

EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut



Argo Ladva

**AHJUDE TERMOGRAAFILINE VAATLUS EKSPERTHINNANGU
EESMÄRGIL**

Thermographic Investigation of Ovens Aimed Giving an Expert Opinion

Bakalaureusetöö
energiakasutuse erialal

Tartu 2012

Olen koostanud bakalaureusetöö iseseisvalt. Kõik minu töös kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad ning kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

Bakalaureusetöö koostaja: Argo Ladva
(kuupäev) (allkiri)

Juhendaja: lektor Mart Hovi
(kuupäev) (allkiri)

Retsensent: dots. Veli Palge
(kuupäev) (allkiri)

Töö vastab kehtivatele nõuetele. Kaitsmisele lubatud.

Energeetika osakonna juhataja:

prof. Andres Annuk
(kuupäev) (allkiri)

Töö valmimist on toetanud programm INTERREG IVA ECOHOUSING Energy Efficient and Ecological Housing

ABSTRACT

Ladva, A. Thermographic Investigation of Ovens Aimed Giving an Expert Opinion. Bachelor thesis. – Tartu: EMÜ, 2012. 43 pages, 18 figures, 1 tables, format A4. In Estonian language.

The topic of this thesis was chosen in order to obtain new knowledge and experiences. Thermography is my interest and ripening of a new stove in our household influenced me to do the thermographical survey of stoves.

The aim of this thesis is to study warming and cooling of different stoves through the thermographic survey. For that, seven stoves were heated; then images of their overlay temperatures were fixed by thermal cameras and the data of the structures, sizes, locations and age of the stoves were collected. By overlay temperature of stoves, power output of them was calculated and compatible formulas for calculations were presented.

In chapters 2, 3, 4, 5 and 6 the overview of history and construction of stoves are given, the heat exchange in a stove is described and the methodology of calculating the power output of the overlay of a stove is presented. In chapter 7 different thermal images are analysed and in chapter 9 the power outputs of overlays of different stoves are compared.

Keywords: temperature of a stove, thermal image, power output, a tile lining stove, a brick lining stove.

SISUKORD

SISSEJUHATUS	4
1. TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED	5
2. AHIKÜTTE ARENG	6
3. TOAAHJUDE LIIGITUS	8
4. SOOJAVAHETUS AHJUS	10
5. AHJU JA KOLDE KASUTEGUR	12
6. AHJU PINNA VÕIMSUSE ARVUTAMISE METOODIKA	13
6.1. Konvektiivne soojuslevi	13
6.2. Kiirguslik soojuslevi	15
7. VAATLUSE ALL OLEVATE AHJUDE ANALÜÜS	16
7.1 Ahi nr 1	16
7.2 Ahi nr 2	18
7.3 Ahi nr 3	20
7.4 Ahi nr 4	23
7.5 Ahi nr 5	26
7.6 Ahi nr 6	28
7.7. Ahi nr 7	30
8. AHJUDE SOOJENEMISE JA JAHTUMISE GRAAFIKUD	32
8.1. Ahju nr 1 soojenemise ja jahtumise graafik	32
8.2. Ahi nr 2 soojenemise ja jahtumise graafik	35
9. AHJUDE VÄLJAANTAVATE VÕIMSUSTE VÕRDLUS	38
KOKKUVÕTE	40
KIRJANDUS	41
LISAD	42
Lisa A Kuiva õhu soojusfüüsikalised parameetrid	43

SISSEJUHATUS

Teema on valitud uute teadmiste ja kogemuste saamise eesmärgil. Huvi on tegeleda termograafiaga ja ahjude termograafilist vaatlust ajendas tegema uue ahju valmimine kodus majapidamises.

Ahi on soojuse tootmise ja salvestamise seade või ehitis, milles kütust põletades saadakse soojust. Ahjud võivad olla ehitatud erinevatest materjalidest ja erineva ehitusviisiga.

Ahjud on tekkinud ja arenenud maailma erinevates paikades eri aegadel ja üksteisest sõltumatult, kuid praeguseks on nad kujunenud võrdlemisi sarnaseks.

Termokaamera on seade, mis meenutab fotoaparaati, kuid ei pildista mitte värve vaid temperatuure. Termokaamera ehk infrapunakaamera abil on võimalik saada objektist soojuspilt, mille abil on võimalik hinnata soojuskadusi ja soojuspidavust.

Termograafeerimine on meetod pindade temperatuuride visualiseerimiseks. See võimaldab määrata konkreetse punkti temperatuuri kraadides kui ka suurema pinna temperatuurierinevused võrdleva üldpildina.

Oma ülesehituselt jaguneb töö kaheks: teoreetiliseks ja uurimuslikuks osaks. Teoreetilises osas antakse ülevaade ahjude ajaloost ja ehitusest, kirjeldatakse ahjus toimuvat soojusvahetust ning tuuakse välja ahju pinna võimsuse arvutamise metoodika. Uurimuslikus osas analüüsitakse erinevate ahjude termograafilisi pilte ning võrreldakse ahju pinna võimsusi.

1. TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED

Ahjud on ruumi kütmiseks kasutatavad majapidamisküttekolded, mis võivad olla ehitatud erinevatest materjalidest ja erineva ehitusviisiga. Tänapäeval on ehitatud ahjud peamiselt eramajadesse või vanematesse korrusmajadesse.

Käesoleva töö eesmärgiks on uurida erinevate ahjude soojenemist ja jahtumist termograafilise vaatluse abil. Selleks köeti 7 erinevat ahju, fikseeriti termokaamera abil pildid nende pinnatemperatuuridest ja koguti andmeid ahjude ehituse, suuruse, asukoha ja vanuse kohta. Ahju pinnatemperatuuri järgi on leitud ahju võimusus ja esitatud arvutamiseks vastavad valemid.

Töö ülesandeks oli kirjeldada erinevate ahjude soojenemist ja jahtumist termograafiliste piltide põhjal ning võrrelda ahjude väljaantavaid võimsusi.

Uurimuse valimiku moodustasid 3 tellisvoodriga ahju, 3 pottvoodriga ahju ja 1 plekkkestaga ahi.

2. AHIKÜTTE ARENG

Kolletest, mis paiknesid avatult köetavas hoones on arenenud välja kaasaegsed ahjud seeläbi, et neid hakati ümbritsema müüride ja keristega. Korsten soojusgeneraatori komponendina oli märgatav edasimineku küttetehnikas. Avastus, et põlemisgaaside soojust saab suitsukäikudes ära kasutada leiti, et ruumides on otstarbekas rajada nii pikad lõõrid kui vähegi võimalik. [1]

Suitsukäikude asetus põlemiskambri kohale tekitas põrandaruumi kokkuhoiu ja väiksema materjalikulu. Loodusseadustest tulenevalt kujunesid seeläbi välja lõõride pikkus ja ahjude mõõtmed. [1]

Kuigi ahjuehitust viljeleti erinevatel ajaetappidel ja kohtades on tänaseks väljakujunenud küllaltki samalaadsed seadmed üksteisest sõltumatult. [1]

Algselt arenesid ahjud praktiliste kogemuste järgi. Kõige tähtsamal kohal oli ahju soojaandvus ja kütusekulule tähelepanu eriti ei pööratud. Eelmisel sajandil hakati ahjusid põhjalikumalt uurima ja katsetama. Uuriti ahjude paiknemise mõju soojaandvusele ja pöörati peamine tähelepanu kütusekulule, et minimaalse kütusekuluga saavutada maksimaalne soojushulk. [1]

Naabrid idas ja lõunas hakkasid Euroopa eeskujul rajama ahje, mis olid varustatud lõõridega. Hollandi eeskujul oli sealjuures märgatav tsaar Peeter esimese valitsemise ajal. Nii vahendid kui oskusteave pärines sealt. Arvestada tuli külmemat talve, mis kasvatas ahjude soojusmahtu ning lõõride pikkust. Sellel ajal arenesid välja suitsukäigud, mis on kasutusel tänaseni. Esiteks rõhtsad ja hiljem ka vertikaallõõridega ahjud. [1]

Püstlõõridega kandilisi ahjusid hakati nimetama Hollandi ahjudeks, sest ahju ehitamiseks kasutatavad ahjupotid toodi peamiselt Hollandist. Hollandis sellisest ahjutüübist ei teatud [1]

Üleelmisel sajandil tekkis veel teisi lõõrisüsteeme. Mitmekorruselistel ja kõrgetel hoonetel olid kõrged korstnad ja tänu sellele sai ehitada ahjud pikkade lõõridega. Kuna suitsugaas pikkades lõõristikes jahtus aga liigselt maha siis hakkasid lõõrid tahmuma ja pigistuma, selle tõttu võis tahm korstnas süttida. [1]

Ahikütet kasutatakse praegu ainult ühe-kahekorruselistes majades, mille korsten ei ole eriti kõrge. Korstna kõrgus kolderestist kuni korstna tipuni peab olema vähemalt 5 m. Pööninguta hoonetel võib korsten olla ka madalam. Lühikese korstna tõttu on aga tõmme juba hoopis väike. Seega ei saa nüüd pika lõõristikuga ahjusid ehitada. Tänapäevased ahjud on enamasti restkoldega ja suhteliselt lühikese lõõristikuga. Restkoldega ahjud tarvitavad ökonoomselt kütust, seega on nendel parem kasutegur kui vanadel pika lõõristikuga ahjudel. Nüüdisaegses restkoldega ahjus on põlemise temperatuur kuni 200 °C võrra kõrgem kui vanades umbkoldega ahjudes. Seda võimaldab restkoldes õigesti reguleeritud lisaõhk ja hea tõmme. Suitsugaasid lähevad korstnasse nii kuumalt, et korsten ei pigistu ega tahmu. Seega on kõrvaldatud tahma süttimise oht korstnas. [1]

Paljudes kohtades on kasutusel ka keraamilistest kividest või tulekindlast betoonist valatud detailidest monteeritavad ahjud ja korstnad. Need materjalid on aga tellistest või potikivist märksa kergemad. Kuna ahju soojamahtuvus oleneb tema massist, siis tuleb kergemaid ahjusid kütta kauem ja kuumemaks, seega vajavad sellised ahjud rohkem kütust. [1]

3. TOAAHJUDE LIIGITUS

Kõik ahjud, koosnevad kahest põhiosast: küttekoldest ja lõõristikust. Kõikide ahjude juurde kuulub ka korsten, mis juhib jahtunud suitsugaasid välja. [1]

Ahju soojenemine oleneb sellest, kuivõrd täielikult kütus koldes põleb. Seoses sellega võib lugeda küttekollet ahju kõige olulisemaks osaks. Kütuse põlemisel tekkinud soojus liigub kuumade gaasidena lõõristikku, kus see salvestub lõõriseintesse ja sealt edasi ruumi õhule antakse. [1]

Toaahjusid võib liigitada: [1]

- lõõriseinte soojenemise astme ja soojamahtuvuse järgi;
- gaaside liikumise järgi ahju sisemuses;
- korruste arvu järgi;
- materjali järgi;
- suitsugaaside ärajuhtimise järgi.

Soojamahtuvuse järgi jagunevad ahjud: [1]

- soojamahtuvusega ahjud;
- soojamahtuvuseta ahjud.

Ahjuseinte soojenemise järgi jagatakse ahjud: [1]

- mõõduka soojenemisega ahjud;
- kuumad ahjud.

Materjali järgi jagatakse ahjud: [1]

- telliskiviahi;
- pottvoodriga ehk pottahi;
- plekk-kestaga ahi;
- gofreeritud kestaga ahi;
- karkassahi.

Lõõristiku järgi jagunevad ahjud: [1]

- püstlõõridega ahjud;
- rõhtlõõridega ahjud;
- alt soojenevad ahjud;
- laskuvate lõõridega ahjud;
- lõõrideta ahjud;
- segalõõridega ahjud.

Kolde järgi jagunevad ahjud: [1]

- umbse põhjaga koldega ahjud;
- restkoldega ahjud;
- lisakambritega koldega ahjud;
- šahtkoldega ahjud.

4. SOOJAVAHETUS AHJUS

Kütuse põlemise käigus eralduva soojuse mõjul ahi soojeneb. Salvestatav soojushulk ja osaliselt ka ahju temperatuuri kasvu kiirus sõltuvad otseselt ajaühikus ärapõlevast kütusehulgast. [1]

Tavalisi toaahjusid köetakse 1 – 2 tundi. Selle aja jooksul peab ahi akumuleerima võimalikult suure soojushulga, mille ta kütmise vaheaegadel ruumi annab. Selleks, et ahi kütmise ajal jõuaks palju salvestada peaks ahju sisepind olema võimalikult suur. [1]

Tavalise toaahju, mida köetakse 1 kord ööpäevas, välispind saavutab suurima temperatuuri 1 – 4 tunni jooksul peale siibri kinni panemist. Salvestatud soojushulgast peab piisama, et hoida ruum soe ühe ööpäeva. Selle saavutamiseks peab ahi ühe ööpäeva vältel välja andma ruumile vajamineva energiahulga. [1]

Kõrge põlemistemperatuur koldes on ahju efektiivse soojaandvuse eeltingimuseks. Seepärast on oluline küllaldase õhukoguse juurdepääs. Õhukogust reguleeritakse restkolde puhul siibriga või tuharuumiukse avamisega ja umbkolde puhul koldeukse avamisega. [1]

Kütmisel puiduga on temperatuur koldes 800 – 900 °C. Koldest väljuvate põlemisgaaside temperatuur on ligikaudu 600 °C ja õige pikkusega lõõristikust peaks korstnasse minema 200 °C temperatuuriga suits. [1]

Suur osa ahju soojusest salvestub ahju sisemistesse vaheseintesse, mille keskmine temperatuur on kõrgem kui ahju välispinna temperatuur. Ahju jahtudes hakkab siseseintesse salvestunud soojus kanduma välisseintele. Ahjuseinte ebaühtlasest temperatuurist tekib ahju sees ebaühtlane soojuspaisumine. See võib tekitada praod ahju seintesse. [1]

Ahjud, mille väliskihi maht on ahju mahu suhtes võimalikult suurem kasutavad kütust ökonoomsemalt. Seega on ristküliku kujulise põhiplaani ahjud ökonoomsemad kui võrdkülgse põhiplaani ahjud. [1]

Tabel 4.1. Mitmesuguste ahjude ligikaudne soojaandvus kW/m² [1]

Ahju tüüp	Soojaandvus kütmisel üks kord päevas kW/m ²
Paksuseinaline pott- või tellisvoodriga ahi	0,49
Paksuseinaline plekk-kestaga ahi	0,42
Õhukeseseinalised ahjud massiga alla 1000 kg	0,34

5. AHJU JA KOLDE KASUTEGUR

Ahju kasutegur on arv, mis näitab kui palju kütuse põlemisel tekkinud soojusest jõuab ruumi. Ahju kasutegur sõltub: kolde konstruktsioonist, lõõride pikkusest ja ahjuseinte paksusest. [1]

Kuna temperatuur on kõige suurem koldes siis salvestub seal enamus põlemissoojusest. Seepärast mõjutab kolle üsna palju ahju kasutegurit. Kasutegurite võrdlemisel liigitatakse ahjud vaid kolde konstruktsiooni järgi. [1]

Kasutegurid määratakse laborites spetsiaalselt katsetamiseks ehitatud ja mõõteaparatuuriga varustatud ahjudel. Sealjuures testitakse mitmeid erinevaid lõõristikke. Ligikaudse kasuteguri saab kätte ka kui vaadelda koldes olevat temperatuuri ja korstnasse minevat temperatuuri. [1]

Umbkoldega ahjude kasutegur on 0,3...0,5, restkoldega ajudel 0,5...0,7. Õige pikkusega lõõristikuga nüüdisaegsete ahjude kasutegur õige kütmisrežiimi puhul võib küündida isegi kuni 0,85-ni. [1]

6. AHJU PINNA VÕIMSUSE ARVUTAMISE METOODIKA

6.1. Konvektiivne soojuslevi

Arvutus on tehtud ahju nr 4 põhjal. Ahju kõrgus oli 2000 mm, laius 850 mm sügavus 850 mm. Arvutusnäites kasutati ahju keskmist temperatuuri, mille ahi oli saavutanud 4 h vältel peale ahju kinni panemist ehk siibri ja õhuvõtu ukse kinni panemist kui ahi oli kustunud. Toa temperatuur mõõtmise hetkel oli 21 °C ja välistemperatuur oli -2 °C. Ahjude keskmine pinnatemperatuur leiti termokaameraga kaasas olnud programmiga InsideIR 4.0.

Kuna õhu temperatuur ahju pinnakihi lähedal ei ole sama mis toas, leiti õhu-piirikihi keskmine temperatuur ahju pinnal

$$t_{p\bar{o}} = \frac{t_{kp} + t_{\bar{o}}}{2} = \frac{40,97 + 21}{2} = 30,967 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.1)$$

kus $t_{p\bar{o}}$ on ahju pinnal õhu-piirikihi keskmine temperatuur °C;

t_{kp} – ahju pinna keskmine temperatuur °C;

$t_{\bar{o}}$ – toa õhu keskmine temperatuur °C.

Leiti termiline ruumpaisumistegur, mis ideaalgaasil avaldub [2]

$$\beta_{p\bar{o}} = \frac{1}{T_{p\bar{o}}} = \frac{1}{304,117} = 0.00329 \text{ K}^{-1}, \quad (6.2)$$

kus $\beta_{p\bar{o}}$ on termiline ruumpaisumistegur K⁻¹;

$T_{p\bar{o}}$ – ahju pinnal õhu-piirikihi keskmine temperatuur K.

Leiti ahju pinna ja õhu temperatuuride vahe

$$\Delta t = t_{kp} - t_{\bar{o}} = 40,97 - 21 = 19,93 \text{ K}, \quad (6.3)$$

kus Δt on ahju pinna ja õhu temperatuuride erinevus K.

Grashoffi arvu vabakonvektsiooni iseloomu määramiseks arvutatakse valemiga [2]

$$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu_{p\delta}^2} \cdot \beta_{p\delta} \cdot \Delta t = \frac{9,81 + 2^3}{(1,59 \cdot 10^{-5})^2} \cdot 0,0033 \cdot 17,4 = 2,03 \cdot 10^{10}, \quad (6.4)$$

kus Gr on Grashoffi arv, mis väljendab tiheduse erinevusest tingitud tõstejõudude ja molekulaarse hõõrdumise suhet;

g – raskuskiirendus $9,81 \text{ m/s}^2$;

l – ahju kõrgus m;

$\nu_{p\delta}$ – õhu viskoosus temperatuuril $t_{p\delta}$. $\nu_{p\delta} = 1,59 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (lisa A).

Leiti Grashoffi ja Prandtl'i arvu korrutis, et määrata Nusselti arvu arvutamiseks vajaminevad konstandid [2]

$$Gr \cdot Pr = 2,03 \cdot 10^{10} \cdot 0,7011 = 1,43 \cdot 10^{10}, \quad (6.5)$$

kus Pr on Prandtl'i arv, mis iseloomustab voolava keskkonna füüsikalisi omadusi.

$Pr = 0,7011$ (lisa A).

Kuna $Gr \cdot Pr > 10^9$ siis Nusselti arvu leidmiseks valiti konstandid $C = 0,135$ ja $n = 1/3$.

Nusselti arv arvutatakse valemiga [2]

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n = 0,135 \cdot (2,03 \cdot 10^{10} \cdot 0,7011)^{\frac{1}{3}} = 327,34, \quad (6.6)$$

kus Nu on Nusselti arv mis väljendab dimensioonita soojusülekandevõimet α ; saadakse kolmandat liiki ääritingimusest voolavale keskkonnale.

Soojusülekandevõime α leidmiseks kasutati valemit [2]

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda_{p\delta}}{l} = 327,34 \cdot \frac{0,0275}{2} = 4,501 \frac{W}{m^2 \cdot K}, \quad (6.7)$$

kus α on soojusülekandevõime $W/(m^2 \cdot K)$;

$\lambda_{p\delta}$ – soojusjuhtivustegur. $\lambda_{p\delta} = 0,0275 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ (lisa A).

Leiti ahju konvektiivse soojuslevi võimsus ühe ruutmeetri kohta [2]

$$q_1 = \alpha \cdot \Delta t = 4,501 \cdot 19,93 = 89,728 \frac{W}{m^2}, \quad (6.8)$$

kus q_1 on võimsus, mida ahi ühe ruutmeetri kohta konvektiivse soojuslevi teel ruumi annab W/m^2 .

6.2. Kiirguslik soojuslevi

Ahju kiirgusliku soojuslevi võimsus ühe ruutmeetri kohta arvutamiseks kasutati valemit [3]

$$\begin{aligned} q_2 &= \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T_{kp}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\delta}}{100} \right)^4 = \\ &= 0,75 \cdot 5,77 \cdot \left(\frac{314,08}{100} \right)^4 - \left(\frac{294,15}{100} \right)^4 = 95,199 \cdot \frac{W}{m^2}, \end{aligned} \quad (6.9)$$

kus q_2 on võimsus, mida ahi ühe ruutmeetri kohta kiirgusliku soojuslevi teel ruumi annab W/m^2 ;

ε – põletatud savi (tellise) mustvärvusaste $\varepsilon = 0,75$ [4];

C_0 – absoluutselt musta keha kiirgustegur $C_0=5,77 \text{ W}/(m^2 \cdot K^4)$ [3];

T_{kp} – ahju pinna keskmine temperatuur K;

T_{δ} – toa õhu keskmine temperatuur K.

7. VAATLUSE ALL OLEVATE AHJUDE ANALÜÜS

7.1 Ahi nr 1

Ahi nr 1 (joonis 7.1) on valminud aastal 1975. See on neljakandiline, plekk-kesta ja ringlõõriga ahi. Ahi asub maja osas, mis on halvasti soojustatud ja talvel neid ruume igapäevaselt ei kasutata. Ahi kütab ühte suurt tuba, kokku 30 m². Mõõtmise ajal oli välistemperatuur -5 °C ja toa temperatuur ahju küdema panemise hetkel vaid 4 °C.

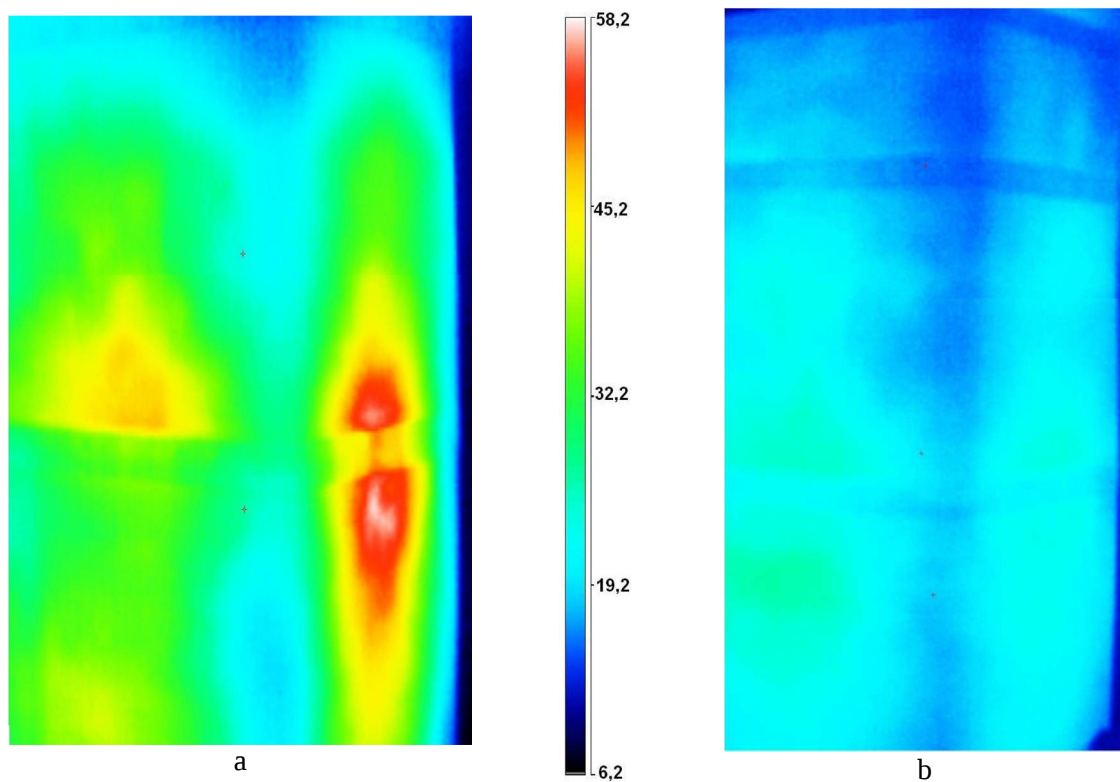


a



b

Joonis 7.1. Vaatluse all olev ahi nr 1: a – vaade termokaameraga pildistatud küljest;
b – vaade ahju eest



Joonis 7.2. Termokaameraga tehtud pildid: a – 4 tundi peale ahju kinni panemist;
b – 19 tundi peale ahju kinni panemist

Joonisel 7.2 (a) on soojuspilt, kui ahju kinni panemisest on möödunud 4 tundi. Jooniselt on näha, et ahi on soojenenud ebaühtlaselt. Ahju külje temperatuur on ligikaudu 40 °C kuid nurgad on soojenenud kõigest 20 °C-ni. Üksikud kohad ahju küljel on soojenenud ka üle 55 °C. Toa temperatuur on tõusnud 2 kraadi ning pildistamise hetkel oli toas sooja 6 °C.

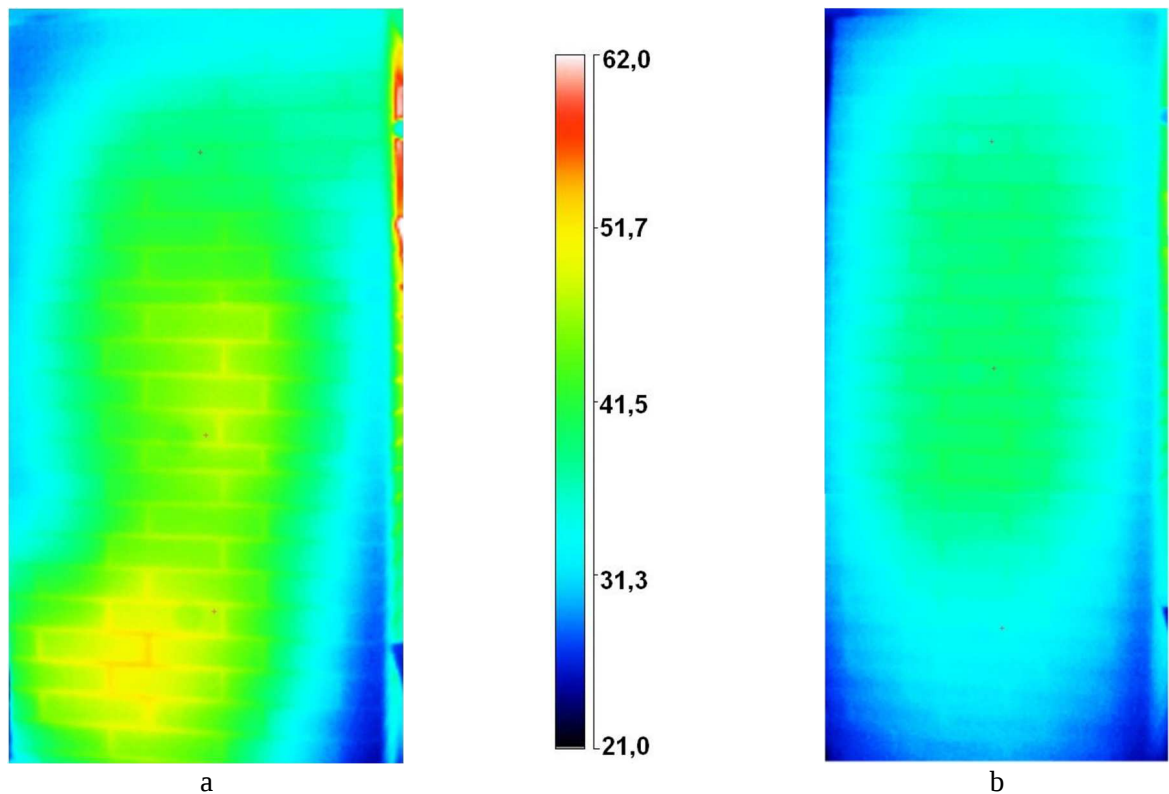
Joonisel 7.2 (b) on soojuspilt, kui ahju kinni panemisest on möödunud 19 tundi. Joonisel on näha, et ahju külje temperatuur on ühtlustunud. Ahju külje ja nurkade temperatuur on ligikaudu 20 °C. Toa temperatuur on pildistamise hetkeks tõusnud 11 °C-ni.

7.2 Ahi nr 2

Ahi nr 2 (joonis 7.3) on valminud aastal 2009. See on neljakandiline, tellisahi. Ahi asub maja osas, mis on hästi soojustatud. Ahi kütab kööktuba ja veel ühte tuba, kokku 45 m². Kööktöös asub ka pliit koos soojamüüriga, mida köetakse iga päev. Mõõtmise ajal oli välistemperatuur -5 °C ja toa temperatuur ahju küdema panemise hetkel oli 17 °C.



Joonis 7.3. Ahi nr 2 pildistatud külg



Joonis 7.4 termokaamera teatud pildid: a – 4 tundi peale kinni panemist;
b – 19 tundi peale kinni panemist

Joonisel 7.4 (a) on soojuspilt, kui ahju kinni panemisest on möödunud 4 tundi. Jooniselt on näha, et ahju külge on soojenenud kõige rohkem kolde kõrvalt, kus ahju temperatuur küünib üle 50 °C. Koldest kõrgemal on ahju külje temperatuur ligikaudu 50 °C. Nurgad on soojenenud ligikaudu 35 °C-ni. 4 tundi peale ahju kinni panemist oli toa temperatuur tõusnud 2 kraadi ning pildistamise hetkel oli toas sooja 19 °C.

Joonisel 7.4 (b) on ahju kinni panemisest möödunud 19 tundi. Sellel soojapildil on näha, et ahju kolde kõrval on ahi jahtunud 30 °C-ni, ahju külje keskosas on temperatuur 38 °C ja nurkades jahtumist märgata pole. Toa temperatuur on pildistamise hetkel tõusnud 21 °C-ni.

7.3 Ahi nr 3

Ahi nr 3 (joonis 7.5) on valminud aastal 2008. See on ebastandardse kujuga, tellisahi. Ahi asub maja esimesel korrusel. Maja on 2008 aastal renoveeritud ja soojustatud. Ahi kütab kahte tuba, kokku 42 m². Mõõtmise ajal oli välistemperatuur -5 °C. Toa temperatuur ahju küdema panemise hetkel oli 21 °C

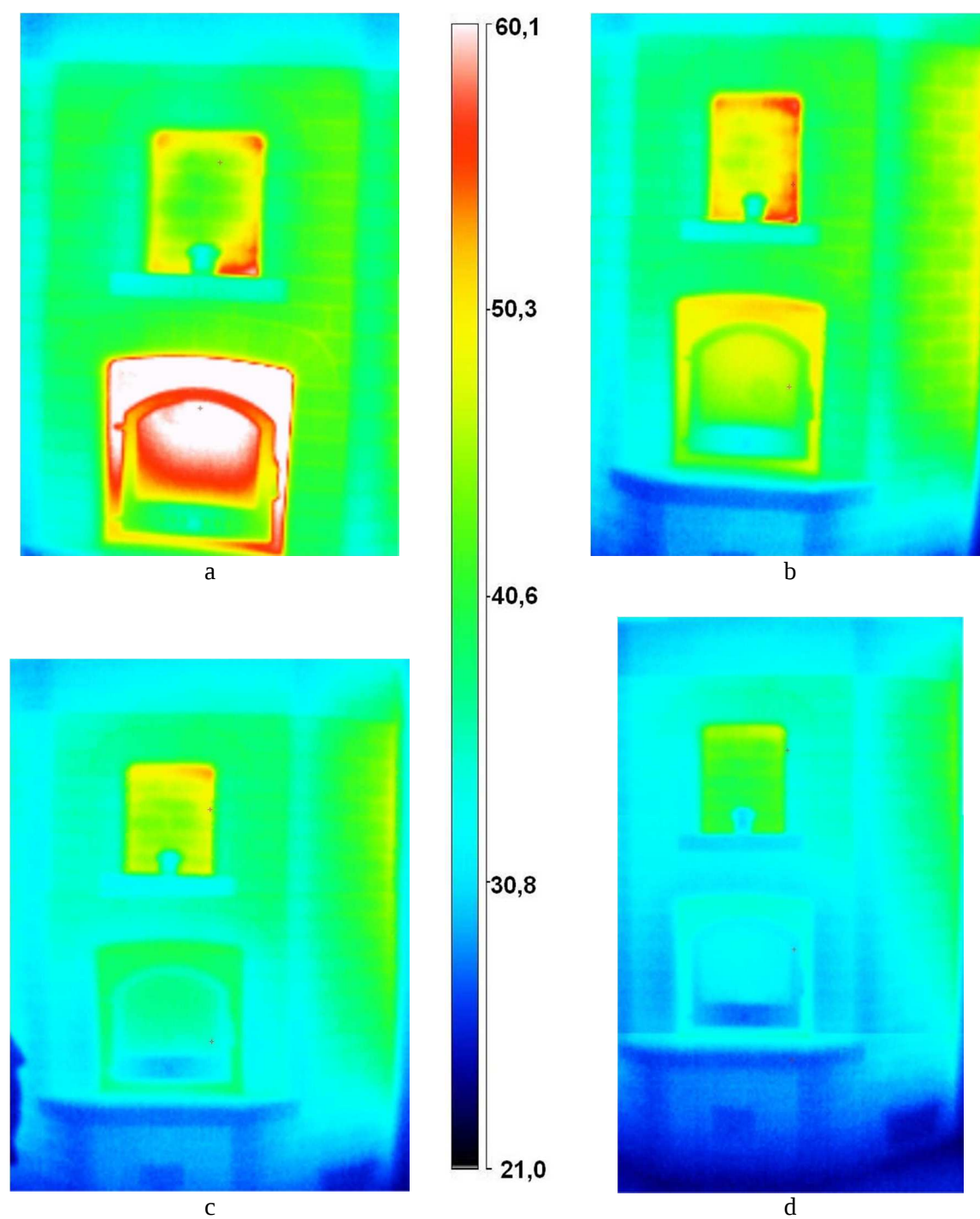


a



b

Joonis 7.5. Vaatluse all olev ahi nr 3: a – ahju eestvaade; b – ahju tagantvaade



Joonis 7.6. Termokaamera teatud pildid: a – 4 tundi peale kinni panemist; b – 8 tundi peale kinni panemist; c – 16 tundi peale kinni panemist; d – 22 tundi peale kinni panemist

Joonisel 7.6 (a) on soojuspilt, kui ahju kinni panemisest on möödunud 4 tundi. Jooniselt on näha, et ahi on soojenenud umbes 45 °C-ni. Ahju ehitatud süvendis küünib temperatuur üle 50 °C ja väljapoole ulatuva osa temperatuur on ligikaudu 35 °C. Nurgad on soojenenud ligikaudu 35 °C-ni. ja 4 tundi peale ahju kinni panemist oli toa temperatuur tõusnud 1 kraadi ning pildistamise hetkel oli toas sooja 22 °C.

Joonisel 7.6 (b) on ahju kinni panemisest möödunud 8 tundi. Jooniselt on näha, et ahju ukse juures on temperatuur langenud. Ahju tehtud süvendi temperatuur on natuke tõusnud ja ülejäänud ahju temperatuurides muutusi märgata ei ole. Toa temperatuur on pildistamise hetkel tõusnud 23 °C-ni.

Joonisel 7.6 (c) on ahju kinni panemisest möödunud 16 tundi. Ahju tehtud süvendis on temperatuur langenud 45 °C-ni. Ahju parem külg on temperatuuriga 40 - 45 °C ja ahju esimene külg on jahtunud temperatuurini 35 °C. 16 tundi peale ahju kinni panemist pole toa temperatuur muutunud ja püsib 23 °C juures..

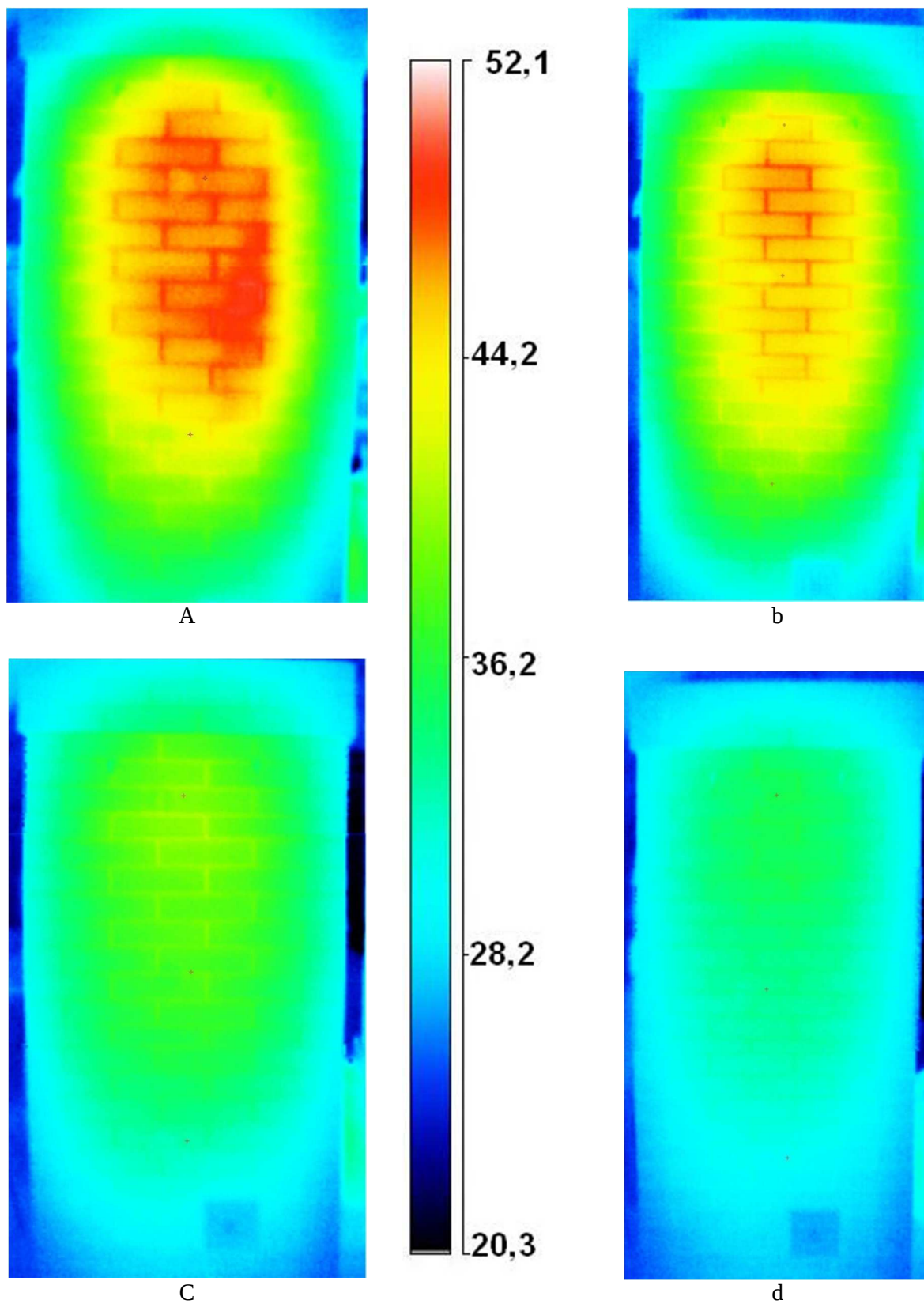
Joonisel 7.6 (d) on ahju kinni panemisest möödunud 22 tundi. Jooniselt on näha, et ahjus olevas süvendis on temperatuur langenud 40 °C-ni, ahju paremal küljel on temperatuur 38 °C ja ahju esimene külg on jahtunud temperatuurini 30°C. Toa temperatuur on ühe kraadi võrra langenud ja toas oli antud hetkel sooja 22 °C.

7.4 Ahi nr 4

Ahi nr 4 (joonis 7.7) on valminud aastal 2008. See on neljakandiline, tellisahi. Ahi asub maja teisel korrusel. Maja on 2008 aastal renoveeritud ja soojustatud. Ahi kütab ühte suurt ruumi, kokku 60 m². Mõõtmise ajal oli välistemperatuur -5 °C. Toa temperatuur ahju küdema panemise hetkel oli 20 °C.



Joonis 7.7. Vaatluse all olev ahi nr. 4



Joonis 7.8. Termokaamera teatud pildid: a – 4 tundi peale kinni panemist; b – 8 tundi peale kinni panemist; c – 16 tundi peale kinni panemist; d – 22 tundi peale kinni panemist

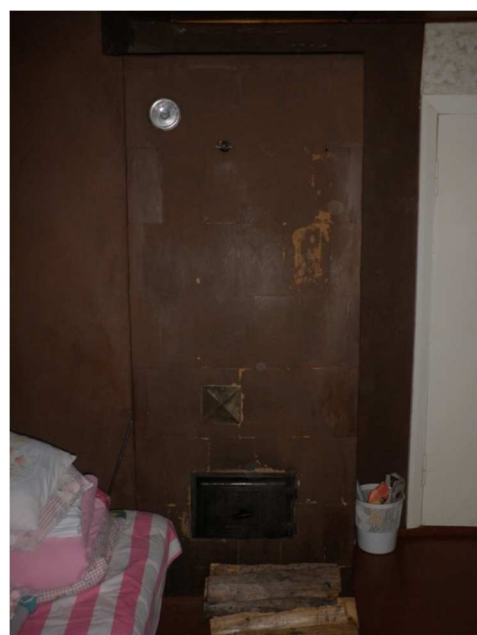
Joonisel 7.8 (a) on termokaamera pilt, kui ahju kinni panemisest on möödunud 4 tundi. Jooniselt 7.8 (a) on näha, et ahju külge on soojenenud umbes 45 °C-ni, üksikud kohad isegi 50 °C-ni. Nurgad on soojenenud ligikaudu 35 °C-ni. Toa temperatuur on tõusnud 1 kraadi võrra ning pildistamise hetkel oli toas sooja 21 °C.

Joonisel 7.8 (b) on ahju kinni panemisest möödunud 8 tundi. Jooniselt on näha, et ahju temperatuur on ligikaudu 45 °C. Ahju nurgad pole jahtunud, vaid säilitavad oma endist temperatuuri. Toa temperatuur on veidi tõusnud ja pildistamise hetkel oli toas sooja 22 °C.

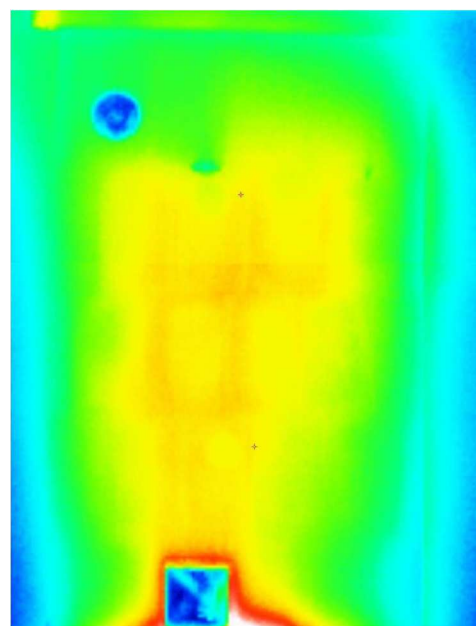
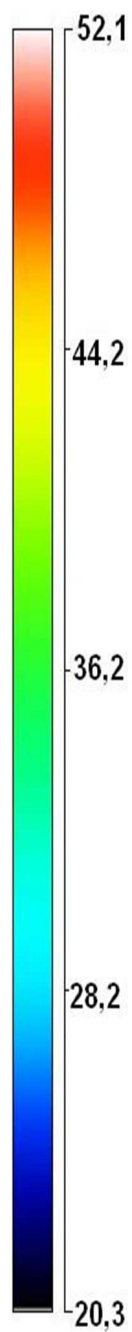
Joonisel 7.8 (c) on ahju kinni panemisest möödunud 16 tundi. Soojuspildilt on näha, et ahju külge on jahtunud temperatuurini 40 °C ja ahju nurgad on jahtunud temperatuurini 30 °C. Toa temperatuur oli pildistamise hetkel ikka 22 °C.

Joonisel 7.8 (d) on ahju kinni panemisest möödunud 22 tundi. Jooniselt on näha, et ahju külge ülemine osa on säilitanud kõige suurema temperatuuri, ligikaudu 35 °C. Ülejäänud ahi on ühtlase temperatuuriga 30 °C. 22 tundi peale ahju kinni panemist oli toa temperatuur 22 °C.

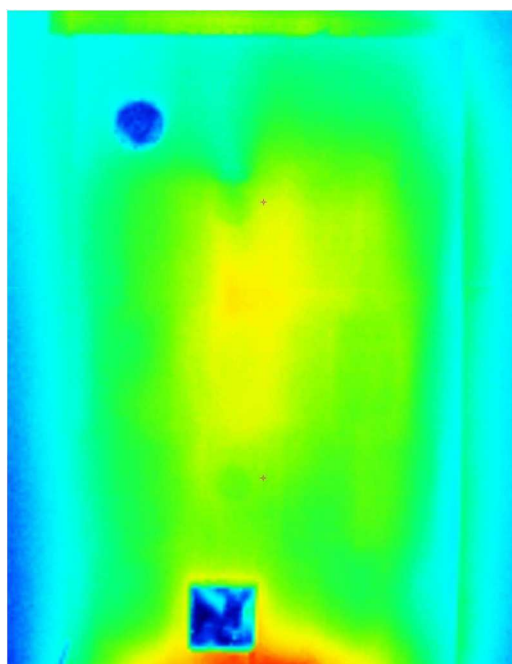
7.5 Ahi nr 5



a



b



c



d

Joonis 7.9. Pildid ahjust nr 5: a – pilt ahjust millest tehti termofotod; b – 4 tundi peale kinni panemist; c – 9 tundi peale kinni panemist; d – 16 tundi peale kinni panemist

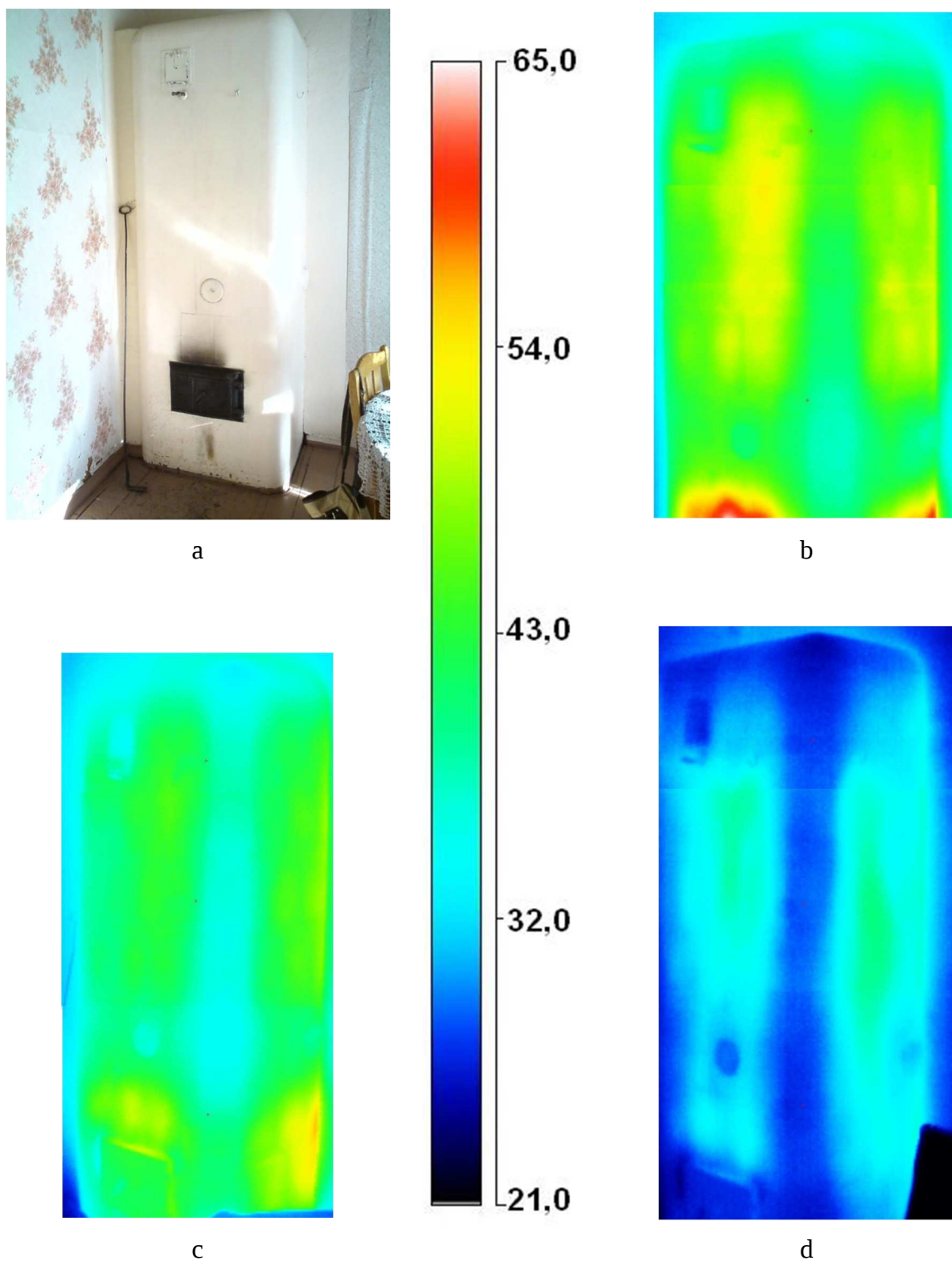
Ahi nr 5 (joonis 7.9) on valminud aastal 1973. See on neljakandiline, potikivi ahi. Ahi asub majas, mis ei ole hästi soojustatud. Majal on vanad aknad ning põrand soojustamata. Ahi kütab kahte tuba, kokku 35 m². Mõõtmise ajal oli välistemperatuur -5 °C. Toa temperatuur ahju küdema panemise hetkel oli 17 °C.

Joonisel 7.9 (b) on näha termopilt 4 tundi peale ahju kinni panemist. Vaadeldava ahju külge on soojenenud umbes 45 °C-ni. Laiemalt on soojenenud ahju ülemine osa. Nurgad on soojenenud 30 - 35 °C-ni. Samuti on näha, et ka sein ahju ümber on soojenenud ligikaudu 30 – 35 °C. Toas on temperatuur tõusnud 1 kraadi võrra ning pildistamise hetkel oli toas sooja 18 °C.

Joonisel 7.9 (c) on ahju kinni panemisest möödas 9 tundi. Jooniselt võib näha, et ahju temperatuur on langenud ligikaudu 5 °C. Samuti on näha, et ahi on ülevalt poolt laiemalt soojem kui alt poolt. Ahju kõrval oleva seina temperatuur muutunud ei ole. Toa temperatuur on pildistamise hetkel 20 °C.

Joonisel 7.9 (d) on näha ahju temperatuuri muutumine 16 tundi peale ahju kinni panemist. Ahju külje temperatuur on nüüd 30 °C - 35 °C. Nurkade temperatuur on 25 °C. Toa temperatuur on tõusnud 20 °C-ni.

7.6 Ahi nr 6



Joonis 7.10. Pildid ahjust nr 6: a – pilt ahjust millest tehti termofotod; b – 4 tundi peale kinni panemist; c – 8 tundi peale kinni panemist; d – 21 tundi peale kinni panemist

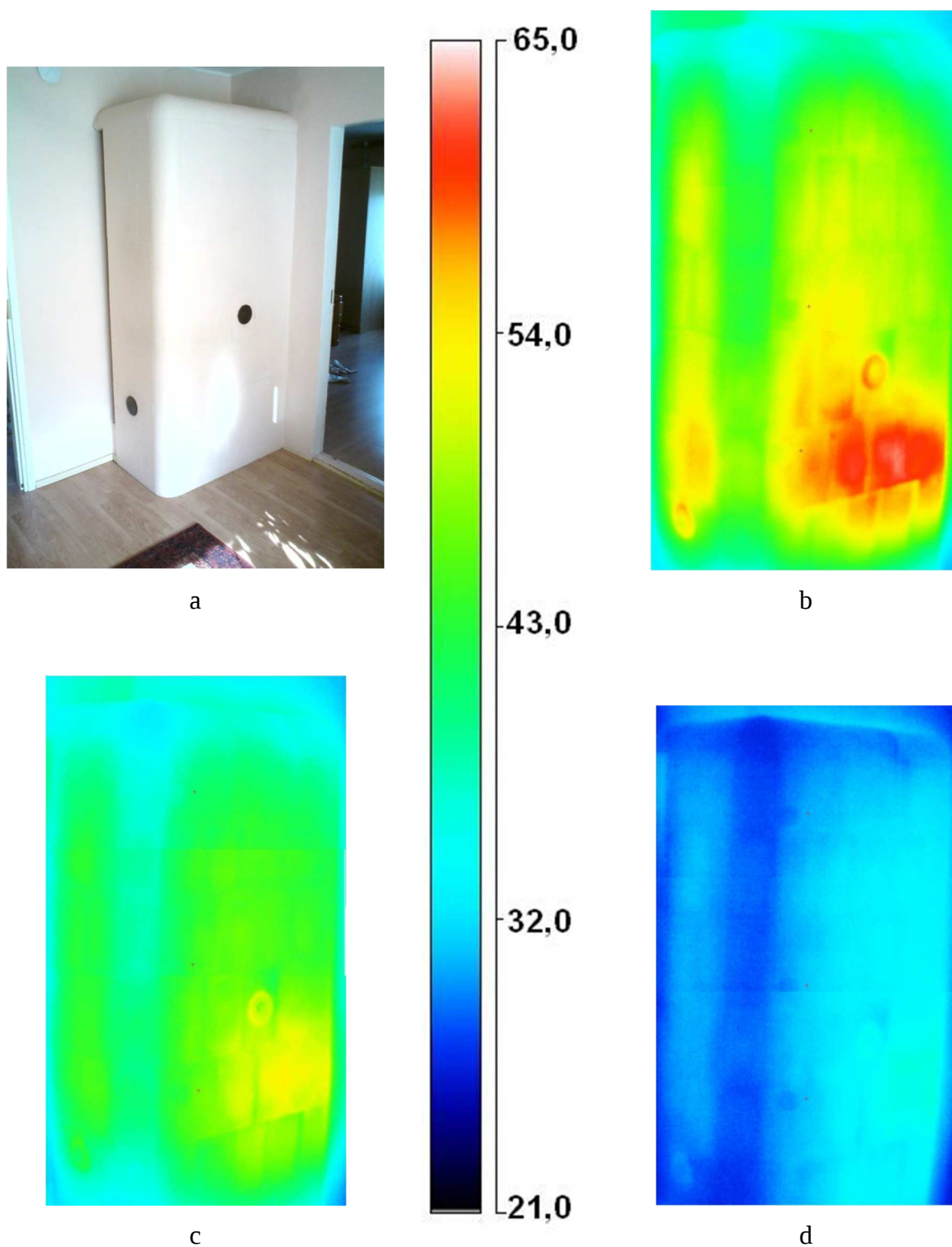
Ahi nr 6 (joonis 7.10) on valminud aastal 1951. See on neljakandiline, potikivi ahi. Ahi asub majas, mis on hästi soojustatud. Ahi kütab kahte tuba kokku ligikaudu 40 m². Mõõtmise ajal oli välistemperatuur 0 °C ja toa temperatuur ahju küdema panemise hetkel 21 °C.

Joonisel 7.10 (b) on soojuspilt 4 tundi peale ahju kinni panemist. Soojuspildilt on näha, et ahju külje temperatuur ulatub üle 50 °C. Nurgad on soojenenud 40 - 45 °C-ni. Samuti on näha et sein ahju ümber on soojenenud 30 – 35 °C. Toa temperatuur on tõusnud 1 kraadi võrra ning pildistamise hetkel oli toas sooja 22 °C.

Joonis 7.10 (c) on tehtud 8 tundi peale ahju kinni panemist. Pildilt on näha, et kolde kõrval ahju alumises osas küünib temperatuur 50 °C-ni. Ahju külje temperatuur ulatub 45 °C-ni. Nurkade temperatuur on 40°C. Sein ahju ümber on jätkuvalt temperatuuriga 30 – 35 °C. Toa temperatuur antud hetkel oli 24 °C.

Joonis 7.10 (d) on tehtud 21 tundi peale ahju kinni panemist. Sellel on näha, et ahju temperatuur on 35 °C. Üksikute kohtade temperatuur on ka 40 °C. Nurkade temperatuur on umbes 25 - 30 °C. Toa temperatuur oli 23 °C.

7.7. Ahi nr 7



Joonis 7.11. Pildid ahjust nr 7: a – pilt ahjust millest tehti termofotaod; b – 4 tundi peale kinni panemist; c – 8 tundi peale kinni panemist; d – 21 tundi peale kinni panemist

Ahi nr 7 (joonis 7.11) on valminud aastal 1953. See on ebestandartse kujuga, potikivi ahi. Ahi asub hästi soojustatud maja teisel korrusel ja kütab kokku ligikaudu 45 m² põrandapinda. Selle ahju kütmiseks kasutasin umbes 10 kg puid. Mõõtmise ajal oli välistemperatuur 0 °C. Toa temperatuur ahju küdema panemise hetkel oli 21 °C.

Joonisel 7.11 (b) on näha soojuspilt 4 tundi peale ahju kinni panemist. Ahju temperatuur on suurim kolde kõrgusel, kus temperatuur on tõusnud 65 °C-ni. Külje temperatuur ulatub üle 50 °C. Nurgad on soojenenud 43 - 47 °C-ni. Toa temperatuur on tõusnud 1 kraadi võrra ning pildistamise hetkel oli toas sooja 22 °C.

Joonisel 7.11 (c) on näha ahju temperatuuri muutumine 8 tundi peale ahju kinni panemist. Ahju temperatuur on jätkuvalt suurim kolde taga, 52 °C. Ahju külje temperatuur ulatub 45 °C-ni. Nurkade temperatuur on ligikaudu 40°C. Toa temperatuur oli 23 °C.

Jooniselt 7.11 (d) on näha, et ahju temperatuur on ligikaudu 32 °C. Nurkade temperatuur on umbes 25 - 30 °C. Sellel pildil on ahju kinni panemist möödunud 21 tundi. Toa temperatuur oli 22 °C.

8. AHJUDE SOOJENEMISE JA JAHTUMISE GRAAFIKUD

8.1. Ahju nr 1 soojenemise ja jahtumise graafik

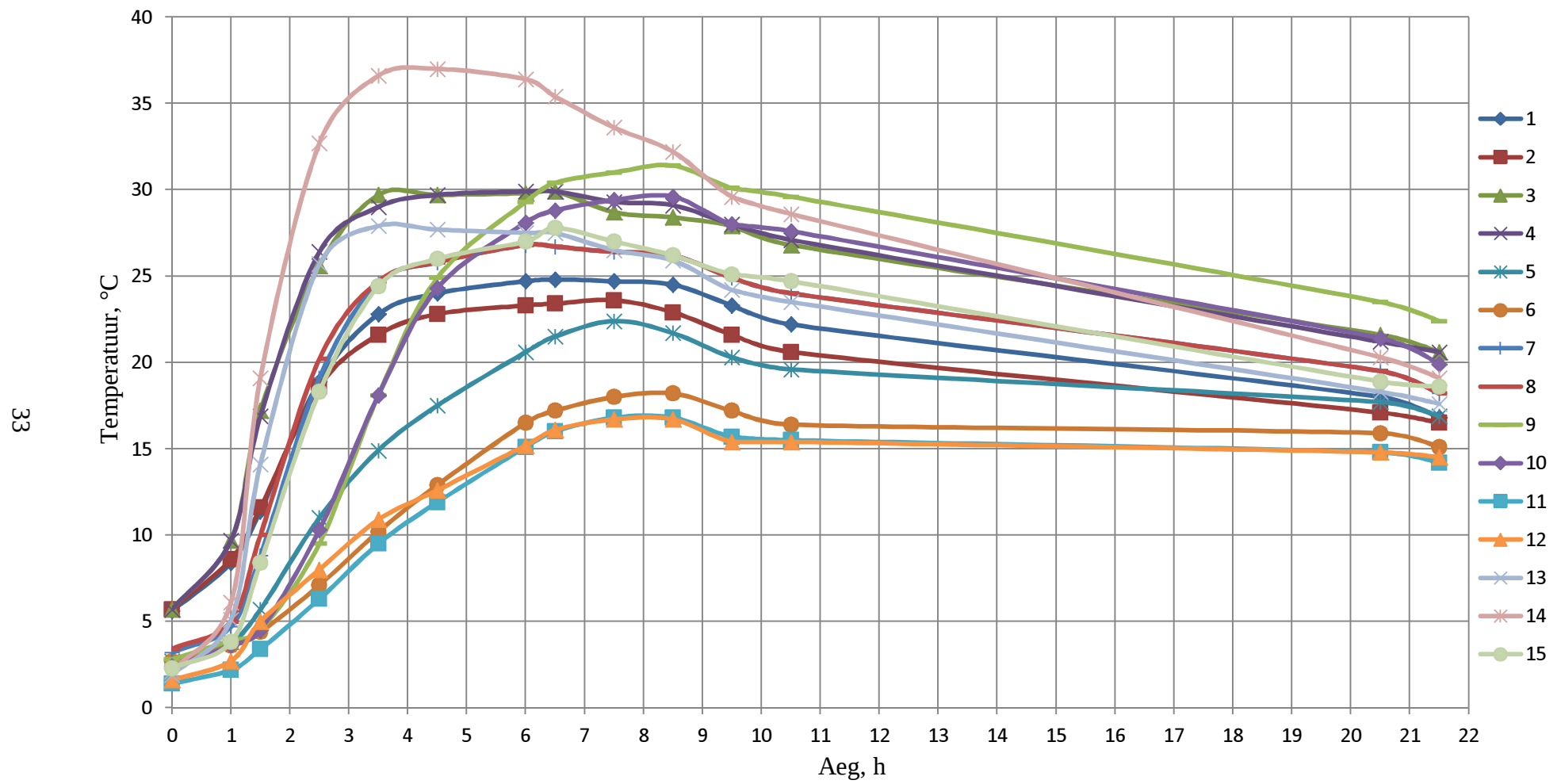
Ahjult nr 1 on valitud 15 erinevat punkti. Punktide asukohad on näha joonisel 8.1. Nende punktide temperatuuri on mõõdetud erinevatel kellaaegadel ja selle põhjal on koostatud ahju eri punktide soojenemise ja jahtumise graafik.



a

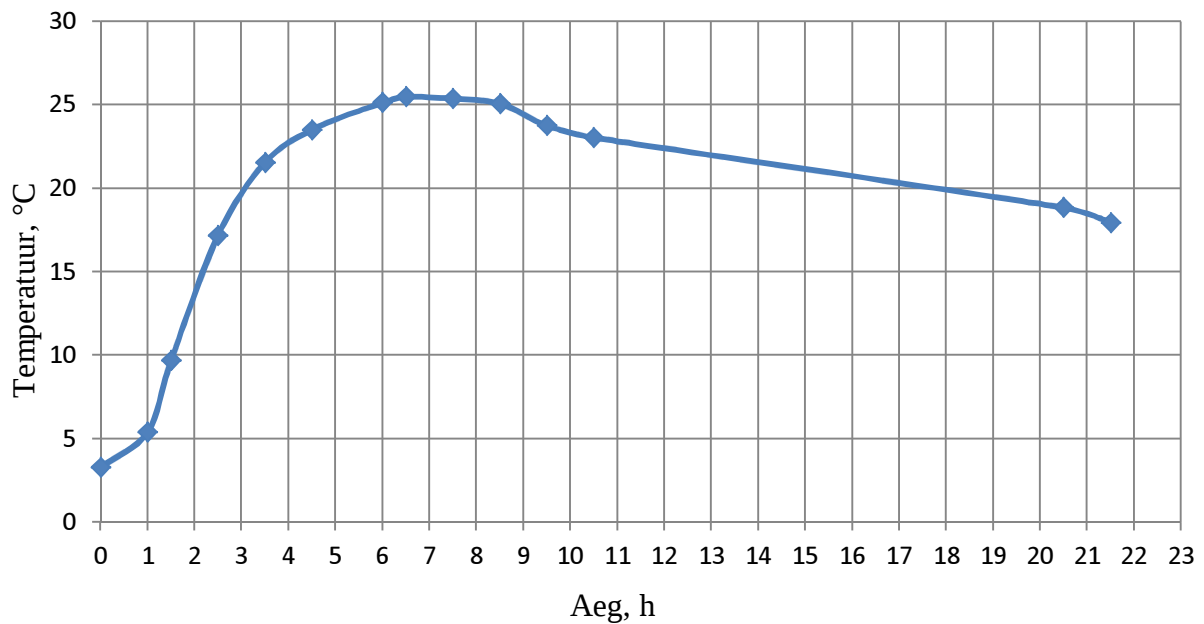
b

Joonis 8.1. Punktide asukohad ahjul: a – ahju esimene külg; b – ahju tagumine külg



Joonis 8.2. Ahju nr 1 soojenemise ja jahtumise graafik

Jooniselt 8.2 on näha, et suurima temperatuuri, 37 °C, saavutasid punkt nr 14, kui ahju süütamisest oli möödas 4 tundi. See punkt asub ahju kolde taga. Kõige vähem, 17 °C, tõuseb temperatuur punktides 11 ja 12, kui ahju süütamisest on möödas 8 tundi. Need punktid asuvad ahju tagumise külje üleval ääres. 21 tunni möödudes on kõige kõrgema temperatuuri, 22 °C, säilitanud punkt nr 9.



Joonis 8.3. Ahju nr 1 keskmise temperatuuri muutumine

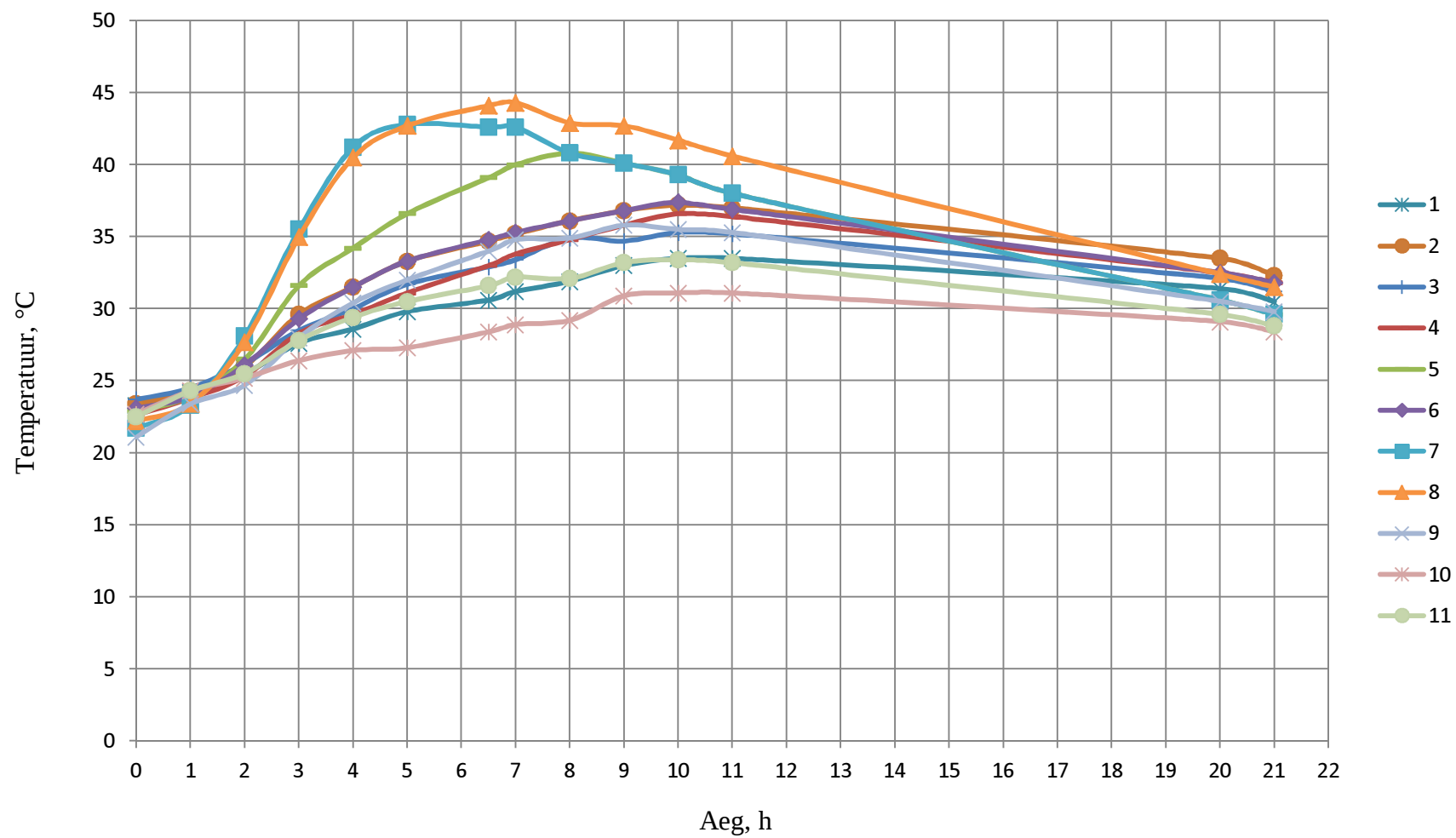
Jooniselt 8.3. on näha, et ahju keskmine temperatuur saavutab maksimaalse väärtuse 26 °C, kui ahju süütamisest on möödunud 7 tundi. 21 tunni möödudes on ahju keskmiseks temperatuuriks ligikaudu 18 °C. Ahi on jahtunud 14 tunniga 8 °C.

8.2. Ahi nr 2 soojenemise ja jahtumise graafik

Ahjult nr 2 on valitud 9 erinevat punkti. Punktide asukohad on näha joonisel 8.1. Nende punktide temperatuuri on mõõdetud erinevatel kellaaegadel ja selle põhjal on koostatud ahju eri punktide soojenemise ja jahtumise graafik.

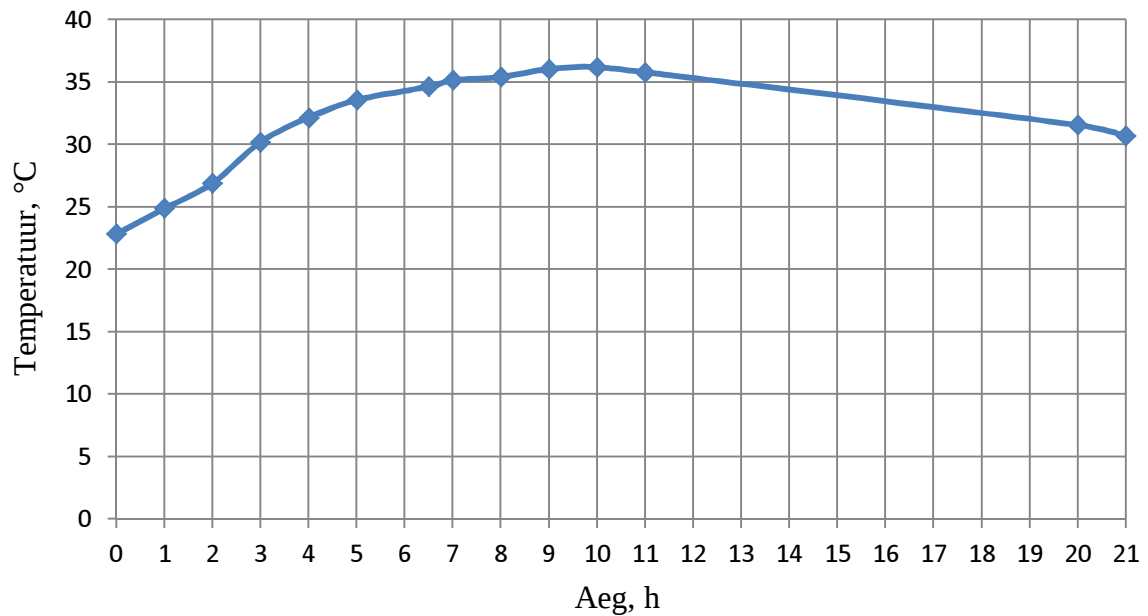


Joonis 8.4. punktide asukohad ahjul nr 2



Joonis 8.5. Ahju nr 2 soojenemise ja jahtumise graafik

Graafikult on näha, et suurima temperatuuri, 43 °C, saavutasid punktid 7 ja 8, kui ahju süütamisest oli möödas 7 tundi. Need punktid asuvad ahju kolde kõrval. Kõige vähem, 31 – 32 °C, tõuseb temperatuur punktides 10 ja 11, kui ahju süütamisest on möödas 9 tundi. Need punktid asuvad ahju nurkades.

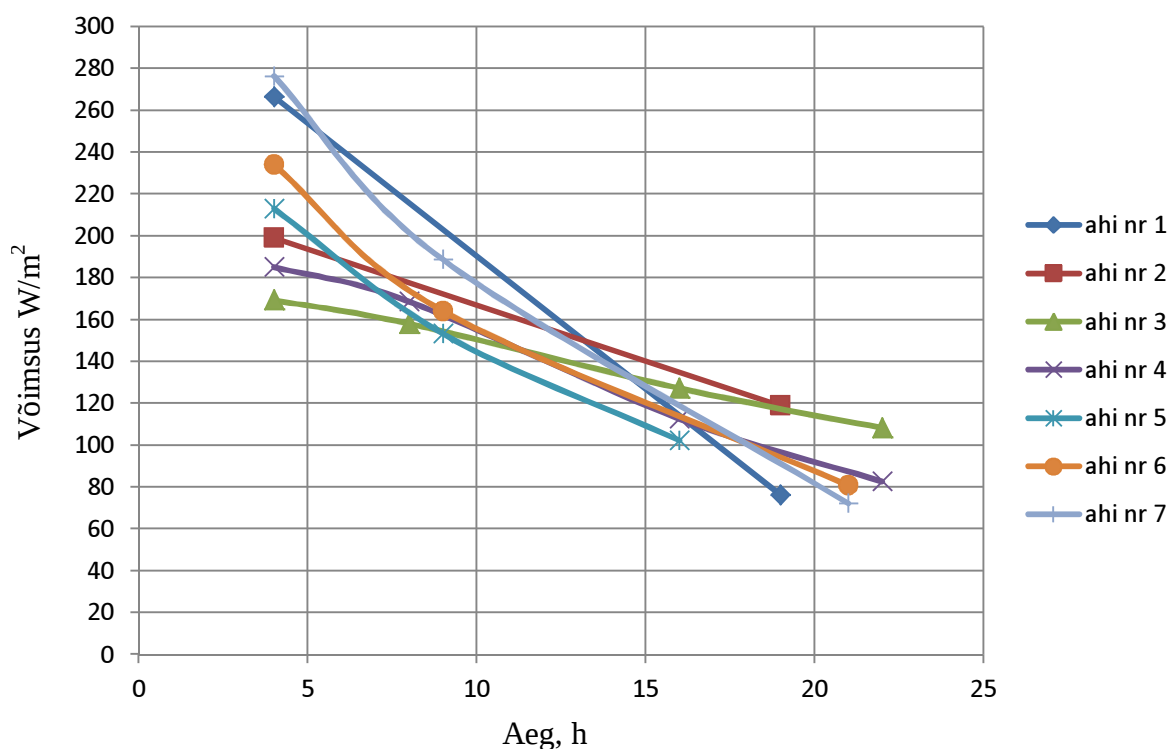


Joonis 8.6. Ahju nr 2 keskmise temperatuuri muutumine

Jooniselt 8.6. on näha, et ahju keskmine temperatuur saavutab maksimaalse väärtuse 36 °C, kui ahju süütamisest on möödunud 10 tundi. 21 tunni möödudes on ahju keskmiseks temperatuuriks ligikaudu 31 °C. Ahi on jahtunud 10 tunniga 5 °C.

9. AHJUDE VÄLJAANTAVATE VÕIMSUSTE VÕRDLUS

Arvutati peatükis 6 välja toodud metoodika abil ahjude väljaantavad võimsused. Võimsuste arvutamiseks kasutati ahjudest tehtud termopilte. Ahjude keskmine pinnatemperatuur leiti termokaameraga kaasas olnud programmiga InsideIR 4.0.



Joonis 9.1. Ahjude võimsuste muutumine

Joonisel 9.1. on välja toodud 7 erineva ahju võimsuse muutumine. Jooniselt on näha et kõige kiiremini väheneb ahju nr 1 võimsus. See tuleneb sellest, et ruumis, milles ahi asus, oli temperatuur ahju küdema panemise hetkel kõigest 4 °C ja see tagab väga intensiivse soojuse ülekande ruumi. Samuti on väga kiire võimsuse vähenemine ahjudel 5, 6 ja 7. Selle põhjuseks on ahjude õhukesed seinad. Õhukeste seinade tõttu läheb ahju pinnatemperatuur kõrgeks ja seega tekib intensiivne soojusülekanne ruumi. Samuti on õhukesed seinad kergemad kui paksud seinad ja seetõttu salvestavad vähem energiat. Ahju nr 5 kiire võimsuse langus tule ka halvasti soojustatud majast. Külmemate ilmade korral jääb seal ahju antavast soojusest puudu. Puudujääv energia saadakse elektriküttest.

Ahjud 2, 3 ja 4 on uuemad telliskiviahjud. Jooniselt 9.1. on näha, et nendel ahjudel on 4 tundi peale ahju kinni panekut võimsus väiksem kui ülejäänud vaatluse all olevatel ahjudel. Samas ei vähene nende ahjude võimsused nii kiiresti kui teistel ahjudel. See tuleb sellest et nende ahjude seinad on paksud ja seega püsivad nad kauem soojad. Sellised ahjud toimivad ainult hästi soojustatud majades, sest kui maja on halvasti soojustatud ei suuda madala külje temperatuuriga ahi külmade ilmade korral maja ära kütta.

Ahi nr 3 võimsus väheneb ajas natuke rohkem kui teiste sama tüüpi ahjudel, sest selle ahju tegemisel on rohkem tähelepanu pööratud ahju dekoratiivsele välimusele. Seetõttu on ahi kaotanud natuke oma väljaantavas võimsuses.

KOKKUVÕTE

Ahjud soojenevad kütuse põlemisel eralduva soojuse mõjul, mis kandub üle koldeseintele ja ahjulõõridele. Kütmisel salvestavad ahjud endasse soojust, mille hiljem pikkamööda annavad üle toaõhule. Kuna ahjud on erineva ehitusega ja asuvad erinevates keskkondades on nende soojenemise ja jahtumise kiirused erinevad, sellest tulenevalt annavad nad välja erineva hulga soojusenergiat.

Käesolevas töös on lühidalt kirjeldatud seitsme eri ahju soojenemist ja jahtumist. Selleks on pildistatud neid termokaameraga. Lisaks termokaameraga pildistamisele on kahel ahjul lasertermomeetriga üles võetud ka ahju erinevate punktide soojenemise ja jahtumise graafikud.

Töö koosneb kahest osast. Esimeses osas antakse ülevaade ahjude ajaloo ja ehitusest, kirjeldatakse ahjus toimuvat soojusvahetust ning tuuakse välja ahju pinna võimsuse arvutamise meetodika.

Teises osas analüüsitakse erinevate ahjude termograafilisi pilte, lasertermomeetriga mõõdetud punktide soojenemist ja jahtumist ning võrreldakse ahju pinna võimsusi.

Tööst tuleb välja, et tänapäeval on potseppadel suund ehitada paksema seinaga ahjusid kuna need püsivad kauem soojad. Seega peab neid harvem kütma. Paksuseinaliste ahjude ehitamine eeldab aga, et maja oleks hästi soojustatud, kuna paksuseinaliste ahjude temperatuur ei tõuse nii kõrgele ja seega ruumi antav soojusenergia jaguneb pikema aja peale. Halvema soojustusega majade puhul võib paksuseinalise ahju võimsus jääda liiga väikseks ja külmemate ilmade korral ei suuda tuba ära kütta.

KIRJANDUS

1. Veski, A. Ahjud, pliidad, kaminad. – Tallinn: Tormikiri OÜ, 2005. – 212 lk.
2. Arro, H., Koni, A., Kull, A., Mikk, I., Ots, A., Poobus, A., Rooraid, H., Õispuu, L. Soojustehnika käsiraamat. – Tallinn: Valgus, 1977. – 619 lk.
3. Talvari, A. Soojusfüüsika alused. Kättesaadav:
riksweb.sisekaitse.ee/index.asp?action=127&id=204 (30.05.2010)
4. Liiske, M. Sisekliima. 2002. Kättesaadav:
lhu.emu.ee/downloads/Welfood/Sisekliima3.pdf (18.05.2010).

LISAD

Lisa A Kuiva õhu soojusfüüsikalised parameetrid [2]

t °C	ρ kg/m ³	c_p kJ/(kg·K)	$\lambda \cdot 10^2$ W/(m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ m ² /s	$\eta \cdot 10^6$ Pa·s	$\nu \cdot 10^6$ m ² /s	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Joonis A.1. Kuiva õhu soojusfüüsikalised parameetrid olenevalt temperatuurist rõhul
760 mmHg