieno kūno ant kito pernešamas šilumos srautas apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$q = \varepsilon_t \cdot C_0 \left[ \left( \frac{T_{p1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{p2}}{100} \right)^4 \right]; \quad (1.17)$$

čia  $q$  – šilumos srautas, krintantis nuo pirmojo kūno ant antrojo spinduliavimo būdu,  $W/m^2$ ;

$T_{p1}$  ir  $T_{p2}$  – pirmojo ir antrojo kūnų paviršiaus temperatūros, °K;

$\varepsilon_t$  – dviejų kūnų sistemos juodumo laipsnis.

Jeigu šiluminis spinduliavimas vyksta tarp dviejų lygiagrečių skirtingų paviršių temperatūrų plokščių, tai dviejų kūnų sistemos juodumo laipsnis apskaičiuojamas pagal šią formulę: [4]

$$\varepsilon_t = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}; \quad (1.18)$$

čia  $\varepsilon_1$  ir  $\varepsilon_2$  – pirmojo ir antrojo kūnų juodumo laipsniai.

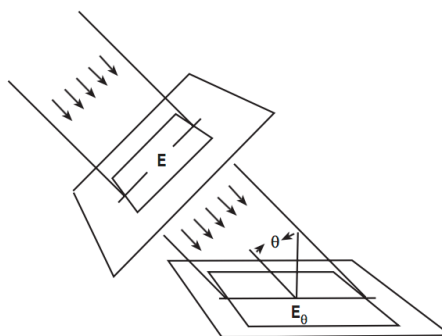
## 1.6 Lamberto kosinuso dėsnis

Tai yra vienas iš pagrindinių dėsnų, kurie nustato, kad spinduliuotės intensyvumas krintantis ant plokščio paviršiaus iš mažo spindulių šaltinio yra maksimalus, kai spinduliuotę sugeriantis kūnas yra orientuotas statmenai spinduliui. *Lamberto kosinuso dėsnis sako, kad spindulių srautas krintantis ant bet kurio paviršiaus priklauso nuo krintančių spindulių kampo  $\theta$  kosinuso* (2.6.1) [5]. Taigi jei spinduliuotę priimantis kūnas yra pasuktas kampu  $\theta$ , tai tą kūną pasiekiančios spinduliuotės dydis yra proporcingas kampo  $\theta$  kosinusui (pav 6).

$$E_\theta = E \cos \theta; \quad (2.6.1)$$

čia:  $E_\theta$  – apšvieta, lx;

$\theta$  – spinduliuotės srauto kritimo kampas.



6 pav. Spindulių srauto krintančio į plokštumą apšvietos priklausomybė nuo kampo  $\theta$  [5]

Šis dėsnis yra taikomas tik mažiems spindulių šaltiniams spinduliuojantiems virš sąlyginai didelio objekto. Infraraudonųjų spindulių inžinerijoje paprastai spindulių šaltiniai yra didelio, kartais net didesnio ploto už šildomus kūnus, o atstumai tarp spinduliuojančio ir sugerenčio kūnų yra santykinai maži. Taigi nors kosinuso dėsnis nėra universalus ir darantis didelę įtaką kūnams absorbuojant maksimalų infraraudonųjų spindulių kiekį, tačiau jo negalima nepaisyti. Tarkime turime ploną metalinę plokštelę, kuri yra orientuota statmenai spindulių šaltiniui (toku atveju,  $\cos\theta=0$ ), todėl teoriškai spindulių sugerties nebūtų.

### 1.7 Niūtono atvirkštinio kvadrato dėsnis

Atvirkštinio kvadrato dėsnis apibrėžia apšvietos  $E_v$  ir šviesos intensyvumo  $I_v$  santykį nuo atstumo:

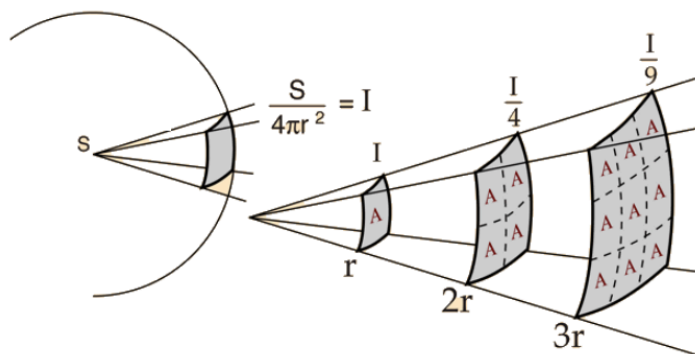
$$E_v = \frac{I_v}{d^2}; \quad (2.6.2)$$

čia:  $E_v$  – apšvieta, lx;

$I_v$  – apšvietos intensyvumas, lm;

$d$  – atstumas tarp šviesos šaltinio ir kūno, m.

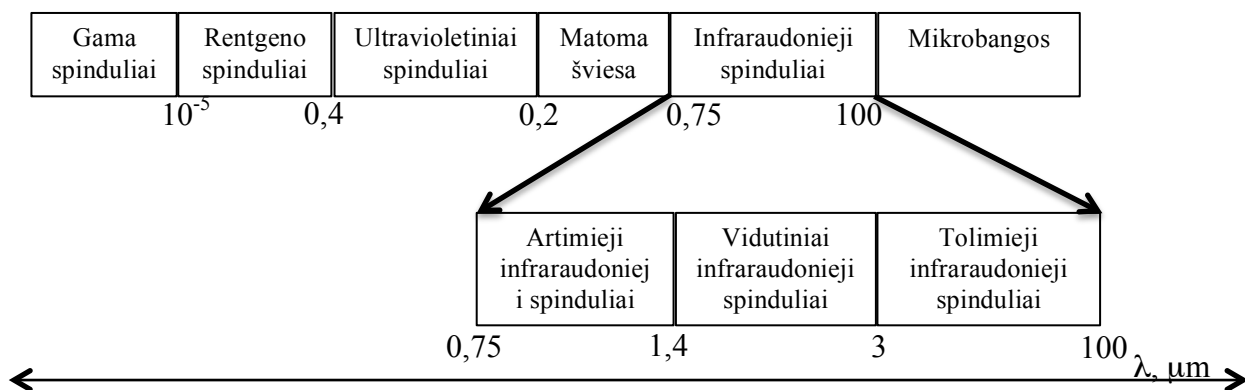
Jei paviršius, kuris yra apšviestas šviesos šaltinio juda tolyn nuo jo, paviršiaus apšvietimas tampa blankesnis. Ištikrųjų, paviršius tamsės kur kas greičiau nei tols nuo šviesos šaltinio. Šis dėsnis taip pat yra paremtas taškinio spindulių šaltinio principu, kuris labiau tinka kalbant apie su apšvietimu susijusias problemas. *Atvirkštinio kvadrato dėsnis teigia, kad apšvietos intensyvumas atvirkščiai proporcingas atstumo kvadratui ir priešingai – spinduliavimo intensyvumas tarp dviejų begalinių plokštumų yra nepriklausomas nuo atstumo tarp jų* [6].



7 pav. Taškinio šviesos šaltinio apšvietos priklausomybė nuo atstumo [6]

### 1.8 Infraraudonųjų spindulių šildytuvų tipai

Visus infraraudonųjų spindulių šildytuvus būtų galima skirstyti pagal daugelį kriterijų: jų sandarą, paskirtį, galią, dydį, tačiau pagrindinis šildytuvo parametras, kuris charakterizuoja šildytuvus yra priklausomybė tam tikram skleidžiamų infraraudonųjų spindulių diapazonui. Šis diapazonas skirstomas į 3 grupes: artimajį, vidutinį ir tolimajį infraraudonųjų spindulių ruožą (8 pav.).



8 pav. Artimųjų, vidutinių ir tolimųjų infraraudonųjų spindulių diapazonas elektromagnetinių bangų spektro ruože.

#### *Artimasis infraraudonųjų spindulių ruožas*

Artimasis arba kitaip trumpųjų infraraudonųjų bangų ruožas priklauso bangos ilgiamas tarp 0,75 ir 1,4 mikronų [15]. Šiame ruože veikiantys šildytuvai pasižymi didelėmis darbinėmis temperatūromis – 1300 °C ir daugiau [7]. Paprastai artimojo IR diapazono spindulių šaltiniai yra kvarcinės lempos su reflektoriais skirtais koncentruoti energiją reikalingame taške ar dujinai, kurie degindami propano ar natūralias dujas kaitina metalinį vamzdelį, o šis įkaitęs skleidžia trumpo bangos ilgio IR spinduliuotę. Dėl aukštų temperatūrų šio tipo šildytuvai naudojami ten, kur reikalingas didelis šiluminis intensyvumas, kaip maisto gaminimas ar metalų virinimas. Kadangi gyvų organizmų oda yra labai laidi artimojo infraraudonųjų bangų ruožo spinduliams, šių spindulių

sugertis yra labai menka, todėl jie netinka patalpų ar gyvų organizmų šildymo panaudojimui. Be to, dėl savo didelio šiluminio intensyvumo jie gali būti net ir pavojingi žmogaus sveikatai, nes veikdami ilgą laiką gali sukelti įvairius odos nudegimus.

#### *Vidutinis infraraudonųjų spindulių ruožas*

Šiam spindulių ruožui priklauso spinduliai, kurių bangos ilgiai yra tarp 1,4 ir 3 mikronų [15]. Tokio bangos ilgio spindulius skleidžia kūnai, kurių temperatūros yra 500 – 800 °C [7]. Vidutinio bangos ilgio IR spinduliuotės panaudojimas gali būti aptinkamas ne tik stiklo gamybos pramonėje, plasmės apdirbime, klijų ir dažų kietinime, pramoniniame džiovinyje, bet taip pat ir karinės ginkluotės pramonėje. Šio diapazono spinduliuotė naudojama įvairių šilumą sekančių raketų gamyboje, kurios aptinka orlaivio variklų išmetamų dujų skleidžiamą šilumą. Išgauti vidutinio IR spindulių ruožui priklausančias bangas naudojami kvarciniai spinduliai, kuriuos sudaro šildoma metalinės spyralė padengta kvarcinio stiklo vamzdeliu ar keraminiai spinduliai. Pastarieji, keraminiai, šildytuvai skleidžia 2 – 3 mikronų ilgio IR spindulius, o tai leidžia juos taikyti viešųjų ar komercinių erdvių šildymui.

#### *Tolimasis infraraudonųjų spindulių ruožas*

Tolimajam infraraudonųjų spindulių arba ilgųjų bangų ruožui priklauso spinduliai, kurių bangos ilgiai yra tarp 3 ir 100 mikronų [15]. Šio bangos ilgio spindulius skleidžia kūnai, kurių temperatūra yra apie 100 °C [7]. Kadangi žmonių ir gyvūnų oda sudaryta iš maždaug 80 % vandens, ji labai gerai sugeria šio tipo spindulius. Tolimojo IR diapazono šaltiniai paprastai yra pagaminti iš nikelio arba šiuo metu ypač populiariu juos gaminti iš anglies pluošto. Dėl savo žemų temperatūrų šie šildytuvai taikomi gyvenamųjų, komercinių, viešųjų patalpų šildymui bei IR spindulių saunose. Šio tipo šildytuvai turi didžiausią šiluminę inerciją: pasiekti darbinę temperatūrą arba pilnai atvėsti gali prisiūkti 10 ir daugiau minučių, kai tuo tarpu vidutinio diapazono šildytuvai užtrunka priklausomai nuo sądaros 1 – 7 min., o artimojo iki kelių sekundžių.

### **1.9. Rinkoje esančių tolimojo spektro infraraudonųjų šildytuvų palyginimas**

Šiuo metu rinkoje yra trijų tipų tolimojo spektro infraraudonųjų spindulių šildytuvai – angliniai, metaliniai bei hibridiniai. Šiam skyriuje bus aptariami šių šildytuvų parametrai bei sandara. Bus atliekamas šildytuvų palyginimas siekiant įvertinti jų pranašumus bei trūkumus vienas kito atžvilgiu. Skyriaus gale bus pateiktas duomenų apibendrinimas bei išvados.

#### *Keramikiniai šildymo elementai*

Šių elementų darbinė temperatūra paprastai svyruoja nuo 300 iki 700 °C laipsnių. Sąlyginai didelis spinduliavimo paviršiaus plotas yra naudingas ne tik spinduliuotei, bet taip pat leidžia tam



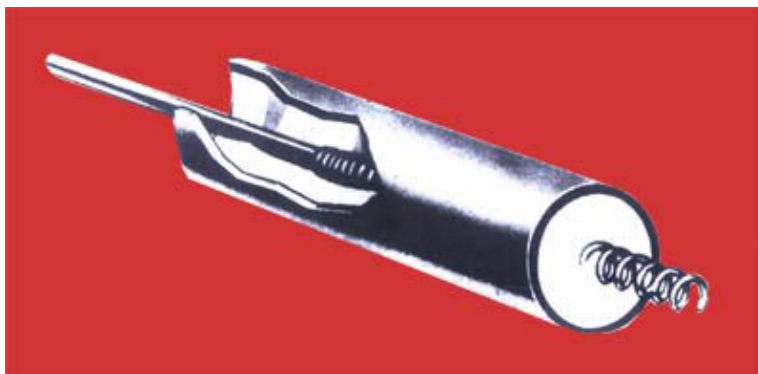
tikrą maitinimo galios sątykį perduoti kaip šilumą (energiją) aplink elementą esančiam orui konvekcijos būdu. Tai gali būti naudinga tam tikrais atvejais. Keraminių spindulių sandarą dažniausiai sudaro nikelio chromo lydinio spyralė, kuri yra padengta keraminiu paviršiumi. Tokia sandara leidžia išvengti terminio šoko ir apsaugo metalinę dalį nuo deguonies poveikio. Dėl tokios sandaros šie šildytuvai pasižymi dideliu šiluminiu inertiškumu. Jų įšilimo/vėsimo laikas 4 ir daugiau minučių. Elemento gyvavimo trukmė yra keletas metų, o spinduliavimo gebos koeficientas gana aukštas – 0,9. Spinduliuojamos energijos pikas yra ties 3 – 5 mikronų bangos ilgiais. Keraminių šildytuvu galia svyruoja nuo 125 W iki 1000 W. [8]



9 pav. keraminius infraraudonųjų spindulių šildymo elementas [8]

### *Metaliniai šildymo elementai*

Cilindro formos elementai geriausiai žinomi dėl jų plataus panaudojimo virdulio ar elektrynės plytelės kaitinimo elemento sudėtyje. Paviršiaus temperatūra įkaista iki 850°C (priklausomai nuo naudojamo metalo, temperatūros riba gali būti ir 750°C laipsnių). Žemesnė šildytuvo darbinė temperatūra leidžia prailginti gyvavimo laiką. Sandara: elementas sudarytas iš nikelio-chromo varžinės spiralės metalinio cilindro viduje, o elektriškai izoliuoti šiuos elementus naudojama magnio oksido pudra. Elementai labai tvirti ir atsparūs mechaniniam šokui. Gyvavimo trukmė keli metai. Didžiausias išspinduliuojamos energijos kiekis yra ties 4 mikronų bangos ilgio riba. Spinduliavimo paviršiui esant tiesioginiame kontakte su oru didžioji įėjimo galios dalis panaudojama kaip konvekinė šiluma. Tam, kad sunkoncentruoti energiją pasirinkta kryptimi, naudojami poliruoti metaliniai paviršiai (pvz. aliuminio arba nerūdijančio plieno). Sistema su kaitinimo rite, metaliniu paviršiumi bei reflektoriumi turi tam tikrą terminę inerciją – apie 2 min. Liekamoji šiluma po išjungimo yra pavojinga karščiui jautriems elementams, todėl reikalingi šilumos skirstytuvai. [8]



10 pav. Infraraudonųjų spindulių šildytuvo su metaliniu paviršiumi elementas [8]

### *Kvarciniai šildymo elementai*

Šio tipo šildymo elementai gaunami metalo lydinio spyralinį elementą apvilktus kvarciniu vamzdeliu su atvirais galais. Darbinė lydinio temperatūra siekia iki 950 °C, o maksimalus spinduliuojamos bangos ilgis apie 2,5 mikronų, tačiau šio tipo šildymo elementai spinduliuoja ir didesnio bangos ilgio infraraudonuosius spindulius – iki 4 mikronų, nes kvarcinio vamzdelio temperatūra yra mažesnė nei šildymo elemento. Dėl to atsiranda konveciniai nuostoliai ir tik apie 60% įėjimo galios yra paverčiama į spinduliuojamą energiją. Spinduliavimo perdavimo koeficientas 0,8.[8]



11 pav. Kvarcinis infraraudonųjų bangų šildytuvas [8]

Dviejų vamzdelių šildytuvai yra gaminami aštuoneto formos. Tokia sandara suteikia papildomo stiprumo konstrukcijai ir leidžia visus pajungimus padaryti viename vamzdelio gale. Toks vamzdelis gali būti gaminamas iki 2,5 metrų ilgio, o jo galia siektų iki 8 kW. Tokių elementų sistemos galios intensyvumas yra 50 kW/m<sup>2</sup>, o temperatūra siekia iki 500 °C. Šilumos perdavimas kondukciniu būdu vidinėms vamzdelio sienelėms yra minimalus dėl mažo kontaktinio ploto. Todėl tai praktiškai neįtakoja įšilimo laiko, kuris pasiekiamas per 20 – 60 sekundžių nuo įjungimo. Dėl visakryptinio kvarcinių vamzdelių spinduliavimo, reikalingas reflektorius nukreipiantis ir koncentruojantis šiluminę energiją reikiama kryptimi. Visi vidutinio bangos ilgio šildymo vamzdeliai turi kelių metų veikimo laiką, tačiau dėl neatsparumo mechaniniam šokui, vibracijoms darbo trukmė gali sumažėti.[8]

### Anglies pluošto šildytuvai

Anglies pagrindu pagaminti šildytuvai tapo pigesniu pakaitalu įprastiniams spyralinio tipo keramikiniams šildytuvams. Šie šildytuvai yra ploni, turi didelį spinduliavimo paviršių, kurio darbinė temperatūra yra žemesnė nei kitų IR šildytuvų – apie 100 C. Anglies pluošto šildytuvai yra gaminami impregnuojant anglinį rašalą (anglies nano dalelės) į stiklo audinio pluoštą, kuris anglies daleles izoliuoja nuo aplinkoje esančių dujų [9]. Jų gyvavimo laikas 2-5 metai. Anglies pluošto šildytuvai dėl savo žemos darbinės temperatūros didžiąją dalį energijos spinduliuoja 6 – 14 mikronų bangos ilgio diapazone, kuris yra pats naudingiausias ir labiausia tinkantis tiek žmonių šildymui, tiek medicinos srityje.

### Tolimojo spektro šildytuvų parametrų palyginimas

1 lentelė. Tolimojo spektro infraraudonųjų spindulių šildytuvų palyginimas [10]

IR spindulių šaltinis	Anglies pluošto	Keramikinis	Kvarcinis
Paviršiaus temperatūra	85-95 °C	95 – 900 °C	900 °C
Galios ir ploto santykis	1 kW/m <sup>2</sup>	38 kW/m <sup>2</sup>	62 kW/m <sup>2</sup>
Bangos ilgis	4 – 14 μm	2,25 -7,9 μm	2,5 – 6 μm
Įšilimo/vėsimo laikas	4 – 8 min.	5 – 8 min.	6 – 10 min.

### Apibendrinimas

Šiame skyriuje buvo apžvelgti tolimojo infraraudonųjų bangų spektro keramikiniai, kvarciniai bei anglies pluošto šildytuvai. Palygine šių šildytuvų techninius parametrus, galime daryti šias išvadas:

- Anglies pluošto šildytuvai pasižymi tolygiomis šilumos perdavimo charakteristikomis visame savo darbinio paviršiaus plote, kai tuo tarpu keramikiniai šildytuvai turi “karštus” taškus.
- Anglies pluošto šildytuvai turi žemą paviršiaus temperatūrą, dėl šios priežasties jie yra saugesni žmogui, o minimalus rekomenduojamas saugus atstumas nuo šildytuvo yra kur kas mažesnis nei keramikinių ar kvarcinių šildytuvų.
- Anglies pluošto šildytuvai, priešingai nei kiti, turi žymiai mažesnę galios ir ploto santykį. Šildant patalpas su keramikiniais ar kvarciniais šildytuvais, kurie savo mažame darbiname paviršiuje turi didelę galios koncentraciją. Esant mažiems spinduliavimo paviršiams galioja 2.5 ir 2.6 skyriuose minėti Lambetro kosinuso ir Niutono atvirkštinio kvadrato dėsniai, kurie nusako spinduliuotės intensyvumo praradimą tolstant nuo energijos šaltinio ar spinduliuotei krintant kampu į objektą.

- Anglies pluošo šildytuvai yra energetiškai naudingesni, kadangi priešingai nei keramikiniai ar kvarciniai šildytuvai, kuriuose elektros energija pirma verčiama metalinio šildymo elemento šiluma, o vėliau kondukcijos būdu perduodama paviršiui turinčiam gerą spinduliavimo gebos koeficientą.

## 2. Tyriamasis darbas I dalis

### 2.1 Infraraudonųjų šildymo plokščių tyrimo tikslai ir uždaviniai.

**Tyrimo tikslas.** Šiame darbe bus siekiama ištirti mažos galios infraraudonųjų spindulių plokščių šilumos perdavimo efektyvumą.

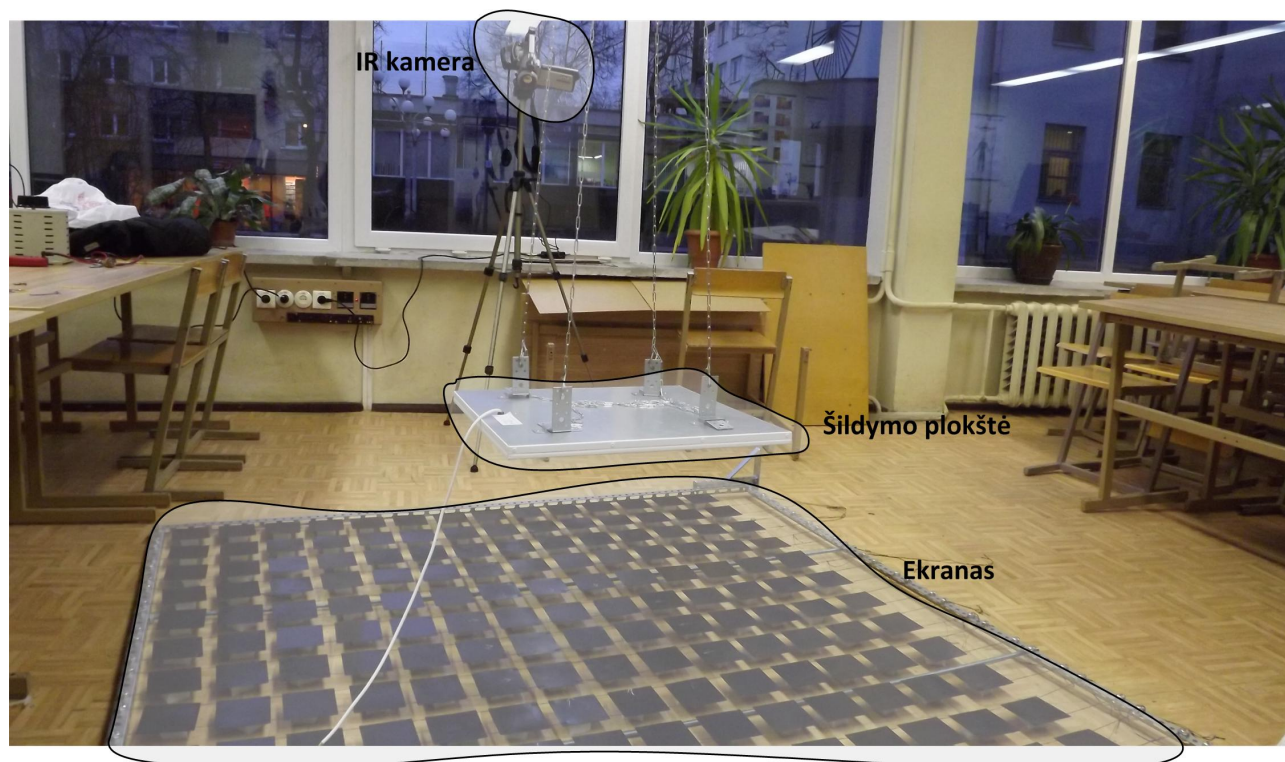
#### I. Darbo tikslo uždaviniai.

- Ištirti pasirinktų IR šildymo plokščių techninius parametrus.
- Nustatyti temperatūros pasiskirstymo priklausomybę nuo atstumo.
- Atlikti tyrimų rezultatų analizę ir pateikti išvadas.

### 2.2 Eksperimentinio tyrimo metodika

Ekserimentinio tyrimo metu buvo nagrinėjama mažos galios infraraudonųjų spindulių šildymo plokščių įtaka plonos plokštelės šiluminės apkrovos charakteristikoms. Tyrimui atlikti buvo pasirinkta 13 x 14 plieno plokštelių, kurių išmatavimai 100 x 100 x 3 mm, matrica. Ši matrica buvo sumontuota statmenai priešais mažos galios IR šildymo plokštes. Šilumos perdavimo charakteristikos buvo matuojamos 2 atvejais: horizontalioje ir vertikalioje ašyse. Taikinio plokštės išilginės dimencijos buvo parinktos sąlyginai didelės lyginant su storiu, tai užtikrina, kad šiluminiai procesai vyktų tik vienoje dimencijoje. Plokščių matrica sudaryta iš mažų plokštelių, tai leidžia atmesti aukštos temperatūros pasiskirstymą tarp plokštelių dėl didelio metalo šiluminio laidumo. Kiekviena IR šildymo plokštė buvo maitinama stabilizuota maitinimo įtampa per autotransformatorių. Galios parametrai buvo fiksuojami su tinko analizatoriumi Siemens SENTRON PAC3200 (matavimo paklaida 0,5%). Atliekant matavimus atstumas tarp šildymo elementų ir taikinio buvo keičiamas. Mataivimai buvo atliekami ties šiais fiksuotais atstumais: 0,3; 0,5; 0,7; 1,0 ir 1,5 m. Plieno plokštelių sugerties koeficientas buvo padidinamas jas nudažant juodais matiniais dažais. Temperatūros nustatymui naudota infraraudonųjų spindulių kamera (FLIR P640, tikslumas  $\pm 2$  °C). Infraraudonųjų spindulių kamerą pasiekia spinduliuotė ne tik išspinduliuota tyrimo objekto, bet taip pat ir atsiradusi dėl kitų aplink esančių objektų. Be to įtaką daro ir atspindžiai bei atmosferos infraraudonoji spinduliuotė. Tokios pašalinės spinduliuotės kiekį sunku tiksliai nustatyti, tačiau dauguma atvejų jį yra pakankamai maža, todėl galima jos nepaisyti [11]. Tam, kad užtikrinti identišką sąlygą atliekant matavimus su skirtingais bandiniais, objektų išdėstymas nebuvo keičiamas. Tyrimo rezultatai buvo fiksuojami tik sistemai pasiekus rimties būseną. Tam, kad išvengtų liekamųjų šiluminių atspindžių, kurie galėtų įtakoti rezultatus, matavimai buvo atliekami tik uždengus šildymo plokštes infraraudonųjų spindulių skydu. Vidutiniška eksperimentinio matavimo trukmė, kurios reikia išpildyti rimties sąlygą, yra 20 min. Prieš tyrimą buvo sukalibruotos FLUKE K tipo termoporos (tikslumas  $\pm 0,5$  °C) tam, kad būtų galima įvertinti

infraraudonųjų spindulių kameros tikslumą. Atlikus bandomuosius matavimus buvo nustatyta, kad matuojant temperatūras iki 105 °C gauti rezultatai visiškai sutampa matavimo paklaidų ribose. Eksperimentinio tyrimo elementų išdėstymo principinė schema pavaizduota 12 pav.



12 pav. Infraraudonųjų spindulių plokščių vertikaliojo spinduliavimo eksperimento vykdymas

### 2.3 I dalies eksperimentinio tyrimo eiga.

Pirmasis eksperimentinis tyrimas susideda iš trijų etapų. Atliekant šiuos tyrimus bus siekiama įvertinti kiekvienos infraraudonųjų spindulių plokštės individualius parametrus: plokštės paviršiaus efektyvumas, galimas gamybinis brokas, šildymo elementų instaliacijos kokybiškumas, spinduliavimo veinodumas, įšilimo/atvėsimo trukmė.

1. Etapas - infraraudonųjų spindulių plokščių paviršių įšilimo tyrimas termovizoriumi.

2. Etapas - infraraudonųjų spindulių plokščių elektrinių parametrų tyrimas.

Tyrimo metu atliekami šie matavimai:

- infraraudonųjų spindulių plokščių matmenys (LxW);
- infraraudonųjų spindulių plokščių darbinių paviršių efektyvus plotas (L`xW`);
- infraraudonųjų spindulių plokščių spinduliuojama galia (W/m<sup>2</sup>);
- infraraudonųjų spindulių plokščių suvartojama galia (W);
- infraraudonųjų spindulių plokščių centro vidutinė temperatūra (°C);
- infraraudonųjų spindulių plokščių kraštinių vidutinė temperatūra (°C);
- infraraudonųjų spindulių plokščių kampų (10 cm nuo kampo) vidutinė temperatūra (°C);

### *3. Etapas - infraraudonųjų spindulių plokščių spinduliavimo tyrimas.*

Tyrimo metu naudojami jutikliai, kurių matmenys 10 x 10 cm, pagaminti iš plieno skardos ir padengti juodais absorbuojančiais šilumą dažais. Matavimai atliekami statmenai spinduliuojamam spindulių srauto kryptčiai. Tyrimo metu atliekami tiek statmeni tiek ir horizontalūs matavimai:

- vertikalios infraraudonųjų spindulių plokštės spinduliavimas 30 cm atstumu;
- vertikalios infraraudonųjų spindulių plokštės spinduliavimas 50 cm atstumu;
- vertikalios infraraudonųjų spindulių plokštės spinduliavimas 70 cm atstumu;
- vertikalios infraraudonųjų spindulių plokštės spinduliavimas 100 cm atstumu;
- vertikalios infraraudonųjų spindulių plokštės spinduliavimas 150 cm atstumu;
- horizontalios infraraudonųjų spindulių plokštės spinduliavimas 30 cm atstumu;
- horizontalios infraraudonųjų spindulių plokštės spinduliavimas 50 cm atstumu;
- horizontalios infraraudonųjų spindulių plokštės spinduliavimas 70 cm atstumu;
- horizontalios infraraudonųjų spindulių plokštės spinduliavimas 100 cm atstumu;
- horizontalios infraraudonųjų spindulių plokštės spinduliavimas 150 cm atstumu.

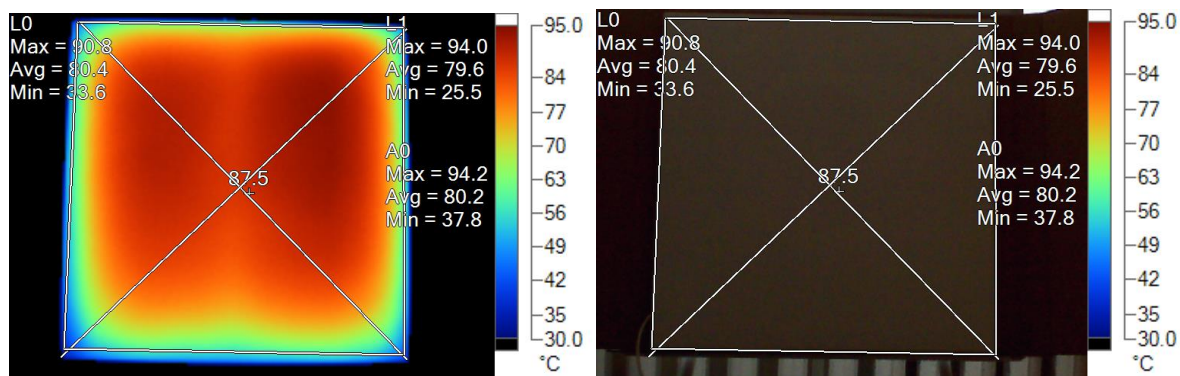
## 2.4 I dalies tyrimo rezultatai

### I. Šildymo plokštė BANDINYS A

2 lentelė. Plokštės BANDINYS A energetiniai duomenys ( $U_t = 230\text{ V}$ )

Parametras	vertė
Plokštės matmenys (LxH)	592×592×26mm.
Efektyvus šildymo plotas (L`xH')	Žr. 4.1.1 ir 4.1.2 pav.
Plokštės elektrinė galia (W)	305 W
Plokščių galios tankis ( $\text{W}/\text{m}^2$ );	$870\text{ W}/\text{m}^2$
Plokštės vidutinė temperatūra, °C	80 °C
Plokštės centro temperatūra, °C	88 °C
Plokštės taško maksimali temperatūra, °C	94 °C
Plokštės kraštinių temperatūra, °C	šonai – 48 °C, viršus – 50 °C, apačia – 46 °C galinė dalis – 40 °C

Šildymo plokštė BANDINYS A sudaryta iš 2 kaitinimo zonų daugmaž simetriškai išdėstytų jos plote. Maksimali plokštės temperatūra esant 230 V maitinimo įtampai siekia 94 °C, vidutinė plokštės temperatūra siekė 80 °C. Plokštės IR vaizdas pateiktas 13 pav. temperatūrų pasiskirstymas išilgai tiesių L0 ir L1 pateiktas 14 pav.



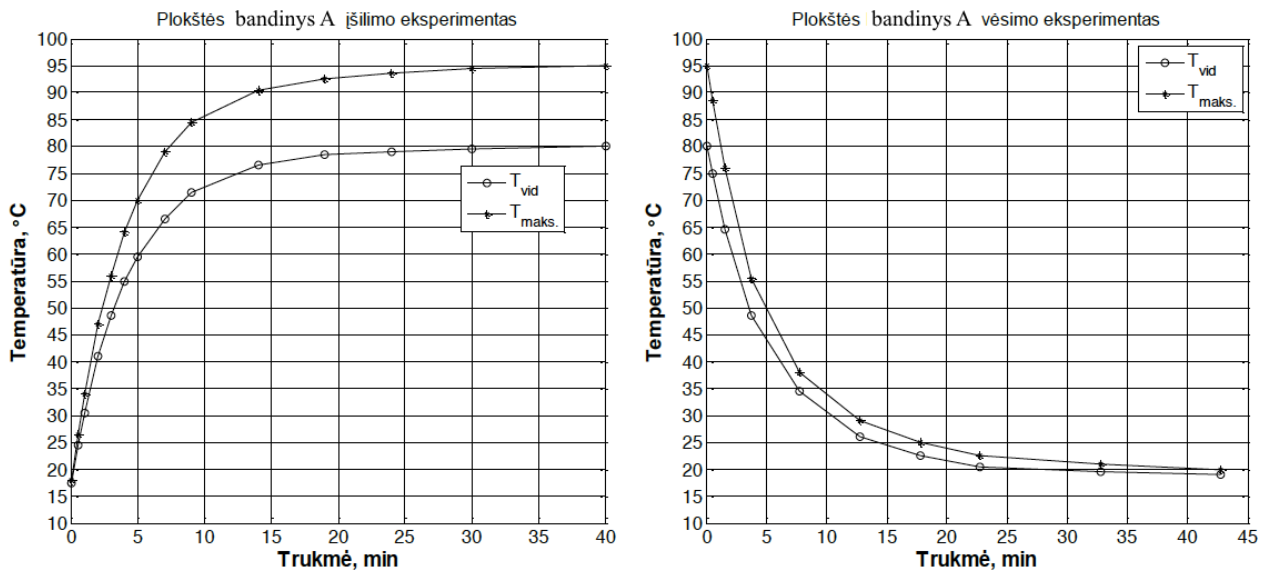
13 pav. Plokštės BANDINYS A termonuotrauka po 40 min. nuo įjungimo pradžios ir plokštės natūralus vaizdas





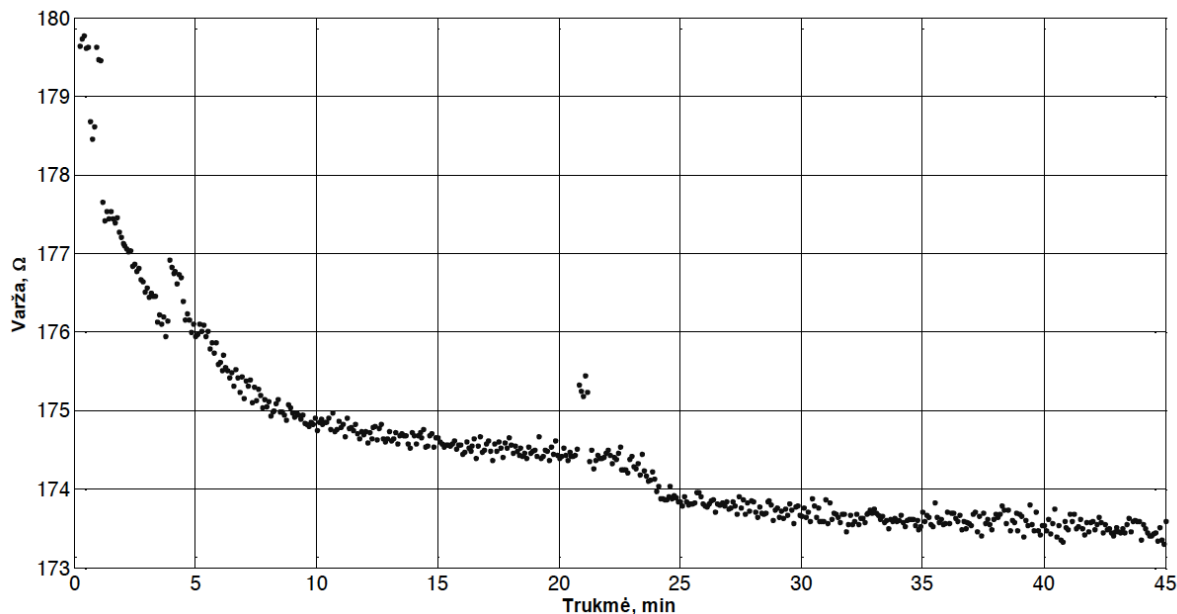
14 pav. Plokštės BANDINYS A temperatūrų kreivės linijose L0 ir L1 po 40 min. nuo įjungimo pradžios

15 pav. pateikti plokštės BANDINYS A įšilimo/vėsimo eksperimento duomenys (vidutinė ir maksimali temperatūra). Iš charakteristikų matyti, kad plokštė 95 % nusistovėjusios temperatūros pasiekia maždaug per 15 min. jai išylant ir per 20 min. vėstant.



15 pav. Plokštės BANDINYS A įšilimo/vėsimo eksperimento duomenys

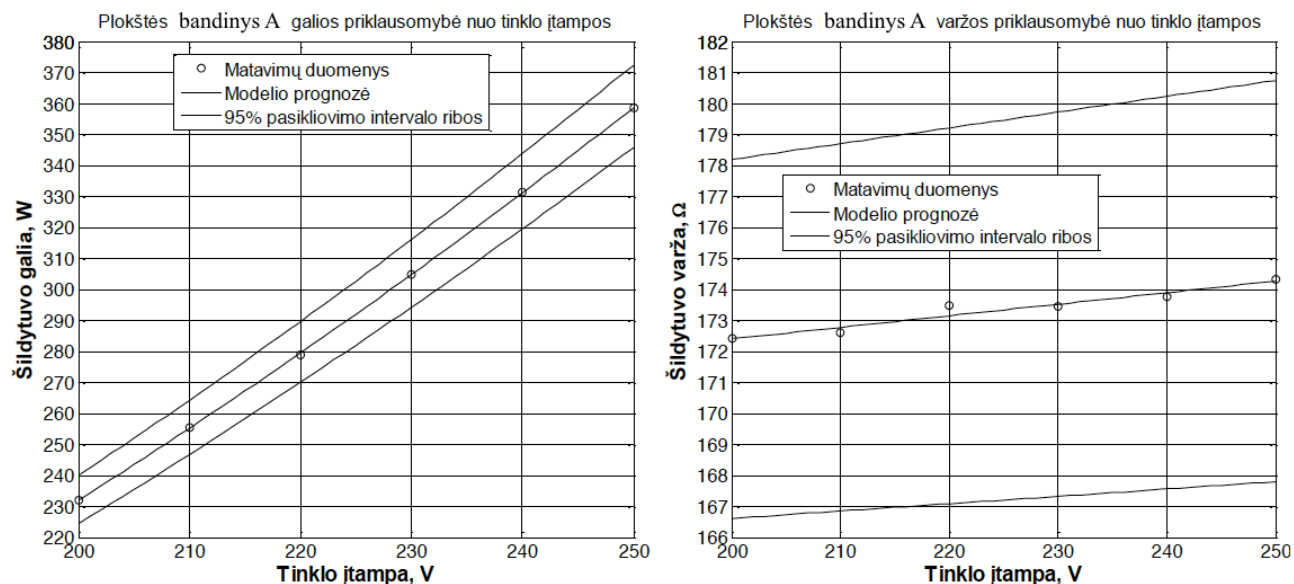
Iš Ohmo dėsnio seka, elektrinė galia atvirkščiai proporcinga imtuvo varžai ( $P = \frac{U^2}{R}$ ). Taigi, žinant plokštės elektrinę varžą, galima apskaičiuoti jos galią esant skirtingai maitinimo įtampai (t.y. sudaryti fizikinį modelį). Pažymima, kad plokštės varža priklauso nuo jos temperatūros, kuri kinta priklausomai nuo maitinimo įtampos. Atlikus plokštės BANDINYS A įšilimo eksperimentą (16 pav.) pastebėta, kad jai išylant mažėja jos elektrinė varža. Plokštės įjungimo į tinklą metu varža siekia apie 180 Ω, jai pilnai įšilus – apie 173,5 Ω. Esant 230 V įtampai šaltos plokštės galia buvo lygi maždaug 295 W, o jai įšilus – 305 W.



16 pav. Plokštės BANDINYS A elektrinės varžos kitimas plokštei kaistant

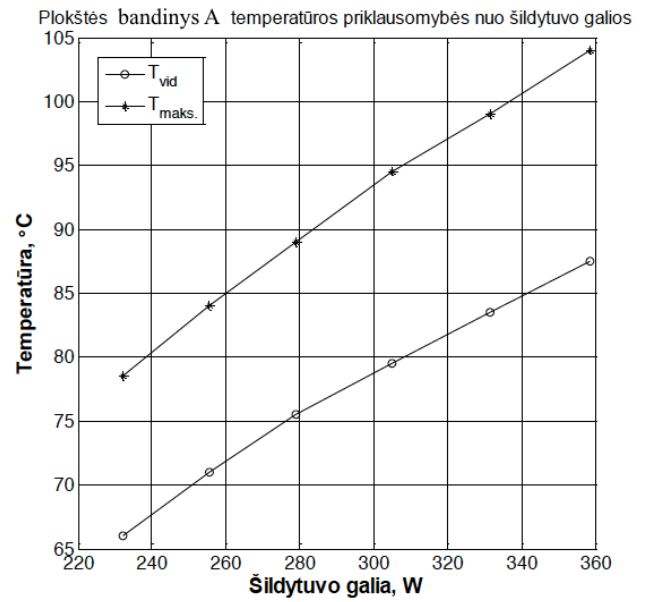
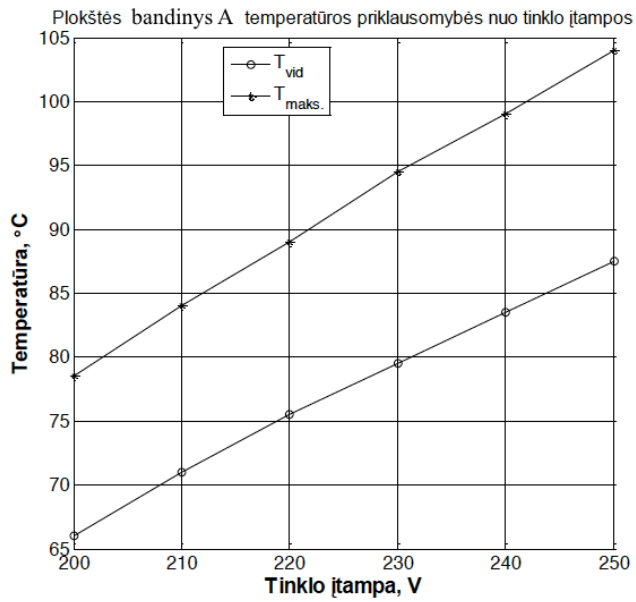
17 paveiksle pateikiami plokštės BANDINYS A elektrinės galios ir varžos priklausomybės nuo tinklo įtampos duomenys. Iš čia matyti, kad plokštės varža įtampų intervale (200-250V) kinta nuo maždaug 172,5 iki 174,5  $\Omega$ .

Tai buvo įvertinta tikslinant šildytuvo galios priklausomybės nuo maitinimo įtampos fizikinį modelį, kurio prognozė su 95 % pasikiojimo intervalu pateikta 17 pav. kairėje. Iš šio paveikslo matyti, kad modeliavimo rezultatai gerai sutampa su matavimų duomenimis.



17 pav. Plokštės BANDINYS A elektrinės galios ir varžos priklausomybė nuo tinklo įtampos

18 pav. pateiktos Plokštės BANDINYS A vidutinės ir maksimalios temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios. Iš čia matyti, kad 200-250 V (230-360 W) intervale plokštės vidutinė temperatūros vertė yra intervale 66 – 87,5  $^{\circ}\text{C}$ , o maksimali – 78,5 – 104  $^{\circ}\text{C}$ .



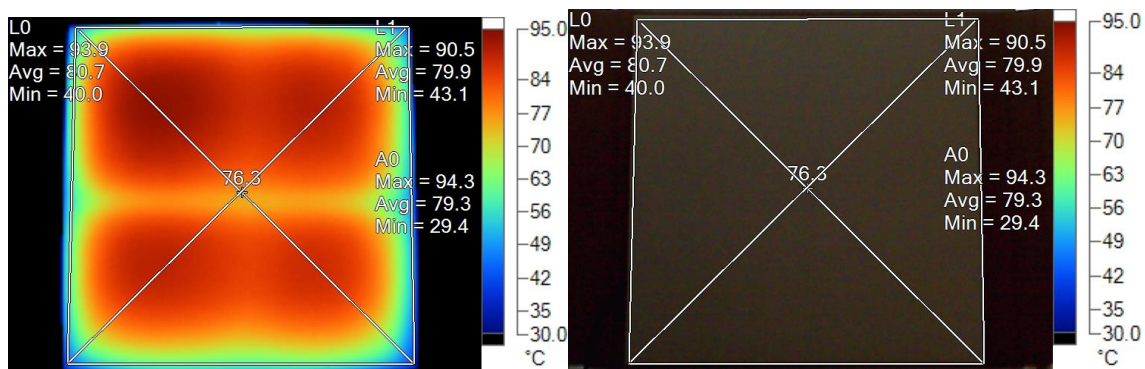
18 pav. Plokštės BANDINYS A temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios

## II. Šildymo plokštė BANDINYS B

3 lentelė. Plokštės BANDINYS B energetiniai duomenys ( $U_t = 230\text{ V}$ )

Parametras	vertė
Plokštės matmenys (LxH)	592×592×30mm.
Efektyvus šildymo plotas (L`xH')	Termografinė nuotrauka
Plokštės elektrinė galia (W)	296 W (230 V)
Plokščių galios tankis ( $\text{W}/\text{m}^2$ );	846 $\text{W}/\text{m}^2$ (230 V)
Plokštės vidutinė temperatūra, °C	79 °C
Plokštės centro temperatūra, °C	76 °C
Plokštės taško maksimali temperatūra, °C	94 °C
Vidutinė plokštės kraštinių temperatūra, °C	šonai – 44 °C, viršus – 47 °C, apačia – 44 °C, galinė dalis – 35 °C

Šildymo plokštė BANDINYS B sudaryta iš 4 kaitinimo sričių daugmaž simetriškai išdėstytų jos plote (kairėje viršuje esanti sritis spinduliuoja daugiau šilumos negu kitos). Maksimali plokštės temperatūra esant 230 V maitinimo įtampai siekia 94 °C, vidutinė plokštės temperatūra siekė 79 °C. Plokštės IR vaizdas pateiktas 19 pav. Temperatūrų pasiskirstymas išilgai tiesių L0 ir L1 pateiktas 20 pav.

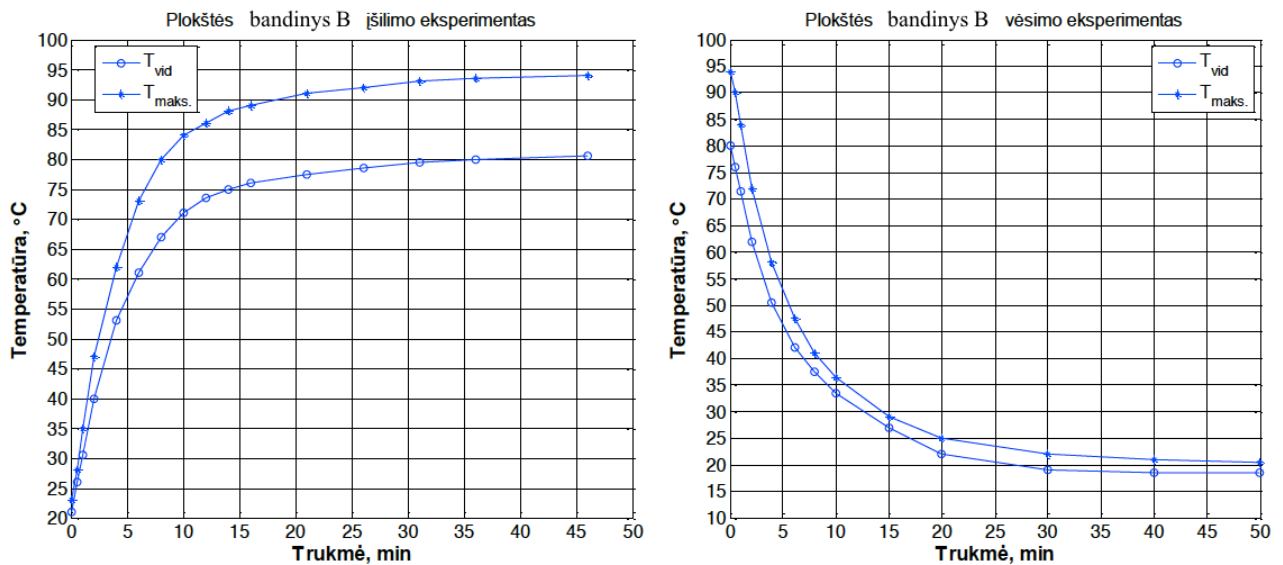


19 pav. Plokštės BANDINYS B termonuotrauka po 46 min. nuo įjungimo pradžios ir plokštės natūralus vaizdas.



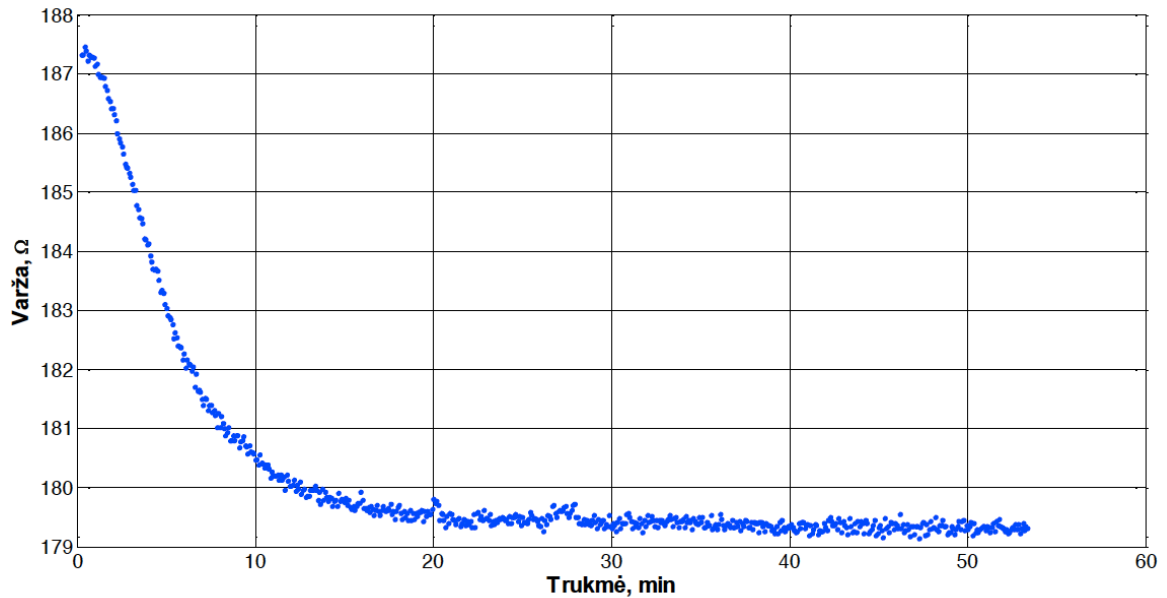
20 pav. Plokštės BANDINYS B temperatūrų kreivės linijose L0 ir L1 po 46 min. nuo įjungimo pradžios

21 pav. pateikti plokštės BANDINYS B įšilimo/vėsimo eksperimento duomenys (vidutinė ir maksimali temperatūra). Iš charakteristikų matyti, kad plokštė 95 % nusistovėjusios temperatūros pasiekia maždaug per 20 min. jai išylant ir per 25 min. vėstant.



21 pav. Plokštės BANDINYS B įšilimo/vėsimo eksperimento duomenys

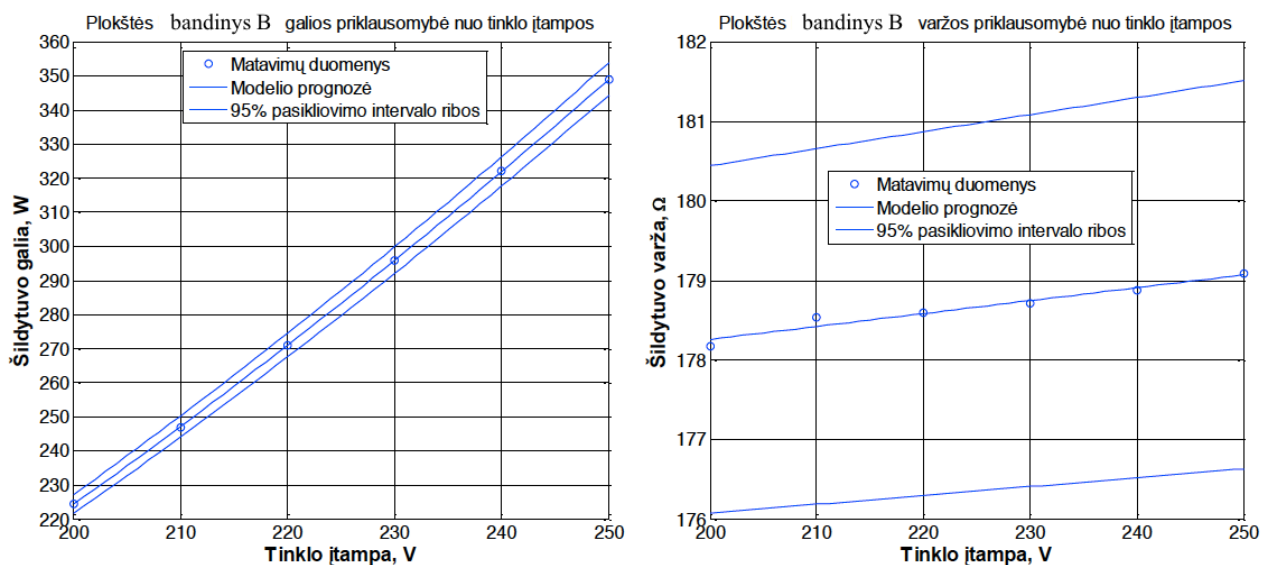
Iš Ohmo dėsnio seka, kad elektrinė galia atvirkščiai proporcinga imtuvo varžai ( $P = \frac{U^2}{R}$ ). Taigi, žinant plokštės elektrinę varžą, galima apskaičiuoti jos galią esant skirtingai maitinimo įtampai (t.y. sudaryti fizikinį modelį). Pažymima, kad plokštės varža priklauso nuo jos temperatūros, kuri kinta priklausomai nuo maitinimo įtamos. Atlikus plokštės BANDINYS B įšilimo eksperimentą (22 pav.) pastebėta, kad jai išylant mažėja jos elektrinė varža. Plokštės įjungimo į tinklą metu varža siekia apie 187  $\Omega$ , jai pilnai išilus – apie 179  $\Omega$ . Esant 230 V įtampai šaltos plokštės galia buvo lygi maždaug 283 W, o jai išilus – 296 W.



22 pav. Plokštės BANDINYS B elektrinės varžos kitimas plokštei kaistant

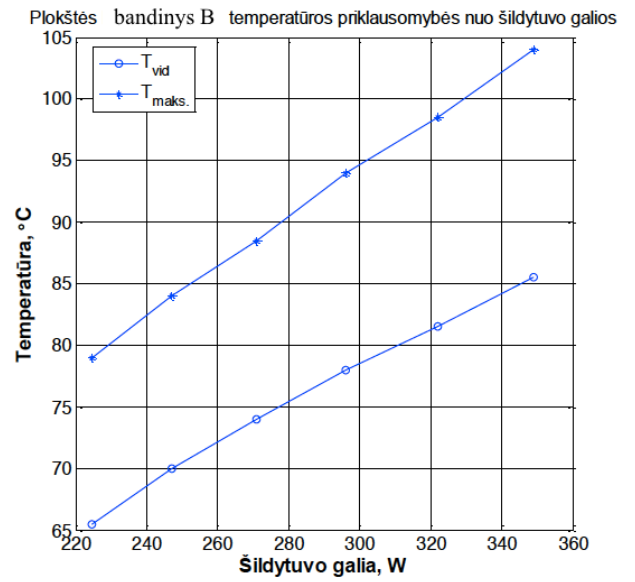
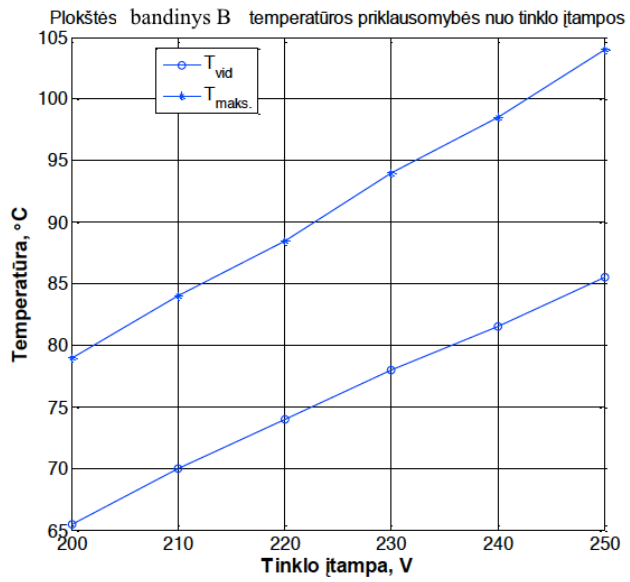
23 pav. pateikiami plokštės BANDINYS B elektrinės galios ir varžos priklausomybės nuo tinklo įtampos duomenys. Iš čia matyti, kad plokštės varža įtampų intervale (200-250V) kinta nuo maždaug 178 iki 179 Ω.

Tai buvo įvertinta tikslinant šildytuvo galios priklausomybės nuo maitinimo įtampos fizikinį modelį, kurio prognozė su 95 % pasiklovimo intervalu pateikta 23 pav. kairėje. Iš šio paveislo matyti, kad modeliavimo rezultatai gerai sutampa su matavimų duomenimis.



23 pav. Plokštės BANDINYS B elektrinės galios ir varžos priklausomybė nuo tinklo įtampos

24 pav. pateiktos Plokštės BANDINYS B vidutinės ir maksimalios temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios. Iš čia matyti, kad 200-250 V (225-350 W) intervale plokštės vidutinė temperatūros vertė yra intervale 65,5 – 85,5 °C, o maksimali – 79 – 104 °C.



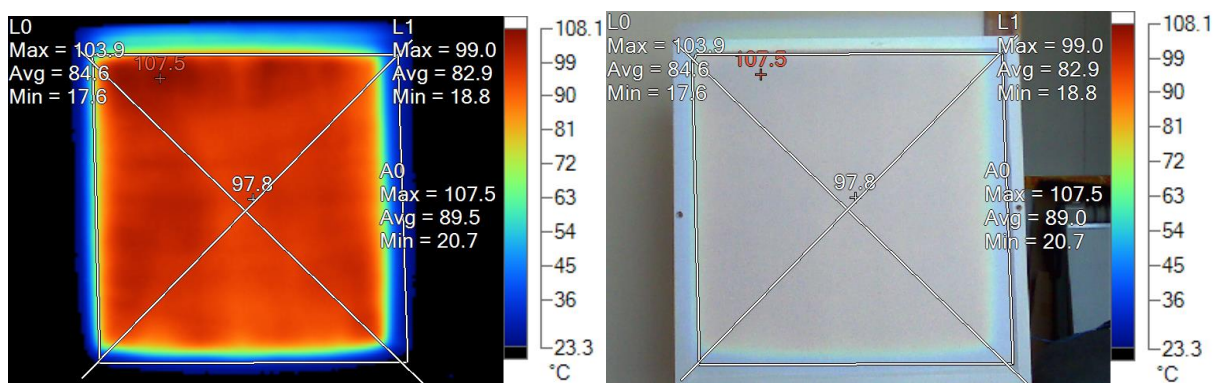
24 pav. Plokštes BANDINYS B temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios

### III. Šildymo plokštė Bandinys C

4 lentelė. Plokštės BANDINYS C energetiniai duomenys ( $U_t = 230\text{ V}$ )

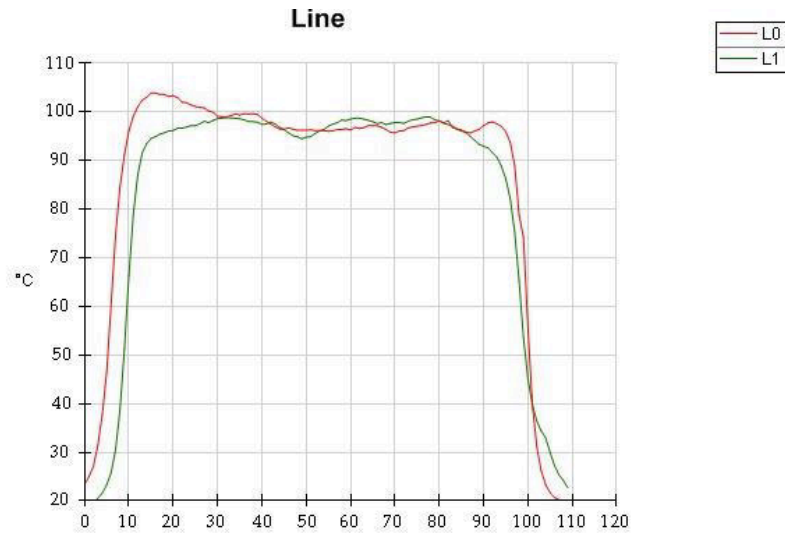
Parametras	vertė
Plokštės matmenys (LxH)	595×595×30mm. Su rėmu (640×640×40mm)
Efektyvus šildymo plotas (L`xH`)	Termografinė nuotrauka
Plokštės elektrinė galia (W)	320 W (230 V)
Plokščių galios tankis ( $\text{W}/\text{m}^2$ );	904 $\text{W}/\text{m}^2$ (be rėmo) 781 $\text{W}/\text{m}^2$ (su rėmu)
Plokštės vidutinė temperatūra, °C	90 °C
Plokštės centro temperatūra, °C	98 °C
Plokštės taško maksimali temperatūra, °C	108 °C
Plokštės kraštinių temperatūra, °C	šonai – 22 °C, viršus – 34 °C, apačia – 22 °C, galinė dalis – 55 °C (viršus), 43 °C (centras)

Šildymo plokštės BANDINYS C šildymo paviršius išdėstytas visame plokštės paviršiuje nevisai tolygiai. Plokštės dešinioji dalis (apie 5 cm) ir apačia (apie 3 cm) nepadengta šildymo elementu (plokštė orientuota taip, kad jos laidas yra apačioje). Tokiu būdu nevisai efektyviai išnaudojamas plokštės plotas. Maksimali plokštės temperatūra esant 230 V maitinimo įtampai siekia 108 °C, vidutinė plokštės temperatūra – 90 °C. Plokštės IR vaizdas pateiktas 25 pav. Temperatūrų pasiskirstymas išilgai L0 ir L1 pateiktas 26 pav.



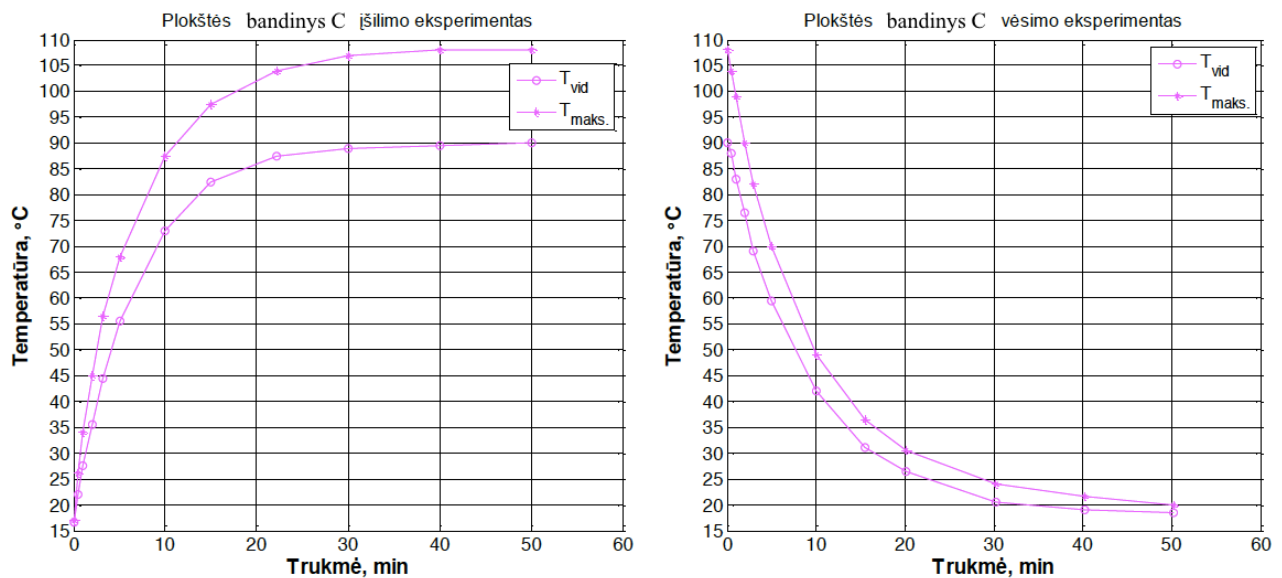
25 pav. Plokštės Bandinys C termonuotrauka po 50 min. nuo įjungimo pradžios ir plokštės natūralus vaizdas





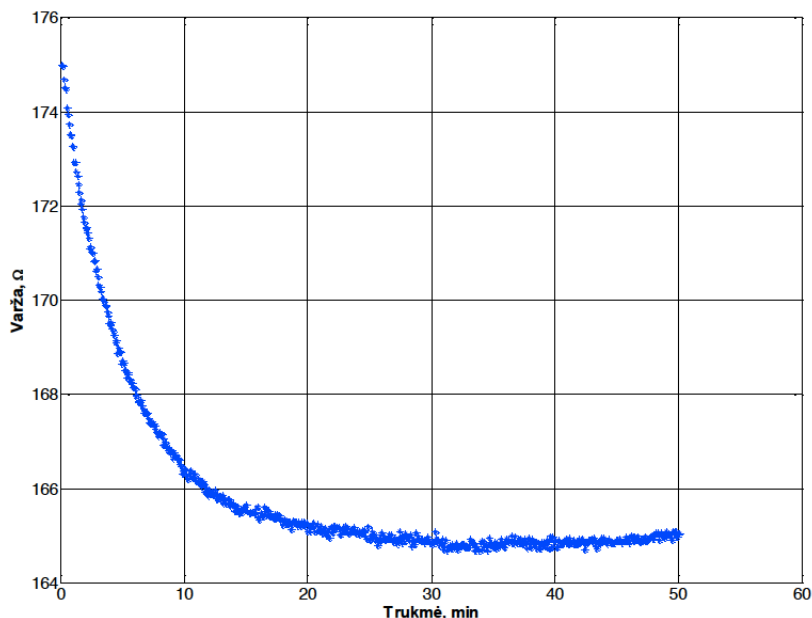
26 pav. Plokštės Bandinys C temperatūrų kreivės linijose L0 ir L1 po 50 min. nuo įjungimo pradžios

27 pav. pateikti plokštės Bandinys C išilimo/vėsimo eksperimento duomenys (vidutinė ir maksimali temperatūra). Iš charakteristikų matyti, kad plokštė 95 % nusistovėjusios temperatūros pasiekia maždaug per 20 min. jai išylant ir per 30 min. vėstant.



27 pav. Plokštės Bandinys C išilimo/vėsimo eksperimento duomenys

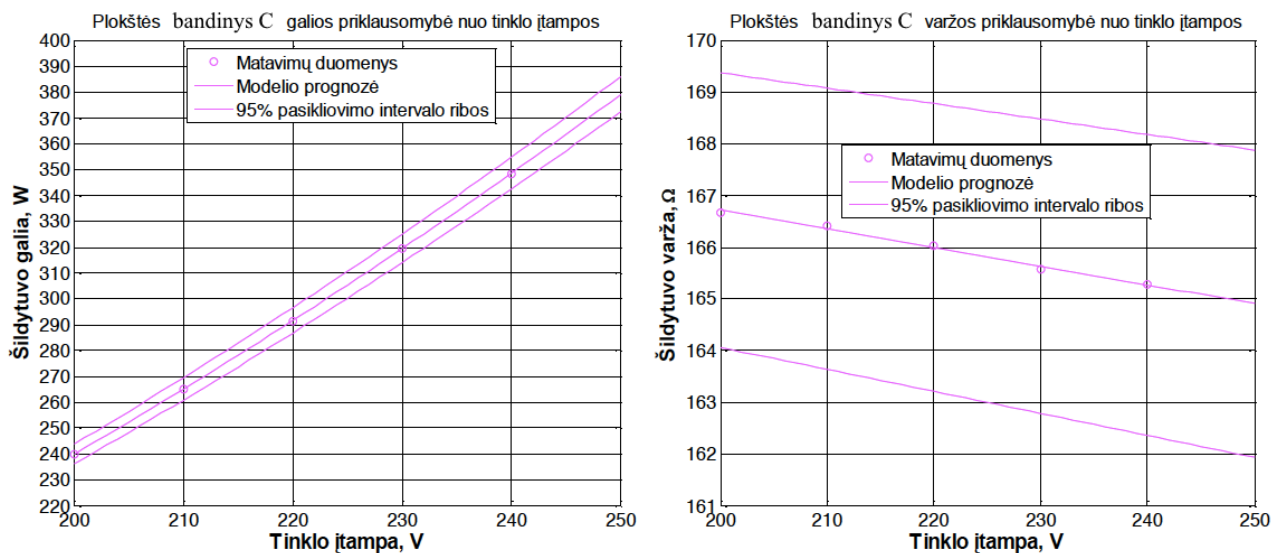
Iš Ohmo dėsnio seka, kad elektrinė galia atvirkščiai proporcinga imtuvo varžai ( $P = \frac{U^2}{R}$ ). Taigi, žinant plokštės elektrinę varžą, galima apskaičiuoti jos galią esant skirtingai maitinimo įtampai (t.y. sudaryti fizikinį modelį). Pažymima, kad plokštės varža priklauso nuo jos temperatūros, kuri kinta priklausomai nuo maitinimo įtampos. Atlikus plokštės BANDINYS C išilimo eksperimentą (28 pav.) pastebėta, kad jai išylant mažėja jos elektrinė varža. Plokštės įjungimo į tinklą metu varža siekia apie 175 Ω, jai pilnai išilus – apie 165 Ω. Esant 230 V įtampai šaltos plokštės galia buvo lygi maždaug 300 W, o jai išilus – 320 W.



28 pav. Plokštės Bandinys C elektrinės varžos kitimas plokštei kaistant

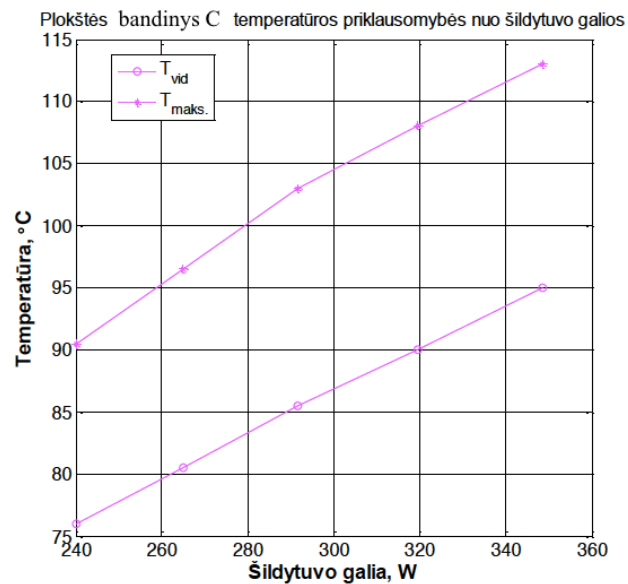
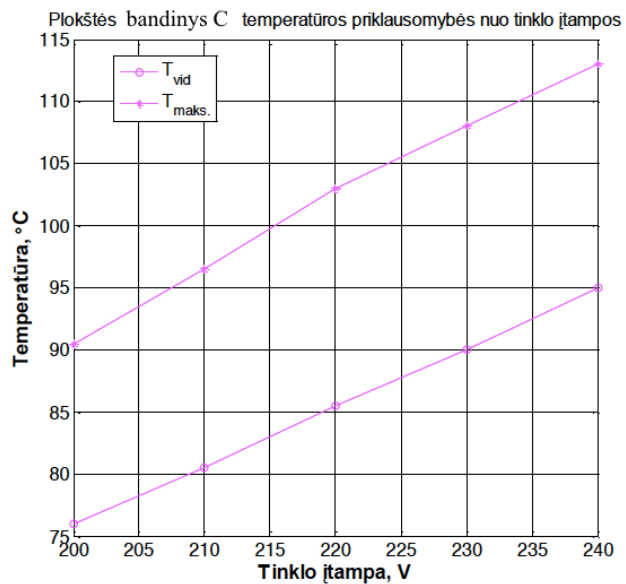
29 paveiksle pateikiami plokštės Bandinys C elektrinės galios ir varžos priklausomybės nuo tinklo įtampos duomenys. Iš čia matyti, kad plokštės varža įtampų intervale (200-250V) kinta nuo maždaug 178 iki 179 Ω.

Tai buvo įvertinta tikslinant šildytuvo galios priklausomybės nuo maitinimo įtampos fizikinį modelį, kurio prognozė su 95 % pasikiojimo intervalu pateikta 29 pav. kairėje. Iš šio paveikslo matyti, kad modeliavimo rezultatai gerai sutampa su matavimų duomenimis.



29 pav. Plokštės BANDINYS C elektrinės galios ir varžos priklausomybė nuo tinklo įtampos

30 pav. pateiktos plokštės BANDINYS C vidutinės ir maksimalios temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios. Iš čia matyti, kad 200-240 V (240-360 W) intervale plokštės vidutinė temperatūros vertė yra intervale 65,5 – 85,5 °C, o maksimali – 79 – 104 °C.



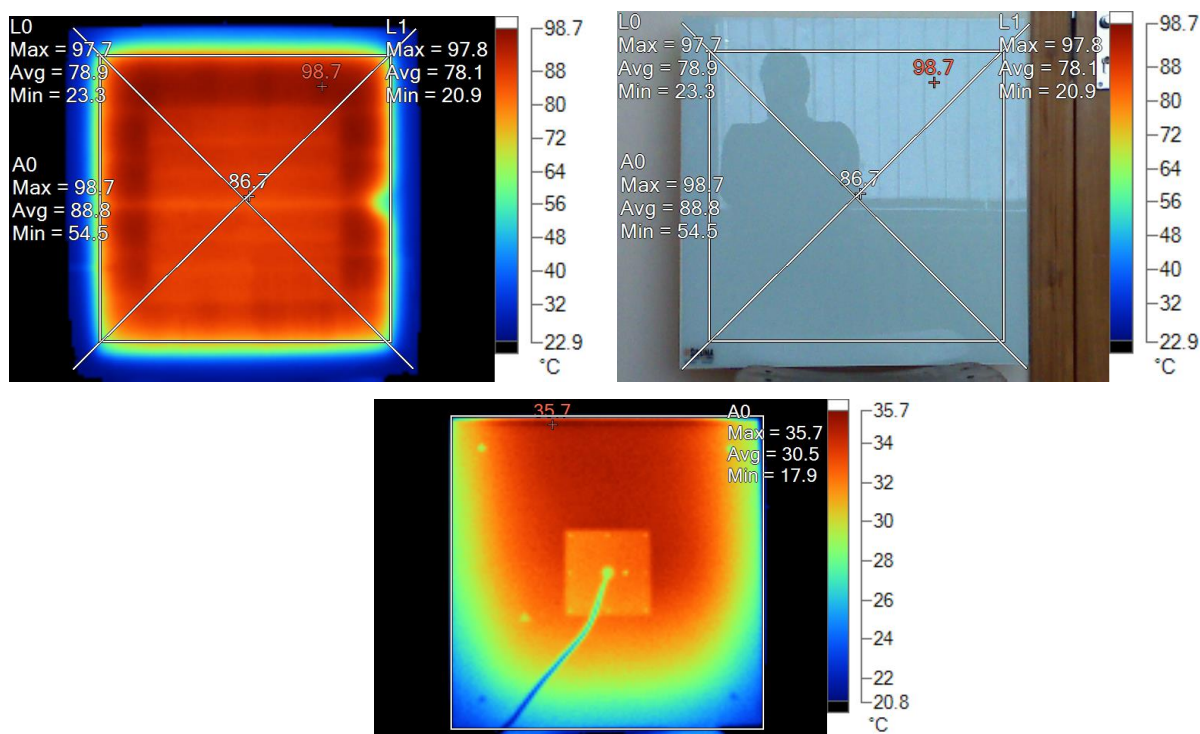
30 pav. Plokštės Bandinys C temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios

IV. Šildymo plokštė BANDINYS D (prototipas)

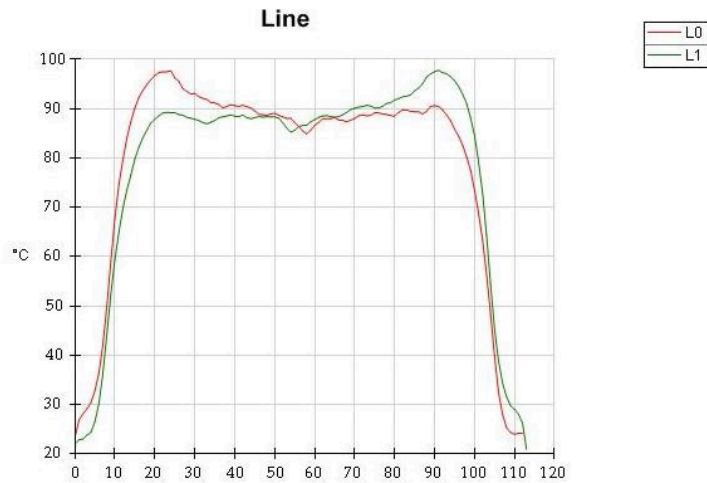
5 lentelė. Plokštės BANDINYS D energetiniai duomenys ( $U_t = 230\text{ V}$ )

Parametras	vertė
Plokštės matmenys (LxH)	505×505×20mm. Su stiklu (600×600×25mm)
Efektyvus šildymo plotas (L`xH`)	Termografinė nuotrauka
Plokštės elektrinė galia (W)	280 W (230 V)
Plokščių galios tankis ( $\text{W}/\text{m}^2$ );	1098 $\text{W}/\text{m}^2$ (be stiklo) 781 $\text{W}/\text{m}^2$ (su stiklu)
Plokštės vidutinė temperatūra, °C	89 °C
Plokštės centro temperatūra, °C	87 °C
Plokštės taško maksimali temperatūra, °C	99 °C
Plokštės kraštinių temperatūra, °C	šonai – 28 °C, viršus – 33 °C, apačia – 28 °C, galinė dalis – 31 °C (vidutinė temperatūra)

Šildymo plokštės BANDINYS D šildymo paviršius išdėstytas perimetru dviem kontūrais. Maksimali plokštės temperatūra esant 230 V maitinimo įtampai siekia 99 °C, vidutinė plokštės temperatūra – 89 °C. Plokštės IR vaizdas pateiktas 31 pav. temperatūrų pasiskirstymas išilgai tiesių L0 ir L1 pateiktas 32 pav.

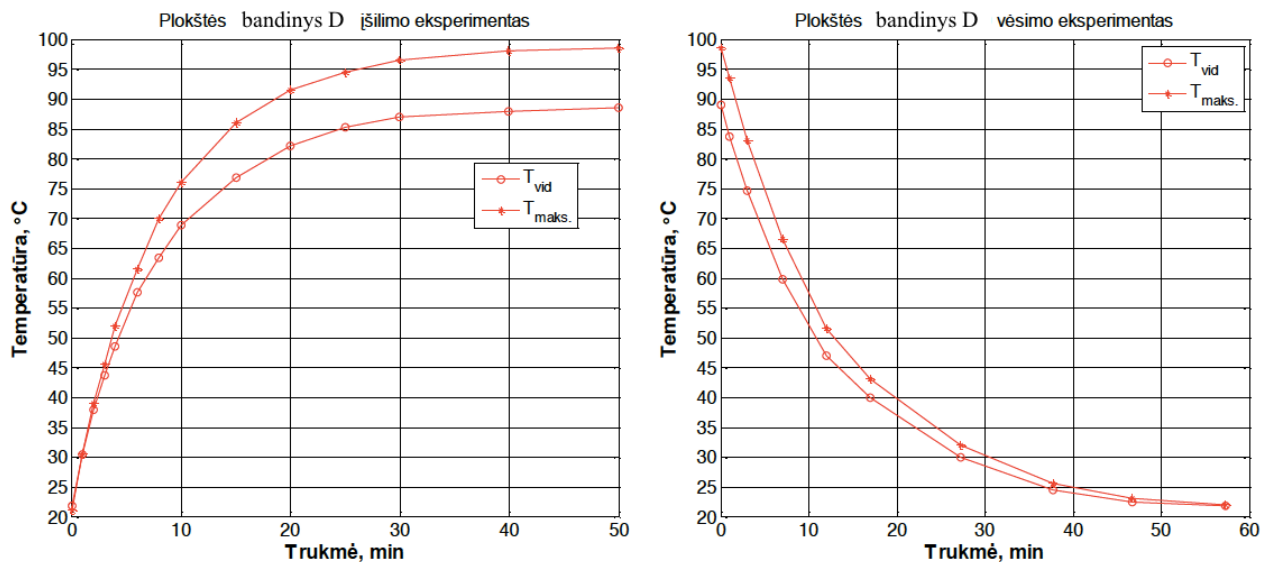


31 pav. Plokštės BANDINYS D termonuotrauka (vaizdas iš priekio ir galo) po 50 min. nuo įjungimo pradžios ir plokštės natūralus vaizdas



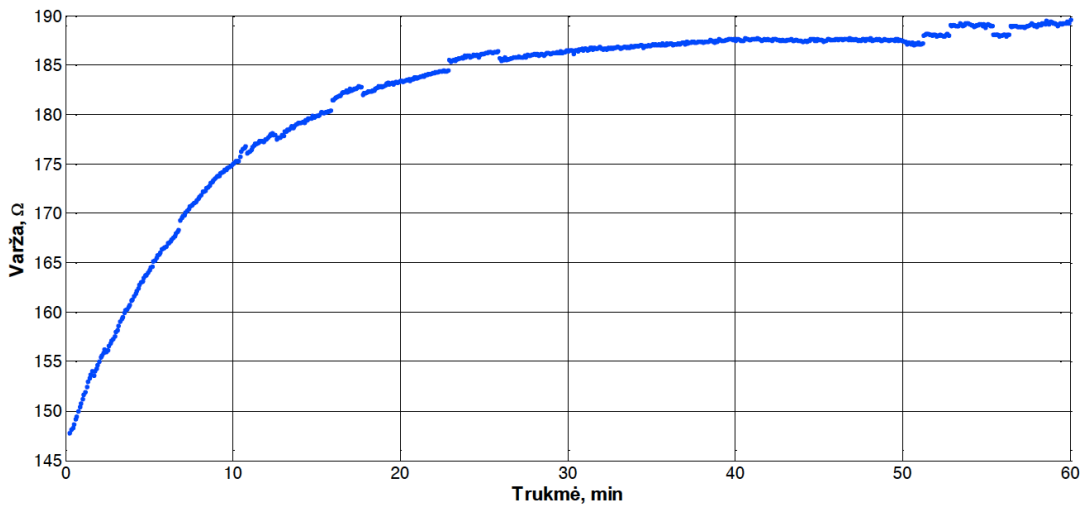
32 pav. Plokštės BANDINYS D temperatūrų kreivės linijose L0 ir L1 po 50 min. nuo įjungimo pradžios

33 pav. pateikti plokštės BANDINYS D įšilimo/vėsimo eksperimento duomenys (vidutinė ir maksimali temperatūra). Iš charakteristikų matyti, kad plokštė 95 % nusistovėjusios temperatūros pasiekia maždaug per 25 min. jai išylant ir per 40 min. vėstant.



33 pav. Plokštės BANDINYS D įšilimo/vėsimo eksperimento duomenys

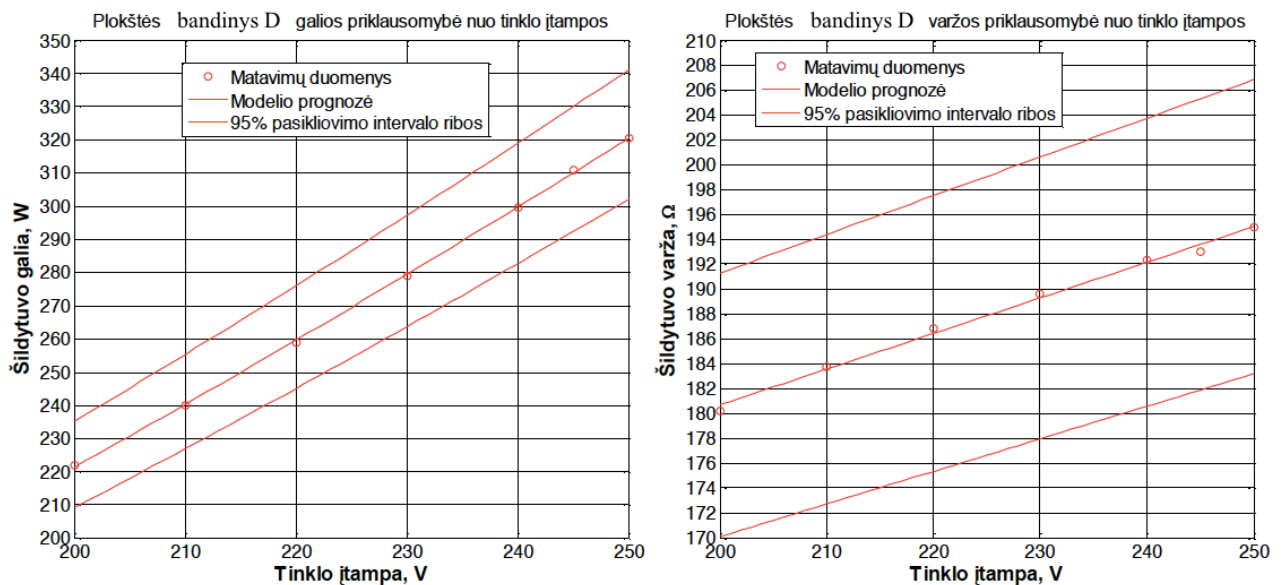
Iš Ohmo dėsnio seka, elektrinė galia atvirkščiai proporcinga imtuvo varžai ( $P = \frac{U^2}{R}$ ). Taigi, žinant plokštės elektrinę varžą, galima apskaičiuoti jos galią esant skirtingai maitinimo įtampai (t.y. sudaryti fizikinį modelį). Pažymima, kad plokštės varža priklauso nuo jos temperatūros, kuri kinta priklausomai nuo maitinimo įtampos. Atlikus plokštės BANDINYS D įšilimo eksperimentą (34 pav.) pastebėta, kad jai išylant didėja jos elektrinė varža. Plokštės įjungimo į tinklą metu varža siekia apie 147  $\Omega$ , jai pilnai išilus – apie 189  $\Omega$ . Esant 230 V įtampai šaltos plokštės galia buvo lygi maždaug 360 W, o jai išilus – 280 W.



34 pav. Plokštės BANDINYS D elektrinės varžos kitimas plokštei kaistant

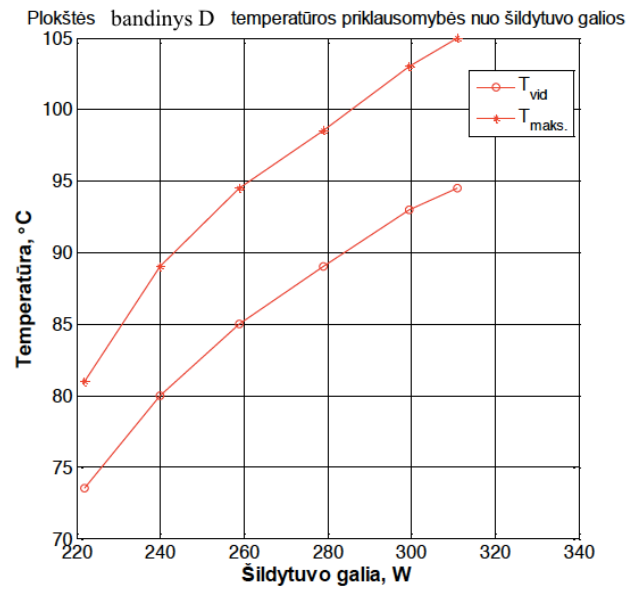
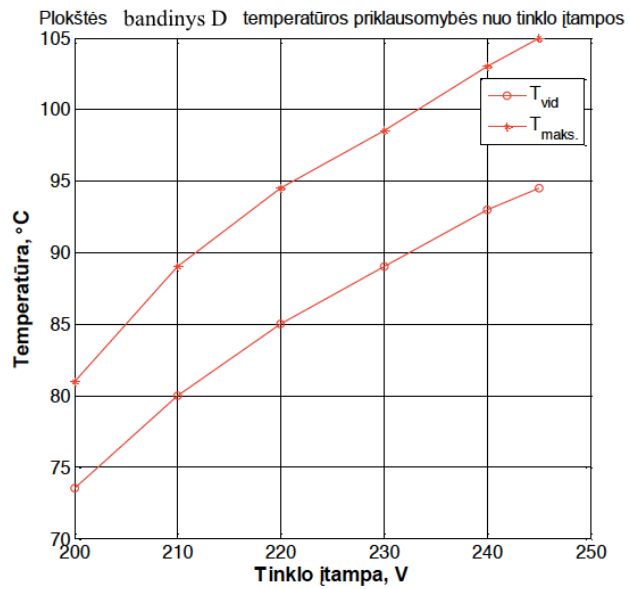
35 pav. pateikiami plokštės BANDINYS D elektrinės galios ir varžos priklausomybės nuo tinklo įtampos duomenys. Iš čia matyti, kad plokštės varža įtampų intervale (200-250V) kinta maždaug nuo 180 iki 195 Ω.

Tai buvo įvertinta tikslinant šildytuvo galios priklausomybės nuo maitinimo įtampos fizikinį modelį, kurio prognozė su 95 % pasikiojimo intervalu pateikta 35 pav. kairėje. Iš šio paveikslo matyti, kad modeliavimo rezultatai gerai sutampa su matavimų duomenimis.



35 pav. Plokštės BANDINYS D elektrinės galios ir varžos priklausomybė nuo tinklo įtampos

36 pav. pateiktos plokštės BANDINYS D vidutinės ir maksimalios temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios. Iš čia matyti, kad 200-245 V (222-311 W) intervale plokštės vidutinė temperatūros vertė yra intervale 74 – 94 °C, o maksimali – 81 – 105 °C. Pastaba: prie plokštės prijungus 250 V įtampą suveikė jos termoapsauga.

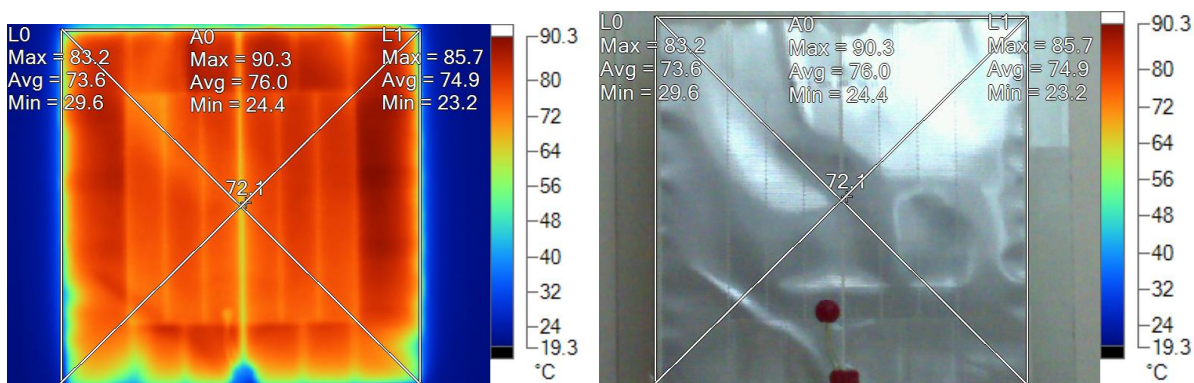


36 pav. Plokštės BANDINYS D temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios

6 lentelė. BANDINIO E energetiniai duomenys ( $U_t = 230\text{ V}$ )

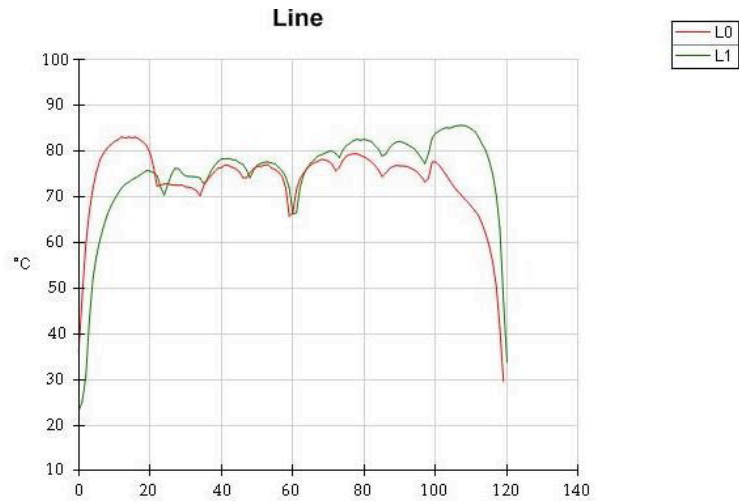
Parametras	vertė
Plėvelės matmenys (LxH)	505×505 20mm. Su stiklu (635×550×5mm)
Efektyvus šildymo plotas (L`xH`)	Termografinė nuotrauka
Plokštės elektrinė galia (W)	292 W (230 V)
Plėvelės galios tankis ( $\text{W}/\text{m}^2$ );	$1145\text{ W}/\text{m}^2$
Plokštės vidutinė temperatūra, °C	79 °C
Plokštės centro temperatūra, °C	73 °C
Plokštės taško maksimali temperatūra, °C	93,5 °C
Plokštės kraštinių temperatūra, °C	-

Plėvelė yra šildymo plokštės BANDINYS D rezistyvusis kaitinimo elementas. Plėvelės kaitinimo takeliai yra iš aliuminio, izoliacija – poliesteris. Plėvelės kaitinimo paviršių sudaro du kontūrai (dešinėje ir kairėje dalyse). Eksperimentai vykdyti kaitinimo plėvelę priklijavus prie 5 mm storio stiklo. Iš termografinio vaizdo matyti, kad labiausiai įšyla plėvelės šonai ir viršus. Maksimali plokštės temperatūra esant 230 V maitinimo įtampai siekia 90,5 °C, vidutinė plokštės temperatūra – 76 °C. Plokštės IR vaizdas pateiktas 38 pav. Temperatūrų pasiskirstymas išilgai tiesių L0 ir L1 pateiktas 39 pav.



38 pav. BANDINIO E termonuotrauka po 20 min. nuo įjungimo pradžios ir plėvelės natūralus vaizdas

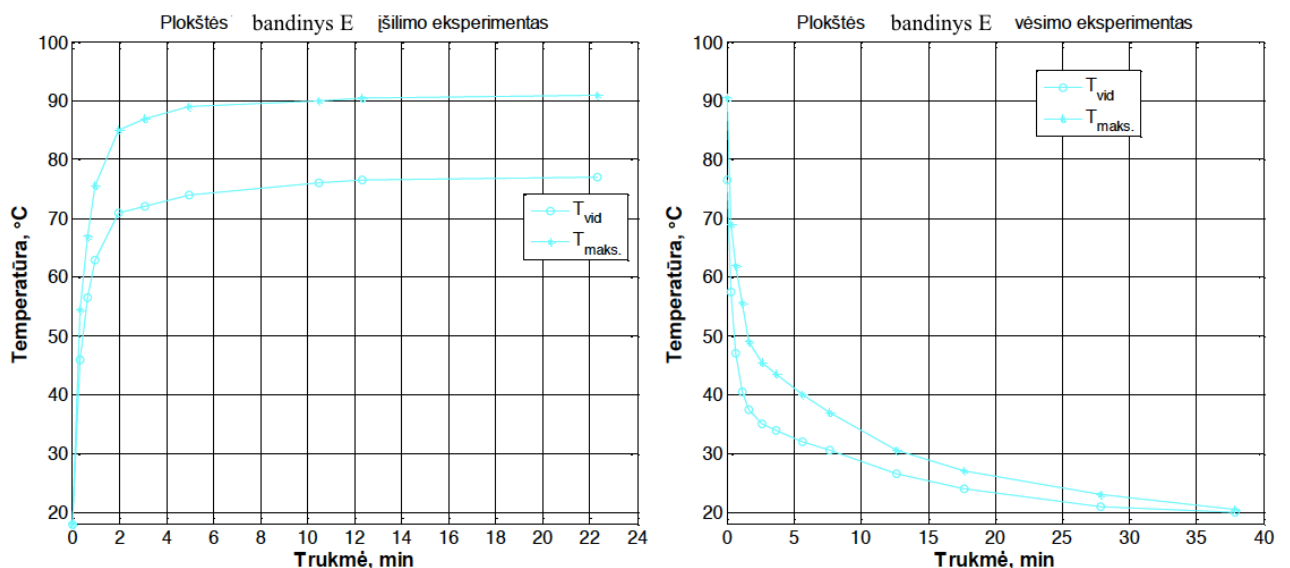




39 pav. BANDINIO E temperatūrų kreivės linijose L0 ir L1 po 20 min. nuo įjungimo pradžios

Verta pažymėti, kad aukščiau pateikti rezultatai buvo gauti plėvelę kaitinant maždaug 22 min (išilimas). Vykdam tolimesnius tyrimus pastebėta, kad plėvelės galia ir temperatūra priklauso nuo kaitinimo trukmės. Pvz., nustatant plėvelės galios ir temperatūros priklausomybę nuo tinklo įtampos matyti, kad esant 230 V plėvelės elektrinė galia ir vidutinė temperatūra siekia apie 292 W ir 79 °C (5 W mažiau ir 3 °C daugiau negu nustatyta plėvelės išilimo eksperimente). Tai paaiškinama ilgesne eksperimento trukme, kuri įtakoja didesnę plėvelės išilimą ir mažesnę šilumos atidavimą aplinkai, dėl to išaugo aliuminio takelių varža ir sumažėjo galia.

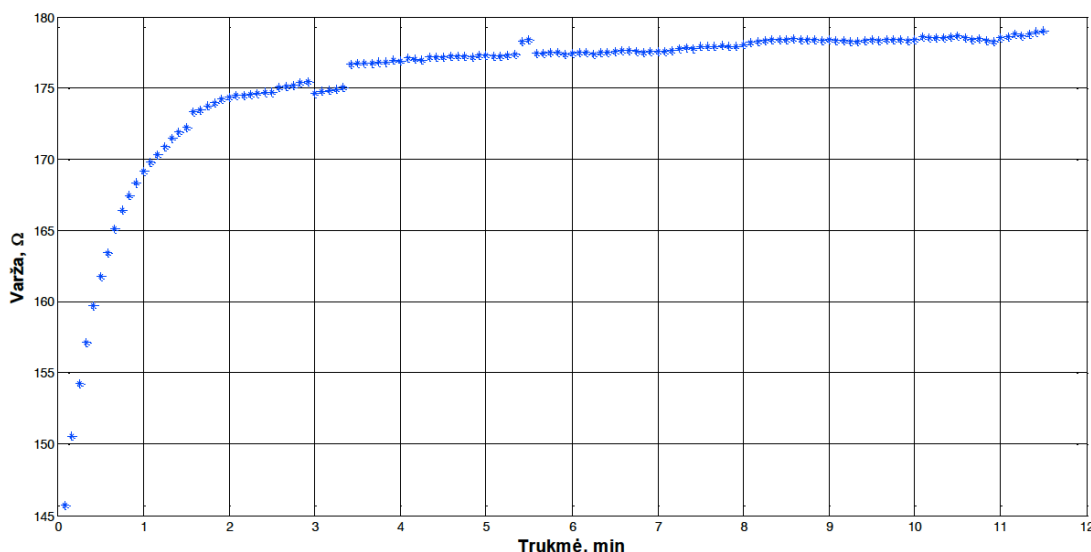
40 pav. pateikti plėvelės išilimo/vėsimo eksperimento duomenys (vidutinė ir maksimali temperatūra). Iš charakteristikų matyti, kad plokštė 95 % nusistovėjusios temperatūros pasiekia maždaug per 5 min. jai iššylant ir per 25 min. vėstant.



40 pav. BANDINIO E išilimo/vėsimo eksperimento duomenys

Pažymima, kad plėvelės varža gana ženkliai priklauso nuo jos temperatūros, kuri kinta priklausomai nuo maitinimo įtampos. Plėvelei iššylant didėja jos elektrinė varža. Plokštės įjungimo į

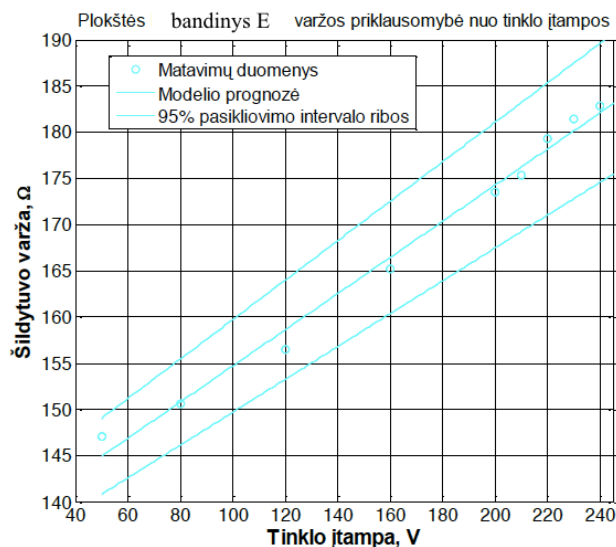
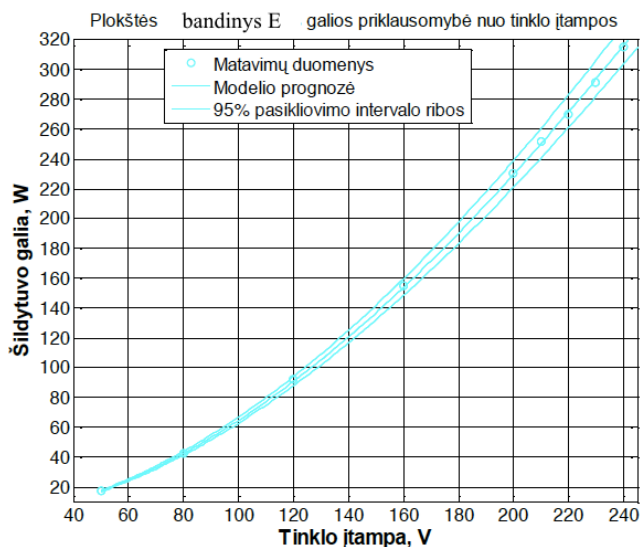
tinklą metu varža siekia apie 145 Ω, jai įšilus – apie 178 Ω. Esant 230 V įtampai šaltos plokštės galia buvo lygi maždaug 365 W, o jai įšilus – 297 W.



41 pav. BANDINGIO E elektrinės varžos kitimas plokštei kaistant

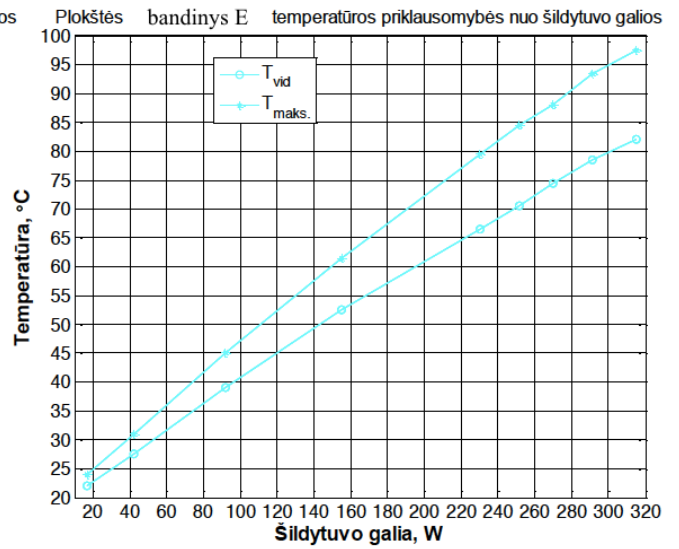
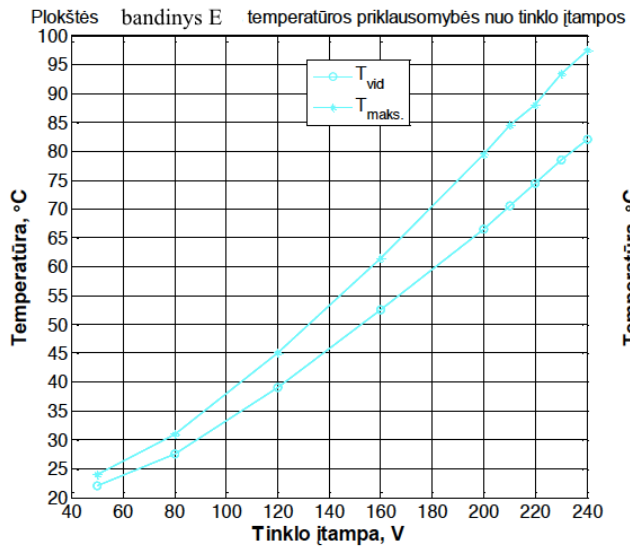
42 pav. pateikiami plėvelės elektrinės galios ir varžos priklausomybės nuo tinklo įtampos duomenys. Iš čia matyti, kad plokštės varža tipinių maitinimo įtampų intervale (200-250V) kinta nuo maždaug 174 iki 183 Ω, o galia atitinkamai nuo 230 iki 315 W.

Siekiant nustatyti plėvelės elektrinės galios priklausomybę nuo maitinimo įtampos buvo atlikti papildomi eksperimentai prijungiant įtampas lygias 50, 80, 120 ir 160 V. Eksperimento rezultatai patvirtino sudaryto  $P = \frac{U^2}{R}$  modelio prognozę.



42 pav. BANDINGIO E elektrinės galios ir varžos priklausomybė nuo tinklo įtampos

43 pav. pateiktos šildymo plėvelės vidutinės ir maksimalios temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios. Iš čia matyti, kad 200-250 V (230-315 W) intervale plokštės vidutinė temperatūros vertė yra intervale 67-82 °C, o maksimali – 80-98 °C.

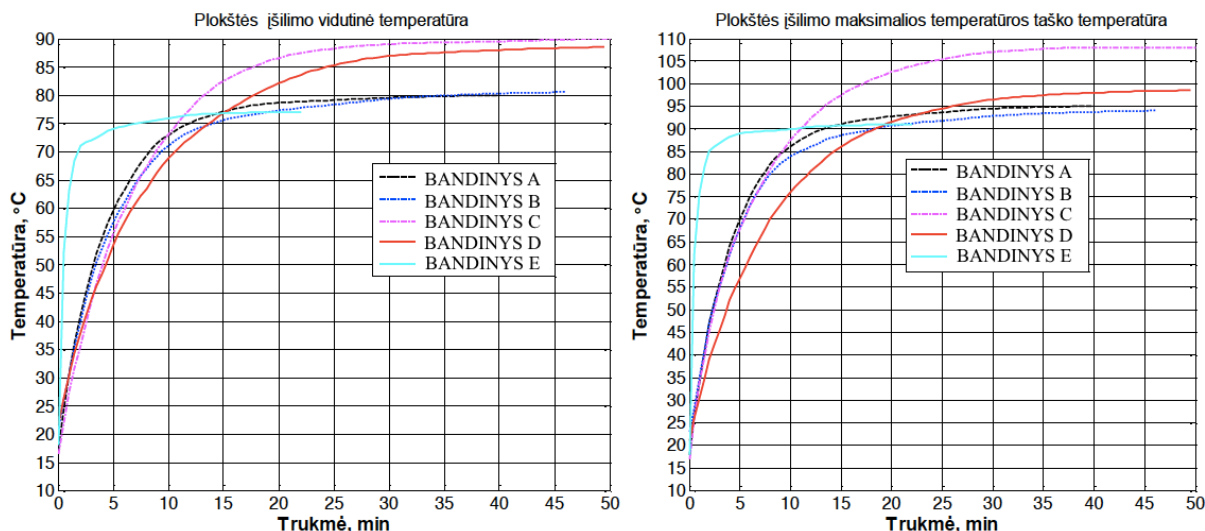


43 pav. Bandinio E temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios

Siekiant nustatyti plėvelės temperatūros priklausomybę nuo maitinimo įtampos ir elektrinės galios buvo atlikti papildomi eksperimentai prijungiant įtampas lygias 50, 80, 120 ir 160 V. Pirminė analizė parodė, kad eksperimento rezultatai gerai aproksimuojami antrojo laipsnio polinomialais.

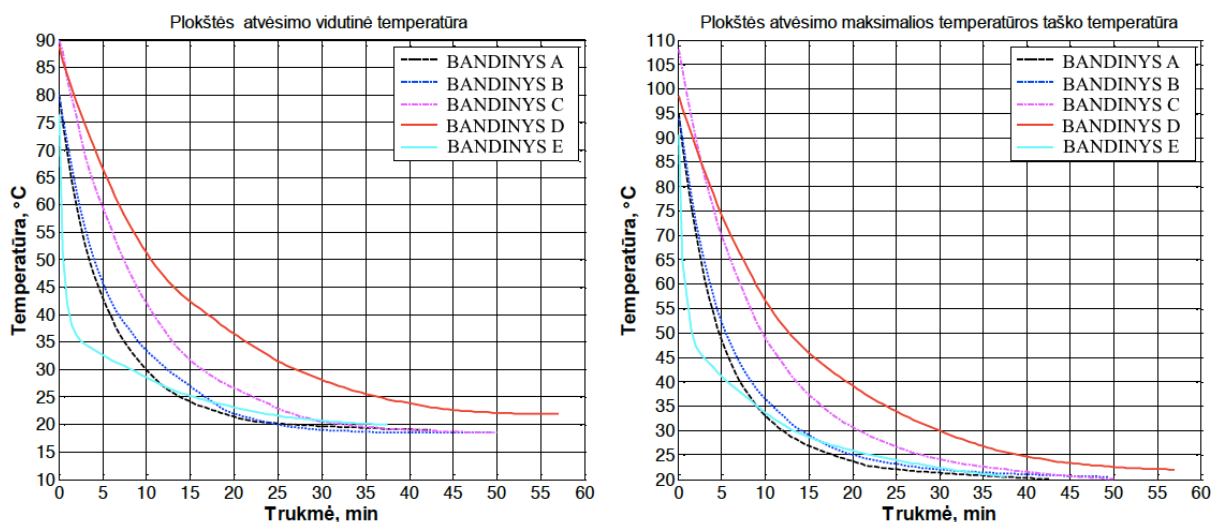
## 2.5 Plokščių charakteristikų palyginimas

Kaip matyti iš 44 pav. greičiausiai 95% nusistovėjusios vidutinės temperatūros vertę pasiekia šildymo plokštė BANDINYS E (3-4 kartus greičiau negu kiti bandiniai). Tai susiję su maža šilumine inercija. Plokštės BANDINYS A ir BANDINYS B greičiausiai įšyla plokščių kategorijoje (jų nusistovėjusi temperatūros vertė lygi 80 °C). Šiek tiek ilgiau šyla plokštė BANDINYS C (nusistovėjusi vidutinė temperatūros vertė yra didžiausia ir lygi 90 °C). Nežymiai lėčiau įšyla plokštė BANDINYS D (nusistovėjusi vidutinė temperatūros vertė lygi 89 °C).



44 pav. Plokščių įšilimo eksperimento duomenys

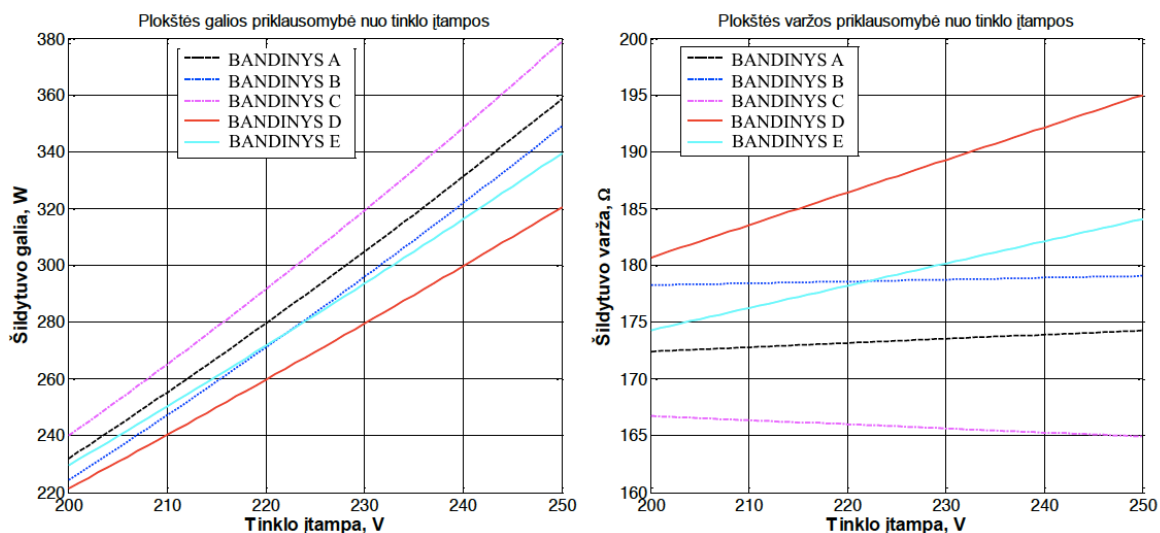
Iš 45 pav. matyti, kad greičiausiai iki 95 % nusistovėjusios vertės atvėsta plėvelė BANDINYS E ir plokštės BANDINYS A ir BANDINYS B. Lėčiausiai atvėsta – BANDINYS D.



45 pav. Plokščių vėsimo eksperimento duomenys

46 pav. pateiktos plokščių elektrinės galios ir varžos priklausomybė nuo tinklo įtampos. Šios charakteristikos svarbios nustatyti šildytuvų faktinę galią pagal esamą tinklo įtampos vertę. Pagal standartą tinklo įtampa gali keistis 230 V ( $\pm 10\%$ ) tai yra nuo 207 iki 253 V.

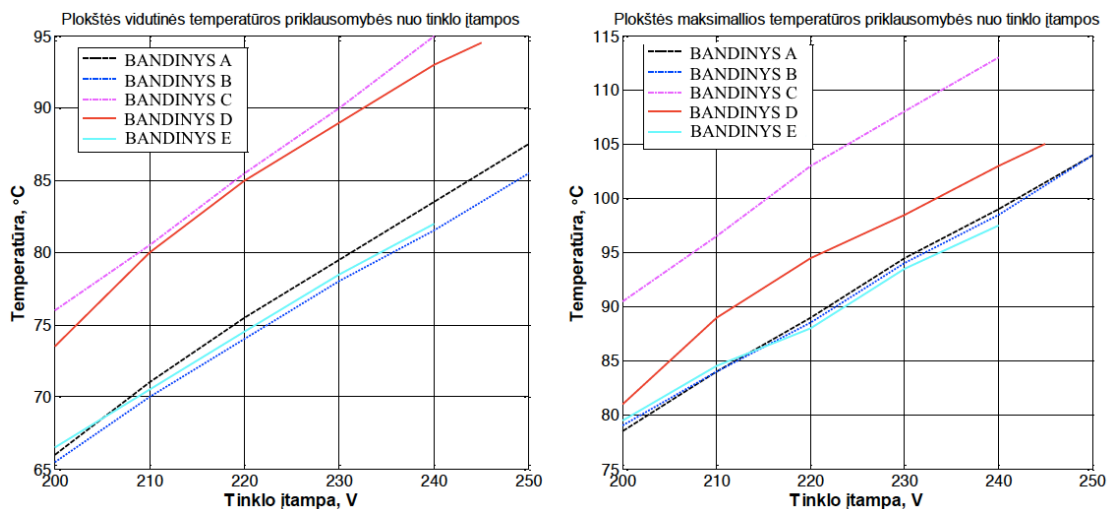
Didžiausią galią turi plokštė BANDINYS C, mažiausią – BANDINYS D. Pažymima, kad plokštės BANDINYS D kaitinimo elemento varža labiausiai priklauso nuo maitinimo įtampos (t.y. nuo jos temperatūros). Pažymima, kad šildytuvo galia proporcinga maitinimo įtampos kvadratui ir atvirkščiai proporcinga plokštės šildymo elemento varžai ( $P = \frac{U^2}{R}$ ). Lyginant šios plokštės ir jos kaitinimo elemento (plėvelės) charakteristikas matyti, kad jos yra panašaus pobūdžio. Plėvelė generuoja didesnę galią, dėl mažesnės jos takelių temperatūros ir varžos. Taip yra dėl to, kad plėvelė didesnę dalį šilumos atiduoda aplinkai ir „mažiau save šildo“.



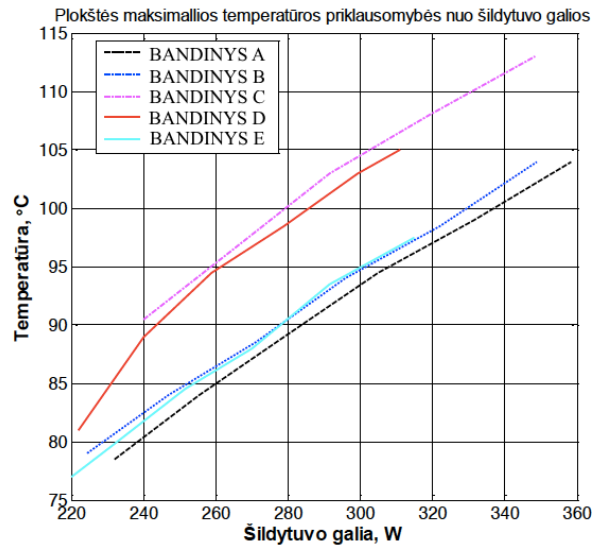
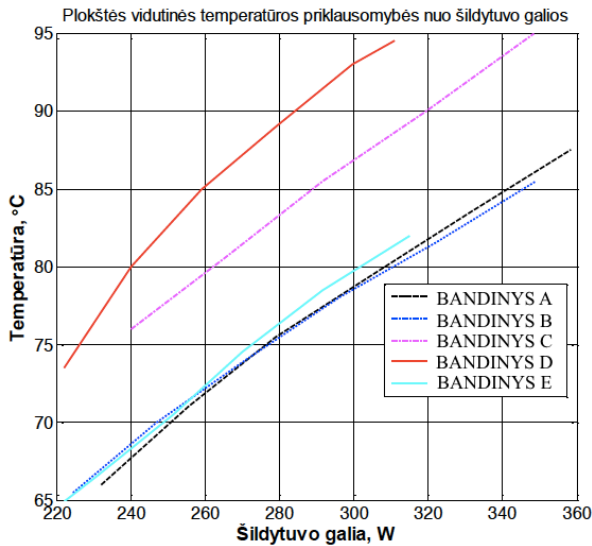
46 pav. Plokščių elektrinės galios ir varžos priklausomybė nuo tinklo įtampos

47 ir 48 paveiksluose pateiktos plokščių vidutinės ir maksimalios temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos ir šildytuvo galios. Iš čia matyti, kad labiausiai įkaista plokštė BANDINYS C ir BANDINYS D, mažiausiai – BANDINYS E ir BANDINYS B.

Pažymėtina plokštė BANDINYS D, kurios galia mažiausia, bet turi didžiausią vidutinę šildymo paviršiaus temperatūrą imant 300 W galią (žr. 48 pav. kairinį grafiką). Tai yra susiję su mažesniu plokštės aktyviuoju paviršiumi ir galimai geresne galinės dalies šilumine izoliacija.

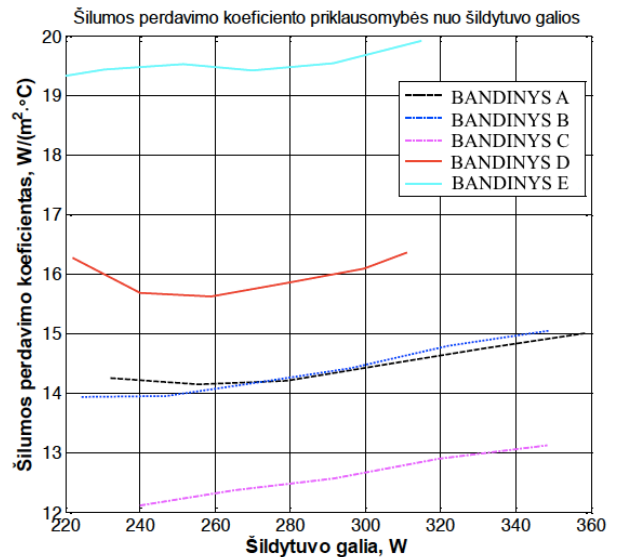
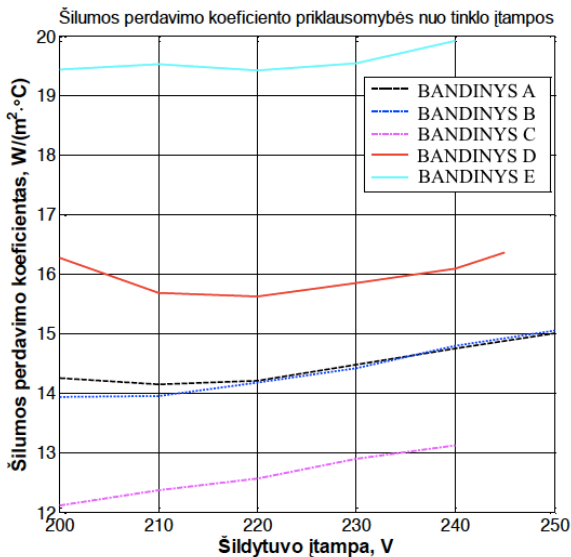


47 pav. Plokščių vidutinės ir maksimalios temperatūros priklausomybė nuo tinklo įtampos



48 pav. Plokščių vidutinės ir maksimalios temperatūros priklausomybė nuo šildytuvo galios

49 pav. pateiktos šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo tinklo įtampos ir plokščių galios. Šilumos perdavimo koeficientas parodo kiek vatų reikia norint pakelti 1 m<sup>2</sup> plokštės vidutinę temperatūrą 1 laipsniu. Žemiausią koeficientą turi plokštė BANDINYS C, tokiu būdu čia esant 300 W galiai ir sąlyginiam 1 m<sup>2</sup> plokštės plotui reikia vidutiniškai 12,7 W 1 m<sup>2</sup> plokštės temperatūrai pakelti 1 laipsniu. Didžiausią koeficientą turi šildymo BANDINYS E (19,7, esant 300 W). Tai yra susiję su geresniu šilumos atidavimu aplinkai (čia, skirtingai nuo plokščių, nėra izoliuotų šilumą kaupiančių dalių).

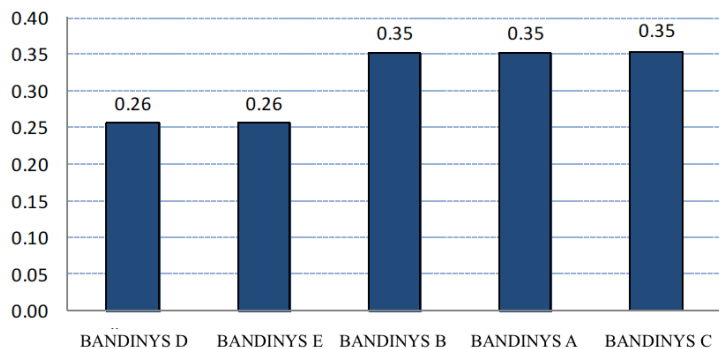


49 pav. Plokščių šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo tinklo įtampos

Pažymėtina, kad atlikti tyrimai yra susiję su pačių plokščių energetinėmis charakteristikomis, bet ne su šilumos perdavimu objektams. Iš gautų rezultatų sunku spręsti, kuri plokštė energetiškai efektyviausia. Teoriškai jų visų energetinis efektyvumas (šiluminės ir elektrinės galių santykis) lygus 1. Pagrindinis klausimas yra apie šilumos perdavimo pobūdį. Kitame etape tai ir bus siekiama nustatyti.

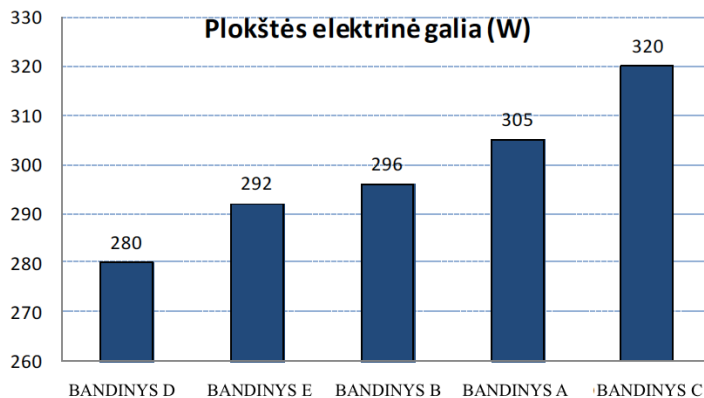
## 2.6 Kitų charakteristikų palyginimas

### Efektyvus šildymo plotas (m<sup>2</sup>)



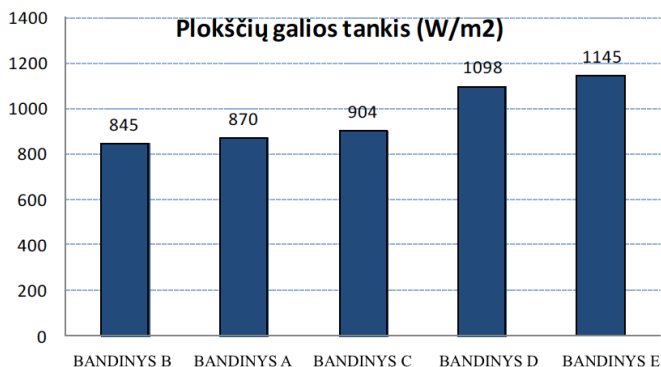
50 pav. Plokščių efektyvaus šildymo ploto palyginimas

### Plokštės elektrinė galia (W)



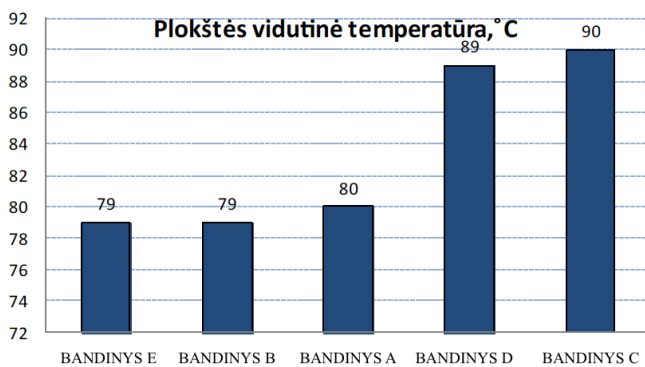
51 pav. Plokščių elektrinės galios palyginimas

### Plokščių galios tankis (W/m<sup>2</sup>)



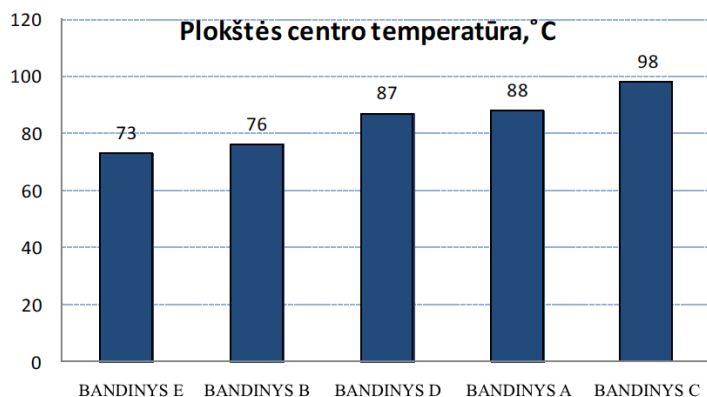
52 pav. Plokščių galios tankio palyginimas

### Plokštės vidutinė temperatūra, °C



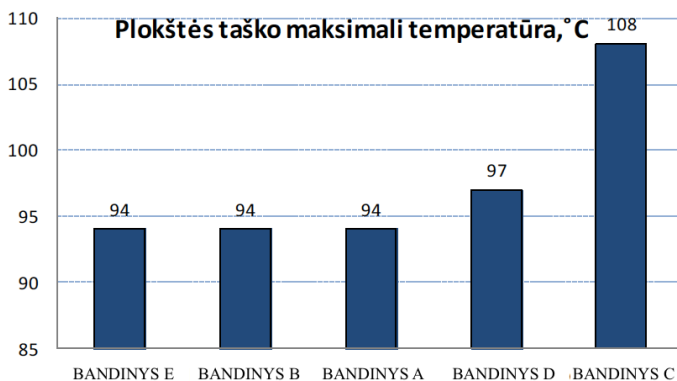
53 pav. Plokščių vidutinės temperatūros palyginimas

### Plokštės centro temperatūra, °C



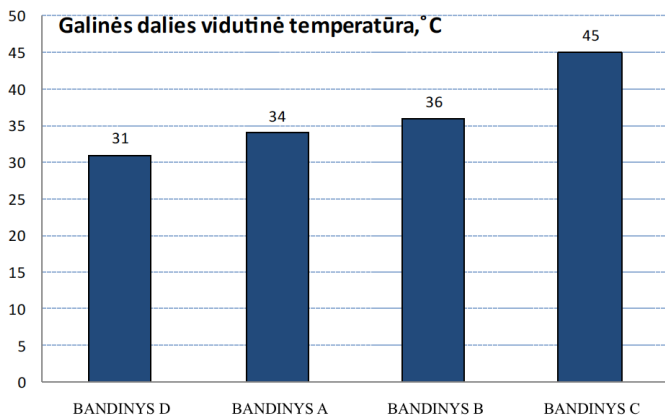
54 pav. Plokščių centro temperatūros palyginimas

### Plokštės taško maksimali temperatūra, °C



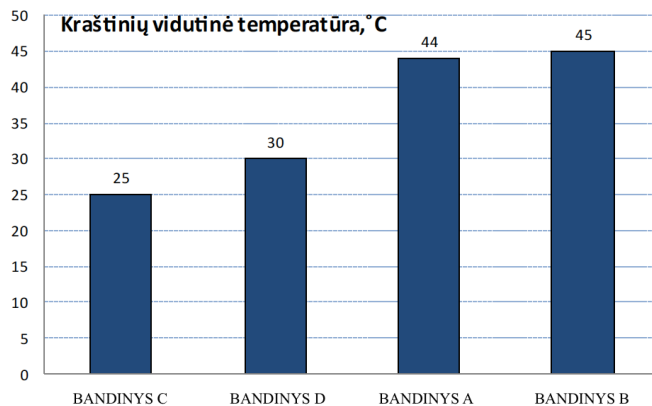
55 pav. Plokščių maksimalios temperatūros palyginimas

### Galinės dalies vidutinė temperatūra, °C



56 pav. Plokščių galinės dalies vidutinės temperatūros palyginimas

### Kraštinių vidutinė temperatūra, °C



57 pav. Plokščių kraštinės dalies vidutinės temperatūros palyginimas

## **2.7 Infraraudonųjų spindulių plokščių spinduliavimo tyrimas**

Šiuo tyrimu įvertinamas kiekvienos plokštės spinduliavimo efektyvumas ir kryptingumas, galimas pastatymo aukštis pagal pageidaujamą temperatūrą. Verta pažymėti, kad praktiškai visų plokščių maksimalus spinduliavimo atstumas yra iki 2 m (esant 2 metrams ir didesniai atstumui turimomis priemonėmis nebepavyksta užfiksuoti ženklesnio temperatūros pokyčio ekrane) Eksperimentai vykdyti 0,3; 0,5; 0,7; 1 ir 1,5 m. atstumais.

7 – 11 lentelėse pateiktos vertikalios ir horizontalios spinduliavimo eksperimentų metu gautos įšilusio ekrano (šildoma 15 min.) termografinės nuotraukos. Siekiant pateikti aiškesnį vaizdą apie šilumos pasiskirstymą (temperatūrą) ekrane, lentelėse pateikiamas standartinis (18-30°C) ir redaguotas temperatūros intervalas.

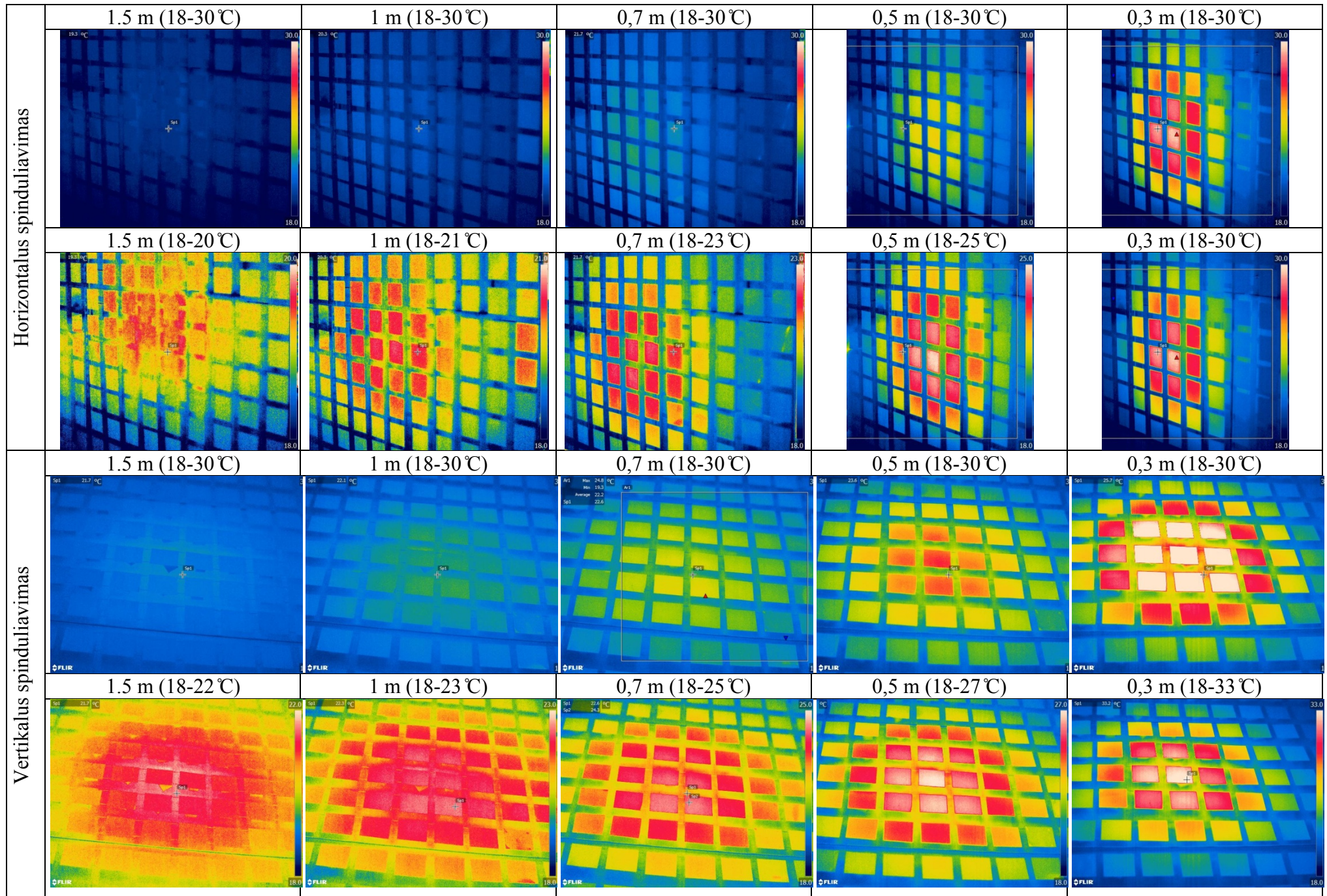
58 – 61 pav. pateikti šildytuvų horizontalios ir vertikalios spinduliavimo eksperimento rezultatai (vidutinė temperatūra) skirtingo dydžio plokštelių ekrano plote.

62 – 67 pav. pateikti šildytuvo įšildomo ploto (slenkstinė temperatūra - 21°C) ekrane priklausomybė nuo atstumo šildytuvai-ekranas.

58 – 67 pav. duomenys gauti apdorojant sertifikuoto termovizoriaus FLIR P640 termografinę informaciją, tam naudojant specialią programinę įrangą.

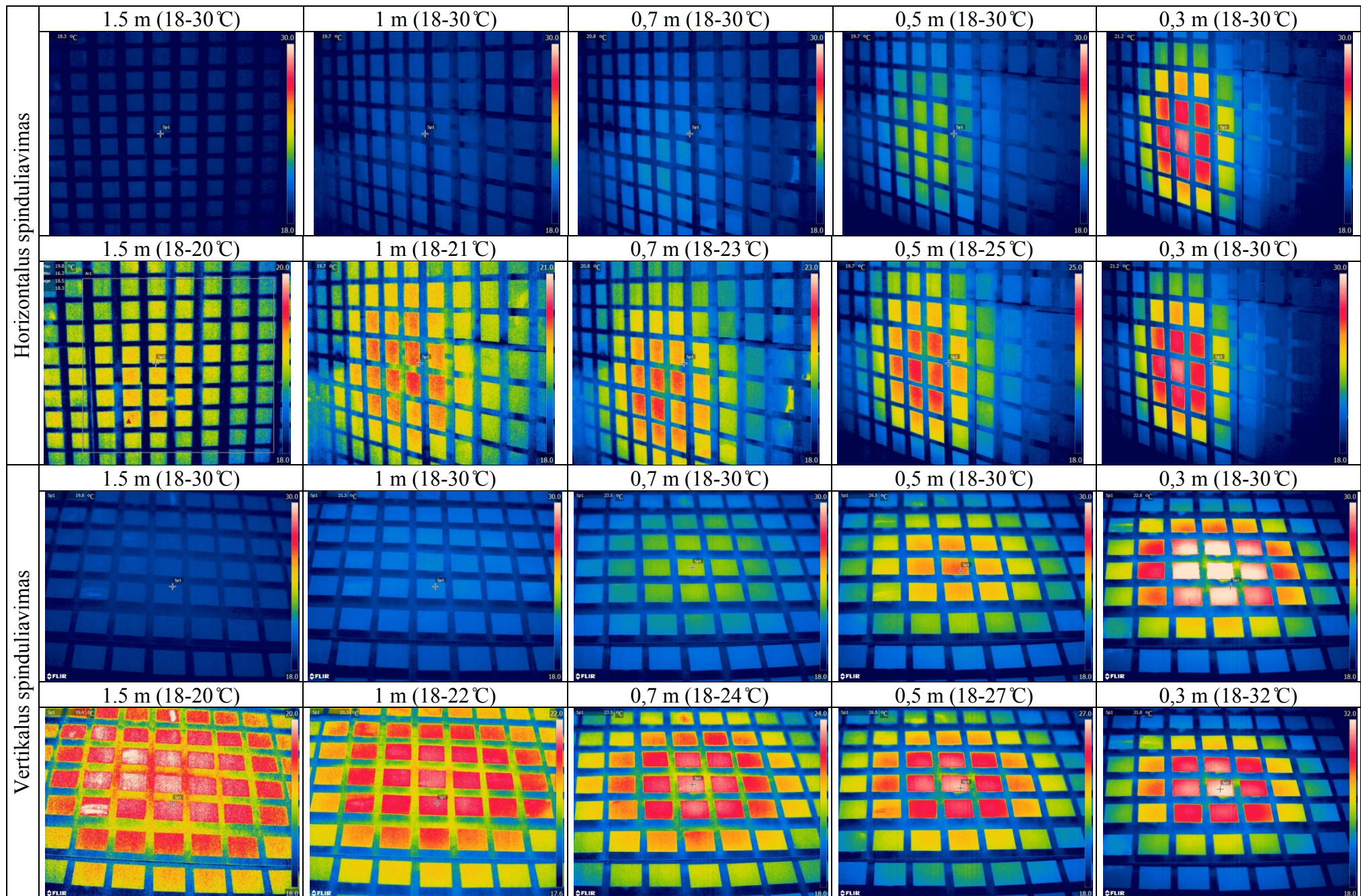


7 lentelė. Šildymo plokštės BANDINYS A spinduliavimo termografinės nuotraukos



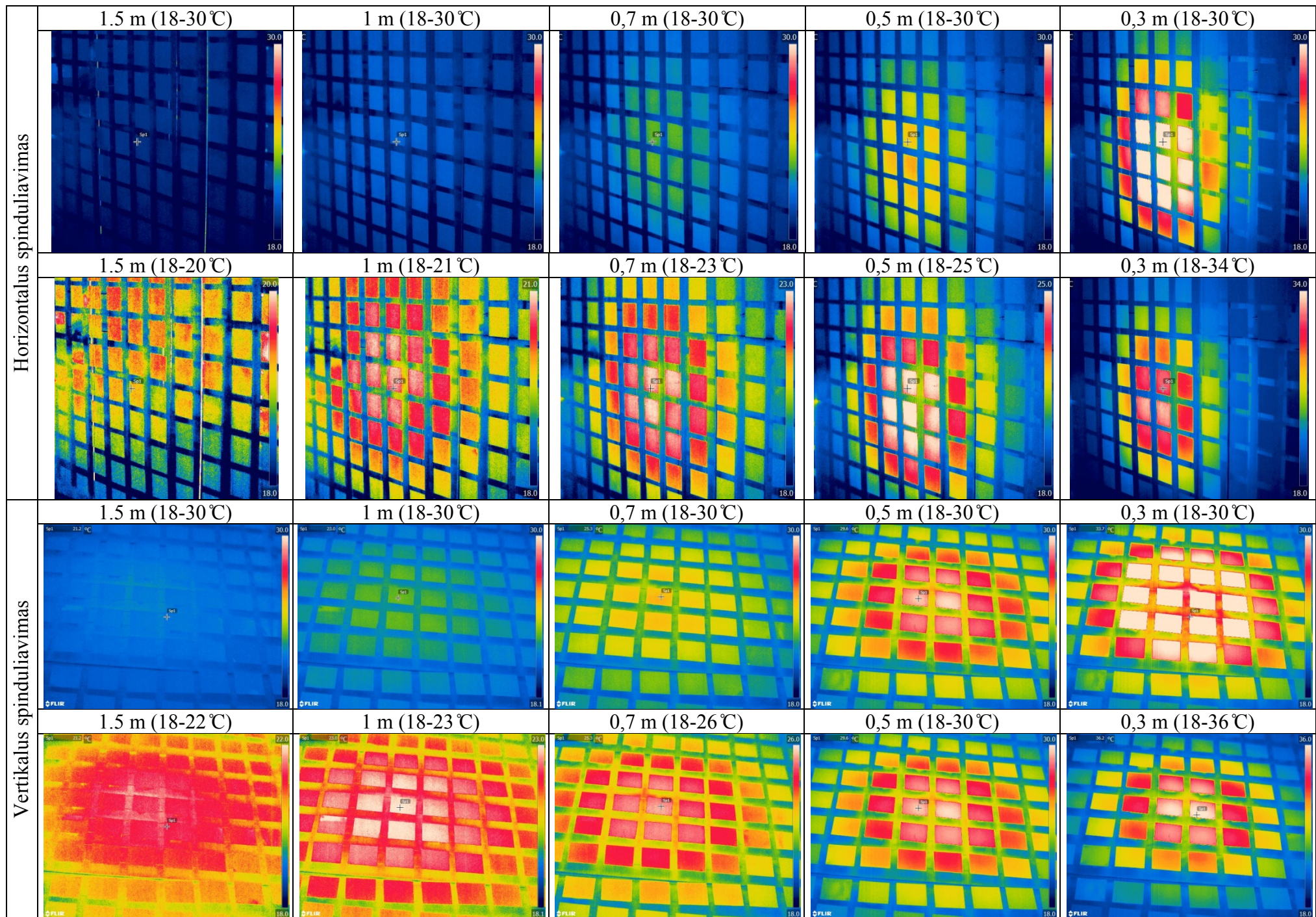


8 lentelė. Šildymo plokštės BANDINYS B spinduliavimo termografinės nuotraukos



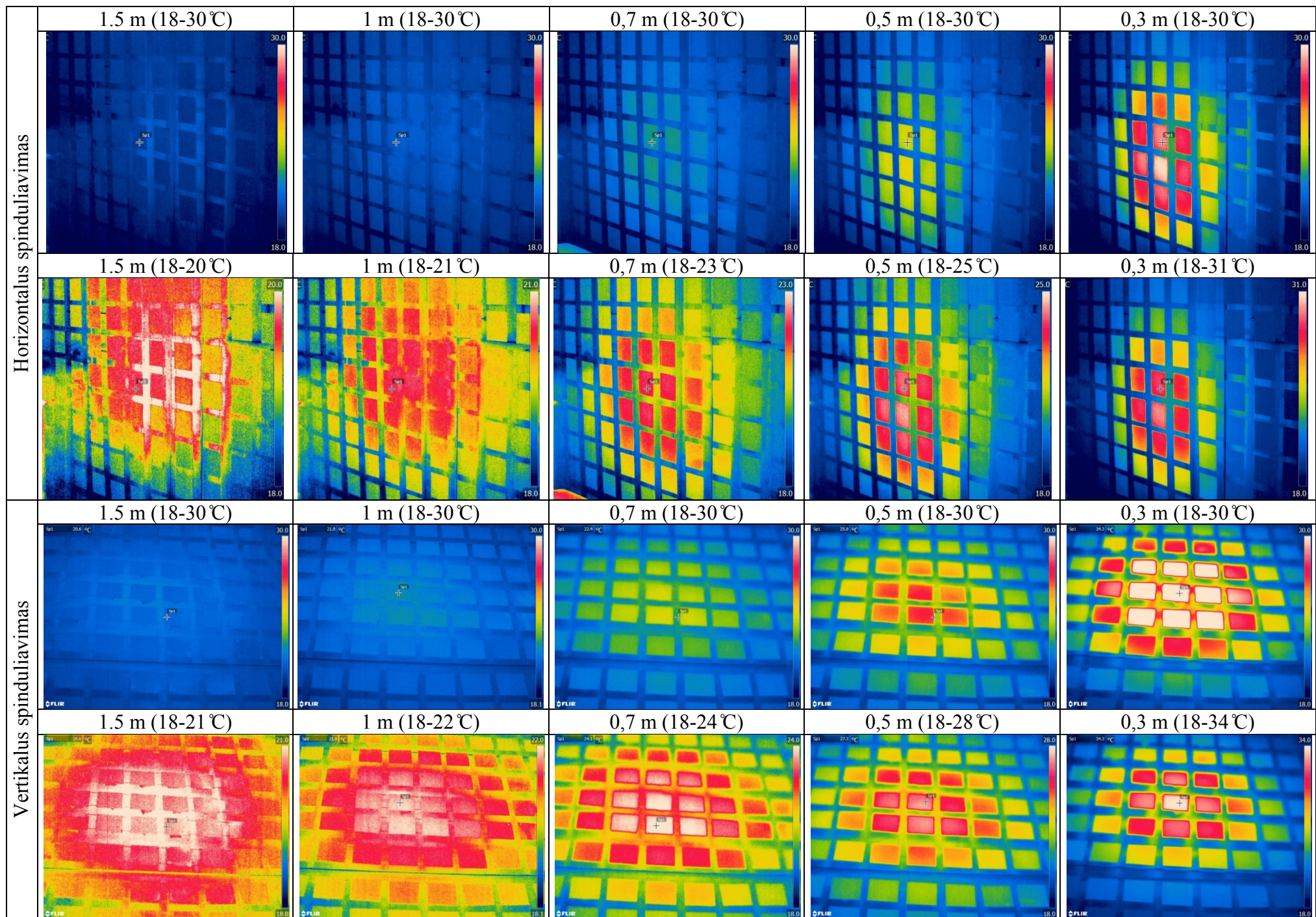


9 lentelė. Šildymo plokštės BANDINYS C spinduliavimo termografinės nuotraukos



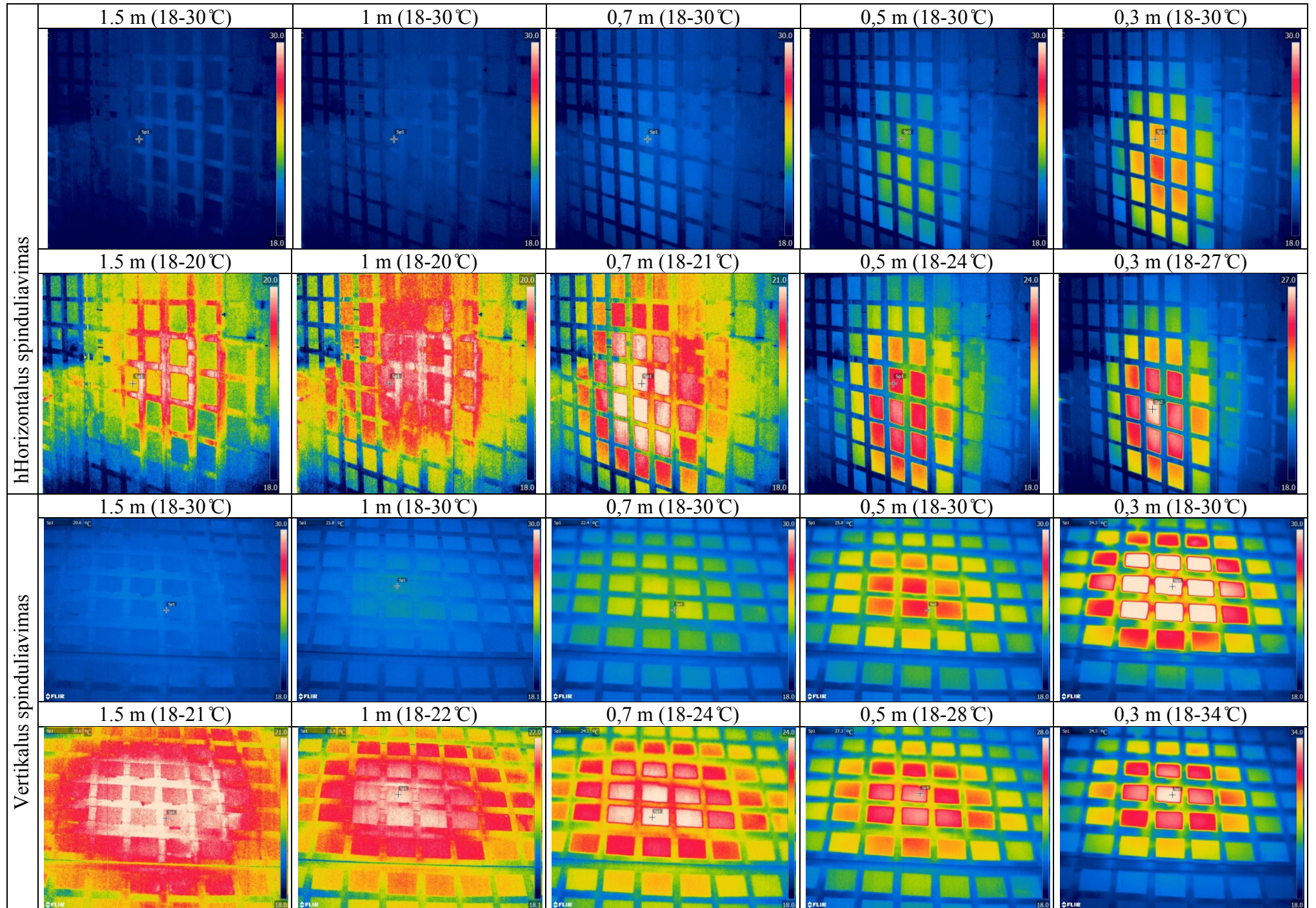


10 lentelė. Šildymo plokštės BANDINYS D spinduliavimo termografinės nuotraukos

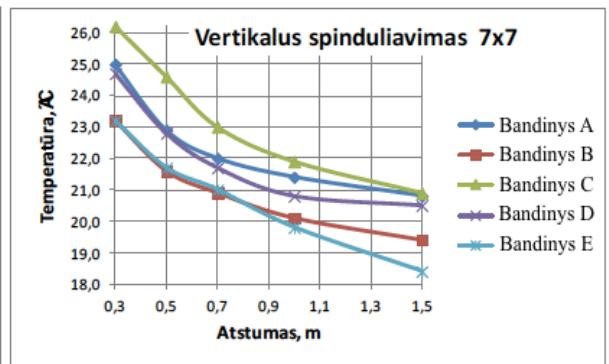
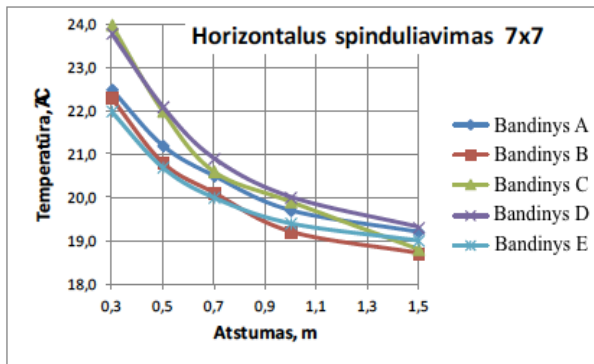




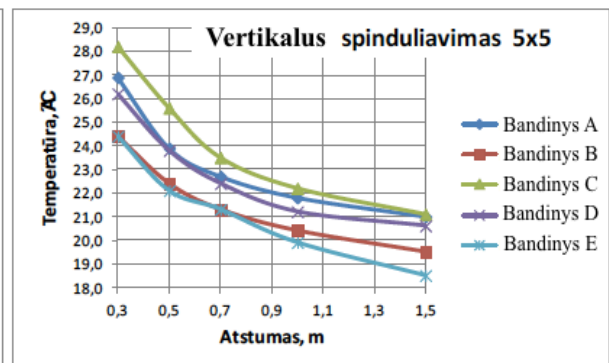
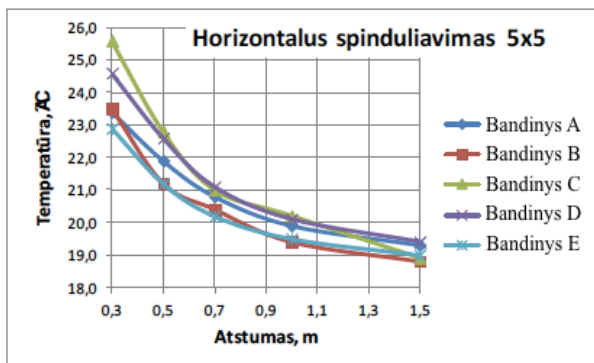
11 lentelė. Šildymo plėvelės BANDINYS E spinduliavimo termografinės nuotraukos



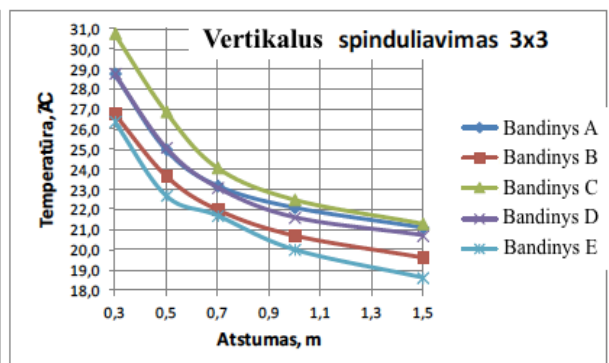
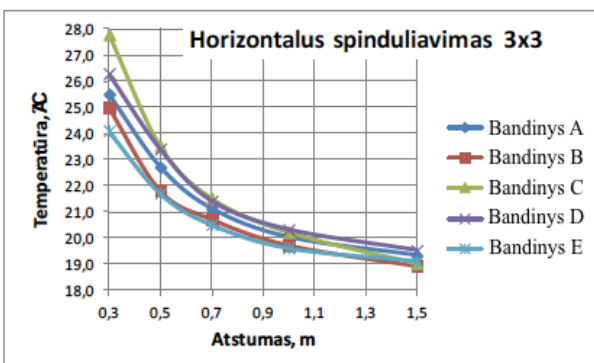




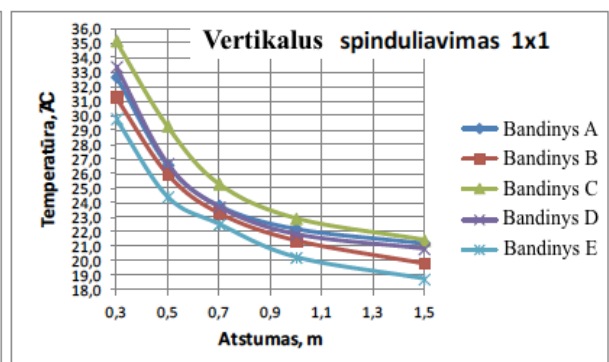
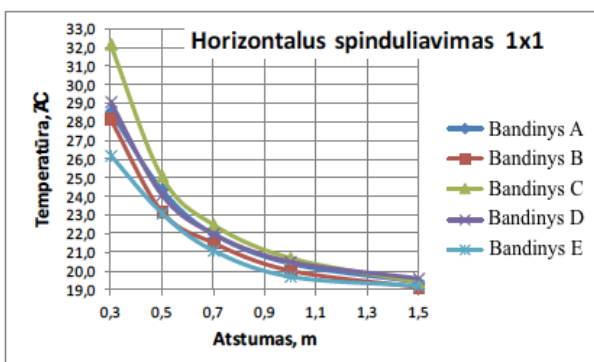
58 pav. Šildytuvų horizontalaus ir vertikalus spinduliavimo vidutinė temperatūra 7x7 (0,89 m<sup>2</sup>) plokštelių ekrano plote



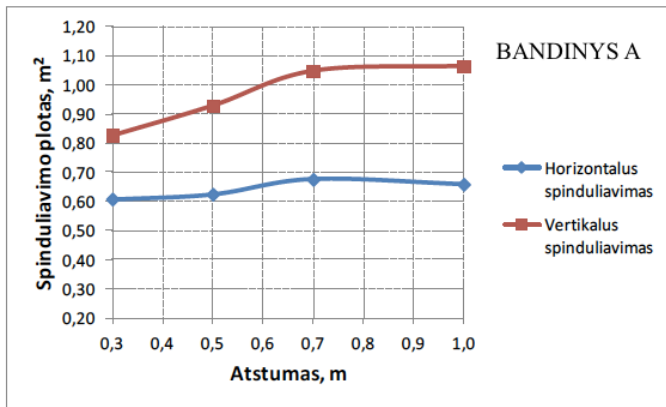
59 pav. Šildytuvų horizontalaus ir vertikalus spinduliavimo vidutinė temperatūra 5x5 (0,44 m<sup>2</sup>) plokštelių ekrano plote



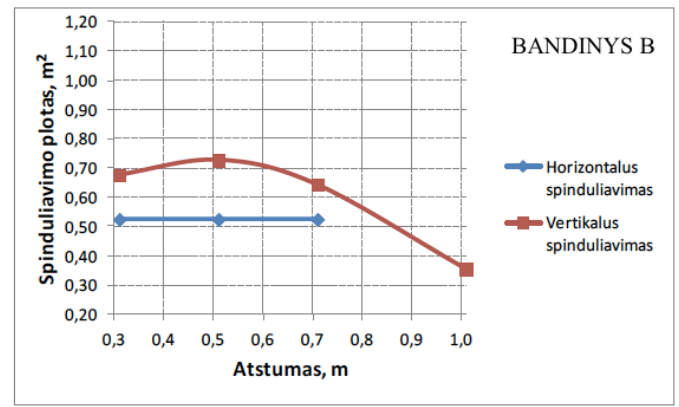
60 pav. Šildytuvų horizontalaus ir vertikalus spinduliavimo vidutinė temperatūra 3x3 (0,15 m<sup>2</sup>) plokštelių ekrano plote



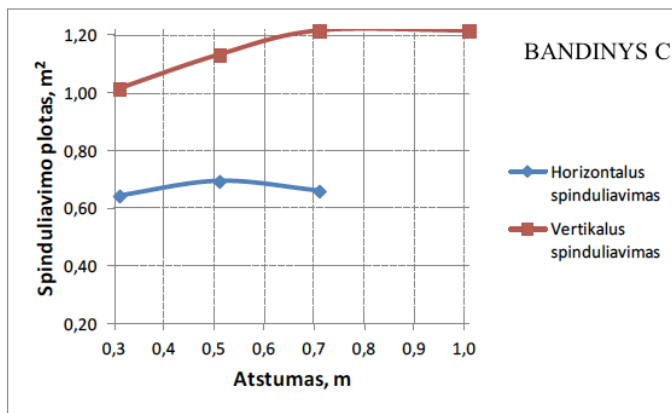
61 pav. Šildytuvų horizontalaus ir vertikalus spinduliavimo vidutinė temperatūra 1x1 (0,01 m<sup>2</sup>) plokštelių ekrano plote



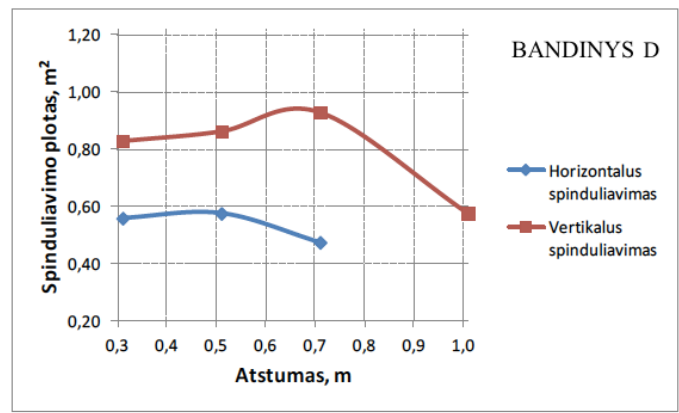
62 pav. Šildytuvo Bandinys A įšildomo ploto (slenkstinė temperatūra - 21°C) ekrane priklausomybė nuo atstumo šildytuvus-ekranas



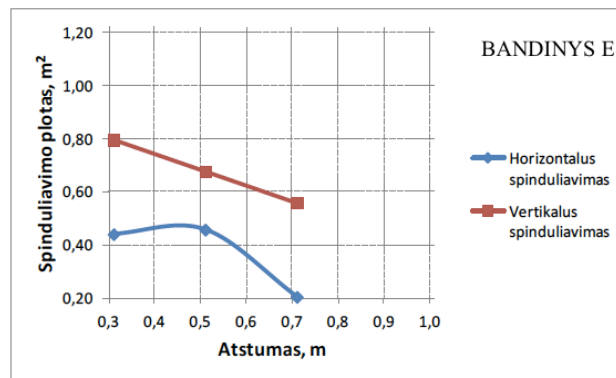
63 pav. Šildytuvo Bandinys B įšildomo ploto (slenkstinė temperatūra - 21°C) ekrane priklausomybė nuo atstumo šildytuvus-ekranas



64 pav. Šildytuvo Bandinys C įšildomo ploto (slenkstinė temperatūra – 21°C) ekrane priklausomybė nuo atstumo šildytuvus – ekranas



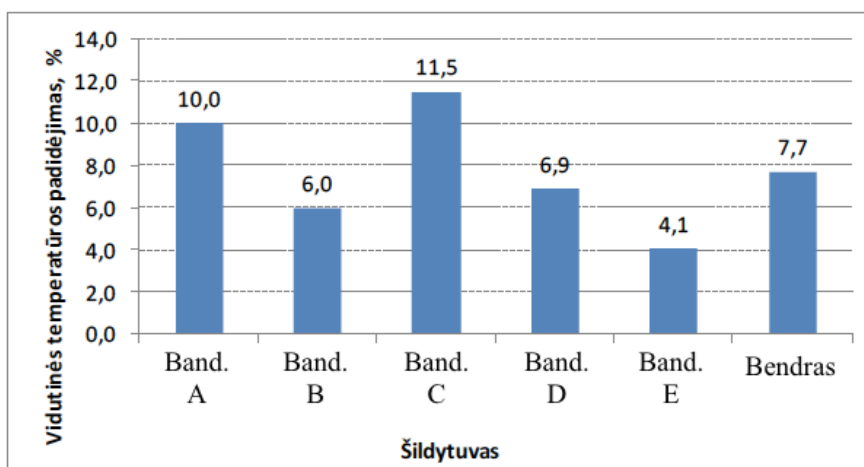
65 pav. Šildytuvo Bandinys D įšildomo ploto (slenkstinė temperatūra – 21°C) ekrane priklausomybė nuo atstumo šildytuvus – ekranas



66 pav. Šildymo plėvelės Bandinys E įšildomo ploto (slenkstinė temperatūra – 21°C) ekrane priklausomybė nuo atstumo šildytuvus – ekranas

## 2.8 Rezultatai ir išvados

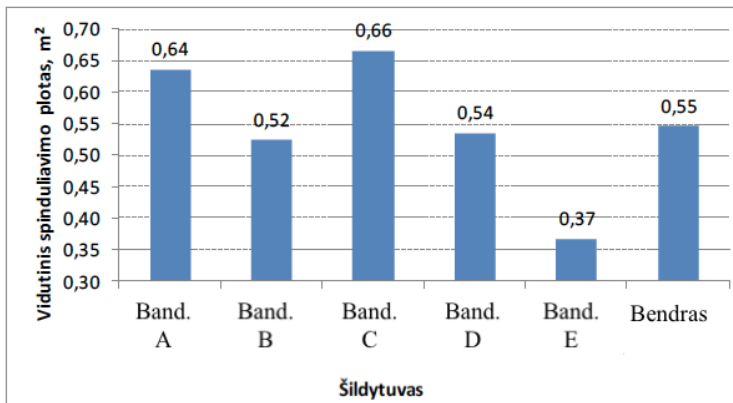
1. Atlikus plokščių šilumos perdavimo (spinduliavimo) efektyvumo tyrimą galima teigti, kad šilumos perdavimo atstumas priklauso nuo plokščių padėties. Vertikalus spinduliavimas leidžia padidinti plokščių vidutinę temperatūrą apytikriai 7,7 % (visoms plokštėms). Apibendrinti skirtingų plokščių duomenys pateikti 67 pav. Atskirų plokščių duomenys pateikti 58 – 61 pav. Iš gautų rezultatų matyti, kad esant vertikaliam spinduliavimui atstumams iki 1 m geriausiai šilumą perduoda plokštė BANDINYS C. Tai gali būti paaiškinta didesne elektrine plokštės galia. Esant 1,5 m atstumui panašų efektyvumą turi plokštės BANDINYS A ir BANDINYS D, nors jų elektrinė galia esant 230 V įtampai mažesnės atitinkamai 15 W ir 40 W.



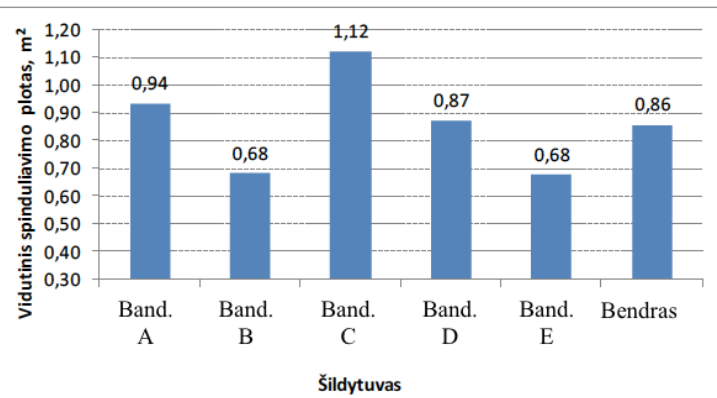
67 pav. Vertikalaus ir horizontalaus spinduliavimo efektyvumo palyginimas

2. Norint įvertinti plokštės šildomą plotą reikia įvesti tam tikrą slenkstinę temperatūrą (nagrinėjamu atveju ji buvo lygi 21°C), kuri uždėtų apatinę ribą (slenkstį) skaičiuojant efektyvų šildomą plotą. Plokštėms, kurių vidutinė temperatūra mažesnė už slenkstinę yra atmetamos (aplinkos temperatūra buvo lygi 19-20 °C). Iš 62 – 66 pav. matyti, kad didžiausia sklaidomos šilumos kampą turi plokštė BANDINYS C. Pažymima, kad efektyvus spinduliavimo plotas skaičiuotas iki 1 m atstumo. Esant didesniai atstumui plokštė geba įkaupti labai nedidelius ekrano plotus. Tai galima paaiškinti tuo, jog šios šildymo plokštės dėl savo konstrukcinių sprendimų didžiąją dalį energijos perduoda konvenciniu, o ne spinduliniu būdu. Dėl šios priežasties žymesni šilumos mainai pradeda vykti tik atstumą sumažinus iki 70 cm.





68 pav. Horizontalaus spinduliavimo vidutinis plotas



69 pav. Vertikalaus spinduliavimo vidutinis plotas

3. Šildymo plokščių galia stipriai priklauso nuo maitinimo įtampos. Vidutiniškai šildymo plokščių galia esant 200 V maitinimo įtampai yra lygi 230 W, o esant 240 V maitinimo įtampai – 320 W. Tai labai svarbu projektuojant šildymo sistemas atokiau esančiose vietovėse, kuriose dėl nuostolių perdavimo linijose maitinimo įtampa yra žemesnė.

4. Infraraudonųjų spindulių šildytuvo efektyvumas priklauso nuo šildomo objekto masės, paviršiaus ploto, geometrinės formos, paviršiaus būklės, spalvos ir šiluminio laidumo. Didžiausią šildymo efektą galima išgauti šildant plokščią juodą matinę metalinę plokštelę, nes sąlyginai mažai masei tenka didelis paviršiaus plotas bei mažas storis. Siekiant maksimalaus šildymo rezultato šildymo elementas ir kūnas turi būti orientuoti lygiagrečiai vienas kito tam, kad išvengti energijos praradimo dėl Lamberto kosinuso dėsnio.

5. Renkantis šildymo būdą būtina iš anksto žinoti, koks objektas bus šildomas. Dauguma medžiagų išskyrus stiklą ir kai kuriuos plastikus yra nepralaidūs infraraudoniesiems spinduliams, o energija yra arba sugerama, arba atspindima. Tokiu atveju perdavimo nuostoliai gali būti ignoruojami. Tokios medžiagos kaip stiklas ar permatoma plastiko juostelė, nors ir praleis didžiąją dalį į ją krįstančių spindulių, tačiau reikėtų įvertinti perėjimo nuostolius.

6. Kai infraraudonųjų spindulių energija pasiekusi kūno paviršių tampa šiluma, ji šildo visą kūną kondukcijos būdu. Todėl tokios medžiagos kaip metalas, turinčios aukštą šilumos laidumo koeficientą, greitai ir vienodai paskirsto šilumą. Priešingai, plastikai, medis ar kitos medžiagos su žemu šiluminiu laidumu gali turėti aukštą paviršiaus temperatūrą ilgą laiką, kol šilumos energija bus perduota vidiniams sluoksniams.

### 3. Tyriamasis darbas II dalis.

#### II. Darbo tikslo uždaviniai.

- Pasirinkti projektuojamą infraraudonųjų spindulių šildytuvo tipą.
- Ištirti sukonstruotos IR spindulių šildymo plokštės techninius parametrus.
- Nustatyti temperatūros pasiskirstymo priklausomybę nuo atstumo.
- Atlikti tyrimų rezultatų analizę ir pateikti išvadas.

#### 3.1 Infraraudonųjų spindulių šildymo plokštės gamyba

Išanalizavus pirmoje dalyje gautus rezultatus galima priėti prie išvados, jog tirti šildytuvai vargu ar patenkintų minimalius vartotojo poreikius. Kaip jau minėta išvadose, mažas šiluminis efektyvumas gali būti dėl netinkamos infraraudonųjų spindulių plokštės konstrukcijos. Dėl šios priežasties didžioji šilumos dalis yra perduodama ne spinduliniu, o konvekcijos būdu. Siekiant paaiškinti prastus rezultatus dėmesys buvo nukreiptas į plokščių konstrukciją. Čia galima išskirti keletą netinkamų konstrukcinių sprendimų: plokščių šilumos energiją generuojantys elementai nėra infraraudonųjų spindulių elementai dėl to elektros energija čia verčiama šiluma ir šildomos aplink esančios plokštės konstrukcijos dalys bei oras. Be to svarbus tai, kad spinduliuojantis paviršius yra padengiamas netinkama medžiaga kaip metalas, ar storas stiklas (pav. 70), kuris praleidžia dalį spindulių, o dalį atspindi bei sugeria. Priklausomai nuo stiklo rūšies, jis gali būti visai nepralaidus tam tikro bangos ilgio IR spindulių diapazonui. Galima teigti, kad eksperimento metu fiksuota infraraudonoji spinduliuotė yra antrinė, kurią sukuria įkaitęs viršutinis šildymo plokštės sluoksnis. Nemažiau svarbu ir tai, kad, kaip buvo pastebėta primoje tyrimo dalyje, IR spinduliai sklinda statmenai šildymo plokštei, todėl gaminti mažo paviršiaus šildytuvą yra nepraktiška, nes būtų šildomas tik mažas plotas.



70 pav. Stiklinis BANDINIO D ir metalinis BANDINIO B paviršiai

Siekiant užtikrinti našų ir efektyvų šildymą, buvo įvertina teorinėje dalyje pateikta medžiaga bei rezultatai gauti atlikus praktinius tyrimus pirmoje dalyje ir suprojektuota bei pagaminta IR šildymo plokštė – BANDINYS X. Projektuojant šildymo plokštę buvo iškelti du pagrindiniai tikslai. Pirma, šiluminė energija kūnams turi būti perduodama infraraudonųjų spindulių pagalba. Antra, turi būti pasiektas kuo didesnis šildomas plotas. Tam, kad įvertinti ar pavyko pasiekti šiuos tikslus bei geresnias šildymo charakteristikas nei šiuo metu rinkoje esančių šildytuvu, bus atliktas palyginimas. Palyginimui buvo parinkta pirmoje dalyje geriausiomis šildymo charakteristikomis pasižymėjusi plokštė BANDINYS C. Nors lyginamų plokščių galios skirias daugiau nei dviem kartais, tačiau lyginant spinduliavimą reikėtų atkreipti dėmesį į galios ir ploto santykį, kuris yra 1,7 karto didesnis BANDINYS C naudai.

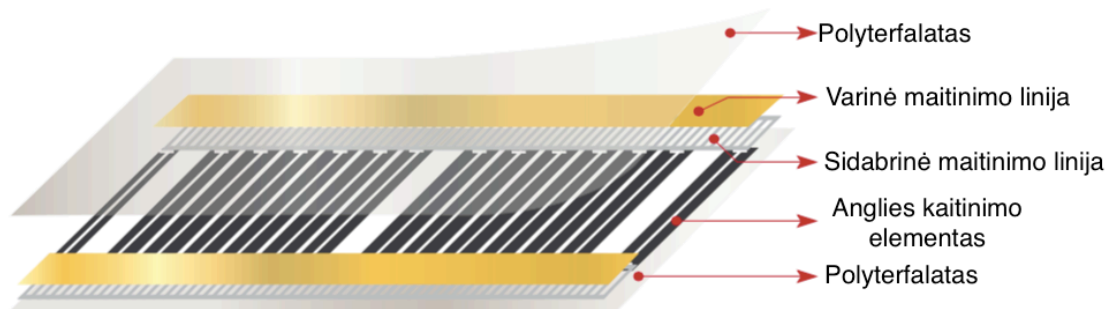
12 lentelė. Bandinys X ir Bandinys C šildymo plokščių techniniai parametrai

	BANDINYS X	BANDINYS C
Galia	798 W	300 W
Efektyvus plotas	1,5 m <sup>2</sup>	0,354 m <sup>2</sup>
Galios ir ploto santykis	526 W/ m <sup>2</sup>	904 W/ m <sup>2</sup>
Pavišiaus temperatūra	70 °C	90 °C

Dėl mažo galios ir ploto santykio šildytuvo gamybai buvo pasirinktas anglies pluošto šildymo elementas. Šio tipo šildytuvai buitiniam patalpų šildymui būtų vienas geriausių pasirinkimas dėl kelių priežasčių. Pirma, jie yra saugūs, nes jų darbinės paviršiaus temperatūros yra apie 70 °C, dėl to galima praktiškai neriboti minimalaus atstumo iki žmogaus. Tai pat anglies pluošto šildytuvai be didesnių nuostolių visą energiją verčia infraraudonosiomis bangomis, kai tuo tarpu kitų tipų šildytuvai dėl savo aukštų temperatūrų tam tikrą dalį energijos praranda konvekcijos būdu “šildydami orą”. Antra, mažas galios ir ploto santykis leidžia gaminti didelio ploto ir negalingus anglies pluošto šildytuvus, priešingai nei keramikinius ar kvarcinius, kuriuose mažuose plotuose koncentruota didelė galia. Tai yra naudinga, nes didelis darbinio paviršiaus plotas leidžia užtikrinti tolygų infraraudonosios spindulių pasiskirstymą visame šildomame plote, be to nereikalingi reflektoriai nukreipiantys spinduliuote. Skaidant spindulius reflektorių pagalba atsiranda netolygus spinduliuotės pasiskirstymas bei tam tikras kiekis IR energijos nepasiekia tikslo. Tai lemia energijos praradimą ir naudingumo koeficiento mažėjimą.

### Šildymo plokštės surinkimas

Dėl žemos kainos ir gerų techninių savybių projektuojamos šildymo plokštės gamybai buvo pasirinkta FELIX firmos anglies pluošto plevelė EX305H. Šia plėvelę sudaro 5 sluoksniai (pav. 71). Viršutinis sluoksnys sudarytas iš polyterfalato, pasižyminčio dideliu atsparumu bei izoliuojančiu vidinius sluoksnius nuo išorinio dujų poveikio ir drėgmės kaupimosi. Dvi 99,92 % vario bei 99,99 % sidabro juostos tiekia elektros energiją infraraudonųjų bangų elementui. Pagrindinis infraraudonųjų spindulių šaltinis – anglies pasta. Plevelė yra ypač plona – 0,338 mm storio. Ši plevelė parduotama 500 mm pločio įvairaus ilgio juostomis. FELIX plevelės EX305H galios sanaudos –  $220 \text{ W/m}^2$ , o maksimali temperatūra  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . [12]



71 pav. Felix infraraudonųjų spindulių šildymo plevelės sandara [12]

Laikančiajai sistemos konstrukcijai buvo panaudota “LIGHTBOND PLUS” aliuminio kompozitinė plokštė. Šios plokštės pasižymi labai dideliu atsparumu, lengvumu, labai gerai išlaiko plokštumos lygumą ir yra lengvai apdirbama. Vidurinis polietileno sluoksnis neturi savyje toksiškų medžiagų, todėl gaisro atveju į aplinką neišsiskiria nuodingi ar žmogaus sveikaitai kenkiantys junginiai. Kadangi abi šių kompozitinių plokščių pusės padengtos ugniai atspariais aliuminio lakštais, LightBond plokštės gali būti naudojamos kaip gairui atsparios medžiagos, atitinkančios priešgaisrinius reikalavimus (ugnies ir dūmų sulaikymas). Plokštės sudėtis: viršutinė apsauginė plėvelė, poliesterio dažų danga, plona aliuminio apsauginė plėvelė, 0.3 mm storio aliuminio lakštas, vidurinio polietileno sluoksnis, 0.3 mm storio aliuminio lakštas, plona aliuminio apsauginė plėvelė.[13]

Tam, kad išventgi šilumos mainų tarp laikančiosios konstrukcijos, LightBond plokštės, ir šilumą generuojančios Felix anglies pluošto plėvelės buvo panaudota 3 mm storio Marbet firmos “Termostop” šilumos ekranas. Jo blizgus aliuminio folijos pluošu padengtas paviršius užtikrina infraraudonųjų spindulių perdavimą reikiama kryptimi, o vidinis sluoksnis, pasižymintis mažu šilumos perdavimo koeficientu, mažina energijos nuostolius, kurie atsirastų šildant laikančiąją konstrukcijos plokštę.



72 pav. Marbet “Termostop” šilumos ekranas

### 3.2 Eksperimentinio tyrimo metodika

Eksperimentinio tyrimo metu buvo siekiama iširti sukonstruotos IR šildymo plokštės techniniai parametrai bei nustatyti temperatūros pasiskirstymo priklausomybę nuo atstumo. Pagamintos plokštės spinduliuojamo ploto nustatymui buvo pasirinkta 13 x 14 plieno plokštelių, kurių išmatavimai 100 x 100 x 3 mm, matrica. Ši matrica buvo sumontuota statmenai IR šildymo plokštei. Taikinio plokštės išilginės dimencijos buvo parinktos sąlyginai didelės lyginant su storiu, tai užtikrina, kad šiluminiai procesai vyktų tik vienoje dimencijoje. Plokščių matrica sudaryta iš mažų plokštelių, tai leidžia atmesti temperatūros pasiskirstymą tarp plokštelių dėl didelio metalo šiluminio laidumo. Plieno plokštelių sugerties koeficientas buvo padidintas jas nudažant juodais matiniais dažais. Tyrimo metu IR šildymo plokštė buvo maitinama stabilizuota 230 V maitinimo įtampa per autotransformatorių. Elektriniai parametrai buvo fiksuojami su tinko analizatoriumi Siemens SENTRON PAC3200 (matavimo paklaida 0,5%). Atliekant matavimus atstumas tarp šildytuvo ir taikinio buvo keičiamas. Matavimai buvo atliekami ties šiais fiksuotais atstumais: 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 1,5 m. Siekiant palyginti pagamintą šildymo plokštę su pramoniniu būdu pagaminta šildymo plokšte BANDINYS C ir įvertinti šildymo efektyvumą gyviems organizmams, eksperimentas buvo atliekamas su žmogumi. Su minėtomis plokštėmis matavimai buvo atliekami ties šiais fiksuotais atstumais: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0. Temperatūros nustatymui naudota infraraudonųjų spindulių kamera (FLUKE Ti105, tikslumas  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ). Tam, kad išvengti liekamųjų šiluminių atspindžių, kurie galėtų įtakoti rezultatus, visi matavimai buvo atliekami tik uždengus šildymo plokštės infraraudonųjų spindulių skydu. Vidutiniška eksperimentinio matavimo trukmė, kurios reikia išpildyti rimties sąlygą, yra 5 min. Eksperimentinio tyrimo elementų vykdymo principinė schema pavaizduota 73 pav.

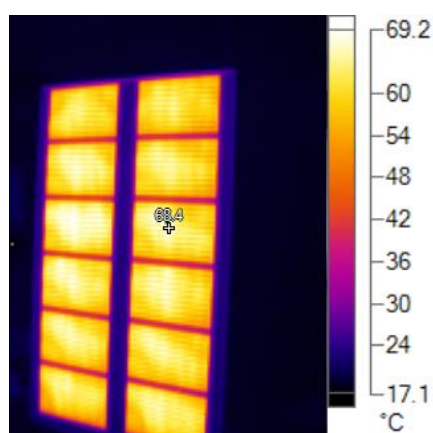


73 pav. infraraudonųjų spindulių plokščių spinduliavimo eksperimento vykdymas

#### 2.4 II dalies eksperimentinio tyrimo eiga.

Antrasis eksperimentinis tyrimas susideda iš dviejų etapų. Pirmajame etape bus siekiama įvertinti pagamintos infraraudonųjų spindulių plokštės BANDINYS X parametrus: plokštės paviršiaus efektyvumas, šildytuvo galios priklausomybė nuo tinklo įtampos, spinduliavimo vienodumas, įšilimo trukmė, maksimali šildytuvo paviršiaus temperatūra. Antrajame etape, bus matuojamas žmogaus įšilimas.

Pagaminta šildymo plokštė sudaryta iš 12 kaitinimo zonų simetriškai išdėstytų jos plote. Maksimali plokštės temperatūra esant 230 V maitinimo įtampai siekia 72 °C, vidutinė plokštės temperatūra siekė 70 °C. Plokštės IR vaizdas pateiktas 74 pav. Plokštės efektyvus šildymo plotas yra 1,2 m<sup>2</sup>, o bendras plotas 1,5 m<sup>2</sup>. Bandomosios plokštės techniniai duomenys yra pateikti 13 lentelėje.



74 pav. Pagamintos šildymo plokštės termonuotrauka po 4 min. nuo įjungimo pradžios.

13 lentelė. Pagamintos plokštės BANDINYS X energetiniai duomenys ( $U_t = 230 \text{ V}$ )

Parametras	vertė
Plokštės matmenys (LxH)	1500×1000×20 mm.
Efektyvus šildymo plotas (L`xH`)	Žr. 74 pav.
Plokštės elektrinė galia (W)	800 W
Plokščių galios tankis ( $\text{W}/\text{m}^2$ );	$526 \text{ W}/\text{m}^2$
Plokštės vidutinė temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	$70^{\circ}\text{C}$

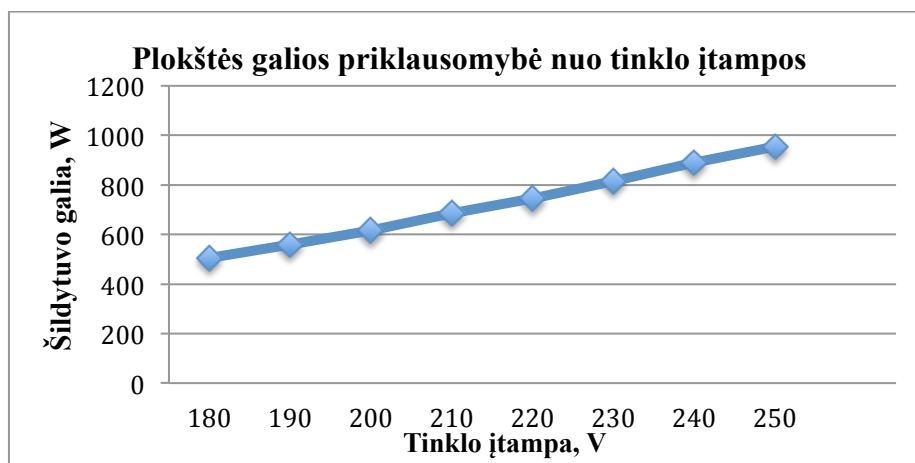
75 pav. pateikti pagamintos plokštės įšilimo eksperimento duomenys. Iš charakteristikų matyti, kad plokštė 95 % nusistovėjusios temperatūros pasiekia maždaug per 4 min., o jos maksimali temperatūra yra  $72^{\circ}\text{C}$ .



75 pav. BANDINYS X šildymo plokštės įšilimo temperatūros priklausomybė nuo laiko.

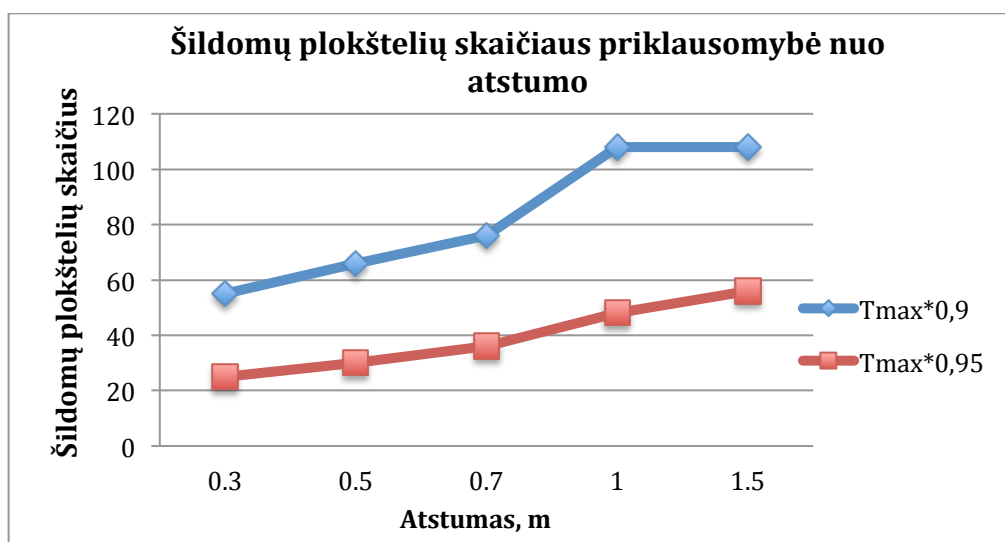
76 pav. pateikta pagamintos plokštės galios priklausomybė nuo tinklo įtampos. Esant standartiniai tinklo įtampai  $230 \text{ V}$  galia yra  $800 \text{ W}$ . Įvertinant leistinus tinklo įtampos svyravimus  $230 \text{ V} \pm 10\%$ , šildytuvo galia kinta nuo  $680 \text{ W}$  iki  $955 \text{ W}$ .





76 pav. Pagamintos šildymo plokštės galios priklausomybė nuo tinklo įtamos. Esant tinklo įtampai 230 V šildytuvo galia yra 800 W.

Sekančiu tyrimu įverinamas pagamintos šildymo plokštės spinduliavimo efektyvumas ir kryptingumas. Eksperimentas vykdytas 0,3; 0,5; 0,7; 1,5 m. atstumais. 14 lentelėje pateiktos spinduliavimo eksperimento metu gautos išilusio ekrano (šildoma 5 min.) termografinės nuotraukos. 77 paveiksle pavaizduota taikinio plokštelių skaičiaus, kuriose yra užfiksuotos temperatūros siekiančios 95% ir 90% maksimalios temperatūros esančios taikinio paviršiuje, priklausomybės nuo atstumo. Toks metodas leidžia nustatyti efektyvų infraraudonųjų spindulių srauto židinio dydį. Kaip galime pastebėti iš termografinių nuotraukų bei 77 paveikslo, didėjant atstumui infraraudonųjų spindulių srauto plotas didėja, tačiau perduodamos šilumos kiekis mažėja, taip yra dėl to, kad tolstan nuo elektromagnetinių bangų šaltinio spinduliavimo srautas slobsta, o sklaida auga. Tai turi tiesioginę įtaką perduodamos šilumos kiekiui.



77 pav. Šildomų plokštelių skaičiaus priklausomybė nuo atstumo.

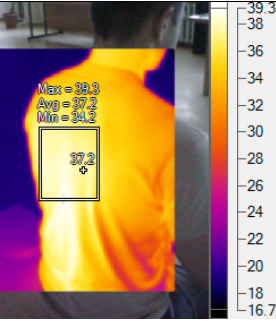
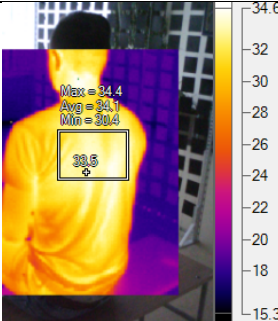
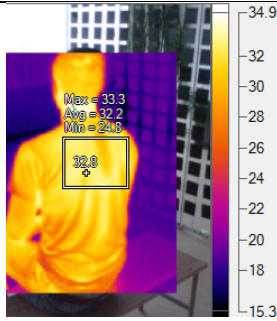
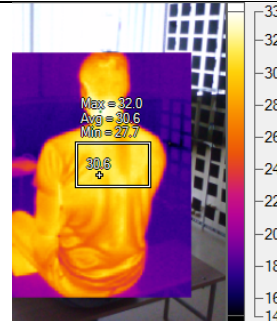
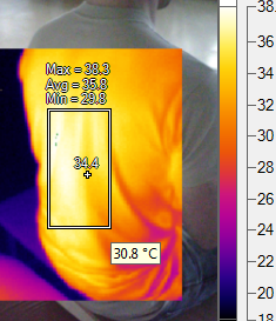
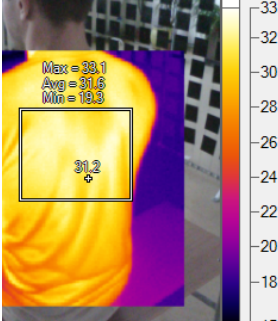




14 lentelė. BANDINYS X šildymo plokštės spinduliavimo tyrimas ( $U_t = 230 \text{ V}$ )

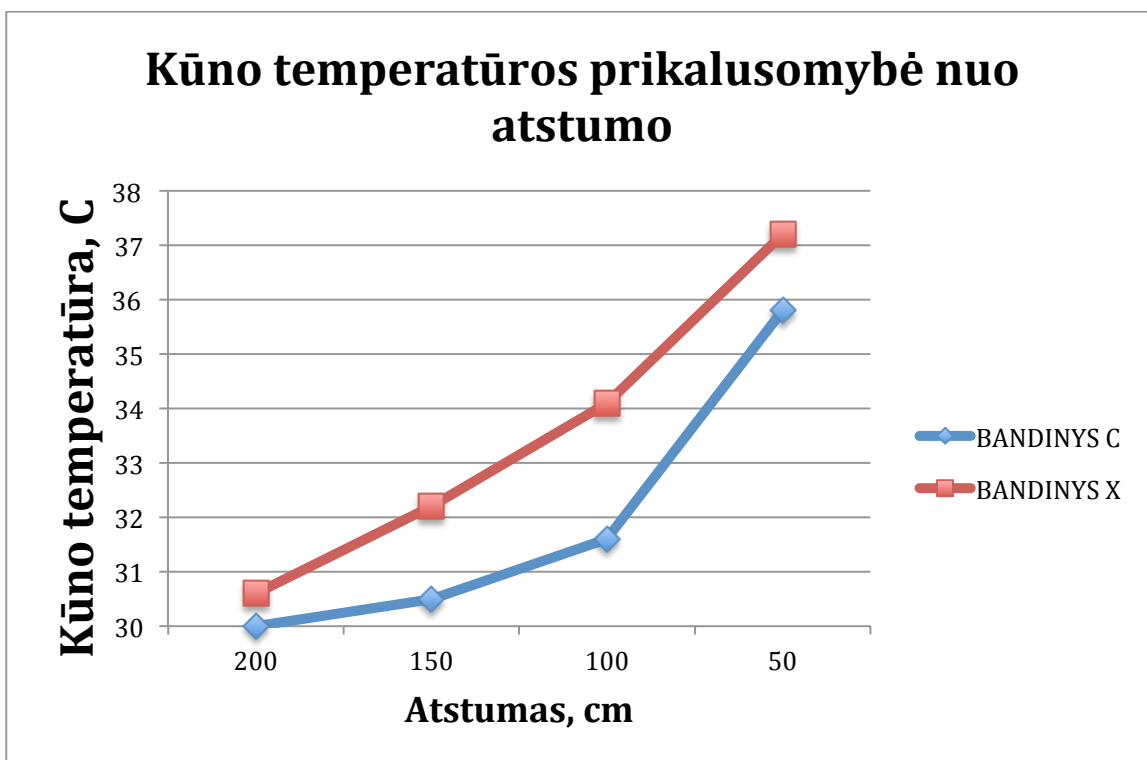
atsumas	0,3 m.	0,5 m.	0,7 m.
Šiluminės apkrovos pasiskirstymas ant ekrano. Temperatūrų ruožas 16 – 38 °C			
90% maksimalios temperatūros vertės			
95% maksimalios temperatūros vertės			
atstumas	1,0 m.		1,5 m.
Šiluminės apkrovos pasiskirstymas ant ekrano. Temperatūrų ruožas 16 – 38 °C			
90% maksimalios temperatūros vertės			
95% maksimalios temperatūros vertės			

Paskutinis tyrimas yra skirtas nustatyti temperatūros perdavimo charakteristikas gyvam organizmui bei gautus duomenis palyginti tarp plokštės BANDINYS X ir I dalyje geriausius rezultatus parodžiusios šildymo plokštės BANDINYS C. 15 lentelėje pateikiamos šio bandymo metu gautos termografinės nuotraukos. Nuotraukų apdorojimui buvo panaudota FLUKE stream view programinė įranga.

15 lentelė. Termografinės spinduliavimo tyrimo nuotraukos ( $U_t = 230 \text{ V}$ )

h	0,5 m.	0,7 m.	1,0 m.	1,5 m.
BANDINYS X				
$T_{\text{vid}}$	37,2 °C	34,1 °C	32,2 °C	30,6 °C
h	0,5 m.	0,7 m.	1,0 m.	1,5 m.
BANDINYS C				
$T_{\text{vid}}$	35,8 °C	31,6 °C	30,5 °C	30,0 °C

78 paveiksle pavazduota šio eksperimento metu gauti rezultatai: vidutinių kūno dalies temperatūrų priklausomybė nuo atstumo – h. Gauti rezultatai išduoda apie skirtingą šildymo elemento prigimtį. BANDINYS X šiluminės charakteristikos daugmaž tiesiškai priklauso nuo atstumo, kai tuo tarpu plokštės BANDINYS C rezultatuose matomas didelis šuolis ties 50 cm atkarpa. Tai galima paaiškinti tuo, kad ši plokštė elektros energiją verčia šiluma, o ne infraraudonaisiais spinduliais, todėl jos šilumos perdavimas yra žemas esant didesniems atstumams, o staigus šuolis įvyksta atstumui sumažėjus, dėl šilumos perdavimo konvekcijos būdu.



78 pav. Kūno temperatūros priklausomybė nuo atstumo.

## Tyrimo išvados.

Šildymo plokščių galia stipriai priklauso nuo maitinimo įtampos. Vidutiniškai šildymo plokščių galia esant 200 V maitinimo įtampai yra lygi 230 W, o esant 240 V maitinimo įtampai – 320 W. Bandomosios šildymo plokštės galia esant tinkle įtampai 200 V yra 615 W, o tinklo įtampai siekiant 240 V galia – 890 W. Tai labai svarbu projektuojant šildymo sistemas atokiau esančiose vietovėse, kuriose dėl nuostolių perdavimo linijose maitinimo įtampa yra žemesnė.

Infraraudonųjų spindulių šildytuvo efektyvumas priklauso nuo šildomo objekto masės, paviršiaus ploto, geometrinės formos, paviršiaus būklės, spalvos ir šiluminio laidumo. Didžiausią šildymo efektą galima išgauti šildant plokščią juodą matinę metalinę plokštelę, nes sąlyginai mažai masei tenka didelis paviršiaus plotas bei mažas storis. Siekiant maksimalaus šildymo rezultato šildymo elementas ir kūnas turi būti orientuoti lygiagrečiai vienas kito tam, kad išvengtų energijos praradimo dėl Lamberto kosinuso dėsnio.

Renkantis šildymo būdą būtina iš anksto žinoti, koks objektas bus šildomas. Dauguma medžiagų išskyrus stiklą ir kai kuriuos plastikus yra nepralaidūs infraraudoniesiems spinduliams, o energija yra arba sugerama, arba atspindima. Tokiu atveju perdavimo nuostoliai gali būti ignoruojami. Tokios medžiagos kaip stiklas ar permatoma plastiko juostelė, nors ir praleis didžiąją dalį į ją krintančių spindulių, tačiau privaloma įvertinti perėjimo nuostolius.

Kai infraraudonųjų spindulių energija pasiekusi kūno paviršių tampa šiluma, ji šildo visą kūną kondukcijos būdu. Todėl tokios medžiagos kaip metalas, turinčios aukštą šilumos laidumo koeficientą, greitai ir vienodai paskirsto šilumą. Priešingai, plastikai, medis ar kitos medžiagos su žemu šiluminiu laidumu gali turėti aukštą paviršiaus temperatūrą ilgą laiką, kol šilumos energija bus perduota vidiniams sluoksniams. Dėl šios priežasties tiriant infraraudonųjų spindulių plokštes geriau naudoti aukšto šiluminio laidumo medžiagas kaip anglinis plienas ar kiti metalai.

Tyrimo metu buvo pastebėta, kad infraraudonųjų spindulių šildymo plokštėms naudojami ne infraraudonųjų spindulių elementai. Tai gerai atskleidžia I dalyje tirta šildymo plokštė BANDINYS D ir atskirai tirtas jos šildymo elementas plėvelė – BANDINYS E. Įšilimo tyrimo metu BANDINYS D 95% maksimalios temperatūros (89 °C) pasiekė per 25 min., o Bandinys E (79 °C) per 5 min. Tai rodo, kad plėvelė ne tiesiogiai spinduliuoja infraraudonuosius spindulius, o tiesiog prišildo plokštės konstrukciją, kuri vėliau dalį energijos atiduoda infraraudonųjų spindulių būdu. Spinduliuavimo tyrimo metu BANDINYS E rezultatai buvo ženkliai prastesni nei BANDINYS D. Iš šių tyrimų rezultatų galime daryti tą pačią išvadą, kad BANDINYS E yra paprastas kaitinimo, o ne infraraudonųjų spindulių elementas.

Geresni BANDINIO D rezultatai yra dėl didesnės paviršiaus temperatūros, kuri atsidanda dėl uždaroje sistemoje atsirandančios kaupiamosios šilumos.

Tirtų plokščių surinkimas neatitinka infraraudonųjų spindulių technologijos. Pirma, spinduliuojantis paviršius yra padengiamas netinkama medžiaga kaip metalas ar stiklas. Metalas yra neskaidrus infraraudoniesiems spinduliams, jis juos sugeria arba atspindi, o stiklas priklausomai nuo jame esančių priemaišų gali praleisti didžiąją dalį spindulių, o dalį atspindėti bei sugerti. Taip pat stiklo priemaišos gali lemti tai, jog jis yra visai nepralaidus tam tikro bangos ilgio IR spindulių diapazonui. Antra, šių plokščių paviršiai buvo padengti sąlyginai storo sluoksnio medžiaga, dėl šios priežasties viršutinis sluoksnis nėra skaidrus infraraudonajai spinduliuotei, o pasižymi sugertimi.

Tyrimo rezultatai parodė, jog infraraudonieji spinduliai sklinda praktiškai statmenai infraraudonųjų spindulių plokštės paviršiui, o tolstant spinduliuotės srautas slobsta. Todėl akivaizdu, jog mažo paviršiaus ploto šildymo plokštė nebus efektyvi. Dėl šių priežasčių infraraudonųjų spindulių šildymo plokščių gamybai labiau tinka medžiagos, kurių paviršiaus ploto ir galios santykis yra mažas. Tai leidžia pasiekti didelį paviršiaus plotą ir žemą galią.

## Literatūra

1. Watlow. *Radiant heating with infrared. A technical guide to understanding and applying infrared heaters*, 1999. P 2 – 4.
2. Novošinskas H. *Inžinerinių technologijų projektavimas*, Akademija: Mokomoji knyga. 2012. P 16.
3. Šalna V. A. *Optika*, Vilnius: Enciklopedija, 2004. P 197-203.
4. FLIR. *Flir B6xx P6xx SC6xx user's manual*. 2011.
5. Novošinskas H. *Inžinerinių technologijų projektavimas*, Akademija: Mokomoji knyga. 2012. P 107-109.
6. John Vam Derlofske. *Illumination Fundamentals*. Lightning research center 2000. P 24. Prieiga per internetą: <<https://optics.synopsys.com/lighttools/pdfs/illuminationfund.pdf>>.
7. Invers square law [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-04-20]. Prieiga per internetą: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/forces/isq.html>>.
8. O'Connell, J. R., Croft, E. F. B. And Hankins, W. C. *Electric Infra-Red Heating for industrial Processes*, London: Electricity Association Services Limited, 1991.
9. Heraeus. *"Understanding Infrared Heating"* (PDF). Heraeus Noblelight. 2013.
10. Evolutionhealth [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-05-01]. Prieiga per internetą: <[https://www.evolutionhealth.com/Infrared\\_Saunas/infrared-fibercarbon-vs-ceramicheater.html](https://www.evolutionhealth.com/Infrared_Saunas/infrared-fibercarbon-vs-ceramicheater.html)>.
11. Chromalox. *Radiant infrared heating – Theory & Principles* (PDF). Technical information.
12. FLIR. *Flir B6xx P6xx SC6xx user's manual*. 2011.
13. Felixkorea [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-04-18]. Prieiga per internetą: <[http://www.felixkorea.com/english/data/FELIXKOREA\\_TOTAL\\_CATALOG\\_ENGLISH.pdf?ckattempt=1](http://www.felixkorea.com/english/data/FELIXKOREA_TOTAL_CATALOG_ENGLISH.pdf?ckattempt=1)>.
14. Heliopolis [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-05-15]. Prieiga per internet: <<http://heliopolis.lt/products/reklamines-akp-plokstes/>>.
15. Fluorescencinė diagnostika biomedicinoje [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-05-20] Prieiga per internet: <[http://www.biofotonika.ff.vu.lt/wp-content/uploads/2012/06/FLD\\_pirmas-skyrius.pdf](http://www.biofotonika.ff.vu.lt/wp-content/uploads/2012/06/FLD_pirmas-skyrius.pdf)>.