



KAUGKÜTTE- JA KAUGJAHUTUSTORUSTIKE PAIKNEMISE ANALÜÜS KASUTADES LÕPLIK ELEMENTIDE MEETODI

Bakalaureusetöö

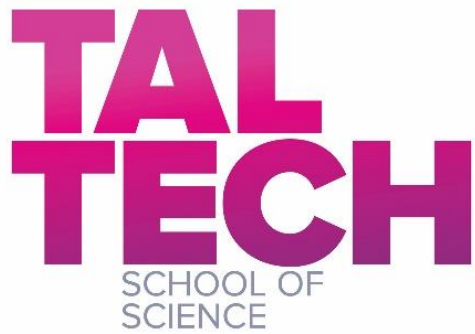
Üliõpilane: Andrei Suhodol

Üliõpilaskood: 155515YAFB

Juhendaja: Dmitri Nešumajev,

Energiatehnoloogia instituut, vanemteadur

Õppekava: Rakendusfüüsika



ANALYSIS OF THE LOCATION OF DISTRICT HEATING AND COOLING PIPING USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Bachelor thesis

Student: Andrei Suhodol

Student code: 155515YAFB

Supervisor: Dmitri Nešumajev,

Department of Energy Technology, Senior Researcher

Study program: Applied Physics

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Andrei Suhodol

[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Dmitri Nešumajev

[allkiri ja kuupäev]

Sisukord

Lühendite ja mõistete sõnastik	5
1 Sissejuhatus	6
2 Kaugküte ja kaugjahutus	7
2.1 Eelisoleritud toru	7
3 Analüütilise meetodi abil soojuskao arvutus	8
4 Numbrilise meetodi abil soojusülekanne arvutus.....	11
4.1 Näidis projekt.....	11
4.2 Mudeli koostamine	12
4.3 Võrgustiku jagamine	13
4.4 Ääritingimused.....	16
4.5 Analüüsi muutuvad väärtused	16
5 Tulemused ja Arutelu	17
5.1 Mudeli valideerimise tulemused	17
5.2 Kaugjahutusetorustiku paiknemise variandid	17
Kasutatud kirjanduse loetelu	19
Annotatsioon.....	21
Abstract	22
Lisad.....	23
Lisa 1 – Lihtlitsents.....	23
Lisa 2 – Gmsh kood	24
Lisa 3 – Elmer FEM solver kood	26

Lühendite ja mõistete sõnastik

Lühendid

KKT	Kaugküttetorustik
KJT	Kaugjahutustorustik
PV	Pealevool
TV	Tagasivool
LEM	Lõplik elementide meetod (Ingl k Finite Element Method, FEM)

Sümbolid

D	Läbimõõt, m
T	Temperatuur, K
H	Sügavus toru keskteljele, m
h	PV ja TV torude telgede vahekaugus, m
λ	Soojusjuhtivustegur, W/(mK)
R	Soojustakistus, (mK)/W
U	Soojusülekanalitegur, W/(m ² K)
α	Maapinna soojusülekanalitegur, W/(m ² K)
q	Soojusvoog (Soojuskadu), W/m ²

1 Sissejuhatus

Viimastel aastatel AS Utilitas Tallinn areneb Tallinnas kaugjahutusvõrgu. Selleks projekteerijatel on vaja leida ruumi maa all veel ühe uue kommunikatsiooni jaoks. Raskendab seda see olukord, et KJ on uus süsteem, millest ei ole mõelnud varem, kui projekteeriti linnad, teed, tänavad, maa-alused kommunikatsioonid ning jääb ruumi puudus. Kuna võrguvaldaja valdusel on nii KKT, kui KJT tavaliselt pannakse need 2 torustiku kõrvuti, selleks et kokku hoida ruumi ja ehituse kulud. Mõnedel olukordadel isegi seda ei anna piisavalt ruumi ja on vaja välja mõelda erilahendused.

Tavaliselt KKT uurimine, modelleerimine põhineb see soojuskaodude analüüsil [1] [2] [4] [5]. Selleks autorid loovad mudelid kasutades numbrilisi meetodeid, nt Lõplik elementide meetod, Lõplik piirjoone meetod jms. Mudeli põhjal võrreldatakse erinevad olukorrad. Tavaliselt tuleb numbrilise mudeli kasutamiseks kõigepealt veenduda väljatöötatud mudeli valiidsuses. Seda tehakse kas võrreldes mudeli tulemusted eksperimentaalse katsega või analüütilise arvutamisega, näiteks P. Wallenten uuris statsionaarse oleku soojuskadu KKT-s ja rakendas mitmepooluselist meetodit, et määratleda sümmeetriline ja asümmeetriline olukorda soojuskao leidmiseks [6]. A. Hlebnikov tõi näided kuidas leida soojuskadu Soojusülekande teguri põhjal [7].

Antud töö autor ei ole leidnud uurimisi, kus vaadati KKT ja KJT koos seega käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on valitud analüüsida kaugkütte- ja kaugjahutustorustike omavahelist mõjud ja selle põhjal vaadata kas on viis, kuidas paigutada torud, et säästa ruumi ja ei suurendada soojusevoog kaugjahutustorustiku poole. Selleks võetakse aluseks HeatConsult OÜ töö nr 2162, kus KK ja KJ jaotustorustikud on paigaldatud vertikaalselt üksteise lähedal.

2 Kaugküte ja kaugjahutus

Kaugküte on tsentraliseeritud viisil soojust toomine tarbijani (elamud, büroohooned jms). See tähendab, et toodetud soojus katlamajast või koostootmisjaamast soojuskandja abil (tavaliselt kuum vesi) suunatakse kliendi hoone soojussõlmesse läbi välisvõrgu torustiku. Soojussõlmes soojusvaheti abil kasutab tarbija seda soojus hoone kütmisel, tarbevee soojendamisel. Soojuse ära andnud vesi suunatakse tagasi katlamajja või koostootmisjaama, kus see uuesti kuumutatakse.

Kaugjahutusel on sama põhimõte nagu kaugkütte, erinevus on sellest, et kasutatakse külma vett, selleks et jahutada hoonet.

Põhiline viis kuidas ehitatakse on maapealne või maa-alune torustik kanalis, ilma kanalita [8]. Antud töös vaadatakse maa-alust kanalita paigaldamist. KKT ja KJT jagunevad peale- ning tagasivoolu torust, mis omakorda koosnevad eelisoleeritud torudest ja torustikuelementidest.

2.1 Eelisoleeritud toru

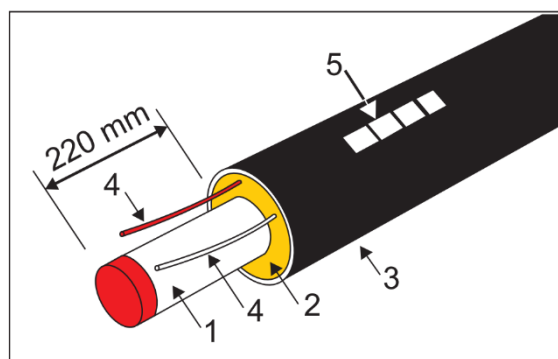
Eelisoleeritud toru on konsolideeritud torusüsteem, mis tähendab, et kõik elemendi on tugevasti seotud enda vahel, kui soojuste piknemise tõttu terastoru pikeneb, siis koos temaga pikenevad ka isolatsioon ja ümbristoru.

Eelisoleeritud toru ehitus ja materjalid on toodud joonisel 1:

- 1 Töötoru – teras;
- 2 Isolatsioon – polüuretaanvaht;
- 3 Ümbristoru – polüetüleen, HDPE;
- 4 Kaks 1,5 mm² vaskjuhet lekkeavastus-süsteemi jaoks, kus üks juhe;
- 5 Torustiku identifitseerimise silt

A preinsulated pipe consists of:

Pos.	Part	Material
1	Service pipe	Steel
2	Insulation	Polyurethane foam
3	Outer casing	Polyethylene, HDPE
4	Two 1.5 mm ² copper wires for surveillance	One wire is tinned
5	Pipe label	



Joonis 1. Logstori katoloogi järgi eelisoleeritud toru [9]

3 Analüütilise meetodi abi soojuskao arvutus

Soojushulk, mis läbib ajaühiku kohta järjestikku ühendatud soojustakistite ahelat, arvutatakse valemiga

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R} \quad (1)$$

Kus q – torustiku soojuskadu

ΔT – temperatuuri vahe vee temperatuuri toru sees ja välise temperatuuri vahel.

$\sum R$ – Soojustakistuse summa

Maa-aluse eelisoleeritud toru puhul soojustakistuse summa võrrandis (1) koos järgmisest osadest

$$\sum R = R_{tsp} + R_s + R_i + R_{pe} + R_{maa} \quad (2)$$

Kus R_{tsp} – töötoru sisepinna pinna soojustakistus

R_s – töötoru sein soojustakistus

R_i – isolatsioonikihi soojustakistus

R_{pe} – ümbristoru sein soojustakistus

R_{maa} – pinnase soojustakistus

Isolatsiooni ja maa takistused on palju suurem, kui töötoru sisepinna, töötoru sein ja ümbristoru takistused

$$R_{tsp} + R_s + R_{pe} \ll R_i + R_{maa} \quad (3)$$

seega kogu soojustakistuse valemi (2) võib asendada ainult isolatsiooni ja maa soojustakistusega.

$$\sum R = R_i + R_{maa} \quad (4)$$

Soojustakistus läbi toru isolatsiooni saab leida

$$R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{D_i}{D_s} \quad (5)$$

Kus λ_i – isolatsiooni soojusjuhtivustegur

D_i – isolatsiooni kihi väline läbimõõt

D_s – isolatsiooni kihi sinene (töötoru väline) läbimõõt

Maapinna soojustakistuse määramiseks tuleb lisada täiendav „fiktiivne“ pinnasekiht paksusega H_f (5). See on pinnase kiht, mille takistus asendab tegelikku konvektiivse soojusülekanne takistust maapinnalt õhku [104, 106, 108]

$$H_r = H + H_f = H + \frac{\lambda_{maa}}{\alpha_0} \quad (6)$$

Kus λ_{maa} – pinnase soojusjuhtivustegur, (mK)/W
 α_0 – soojusülekanetegur õhu poolt maapinna kihile, W/(m²K)
 H – reaalne sügavus toru keskteljeni, m

Soojusülekanetegur õhu poolt maapinna kihile vastavalt Helbnikovi analüüsile [7] võetakse see 15 W/(m²K).

Pinnase soojustakistus leitakse järgmise valemi abil

$$R_{maa} = \frac{1}{2\pi\lambda_{maa}} \ln \left[\frac{2H_r}{D_i} + \sqrt{\left(\frac{2H_r}{D_i}\right)^2 - 1} \right], \text{ kui } \frac{H}{D_i} < 2,0 \quad (7)$$

$$R_{maa} = \frac{1}{2\pi\lambda_{maa}} \ln \frac{4H_r}{D_i}, \text{ kui } \frac{H}{D_i} \geq 2,0 \quad (8)$$

Väikese sügavuse korral $\frac{H}{D_i} < 2,0$ maapinna temperatuur võib oluliselt ületada maapinna loomulikku temperatuuri. Vea vältimiseks soojuskadude arvutamisel on vaja kasutada välisõhu temperatuuri. Suure sügavuse korral $\frac{H}{D_i} \geq 2,0$ on maapinna temperatuur peaaegu identne maapinna loodusliku temperatuuriga. Soojuskadude arvutamisel tuleb kasutada maapinna loomulikku temperatuuri toru telje sügavusel. [7]

Soojustakistus arvestades soojusevahetus PV ja TV torude vahel leitakse järgmise valemi abil

$$R_0 = \frac{1}{2\pi\lambda_{maa}} \ln \left[1 + \sqrt{\left(\frac{2H_r}{h}\right)^2} \right] \quad (9)$$

Kus h – horisontaalne vahekaugus torude keskteljest

Soojuskaod arvutamiseks on vaja veel arvutada soojusülekaneteguri PV toru jaoks järgmise valemi abil

$$U_p = \frac{R_{i,t} + R_{maa,t}}{(R_{i,p} + R_{maa,p})(R_{i,t} + R_{maa,t}) - R_0^2} \quad (10)$$

TV toru jaoks järgmise valemi abil

$$U_t = \frac{R_{i,p} + R_{maa,p}}{(R_{i,p} + R_{maa,p})(R_{i,t} + R_{maa,t}) - R_0^2} \quad (11)$$

Soojusülekanetegur arvestades soojusevahetus PV ja TV torude vahel leitakse järgmise valemi abil

$$U_{p,t} = U_{t,p} = \frac{R_0}{(R_{i,p} + R_{maa,p})(R_{i,t} + R_{maa,t}) - R_0^2} \quad (12)$$

- Kus U_p – PV toru soojusülekanndegur
 U_t – TV toru soojusülekanndegur
 $R_{i,t}$ – TV toru isolatsiooni kihi soojustakistus
 $R_{maa,t}$ – TV toru pinnase soojustakistus
 $R_{i,p}$ – PV toru isolatsiooni kihi soojustakistus
 $R_{maa,p}$ – PV toru pinnase soojustakistus

PV ja TV toru soojuskaod arvutatakse järgmiselt

$$q_p = U_p(T_p - T_{maa}) - U_{p,t}(T_t - T_{maa}) \quad (13)$$

$$q_t = U_t(T_t - T_{maa}) - U_{t,p}(T_p - T_{maa}) \quad (14)$$

- Kus T_p – PV toru vee temperatuur
 T_t – TV toru vee temperatuur
 T_{maa} – Pinnase temperatuur

PV ja TV toru soojuskaod koos annavad kogu maa-aluse torustiku soojuskadu

$$q = q_p + q_t \quad (15)$$

4 Numbrilise meetodi abil soojusülekanne arvutus

Numbriline arvutus on tehtud Elmer FEM tarkvaras. Elmer FEM on avatud lähtekoodiga multifüüsikaline simulatsioonitarkvara, mis annab võimalust arvutada mitu erinevat võrrandit ühes mudelis. Soojuse võrrandi arvutamiseks Elmer lähtub energia jäävuse seadusest ja kuna mudelis käsitletakse ainult soojusjuhtivust, kasutatakse veel Fourier' seadust selle modelleerimiseks [12].

Lõpliku elementide meetodiga Elmer simuleerib temperatuuri jaotamist ja selle põhjal arvutab soojusvoogu. Voogude arvutamiseks Elmer kasutab Poissoni võrrandit [12]. Statsionaarse oleku ja Fourier' seaduse põhjal soojusvoo arvutamiseks saab arvestada Poissoni võrrandit järgnevalt:

$$q = -\lambda \nabla T \quad (16)$$

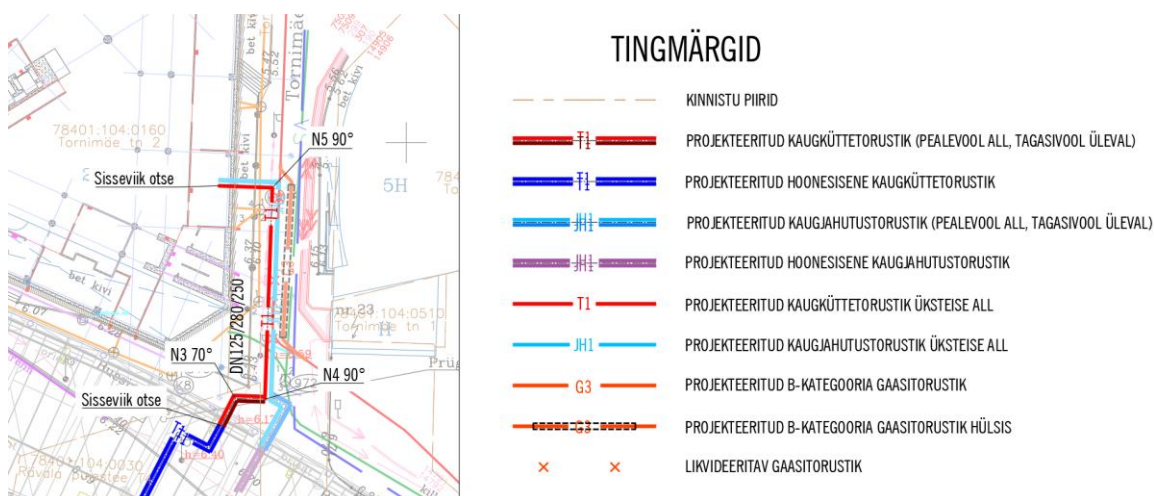
Kus λ – soojusjuhtivustegur, (mK)/W
 ∇T – temperatuuri gradient, K/m.

Kolmemõõtmelistes Descartesi koordinaatides saab võrrandit lahti kirjutada järgnevalt

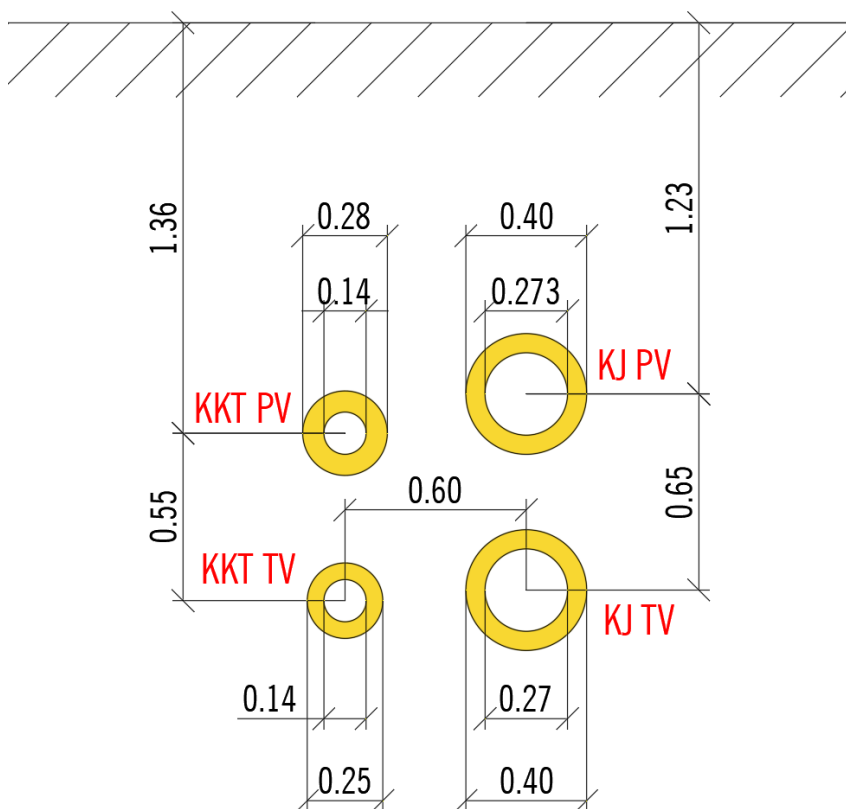
$$\bar{q} = c \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (17)$$

4.1 Näidis projekt

Vaatame Heatconsult töö nr 21062 osa, kus kinnistule Tornimäe tn 2 projekteeritud torustikud. Pärast väljundit maa-aluse parklast tehakse kaks suunamuutus põlvedega. Esimeses põlves keeravad nii KKT kui KJT torud üks teise alla ja teises põlves nad on juba vertikaalses seisundis. Koht ühe meetri kaugusel põlvest N4 90° (vt joonis 2) on võtnud uuritavaks kohaks. Joonisel 3 on näha torustike paiknemist.



Joonis 2 Väljalõige kaugjahutustorustiku asendiplaani, töö nr 21062



Joonis 3. Torustike ristlõige

Heatconsult töös nr 21062 Kaugküttetorustikuks kasutatakse DN125/280/250 torud, mis tähendab, et terastoru on nimiläbimõõduga DN125 ja PV toru on 3. klassi isolatsiooniga 280mm, TV toru on 2. klassi isolatsiooniga 250mm. Kaugjahutus torustik koosneb eelisoleritud torust DN250/400, mis tähendab, et PV-le ja TV-le on sama toru, vastavalt tabelile 1.

Tabel 1 Eelisoleritud toru parameetrid

Toru	Terastoru läbimõõt ja seinapaksus, mm	Toru välisläbimõõt, mm	Ümbristoru seinapaksus, mm
DN125/280	139,7x3,6	280	3,9
DN125/250	139,7x3,6	250	3,6
DN250/400	273x5,0	400	4,8

4.2 Mudeli koostamine

Maa-aluse torustiku soojusülekanne koosneb soojusülekandest torus ja pinnase sees. Neid kahte protsessi mõjutavad paljud parameetrid, näiteks pinnase omadused, vedeliku vool toru sees. Analüüsi lihtsustamiseks esitatakse järgmised oletused:

- Vesi toru on homogeenne ja isotroopne;
- Soojusvool ja vedeliku voolamine on püsivad;

- Kuna temperatuurigradient risti toru on palju suurem kui piki toru temperatuurigradient, eeldatakse, et toru soojusjuhtivus on kahemõõtmeline ja temperatuurilangus mööda toru ei võta arvesse;
- Soojusomadused on konstantsed, sealhulgas soojusjuhtivus, tihedus ja erisoojus jne;
- Pinnase soojusjuhtivust mõjutavad paljud tegurid ja pinnase koosseis, niiskusesisaldus, tihedus jne, arvestades pinnase koostise ja veesisalduse ebaühtlust ja osa määramatust pinnase soojusjuhtivustegur on valitud 1,6 W/(mK);
- Vee soojusjuhtivus ja tihedus muutuvad koos temperatuuriga, kuid muutus on väike ja seda võib ignoreerida;
- Konstantne soojusvoo ääritingimus

Mudeli lihtsustatud eelduste tõttu ei pruugi arvutused kajastada tegelikke soojuskadusid, mis toimivad kaugküttesüsteemides. Tabelis 1 on toodud materjalide omadused, mis kasutatakse edasi.

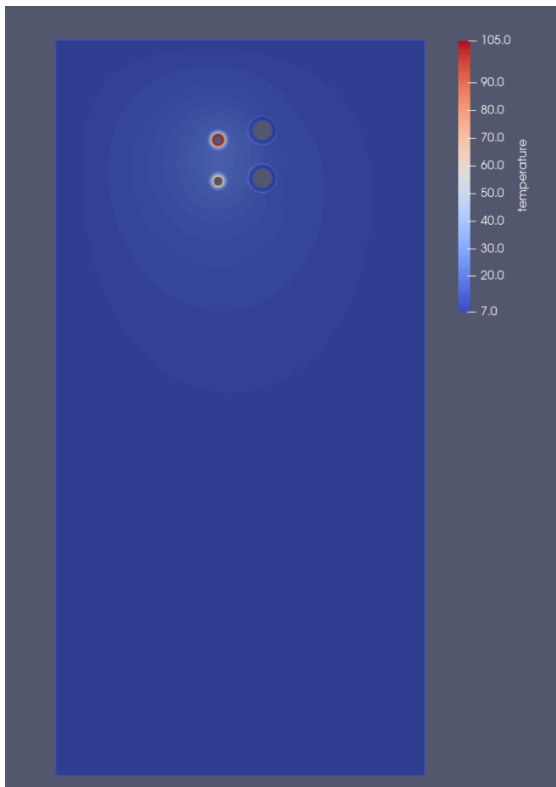
Tabel 2 Materjalide omadused

Nimi	Materjal	λ , W/(mK)	c , W/(mK)	ρ , W/(mK)
Töötoru	Teras	60	452	7860
Isolatsioon	PUR vaht	0,029	1200	80
Ümbristoru	HDPE	0,4	1900	965
Pinnas	Pinnas	1,6	1050	1760

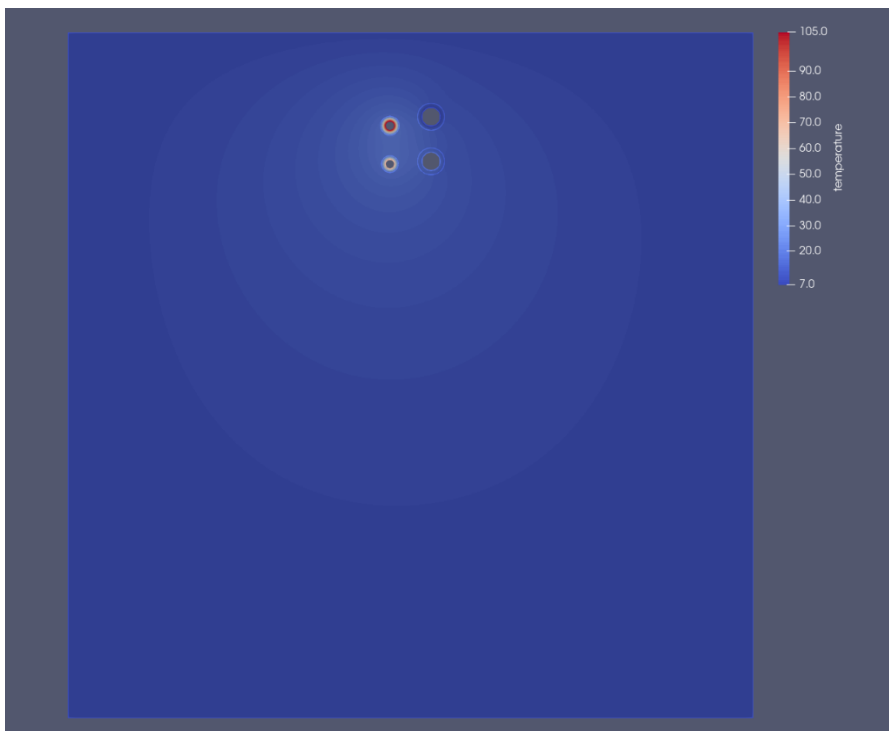
4.3 Võrgustiku jagamine

Võrgustiku koostamine viiakse lõplik elementide võrgustiku generaatoris Gmsh. Gmsh oli valitud, sest ta on lihtne, võimaldab luua 2d võrgustikud, annab võimalust ühes programmis määrata geomeetria ja luua võrgustikku.

Erinevate suuruste võrgustikud olid uuritud teistest töodes. A. Dalla Rosa enda töös [1] kasutas kõige suuremate piiridega võrku, laius 40m, kõrgus 20m. P. Oclon [11] kasutas 10m korda 10m võrgustiku oma arvutamisel, J. Danielewicz võrreldes erinevad suurused ja kuidas nad mõjutavad temperatuuri jaotust [13]. Antud töös on valitud , et 10m korda 10m võrgustik, mis mõjutab temperatuuri levimist vähemal määral (vt joonised 4, 5).

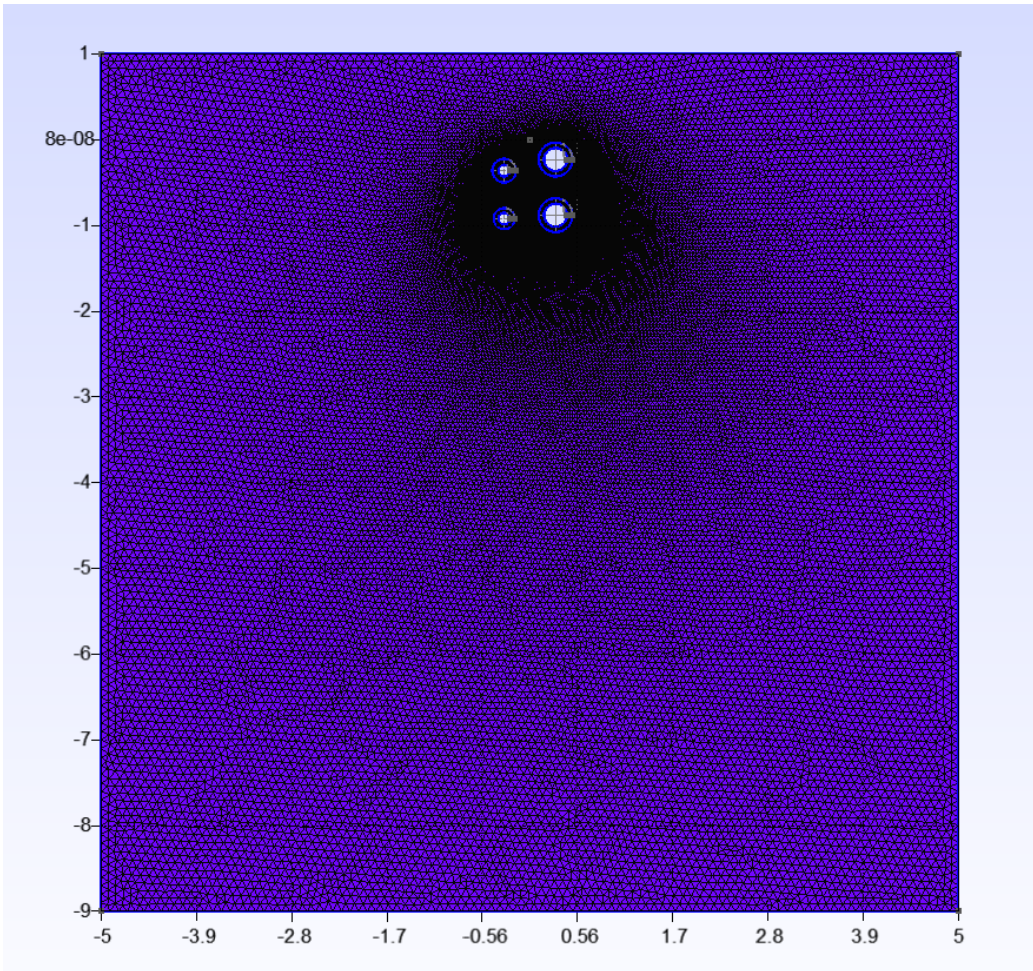


Joonis 4 Võrgustik laiusega 5m

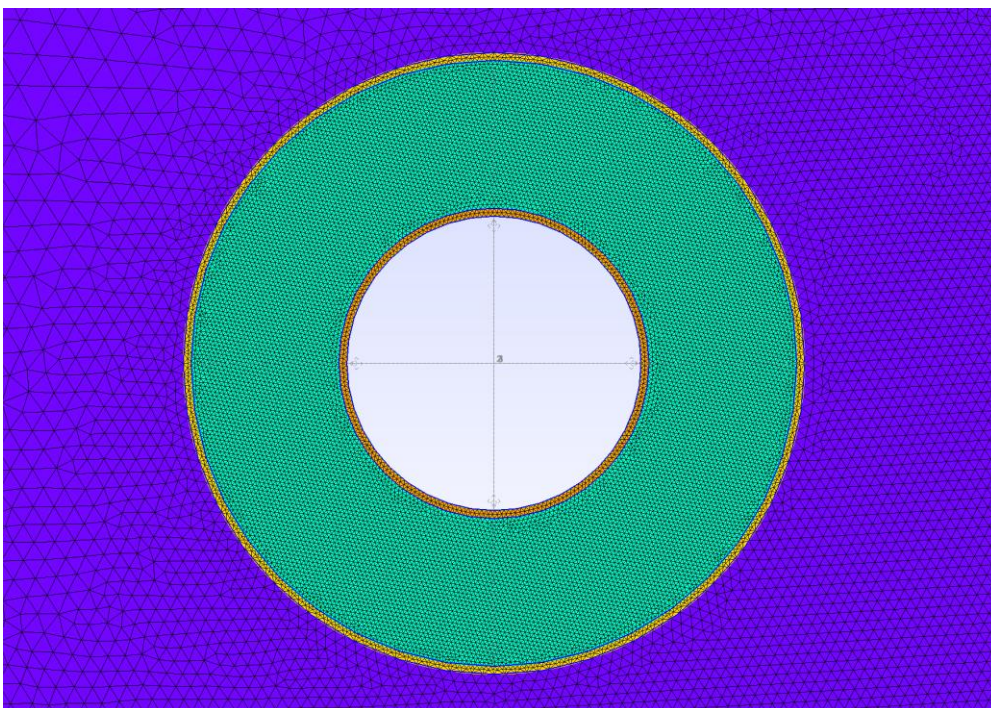


Joonis 5 Võrgustik laiusega 10m

Võrgustiku elemendi suuruse analüüs oli tehtud J. Danielewicz poolt [13]. Selle töö põhjal on valitud järgmised elemendid: maksimaalne elemendi suurus on 0.1m, see on pinnas (vt Joonis 6). Minimaalne elemendi suurus on 0.002m, toru kihid ja pinnase kihid ümber torud (vt Joonis 7). Kolmenurgelised elemendid on kasutatud [11].



Joonis 6 Võrgustik



Joonis 7 Toru võrgustik

4.4 Ääritingimused

Järgmised ääritingimused on ette antud mudeli koostamisel.

Dirichlet ääritingimuse järgi küljepoolsetele ja alumisele piiridele on ette antud konstantse temperatuuriga $T_{maa} = 8^{\circ}C$ ääritingimus.

Terastoru siseseinale ja maapinnale on ette antud soojusvoog, mis põhineb valemil [12].

$$-U \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_i) \quad (18)$$

Terastoru siseseinale on ette antud soojusvoo soojusülekandeegur vee poolt toru sisepinnale $\alpha_{vesi} = 3000 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ [108] ja vee temperatuur vastavalt graafikule. On arvestatud, et KJ võrk jahutab hoonetkogu aasta jooksul, hoones on olemas tarbijad kellel kogu aasta jooksul on vaja serveriruumi maha jahutada. Selle tõttu antud töös on arvestatud KKT talvise temperatuuri graafikuga, sest sellisel olukorras on suurem temperatuurne mõju KKT-st KJ-le. KKT puhul $T_p = 105^{\circ}C$, $T_t = 70^{\circ}C$ ja KJ temperatuurid on $T_p = 7^{\circ}C$, $T_t = 16^{\circ}C$.

Maapinnale nagu analüütilises valemis, LEM mudelis on arvestatud soojusülekandeeguriga õhu poolt maapinna kihile $\alpha_0 = 14,6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ [2, 13]. Keskmiseks aasta temperatuuriks, mis mõjutab maapinnast, on võetud $8^{\circ}C$.

4.5 Analüüsi muutuvad väärtused

Antud töös numbrilisega meetodiga loodud mudelit analüüsitakse kahe muutuja muutmise teel. Üks nendest on horisontaalne vahekaugus torustiku vahel, teine on kaugjahutuse PV ja TV torude asukohta vahetamine. Peatükis 8.2 võrreldakse kumb muutmine rohkem vähenab kaugküttetorustiku mõju kaugjahutusele.

5 Tulemused ja Arutelu

5.1 Mudeli valideerimise tulemused

Arvestades sellega, et analüütiline valemid ei käsitle olukorda nelja toruga (KKT+KJ) [5], antud töös arvutatakse eraldi KKT ja KJT mudeli soojuskaod analüütilise valemiga (15), mis pärast võrreldakse LEM meetodist saadud tulemustega.

Tabel 3 Mudeli valideerimise tulemused

	Soojuskaod, W/m ²		
	Analüütiline lahendus	Numbrilise lahendus	Suhteline viga, %
DN125/280/250	41,22	46,09	11,8%
DN250/400	67,34	70,94	5,3%

Mudelite võrdlemiseks analüütilise valemiga oli kasutatud väärtused peatükist 7.3 ja tabelist 1. Analüütilise lahendusel oli kasutatud sama pinnase temperatuur $T_{maa} = 8^{\circ}C$. Mõlemad olid võrreldud kasutades KKT temperatuuri graafikut, kuna suurem temperatuuride vahe võib resulteerida suuremas veas. Tulemused on toodud tabelis 3. On näha, et numbriline lahendus annab natuke suurema tulemuse. Keskmise viga kahe resultaate vahel on 8,6%.

5.2 Kaugjahutusetorustiku paiknemise variandid

Oli modelleeritud 3 erinevad horisontaalset vahekaugust kaugkütte- ja kaugjahutustorustike vahel. 1. variant 60cm on see mis oli projekteeritud ehitusprojekti nr 21062, 2. variant on 80cm ja 3. variant on 100cm. Igal vahekaugusel oli vaadatud kaks sündmust, KJ PV toru üleval, TV toru all ja teistpidi KJ PV toru all ja TV toru üleval. Tulemused on toodud tabelis 4 ja 5.

Tabel 4 Temperatuuri muutus sõltuvalt mudeli variandist

Temperatuur toru välispinnal, °C				
kaugus	KKT PV	KKT TV	KJ PV	KJ TV
KJ PV on üleval				
60cm	18,25	18,26	13,03	14,37
80cm	18,19	18,17	12,31	13,58
100cm	18,17	18,12	11,73	12,95
KJ PV on allpool				
60cm	18,32	18,01	13,78	13,5
80cm	18,21	17,99	13,00	12,77
100cm	18,16	17,99	12,37	12,19

Tabel 5 Soojakao muutus sõltuvalt mudeli variandist

Soojusvoog toru välispinnal, W/m ²				
	KKT PV	KKT TV	KJ PV	KJ TV
KJ PV on üleval				
60cm	28,06	22,75	9,41	7,94
80cm	27,95	22,67	7,5	6,35
100cm	27,89	22,64	6,23	5,36
KJ PV on allpool				
60cm	27,79	23,01	8,7	8,68
80cm	27,78	22,85	6,96	6,88
100cm	27,79	22,79	5,78	5,76

Tabelite 4 ja 5 põhjal on näha, et suurendamisel kaugust torustike vahel (20cm kaupa) toob suuremat mõju, kui panna KKT PV ja KJ PV diagonaali, vastas nurkades. Vahekauguse suurendamine tõi KJ PV torul soojusvoo vähendamist 9,41 W/m² kuni 7,5 W/m² (20,2%), kui kaugjahutuse PV ja TV torude omavaheline muutmise vähenes 9,41 W/m² kuni 8,7 W/m² (7,5%).

Peamine lahend, kuidas vähendada KKT soojusvoogu KJT poole on distantseerida torustikud üksteisest. Olukorral kus see on raskendav vähemal määral aitab KKT ja KJT PV torud paigaldada kaugemale üks teisest.

Kasutatud kirjanduse loetelu

[103 1] A. Dalla Rosa, H. Li and S. Svendsen, „Method for optimal design of pipes for low-energy district heating, with focus on heat losses“, *Energy*, vol. 36, no 5, pp. 2407-2418, May 2011.

[Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544211000259>

[104 2] B. Bøhm, „On transient heat losses from buried district heating pipes,“ *Inter. Journal of Energy Research*, vol. 24, no. 15, pp. 1311-1334, Dec. 2000. [Online]. Available:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1099->

[114X%28200012%2924%3A15%3C1311%3A%3AAID-ER648%3E3.0.CO%3B2-Q](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1099-114X%28200012%2924%3A15%3C1311%3A%3AAID-ER648%3E3.0.CO%3B2-Q)

[111 3] A. Arabkoohsar, M. Khosravi and A. S. Alsagri, „CFD analysis of triple-pipes for a district heating system with two simultaneous supply temperatures,“ *Inter. Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 141, pp 432-443, Oct. 2019. [Online]. Available:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931019322422>

[112 4] Qian Xu et al., „A new type of two-supply, one-return, triple pipe-structured heat loss model based on a low temperature district heating system,“ *Energy*, vol. 218, March 2021.

[Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220326761>

[113 5] T. J. Teleszewski, D. A. Krawczyk and A. Rodero, „Reduction of Heat Losses Using Quadruple Heating Pre-Insulated Networks: A Case Study,“ *Energies*, vol 12(24), no 4699, 2019.

[Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/24/4699>

[114 6] P. Wallenten, „Steady-state heat loss from insulated pipes,“ PhD thesis, Lund Institute of Technology; Department of Building Physics, Lund Institute of Technology, Sweden, 1991.

[Online]. Available: <https://portal.research.lu.se/en/publications/steady-state-heat-loss-from-insulated-pipes>

[102 7] A. Hlebnikov, „The Analysis of Efficiency and Optimization of District Heating Networks in Estonia“, Ph.D. dissertation, Faculty of Mechanical Engineering, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia, 2010. [Online]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/item/00b93d85-2994-41d0-baab-44868c226cb6>

[Online]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/item/00b93d85-2994-41d0-baab-44868c226cb6>

[107 8] S. Frederiksen and S. Werner, *District heating and cooling*. Lund, Sweden: Studentlitteratur, 2013.

[105 9] Logstor. „Product catalogue district energy,“ 2020 [Online]. Available:

<https://www.logstor.com/media/6506/product-catalogue-uk-202003.pdf>

[106 10] E. J. Sokolov, *District heating and heating networks*. Moscow, Russia: Izdatelstvo MEI, 2001.

[108 11] P. Ocioń, M. Nowak-Ocioń, A. Vallati, A. Quintino and M. Corcione, „Numerical determination of temperature distribution in heating network“, Energy, vol. 183, pp. 880-891, Sep. 2019. [Online]. Available:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219312952>

[109 12] P. Raback et al. „Elmer Models Manual,“ CSC – IT Center for Science, Dec. 2023. [Online].

Available: <https://www.elmerfem.org/blog/documentation/>

[110 13] J. Danielewicz, B. Śniechowska, M.A. Sayegh, N. Fidorów and H. Jouhara, „Three-dimensional numerical model of heat losses from district heating network pre-insulated pipes buried in the ground,“ Energy, vol 108, pp. 172-184, Aug. 2016. [Online]. Available:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215009068>

Annotatsioon

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on analüüsida kuidas kaugkütte- ja kaugjahutustorustike mõjutavad üksteist ja selle arvestamisel uurida viis kuidas saab neid projekteerida kompaktselt ja ei suurendada soojusevoog kaugjahutustorustiku poole.

Tulemuste saavutamiseks kasutatakse näidiseks ehitusprojekt HeatConsult, töö nr 21062. Kootatakse lõplik elementide meetodi põhjal mudeli mille abil saab analüüsida soojusülekanne. Mudeli koostamiseks on kasutatud Gmsh tarkvara võrgustiku tegemiseks ja Elmer FEM solver multifüüsikaline simulatsioonitarkvara mudelile ette antud võrrandid lahendamiseks.

Töö tulemusena on saanud kaugkütte- või kaugjahutustorustiku mudeli koostamise meetod. Lihtsatatud 2D statsionaarse oleku mudeli analüüs, mille põhjal saab analüüsida soojusülekanne torustiku süsteemis

Abstract

The aim of this thesis is to analyse how district heating and district cooling pipelines affect each other and, taking this into account investigate a way how they can be designed in a compact way and not increase the heat flow towards the district cooling pipeline.

To achieve the results, the construction project by HeatConsult, job no. 21062, is be used as an example. A model based on the finite element method is compiled to analyse heat transfer. Gmsh software for creating of mesh and Elmer FEM solver multiphysics simulation software for solving the equations prescribed for the model are used to build the model.

Lisad

Lisa 1 – Lihtlitsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Andrei Suhodol(*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Kaugkütte- ja kaugjahutustorustike paiknemise analüüs kasutades lõplik elementide meetodi, (*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Dmitri Nešumajev, (*juhendaja nimi*)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

20.05.2024 (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Lisa 2 – Gmsh kood

```
// Gmsh project created on Sun May 19 08:53:48 2024
SetFactory("OpenCASCADE");
//+
Circle(1) = {-0.3, -0.36, 0, 0.06625, 0, 2*Pi};
//+
Circle(2) = {-0.3, -0.36, 0, 0.06985, 0, 2*Pi};
//+
Circle(3) = {-0.3, -0.36, 0, 0.1364, 0, 2*Pi};
//+
Circle(4) = {-0.3, -0.36, 0, 0.14, 0, 2*Pi};
//+
Circle(5) = {-0.3, -0.92, 0, 0.06625, 0, 2*Pi};
//+
Circle(6) = {-0.3, -0.92, 0, 0.06985, 0, 2*Pi};
//+
Circle(7) = {-0.3, -0.92, 0, 0.1211, 0, 2*Pi};
//+
Circle(8) = {-0.3, -0.92, 0, 0.125, 0, 2*Pi};
//+
Circle(9) = {0.3, -0.23, 0, 0.1315, 0, 2*Pi};
//+
Circle(10) = {0.3, -0.23, 0, 0.1365, 0, 2*Pi};
//+
Circle(11) = {0.3, -0.23, 0, 0.1952, 0, 2*Pi};
//+
Circle(12) = {0.3, -0.23, 0, 0.2, 0, 2*Pi};
//+
Circle(13) = {0.3, -0.88, 0, 0.1315, 0, 2*Pi};
//+
Circle(14) = {0.3, -0.88, 0, 0.1365, 0, 2*Pi};
//+
Circle(15) = {0.3, -0.88, 0, 0.1952, 0, 2*Pi};
//+
Circle(16) = {0.3, -0.88, 0, 0.2, 0, 2*Pi};
//+
Point(17) = {5, 1, 0.00, 1.0};
//+
Point(18) = {0, 0, 0.00, 1.0};
//+
Point(19) = {-5, 1, 0.00, 1.0};
//+
Point(20) = {-5, -9, 0.00, 1.0};
//+
Point(21) = {5, -9, 0.00, 1.0};
//+
Line(17) = {19, 17};
//+
Line(18) = {17, 21};
//+
Line(19) = {21, 20};
//+
Line(20) = {20, 19};
//+
Curve Loop(1) = {1};
//+
Plane Surface(1) = {1};
//+
Curve Loop(2) = {1};
//+
Curve Loop(3) = {2};
//+
Plane Surface(2) = {2, 3};
//+
Curve Loop(4) = {2};
//+
Curve Loop(5) = {3};
//+
Plane Surface(3) = {4, 5};
//+
Curve Loop(6) = {3};
//+
Curve Loop(7) = {4};
//+
Plane Surface(4) = {6, 7};
//+
Curve Loop(8) = {5};
//+
Plane Surface(5) = {8};
//+
Curve Loop(9) = {5};
//+
Curve Loop(10) = {6};
//+
Plane Surface(6) = {9, 10};
//+
```



```

Curve Loop(11) = {6};
//+
Curve Loop(12) = {7};
//+
Plane Surface(7) = {11, 12};
//+
Curve Loop(13) = {7};
//+
Curve Loop(14) = {8};
//+
Plane Surface(8) = {13, 14};

//+
Curve Loop(15) = {9};
//+
Plane Surface(9) = {15};
//+
Curve Loop(16) = {9};
//+
Curve Loop(17) = {10};
//+
Plane Surface(10) = {16, 17};
//+
Curve Loop(18) = {10};
//+
Curve Loop(19) = {11};
//+
Plane Surface(11) = {18, 19};
//+
Curve Loop(20) = {11};
//+
Curve Loop(21) = {12};
//+
Plane Surface(12) = {20, 21};
//+
Curve Loop(22) = {13};
//+
Plane Surface(13) = {22};
//+
Curve Loop(23) = {13};
//+
Curve Loop(24) = {14};
//+
Plane Surface(14) = {23, 24};
//+
Curve Loop(25) = {14};
//+
Curve Loop(26) = {15};
//+
Plane Surface(15) = {25, 26};
//+
Curve Loop(27) = {15};
//+
Curve Loop(28) = {16};
//+
Plane Surface(16) = {27, 28};
//+
Curve Loop(29) = {8};
//+
Curve Loop(30) = {16};
//+
Curve Loop(31) = {4};
//+
Curve Loop(32) = {12};
//+
Curve Loop(33) = {17, 18, 19, 20};
//+
Plane Surface(17) = {29, 30, 31, 32, 33};
//+
Delete {
    Surface{1};    Surface{9};    Surface{13};
    Surface{5};
}
//+
MeshSize {4, 12, 16, 8} = 0.02;
//+
MeshSize {8, 7} = 0.02;
//+
MeshSize {6, 5, 15, 14, 13, 11, 10, 9, 3, 2, 1} =
0.02;
//+
MeshSize {4, 8, 16, 12} = 0.05;

```

Lisa 3 – Elmer FEM solver kood

```
Header
CHECK KEYWORDS Warn
Mesh DB "." "."
Include Path ""
Results Directory ""
End

Simulation
Max Output Level = 5
Coordinate System = Cartesian
Coordinate Mapping(3) = 1 2 3
Simulation Type = Steady state
Steady State Max Iterations = 1
Output Intervals(1) = 1
Solver Input File = 21062.sif
Post File = 21062_100.vtu
End

Constants
Gravity(4) = 0 -1 0 9.82
Stefan Boltzmann = 5.670374419e-08
Permittivity of Vacuum = 8.85418781e-12
Permeability of Vacuum = 1.25663706e-6
Boltzmann Constant = 1.380649e-23
Unit Charge = 1.6021766e-19
End

Body 1
Target Bodies(1) = 1
Name = "Body 1"
Equation = 1
Material = 1
End

Body 2
Target Bodies(1) = 2
Name = "Body 2"
Equation = 1
Material = 2
End

Body 3
Target Bodies(1) = 3
Name = "Body 3"
Equation = 1
Material = 3
End

Body 4
Target Bodies(1) = 4
Name = "Body 4"
Equation = 1
Material = 1
End

Body 5
Target Bodies(1) = 5
Name = "Body 5"
Equation = 1
Material = 2
End

Body 6
Target Bodies(1) = 6
Name = "Body 6"
Equation = 1
Material = 3
End

Body 7
Target Bodies(1) = 7
Name = "Body 7"
Equation = 1
Material = 1
End

Body 8
Target Bodies(1) = 8
Name = "Body 8"
Equation = 1
Material = 2
End

Body 9
Target Bodies(1) = 9
Name = "Body 9"
```

Equation = 1
Material = 3
End

Body 10
Target Bodies(1) = 10
Name = "Body 10"
Equation = 1
Material = 1
End

Body 11
Target Bodies(1) = 11
Name = "Body 11"
Equation = 1
Material = 2
End

Body 12
Target Bodies(1) = 12
Name = "Body 12"
Equation = 1
Material = 3
End

Body 13
Target Bodies(1) = 13
Name = "Body 13"
Equation = 1
Material = 4
End

Solver 1
Equation = Heat Equation
Procedure = "HeatSolve" "HeatSolver"
Variable = Temperature
Exec Solver = Always
Stabilize = True
Optimize Bandwidth = True
Steady State Convergence Tolerance = 1.0e-5
Nonlinear System Convergence Tolerance = 1.0e-7
Nonlinear System Max Iterations = 20

Nonlinear System Newton After Iterations = 3
Nonlinear System Newton After Tolerance = 1.0e-3
Nonlinear System Relaxation Factor = 1
Linear System Solver = Iterative
Linear System Iterative Method = BiCGStab
Linear System Max Iterations = 500
Linear System Convergence Tolerance = 1.0e-10
BiCGstabl polynomial degree = 2
Linear System Preconditioning = ILU0
Linear System ILUT Tolerance = 1.0e-3
Linear System Abort Not Converged = False
Linear System Residual Output = 10
Linear System Precondition Recompute = 1
End

Solver 2
Equation = Flux and Gradient
Calculate Flux = True
Procedure = "FluxSolver" "FluxSolver"
Calculate Flux Magnitude = True
Exec Solver = Always
Stabilize = True
Optimize Bandwidth = True
Steady State Convergence Tolerance = 1.0e-5
Nonlinear System Convergence Tolerance = 1.0e-7
Nonlinear System Max Iterations = 20
Nonlinear System Newton After Iterations = 3
Nonlinear System Newton After Tolerance = 1.0e-3
Nonlinear System Relaxation Factor = 1
Linear System Solver = Iterative
Linear System Iterative Method = BiCGStab
Linear System Max Iterations = 500
Linear System Convergence Tolerance = 1.0e-10
BiCGstabl polynomial degree = 2
Linear System Preconditioning = ILU0
Linear System ILUT Tolerance = 1.0e-3
Linear System Abort Not Converged = False

Linear System Residual Output = 10
Linear System Precondition Recompute = 1
End

Equation 1
Name = "HeatnFlux"
Active Solvers(2) = 1 2
End

Material 1
Name = "Teras"
Heat expansion Coefficient = 13.8e-6
Youngs modulus = 200.0e9
Heat Conductivity = 60
Density = 7860.0
Poisson ratio = 0.285
Sound speed = 5100.0
Heat Capacity = 750
End

Material 2
Name = "PUR"
Density = 80
Poisson ratio = 0.37
Heat expansion Coefficient = 67.0e-6
Heat Conductivity = 0.029
Heat Capacity = 1200
Youngs modulus = 2.2e9
End

Material 3
Name = "PE"
Heat Capacity = 1900
Heat Conductivity = 0.4
Density = 965
End

Material 4
Name = "Pinnas"
Density = 1760
Heat Conductivity = 1.6
Heat Capacity = 1050
End

Boundary Condition 1

Target Boundaries(1) = 1
Name = "KKTPVvesi"
Heat Transfer Coefficient = 3000
External Temperature = 105
End

Boundary Condition 2
Target Boundaries(1) = 5
Name = "KKTTVvesi"
Heat Transfer Coefficient = 3000
External Temperature = 70
End

Boundary Condition 3
Target Boundaries(1) = 9
Name = "KJPVvesi"
External Temperature = 7
Heat Transfer Coefficient = 3000
End

Boundary Condition 4
Target Boundaries(1) = 13
Name = "KJTVvesi"
External Temperature = 16
Heat Transfer Coefficient = 3000
End

Boundary Condition 5
Target Boundaries(1) = 17
Name = "OHK"
Heat Transfer Coefficient = 14.6
External Temperature = 8
End

Boundary Condition 6
Target Boundaries(3) = 18 19 20
Name = "Maa"
Temperature = 8
End

Boundary Condition 7
Target Boundaries(1) = 4
Name = "pe1"
End

Boundary Condition 8

Target Boundaries(1) = 8

Name = "pe2"

End

Boundary Condition 9

Target Boundaries(1) = 12

Name = "pe3"

End

Boundary Condition 10

Target Boundaries(1) = 16

Name = "pe4"

End