



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Soojustehnika instituut
Soojusjõuseadmete õppetool

MSJ04LT

Enar Kraav

NELJANDA PÕLVKONNA KAUGKÜTE
Bakalaureusetöö

Autor taotleb
tehnikateaduste bakalaureuse
akadeemilist kraadi

Tallinn
2015

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Eduard Latõšov juhendamisel

“.....”2015.a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....”2015.a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”2015. a.

..... allkiri

TTÜ soojustehnika instituut

Soojusjõuseadmete õppetool

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE

2015. aasta 6. semester

Üliõpilane: Enar Kraav, 120623MASB61

Õppekava: MASB02/09

Eriala: Soojusenergeetika

Juhendaja: Insener Eduard Latõšov

Konsultandid: Professor Andres Siirde, 55 16619

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

Neljanda põlvkonna kaugküte

4th Generation District Heating

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr.	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Töö ülesehituse kinnitamine juhendajaga.	märts 2015
2.	Töö teoreetiliste alustega tutvumine	märts 2015
3.	Töö valmis kirjutamine	mai 2015
4.	Töö kinnitamine juhendaja poolt	juuni 2015

Lahendatavad inseneritehnilised ja majanduslikud probleemid: Neljanda põlvkonna kaugkütte uurimine, tutvustus, hinnangu andmine ning eeliste ja puuduste analüüsimine.

Täiendavad märkused ja nõuded:

Töökeel: eesti keel

Kaitsmistaoitus esitada hiljemalt: 12.05.2015

Töö esitamise tähtaeg:

Üliõpilane: Enar Kraav

/allkiri/

kuupäev

Juhendaja Eduard Latõšov

/allkiri/.....

kuupäev

SISUKORD

Bakalaureusetöö ülesanne	3
Seledede loetelu	6
Tabelite loetelu	7
Eessõna.....	8
SISSEJUHATUS.....	9
1. KAUGKÜTTE PÕLVKONDADE ÜLDISELOOMUSTUS	11
1.1. Esimene põlvkond	13
1.2. Teine põlvkond.....	13
1.3. Kolmas põlvkond.....	14
1.4. Neljas põlvkond.....	14
1.5. Põlvkondade erinevused	15
2. NELJANDA PÕLVKONNA PÕHJENDATUD MÕJU	17
2.1. Tootja.....	18
2.1.1. Koostootmine	19
2.1.2. Soojusenergia taaskasutamine.....	20
2.1.3. Soojussalvestite integreerimine erinevate taastuvate energiaallikatega.....	21
2.2. Võrk.....	23
2.2.1. Võrgutemperatuur	23
2.2.2. Kaugküttetorude materjal ja soojusisolatsioon	24
2.2.3. Kahe-torulise element	25
2.2.4. Keemise oht.....	26
2.2.5. Leketega kaasnev oht	26
2.3. Tarbija.....	26
2.3.1. Põlvkonna vahetust raskendavad tegurid	26
2.3.2. Legionella bakter.....	27

2.3.3. Targad süsteemid.....	28
3. ARVUTUSNÄIDE.....	30
3.1. Tarbijad.....	30
3.2. Kaugküttevõrk	34
3.3. Alternatiivide võrdlus	37
3.3.1. Kaugküttevõrgu efektiivsus.....	37
3.3.2. Võrgukaod	38
3.3.3. Kaugküttevõrgu torud	39
3.3.4. Võrgu pumpamiskulud	39
3.3.5. Tarbijate küttesüsteem.....	41
3.3.6. Soojusenergia tootmine	41
3.3.7. Kütusekulu	43
3.3.8. Elektrienergia kulu	44
3.4. Alternatiivide kokkuvõte	44
KOKKUVÕTE.....	47
SUMMARY	49
KASUTATUD KIRJANDUS	51
LISAD	54

SELEDE LOETELU

- Sele 2.1.2. Suitsugaaside kondensaatori lisa võimsus sõltuvalt tagastuva vee temperatuurist ja kütuse niiskusest.
- Sele 2.2.3. Eelisolleeritud ühe ja kahe-torulise toruelemendi erinevus.
- Sele 3.1.1. Soojusvõrgu soojuskoormus sõltuvalt välisõhutamperatuurist.
- Sele 3.1.2. Tarbimise soojuskoormuse kestvusgraafik.
- Sele 3.2. Kaugküttevõrk.

TABELITE LOETELU

Tabel 1.5.1. Põlvkondade iseloomulikud üldised erinevused.

Tabel 3.1.1 Tarbija parameetrid.

Tabel 3.1.2. Soojusvõrgu soojuskoormuse parameetrid.

Tabel 3.2.1 Kolmanda põlvkonna kaugkütte arvutus.

Tabel 3.2.2 Neljanda põlvkonna kaugkütte arvutus.

Tabel 3.3.1. Alternatiivide kaugküttevõrgu parameetrid.

Tabel 3.3.3. Kaugküttesüsteemi andmed.

Tabel 3.3.6. Suitsugaaside kondensaatori valik.

Tabel 3.3.7 Alternatiivide kütusekulu.

Tabel 3.4. Alternatiivide investeeringute kokkuvõte.

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema on valitud töö koostaja initsiatiivil. Lõputöö teema idee tekkis AS Tallinna Kütte praktikal ja Eesti Jõujaamade ja Kaugkütte Ühingu kaugkütte seminaril. Teemat innustas uurima selle valdkonna lõputööde puudumine.

Lõputöö juhendaja leidmisel aitas mind Tallinna Tehnikaülikooli Mehaanikateaduskonna Soojustehnika instituudi direktor prof. Andres Siirde, kelle soovitusel kohtusin ma Soojustehnika instituudi inseneri Eduard Latõšoviga, kellest sai ühtlasi ka käesoleva lõputöö juhendaja. Samuti tänan Igor Krupenskit ja Alexandr Hlebnikovi arvutus materjalide eest.

Töö autorina sooviksin tänada Soojustehnika instituuti vastutulelikkuse ja suurepärase koostöö eest tudengitega.

SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö teema on valitud töö koostaja initsiatiivil. Lõputöö teema idee tekkis AS Tallinna Kütte võrguüksuse praktikal ja Eesti Jõujaamade ja Kaugkütte Ühingu kaugkütte seminaril. Teemat innustas uurima selle valdkonna lõputööde puudumine.

Kaugkütte eesmärk on suure elanikkonna soojusvarustuse tagamine tsentraalse koostootmisjaama ja soojusvõrguga. Kaugküte põhineb põhiliselt elektrijaamade jääksoojuse, tööstuste heitsoojuse või katlamajade soojusenergia rakendamisel. Kaugküte on Eesti suurlinnades põhiline meetod, kuidas tagatakse linnaelanike küttevajadus. Samuti soosib kaugkütet Eesti külm kliima ja ajalooliselt väljaehitatud kaugküttevõrgud. Kaugkütte arendus on kestnud kolm sajandit ning selle aja jooksul on võimalik eristada kolme erinevat kaugkütte põlvkonda. Kaugkütte kolmandat põlvkonda tuntakse kui traditsioonilist kaugkütet, sest on hetkelt kõige laialdasemalt kasutatav. Neljas põlvkond on kaugkütte uus arendus, mille põhiline eesmärk on liikuda energia säästlikkuse poole, vähendades soojuskadu ja loodusressursside kasutust, kasutades selleks madalamaid soojuskandja temperatuure kaugküttevõrgus.

Lõputöö eesmärgiks on uurida:

- neljanda põlvkonna kaugkütet, võrreldes seda traditsioonilise kaugküttega;
- põhilisi eelised kasutades madala temperatuurilist soojuskandjat;
- tehnoloogilisi võimalusi, mis on olemas, et rakendada madala temperatuurilist soojuskandjat kaugküttevõrgus;
- väljakutseid, mida peab lahendama, et kasutada madala temperatuurilist soojuskandjat;
- taastuvate energiaallikate kasutust neljanda põlvkonna kaugküttes;
- muudatusi, mis üleminek kolmandast põlvkonnast neljandale toob kaasa tootjatele, võrgule ning tarbijatele;
- kuidas lahendada leegionäritõve puhangut madalate soojuskandja temperatuuride juures.

Töö on tinglikult jagatud kolmeks osaks. Töö esimese peatüki eesmärk on iseloomustada erinevate kaugkütte põlvkondi ja nende arengut neljanda põlvkonna kaugkütteni. Esimeses peatükis võetakse kokku erinevate põlvkondade võrdlusega. Töö teises osas lahendatakse

lõputöös püstitatud eesmärged, uurides neljanda põlvkonna madala soojuskandja temperatuuridele ülemiku mõju tootjale, võrgule ja tarbijatele. Töö kolmandas osas on tehtud lihtsustatud arvutusnäide, kus võrreldakse traditsioonilist kaugkütet madala temperatuurilise soojuskandjaga neljanda põlvkonnaga. Arvutuste tegemiseks kasutati Logstor A/S ja Microsoft Office Excel arvutitarkvara.

Kokkuvõttes tuuakse välja neljanda põlvkonna lahenduste tehnilis-majanduslikud aspektid koos eesmärkidega edasiseks uurimiseks.

1. KAUGKÜTTE PÕLVKONDADE ÜLDISELOOMUSTUS

Tarbijate soojusvarustuse tagamiseks kasutatud erinevaid süsteeme liigitatakse: [8]

- lokaalne e. kohalik soojusvarustuse süsteem;
- grupiviisilise soojusvarustuse süsteem;
- kaugsoojusvarustuse süsteem ehk kaugküttesüsteem.

Esmapilgul grupiviisiline ja kaugkütte soojusvarustuse süsteem ei erine üksteisest, kuid grupiviisilise kütte jaotusvõrk on väike ja kohaliku tähtsusega ning kaugkütte jaotusvõrk hõlmab üldiselt tervet linna või suurt osa sellest [8].

Kaugküte on alguse saanud 19. Sajandil. Esimest kaugküttesüsteemi kasutati aastal 1877 Ameerikas Lockportis. Venemaal on rajatud teadaolevalt esimene kaugküttesüsteem aastal 1903 Peterburis. Kaugküttevõrgus kasutati elektrijaama turbiinides töötanud auru. Kaugküttesüsteeme klassifitseeritakse põlvkondade järgi ning esialgsed kaugküttesüsteemid on kaugkütte esimene põlvkond [8].

Kaugküttesüsteeme hakati rajama suure hulga tarbijate soojusvarustuse tagamiseks tööstusettevõtete heitsoojuse ja elektrijaamade jääsoojuse kasutamisel [9]. Kaugkütte esmaseks ideeks ja põhieesmärgiks oli hoonete kütte tagamine odava tööstusliku tootmise heitsoojusega, mis muidu jääks kasutamata. Kaugküttesüsteemi võrk ühendab tootjad ja tarbijad. Ühe suure jaotusvõrguga koondati kokku suur hulk hooneid, mis vajavad soojusenergiat. Tootjast hargneva jaotusvõrguga edastati soojusenergiat soojuskandjaga, millega tagati hoone kütmine, sooja tarbevee ettevalmistamine ja ventilatsioon. Tarbijate soojusenergiaga varustamises võib osaleda üks tsentraalne soojusenergia tootmisettevõttes või mitu erinevat ettevõtet. Kaugküttesüsteemis osalevad tootmisettevõtted tagavad soojusvarustuse peamiselt võrguga ühendatud tsentraalse katlamaja, tööstusettevõtte või soojuse- ja elektri koostootmisjaamaga [8].

Kaugküttesüsteemil on eelised teiste süsteemide ees: [8]

- tsentraalne kontroll heitmete ja saasteainete emissiooni üle, on võimalik tsentraalselt hajutada atmosfääri heitmeid;

- kõrgem varustuskindlus, kohalike kütuste kasutamine, tootjal on kohustus omada reservkatlaid avariideks;
- suurem potentsiaal soojuse- ja elektri koostootmiseks, tööstuste madalapotentsiaalse heitsoojuse kasutamiseks ja madalpotentsiaalse soojusallika rakendamiseks soojuspumpades.

Väljatoodud kaugkütte eelistega kaasnevad ka teatud võimalikud puudused, mis on iseloomulikud just Nõukogude ajal ehitatud teise põlvkonna kaugküttesüsteemil: [8]

- soojus- ja elektri koostootmisjaamade vähesus kaugküttesüsteemides;
- enamus kaugkütte ettevõtete katlamajad kasutati fossiilseid kütuseid, mille kasutamine lokaalsel kütmisel oleks olnud võrgu kvaliteedi tõttu sama efektiivne;
- väga suured suhtelised soojuskaod;
- kaugküttevõrgu torude ebakvaliteetne soojusisolatsioon või selle puudumine, vee ja niiskusekahjustusega isolatsioon põhjustas torude korrosiooni;
- kvalitatiivne soojushulga reguleerimine põhjustas kaugkütte tsirkulatsiooni tagamiseks suure elektrienergia tarbe ja kõrged suhtelised soojuskaod suvel, kui tarbimine on madal;
- soojusvarustuse tagamiseks kaugküttega kasutati väga kõrgeid temperatuure – 130/70°C, kohati tipukoormuse ajal 150/70°C;
- soojusenergia kallis hind, mis oli võimendatud suurte soojuskadude ja pidevate hooldus- ja remondikulude tõttu.

Kaugkütte võrguvee liialt kõrge temperatuuriga kaasnevad järgmised olulised puudused: [8]

- suurenenud suhtelised soojuskaod, eriti suvisel perioodil;
- ei õnnestu efektiivselt kasutada tööstuse heitsoojust;
- soojuspumpade efektiivsus jääb madalaks, kui neid tahetakse kasutada;
- koostootmisagregaatide rakendamisel seadmete efektiivsus väiksem, kui ta võiks olla madala soojuskandja temperatuuri korral.

Riigikontrolli aruandes leiti, kaugküte on asulates ja linnades eelistatud kütteviis. Kui kaugküte on läbimõeldult projekteeritud ja välja ehitatud ning toimib efektiivselt võimaldab see toota elektrit ja soojust koos, kasutada kaugküttevõrgus ära tööstuslikul tootmisel

eralduvat heitsoojust, tarvitada odavamaid ja madalama kvaliteediga kütuseid, saastada õhku vähem [22].

1.1. Esimene põlvkond

Esimeseks põlvkonnaks loetakse kõige esimesi kaugküttesüsteemi, mis tagasid tarbijate küttevajaduse auruga. Auru kasutamine kaugküttes on vananenud tehnoloogia, sest kõrge temperatuuriline aur põhjustas suurt soojuskadu. Kaugkütte võrgus olid enamasti kasutusel teras torustikud suurte kompensaatoritega betoonkanalites. Tarbijad olid kaugküttega ühendatud valdavalt lahtise süsteemiga, milles ringles peamiselt aur 150°C ja kondensaat 90°C juures. Soojus edastati tarbijatele auru kondenseerumisega radiaatorites. Lahkuv kondensaat radiaatoritest põhjustas tagasivoolu torudes korrosiooni, tagastades üha vähem kondensaati ja seetõttu vähenes ka tootja energeetiline kasutegur. Kütusena kasutasid tootjad peamiselt kivisütt [16].

1.2. Teine põlvkond

Teise põlvkonna süsteem lõpetas auru soojuskandjana kasutamise. Soojusenergiat hakati edastama valdavalt soojusenergiat rõhu all oleva kuuma veega, mis tavaliselt oli üle 100°C. Selline kaugküttesüsteem arenes välja 1930-del ja kestis kuni 1970 aastateni. Kaugkütte võrgus kasutati põhiliselt terasest torusid, mis isoleeriti paigaldamise käigus. Tarbijate poolel võeti kasutusele soojussõlm, mis muutis lahtise süsteemi kinniseks. Soojussõlmed olid suured ja materjali nõudlikud, kus kasutusel olid toru-toru soojusvahetid. Radiaatorites voolas rõhu all olev vesi 90°C juures. Teise põlvkonna kaugkütte süsteem leidis suurt rakendust Nõukogude Liidus. Selle efektiivsus oli enamjaolt madal ja süsteemil puudus soojuskoormuse kontroll [25]. Soojus- ja elektrienergia tarbimise kokkulangemise tõttu, seati kaugkütte teise põlvkonna lõpuks eesmärk rakendada rohkem soojuse ja elektri koostootmist. Koostootmise korral on süsteemi efektiivsus suurem, sest soojusenergia vajadust on suuremal määral võimalik katta elektritootmisest tekkiva heitsoojusega, mis toob kaasa jaama üldkasuteguri kasvu ja kütusekulu vähenemise. Kütusena kasutati enamasti rasket kütteõli ja kivisüsi [16].

1.3. Kolmas põlvkond

Kolmanda põlvkonna arendus algas 1970-datel ja sai laialdasemat kasutust 1980-ndatel aastatel. Kaugkütte võrgus hakati kasutama eelpingestatud ja isoleeritud torustikke. Soojust edastati rõhu all ja tavaliselt madalamatel kui 100°C soojuskandja temperatuuridel. Tarbijate poolel mindi üle kompaksetele plaatsoojusvahetitele. Radiaatorites ringles soojuskandjana vesi 70°C juures. Soojussõlmede ümberehitamisega saavutati märkimisväärne materjalide sääst ning sellega kujunes välja ka kolmanda põlvkonna märksõna – vähene materjali kasutus. Samuti hakati veel rohkem tähelepanu suunama kütuste ja energia efektiivsele kasutusele. Kaugkütet hakati siduma koostootmisjaamadega, milles kasutati odavamaid kohalikke kütuseid. Varasemalt laialt kasutatud raske kütteõli ja kivisöe asemel hakati kasutama gaasi, biomassi ja prügi. Samuti alustati katsetega päikese ja geotermilise soojuse kasutamiseks kaugkütteks. Kolmas põlvkond on leidnud hulganisti kasutust ülemaailma ning on just põhiline kaugkütte vorm Eestis ja on seega muutunud „traditsiooniliseks“ kaugkütteks [16].

1.4. Neljas põlvkond

Neljas põlvkond on kaugkütte tuleviku arengusuund mille eesmärgiks on muuta efektiivsemaks ja paindlikumaks hetkel laialdaselt kasutusel olevat traditsioonilist ehk kolmanda põlvkonna kaugkütet. Neljanda põlvkonna põhimõtted on: [16]

- madalam soojuskandja jaotustemperatuur;
- kütuse efektiivne kasutus koostootmisel;
- taastuvate energiaallikate ja heitsoojuse rakendamine;
- materjalide säästlik kasutus kompaksemate seadmete rakendamisel;
- tarkade süsteemide (inglise keeles smart energy system) rakendamine.

Neljanda põlvkonna kaugküttevõrgu eesmärk on edastada soojust 30 – 70°C veega, kus on võimalik kasutada eelpingestatud, eelisoleeritud ja painduvaid plastik kahetorulist elementi (inglise keeles twin pipe). Kaugküttevõrgu ja tootjate eesmärk on välja arendada jätkusuutlik kaugkütte süsteem, mis kasutab ainult taastuvaid kütuseid, kombineerides biomassi-, tuule-, geotermilise- ja päikeseenergia. Erinevatel tootjatel avaneks rohkem võimalusi kaugküttevõrgus ära kasutada madala potentsiaaliga soojusallikaid.

Tarkade süsteemide integreerimine kaugküttes võimaldaks muuta tarbimist efektiivsemaks, mugavamaks ja tarbijale säästlikumaks [16].

Neljanda põlvkonna täpsem kirjeldus ja eelised võrreldes hetkel kasutatavate põlvkondadega on toodud järgmistes peatükkides.

1.5. Põlvkondade erinevused

Kaugküte on peale esimest põlvkonda pidevalt olnud arenduses. Kaugkütte põlvkondade erinevuste võrdlemisel on võimalik teha järgmiseid kokkuvõtvaid järeldusi (vt tabel 1.5.1).

Tabel 1.5.1. Põlvkondade iseloomulikud üldised erinevused. [16, 25]

	I põlvkond	II põlvkond	III põlvkond	IV põlvkond
TOOTJA				
Eelistatav tootja	Katlajaam	Katlajaam	Koostootmisjaam	Koostootmisjaam
Kütus, energiaallikas	Kivisüsi	Kivisüsi, raske kütteõli	Raske kütteõli, gaas, biomass, prügi	Biomass, päike, tuul, geotermaal
Soojuskandja	Aur	Vesi	Vesi	Vesi
Temperatuur	150 – 300°C	>100°C	<100°C	30 – 70°C
VÕRK				
Keskkond	Betoonkanalid	Betoonkanalid	Maa-alune võrk	Maa-alune võrk
Toru süsteem	2 toru	2 toru	2 toru	1 toru (kaks ühes)
Torud	Teras	Teras	Eelpingestatud teras	Eelpingestatud plastik ja teras
Isolatsioon	Kohapeal	Kohapeal	Eelisolatsioon	Eelisolatsioon
TARBIJA				
Soojuskandja	Aur/Kondensaat	Vesi	Vesi	Vesi
Keskkond	Radiaator	Radiaator	Radiaator	Põrandaküte
Soojussõlm	Soojussõlm	Toru-toru soojusvaheti	Plaatsoojusvaheti	Plaatsoojusvaheti
Süsteem	Lahtine	Lahtine, kinnine	Lahtine, kinnine	Kinnine

Esimese kolme põlvkonnaga toimunud erinevuste analüüsil võib välja tuua järgmised arengutrendid: [9, 16, 25]

- katlamajade asemel kasutatakse rohkem koostootmisjaama;
- soojuse ja elektri koostootmine suures kaugküttevõrgus tõstis energiasüsteemide efektiivsust. Jaama kasutegur on koostootmise korral märksa suurem;
- tsentraalne koostootmisjaam on väiksema keskkonnasaastega ning kasvuhoonegaaside emisioon on paremini kontrollitav;
- kütusena on hakatud kasutama rohkem kohalikke ja taastuvaid kütuseid;
- auru asemel on soojuskandja vesi;
- rõhu all vee, kasutamine soojuskandjana andis võimaluse kasutada madalamaid temperatuure;
- madalamate soojuskandja temperatuuride kasutamine optimeeritud läbimõõtudega ja soojustatud torustike pidi soojuse edastamine vähendas soojuskadu;
- materjalide säästlik kasutust kaugküttevõrgus on toonud kaasa kompaktsemad torud, soojusvahetid ja soojussõlmed.

2. NELJANDA PÕLVKONNA PÕHJENDATUD MÕJU

Energiamajanduse arengukavad kohustuvad soojuse ja elektri koostootmise ja kaugkütte arendamist euroopa riikides, kus on ajaloolisel välja kujunenud kaugküttesüsteemid. Euroopa liit toetab taastuvatel energiaallikatel töötavaid koostootmisjaamu. Aastaks 2030 on seatud eesmärk toota kogu soojusenergia 50%-lt taastuvatest energiaallikatest. Aastast 2020 tohib ehitata ainult vähemalt liginullenergia standardile vastavaid hooneid ning tuleb kõik riigi poolt hallatavad hooned renoveerida energiasäästlikeks. Euroopa Liidu direktiivid näevad ette, et 2020. aastaks peab olema vähendatud 20% võrra energiatarbimist, kasvuhoonegaaside emissiooni ning suurendama 20% võrreldes 1990. aasta taastuvaenergiaallikate osakaalu energiatarbimises [9].

Seega energiapoliitika seab kaugküttesüsteemi haldajatele suured väljakutsed ja eesmärgid suurendada energia efektiivset kasutust, vähendada kaugkütte süsteemide kadusid ning renoveerida süsteeme selliselt, et arvestatakse tarbijate soojustarbimise vähenemisega. Kaugküttesüsteemi energia efektiivsuse suurendamiseks rõhutatakse, et energia tõhusust tuleb alustada energiamuundamise ahela alguses kuni lõpptarbijani. Koostöö kaugküttesüsteemi tootja, võrgu ja tarbija vahel on kõige olulisem kaugküttesüsteemide arendamisel, väljaehitamisel ja probleemide lahendamisel [9].

Neljanda põlvkonna süsteemi põhimõtte koosneb tarkade süsteemide abil taastuvatest energiaallikatest saadud soojuse suunamist kaugküttevõrku ning madalate jaotuskadudega madalenergia hoonetel soojusega varustamist. Põlvkondade vahetus nõuab institutsionaalset ja organisatsioonilist koostööd, et arendada optimaalse investeeringu energia süsteemi väljaehitamiseks ja selles tuleneva kasumi jaotus tootja ja tarbija vahel [1].

Uue põlvkonna kaugküte peab täitma järgmisi energeetilisi tingimusi, et tagada jätkusuutlik ja säästev areng: [16]

1. Suuteline varustama madala soojuskandja jaotustemperatuuridega nii olemasolevaid hooneid, renoveeritavaid hooneid kui ka uusi madalenergia hooneid.
2. Võimeline jaotama ja edestama soojuskandjat madalate kadudega. See eeldab vana kaugküttetorustike renoveerimist või ümberehitamist.

3. Võimeline integreerima ja kasutama madala temperatuuriga taastuenergia soojusallikaid nagu päikeseenergia ja maapõueenergia, kasutada tehnoloogilist jääsoojust või taaskasutada heitsoojust soojuspumpadega.
4. Võimeline rakendama tarku süsteeme koostöös teiste jaotusvõrkudega nagu elektri-, vee- ja gaasivõrk.
5. Suuteline tagama jätkusuutlikku arendust nii tarbijale kui ka tootjale. Olemasolevate soojusvarustuse süsteemide arendus ja tõhustamine saab toimida ainult omavahelises mõistvas ja heas koostöös.

Kõrged temperatuurid ja soojuskaod kaugküttetorustikes on peamine takistus, miks ei saa heitsoojust ja madala potentsiaaliga taastuvat soojust kasutada kaugküttevõrgus. Madalamate temperatuuridega ja soojuskadudega töötamine annab võimaluse kasutada madala potentsiaaliga heitsoojust kaugkütteks [1].

Järgmistes peatükkides on analüüsitud neljanda põlvkonna peamise tingimuse – madala soojuskandja temperatuuri mõjudest tootjale, võrgule ja tarbijale.

2.1. Tootja

Neljanda põlvkonna kaugkütte olulisemaks suunaks on laiendada taastuvate energiaallikate ja heitsoojuse madalatemperatuurilise soojuskandja kasutust kaugküttevõrgus [16] ning liikuda suurtest katlajaamadest väiksemate, paindlikumate ja paremini kontrollitavatele detsentraliseeritud jaamadele, millega kaasneks energia säästlikum ja efektiivsem kasutus kaugküttevõrgus [25].

Soojusvõrgu soojuskandja temperatuuri alandamisega saaks kasu nii väike- kui ka suurtootjad, sest: [16]

- madalamate temperatuuridega on veeauruturbiinidega koostootmisjaamadel suurem toodetud elektri ja soojuse suhe;
- parem soojusetagastus suitsugaaside kondensatsioonist;
- võimalus kasutada tööstuste heitsoojust ja liita kaugküttevõrgule uusi soojusenergia tootjaid;

- päikesekollektorite soojusenergia tootmine efektiivsem ja väiksemate kadudega, sest madalamaid temperatuure on kergem saavutada;
- paremad soojustegurid (inglise keeles Coefficient of Performance ehk COP) soojuspumpades, sest kompressor teeb vähem tööd, et saavutada vajalik temperatuur,
- geotermaalenergia kasutuse võimalus koos soojuspumpadega;
- paremaid võimalusi kasutamaks soojussalvesteid mida on võimalik kütta eelnevate meetoditega nõutud temperatuurini.

Kaugküttevõrgule on kehtestatud kindlad võrgueeskirjad kaugkütteseaduses, et tagada soojusenergia varustuse kindlus ja kaugküttevõrgu ettevõtete häireteta töö. Väikse soojusenergia mahtudega tootjad peavad täitma võrgu poolt seatud eeskirju, et vältida soojusenergia varustuse probleeme, mille tõttu kannatajateks jäävad tarbijad. Kui väiketootjad suudavad täita võrgu eeskirju, siis võivad nad müüa toodetud soojusenergiat võrku võrdsetel tingimustel, soodsaima hinnaga. Tarbijatele on kasulik kui kaugküttevõrguga liituvad uued soojusenergia varustajad, sest suurem konkurents soojusenergia turul vähendab kodukütte kulu tarbijatele. Neljanda põlvkonna kaugküttevõrk ja selle nõuded peavad olema ülesehitatud selliselt, et see toetaks uusi konkureerivaid tootjaid liituma kaugküttevõrguga, tagades selle jätkusuutlikkuse [11].

2.1.1. Koostootmine

Soojuse ja elektri koostootmine toimub soojuselektrijaamas, millel on kõrge eksergiline kasutegur. Soojuselektrijaama kasutegur on üle 90% ning võib ületada ka 100% alumise kütteväärtuse järgi, kui kasutatakse suitsugaaside kondensatsiooni. Madalad soojuskandja peale- ja tagasivoolu temperatuurid lasevad aurul teha turbiinis rohkem paisumistööd ja toota rohkem elektrienergiat, tõstes jaama elektrilist kasutegurit [25]. Mida väiksem on jahuti temperatuur, seda suurem termiline kasutegur ning suurem osa soojendist ringprotsessi siirduvast soojusest muudetakse ringprotsessis kasulikuks tööks [19]. Toodetud elektrienergia mahtude suurendamisest on huvitatud kõige rohkem koostootmisjaamad, mis osalevad vabal elektriturul, sest koostootmisjaama kasumlikkus sõltub oluliselt toodetud elektrienergiast [16].

Koostootmisjaamade töö peaks olema reguleeritud selliselt, et koostootmisjaam töötaks võimalikult palju pidevalt ja stabiilselt oma nimikoormusel ning toodaks rohkem elektrit.

Kõikuva iseloomuga taastuvate energiaallikate ning heitsoojuse võrguga integreerimisel tuleks võtta kasutusele soojussalvestid. Taastuvatest energiaallikatest saadav soojusenergia salvestatakse soojussalvestites, et seda hiljem kasutada kaugküttes ning võimaldada koostootmisjaamal töötada stabiilsel koormusel. Koormuse kõikumiste minimeerimine omakorda positiivselt mõjutab koostootmisjaama kütuse säästliku ja efektiivse kasutusele. Taastuvate energiaallikatega soojusenergia tootmisel tuleb arvestada sellega, et koostootmisjaama soojusenergia tootmise vahetamine soojaveeboilerite vastu toob kaasa kogu süsteemi efektiivsuse languse [16].

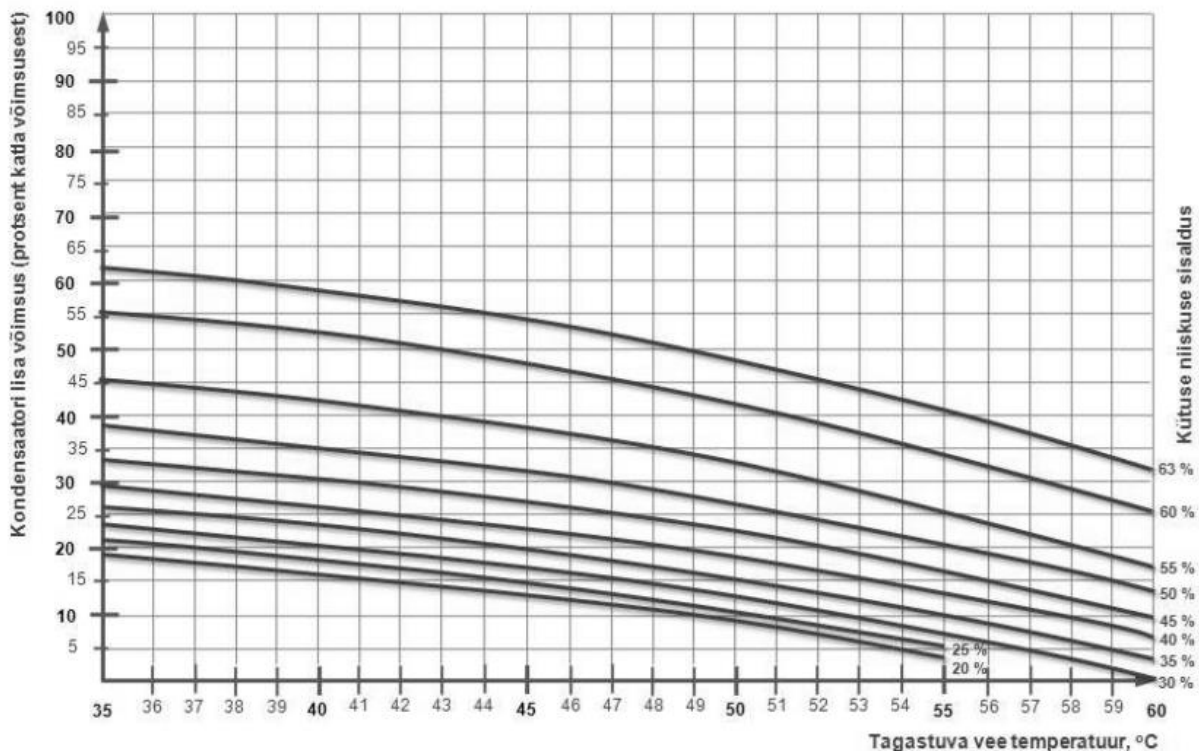
2.1.2. Soojusenergia taaskasutamine

Kütuse põlemisel kütuses sisalduv niiskus aurustub ja juhitakse koos suitsugaasidega korstnasse. Suitsugaaside pesuris jahutatakse lahkuvate suitsugaaside temperatuur allapoole kastepunkti ja saadakse kütuse põlemisel keemiliselt tekkinud veeauru või kütuses sisaldava vee aurustamiseks kulunud soojus kondenseerumissoojusena tagasi [10]. Lahkuvate suitsugaaside kondensatsioonidega on võimalik osaliselt alumise ja ülemise kütteväärtuse vahe ära kasutada, mis muidu jääks kasutamata [25]. Olulisemad tegurid, mis mõjutava suitsugaaside pesuri võimsuse valikut on kütuse niiskus ja tagastava kaugküttevete temperatuur [10].

Suitsugaaside kondensatsioon on igati asjakohane koostootmisjaamades ja katlajaamades, mis kasutavad kõrge niiskuse sisaldusega kütust nagu biomass või prügi [25]. Mida suurem on kütuse niiskus, seda rohkem on võimalik saada täiendavat soojust suitsugaaside pesuriga [10]. Madalam soojuskandja tagasivoolu temperatuur muudab suitsugaaside kondensatsiooni efektiivsemaks, sest sedasi on võimalik lahkuvate suitsugaaside soojust alandada ja suuremal määral korduskasutada [25]. See tõstab suitsugaasi pesuri soojuslikku kasutegurit ja sellega väheneb kütuse kulu vajaliku soojushulga tootmiseks [10]. Selleks, et efektiivselt kasutada elektritootmisest ning suitsugaaside kondensatsioonist tekkinud jääksoojust, on vaja piisavalt suurt kaugküttevõrku, kuhu oleks võimalik soojust tarnida [16]. Mõned Rootsi biomassil töötavad koostootmisjaamadel on lahkuvate suitsugaaside temperatuur 30°C [25].

Sele graafikul (vt. Sele 2.1.2.) järeldub, et madalam soojuskandja tagastuv temperatuur tähendab suuremat lisavõimsust. Neljanda põlvkonna kohaselt kui kütuse niiskus on 35%, siis tagastava vee temperatuuril 35°C on võimalik saada 26% lisavõimsust. Alandades tagastava

vee temperatuuri on veelgi enam võimalik saada lisavõimsust. Kasutades traditsioonilist kaugkütet on võimalik tagastuva vee temperatuuril 50°C saada ainult 15% lisavõimsust [10].



Sele 2.1.2. Suitsugaaside kondensaatori lisa võimsus sõltuvalt tagastuva vee temperatuurist ja kütuse niiskusest [10].

2.1.3. Soojussalvestite integreerimine erinevate taastuvate energiaallikatega

Soojussalvesteid saab jagada kaheks: [7]

1. Hooajaline soojussalvesti.
2. Lühiajaline soojussalvesti.

Viimast tuntakse rahvakeeli akumulatsioonipaagina.

Hooajaline soojuse salvestamine kaugkütteks ei ole veel täielikult väljatöötatud ning on veel arengufaasis, kuid lühiajalised soojussalvestid on end juba praeguse tehnoloogiaga tõestanud. Lühiajaliste soojussalvestite eesmärk on nihutada osa tipptunni soojusenergia tarbimisest aegadele, kui koormus on madalam ja stabiilsem. Soojussalvestitega lühiajaliste soojusenergia tipukoormuste katmine tõstab koostootmisjaama elektrilist kasutegurit ning annab võimaluse

toota rohkem elektrienergiat hetkel, kui elektrienergia hind on kõrge ja koostootmisjaamale kõige tulusam. Lisaks reageerivad soojussalvestid järsule tarbimise muutusele paremini kui koostootmisjaam, sest nende inerts soojusenergia väljastamiseks on väiksem, seega tõuseb soojusenergia varustuskindlus ning nendega ei kaasne kahjumit, mis võib tekkida seadme pideva koormuse muutmisega ning sisse ja välja lülitamisega. Soojusenergia salvestamine koos koostootmisjaamaga on pikemas perspektiivis odavam ja väiksemate üldkuludega, kui tipukoormuse katla käitamine [7].

Heitsoojus on: „Tootmisprotsessis vabanev ja seal kasutust mitteleidv soojusenergia. Heitsoojuse tagasisuunamine tootmistegevusse, kasutamine kütteks või vee soojendamiseks võimaldab kokku hoida loodusvarasid ja vähendada saastumist.“ [23]

Madala soojuskandja temperatuuriga kaugküttevõrk, kus peale- ja tagasivoolu temperatuurid jäävad aastas keskmiselt 50/20°C juurde, annab tööstusliku või jahutusprotsesside heitsoojuse kasutamisele palju suurema potentsiaali, kui seda praeguse traditsioonilise kaugküttevõrgu temperatuuridega. Heitsoojust oleks võimalik kasutada nii hoone kütmiseks, õhutemperatuuri hoidmiseks või soojusenergia salvestamiseks [16].

Praegusel hetkel jääb heitsoojuse kasutamine lokaalsele tasemele, sest seda soojust ei ole võimalik kontrollitult ja mõõdetult tarnida kaugküttevõrku. Kaugküttevõrk, mis suudaks kasutada heitsoojust kaugkütteks, nõuab paremat kootööd võrgu ja tootjate vahel, et luua regulatsioone ning dünaamilist juhtimissüsteemi, mis kontrollib soojusenergia tarnimist ja peab omama selleks tehnilisi eeldusi (eelkõige madal võrgutemperatuur) [16].

Päikeseenergia on sesoonne ja sõltub suurel määral ilmastikust. Päikeseenergia parkide ülesanne soojusvõrgus oleks tõsta või hoida soojuskandja temperatuuri soojussalvestites aasta ringselt, mis tagaks soojusvarustuse kindluse kasutades taastuvat energiaallikat. Madalamad võrgu jaotustemperatuurid ja väiksemad soojuskaod suurendavad päikesepaneelide ja päikesekollektorite efektiivsust, sest madalamaid temperatuure on lihtsam saavutada ja väiksemate kadudega säilitada [25]. Suuri päikeseenergia parke oleks võimalik ehitada hoonete katustele või linna piiridele koos tsentraalse soojussalvestiga, mis oleks ühendatud soojusvõrgu magistraaltoruga [16]. Päikeseenergia võimsus on suurim siiski suvel, kui küttekoormused on madalad, mistõttu tuleks mõelda suurte piirkondlike soojussalvestite peale, mille salvestatud soojust on võimalik suures koguses talvel ära kasutada [13].

Geotermaalenergia laialdane kasutamine Eestis on piiratud, kuid enamik Euroopa aladel oleks võimalik kasutada maasse salvestunud taastuvat soojust ehk geotermaalenergiat [17]. Geotermaalenergia on kõige soositum aladel, kus on geisrite rohkus või pidev vulkaaniline aktiivsus. Sellistel juhtudel on võimalik maa seest saadavat auru kasutada auruturbiinides elektrienergia tootmiseks [7].

Põhimõtteliselt, kasutades geotermaalenergiat on võimalik soojuskandjale tagada olenevalt puuraugu sügavusest 40° kuni 80°C temperatuur [25]. Leedus töötab enam kui kümme aastat esimene näidisenergiajaam Klaipedas, kus maapõuest saadav 38°C vesi pärast soojuspumpadega temperatuuri tõstmist suunatakse majade küttesüsteemi [17]. Geotermaalenergiajaamades kasutatakse absorptsioon-soojuspumpasid, mida oleks võimalik suunata otse soojusvõrku või integreerida neid koostootmisjaamadega. Kaugküttevõrgu kõrged töötemperatuurid on põhiline põhjus, miks hetkel ei ole mõistlik geotermaalenergiat töötavaid soojusallikaid integreerida kaugküttevõrku. Madalamatel töötemperatuuridel muutuks geotermaalenergia kaugküttevõrgu soojusenergia tootmises konkurentsivõimelisemaks [25]. Samuti lihtsustaks see geotermaalenergiajaamade rajamist ja kasutamist kaugküttevõrgus [16]. Kui soojuskandja temperatuurid jäävad alla 60°C, siis on maapõueenergia kasutamine Kesk-Euroopas kõige kasulikum ja säästlikum, sest maasoojuspumpadel oleks kergem tagada kaugküttevõrku osaliseks või täielikuks soojendamiseks teatud temperatuurini [25].

Geotermaalenergiat kasutatavad soojuspumbad muutuvad konkurentsivõimelisemaks madalama soojuskandja temperatuuriga küttesüsteemis või kaugküttevõrgus, sest nii rõhk kui ka temperatuur on soojuspumba kondensaatoris madalam, ning selline situatsioon muudab kompressori elektrienergia tarbimist säästlikumaks, tõstes soojuspumba soojustegurit [25].

2.2. Võrk

2.2.1. Võrgutemperatuur

Temperatuuri alandamine kaugküttevõrgus mõjub kõige efektiivsemalt võrgu soojuskadudele. Madalama temperatuuriga töötades on väiksemad soojuskaod. Väiksemad soojuskaod omakorda vähendavad pealevoolu temperatuuri langust kaugküttevõrku torudes [25].

Neljanda põlvkonna kaugküte edastaks soojust aasta keskmiselt pealevooluga 50°C ja tagasivooluga 20 – 30°C. See üleminek tähendaks temperatuuri alandamist umbes kaks korda võrreldes traditsioonilise kaugküte temperatuuridega [16].

Madalamatele temperatuuridele üleminek on mõistlik ka sellepärast, et tarbijad on hakanud vähem soojust tarbima. Tarbimise vähenemisele on oma mõju avaldanud hoonete soojustamine ja taastuvenergiaallikate kasutamine, mistõttu traditsioonilise kaugküte süsteemid muutuvad üle dimensioneerituks, ebaefektiivseks ja hoiavad soojust hinna tarbijatele liiga kõrge [2].

2.2.2. Kaugküttetorude materjal ja soojusisolatsioon

Neljanda põlvkonna torustikusüsteem koosneb eelpingestatud ja eelisooleeritud torudest ja torustikuelementidest, mis on valmistatud teras- või plastiktorust, ümbritsetud jäigast polüuretaanvahu soojusisolatsioonikihi ja polüetüleenümbristorust [4]. Eelisooleeritud torusüsteemi pikaajalise eluea määrab polüuretaanvahtmaterjali püsivus toru ümber ning selle termiline stabiilsus. Pikaldane kõrge temperatuuri mõju vähendab soojusisolatsioonmaterjali termilist stabiilsust, millega koos vähenevad ka tugevusomadused.

Eelisooleeritud torusüsteemi termiline lagunemine tekib torudele mõjuvatest mehaanilistest koormustest nagu pinnase reaktsioonijõu ja pinnaseliikumise koormus. Oletatakse, et termilist lagunemist on võimalik kirjeldada Arrheniuse seaduse kohaselt, mis loob seose temperatuurist tingitud koormuse ja tööea vahel [4].

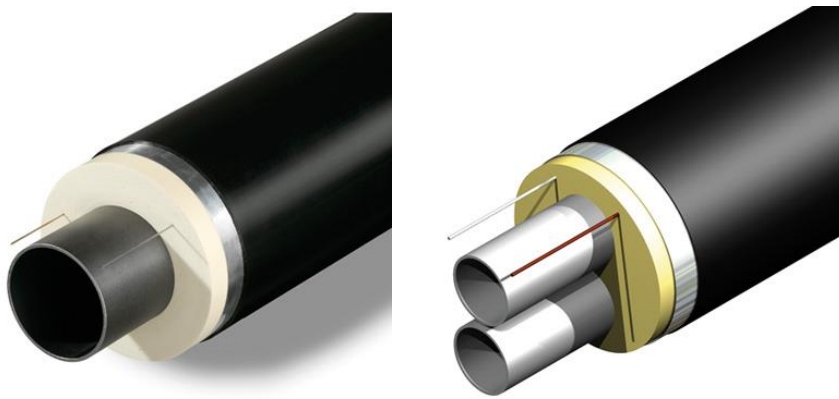
Mitme toru süsteem ja madalamad soojuskandja temperatuurid aitavad muuta isolatsiooni efektiivsemaks [16]. Jaotustemperatuuride vähenemisega suureneb jäiga polüuretaanvahu mehaanilise tugevuse ja soojusjuhtivuse stabiilsuse vastupidavus. Torustike soojusjuhtivuse stabiilsust ja vastupidavust mõjutavad samuti töötemperatuurid, difusiooniprotsessid ja termiline vananemine [4].

Madalam soojuskandja temperatuur ja väiksemad soojuskaod tagavad võrgus stabiilsema pealevoolu temperatuuri piki torustikku, mistõttu on kaugküte torudele mõjuvad termopinged väiksemad võrreldes traditsioonilise kaugküttega. Madalama soojuskandja temperatuur ja

sellega kaasnevad madalad termopinged annavad rohkem võimaluse kasutada plastist torusid, sest varasemalt kasutati tavaliselt metalle nagu teras ja vask, et kaugküttevõrk peaks vastu kõrgetele temperatuuridele ja sellega kaasnevatele termopingetele. Madalamad termopinged vähendavad lekete tekkimise ohtu ja sellega seotud püsi- ja hoolduskulud on samuti madalamad [25].

2.2.3. Kahe-toruline element

Kahe- või kolme-toruline element (inglise keeles twin pipe) on plastist isoleeritud küttevõrku, milles on kaks või kolm voolutoru [27]. Mitme torulise elemendi kasutamine mitte ainult ei vähenda soojuskadu vaid ka paigaldus kulutusi, sest kahetoruline element võtab tunduvalt vähem ruumi, kui kahe eraldiseisva toru kasutamine [25].



Sele 2.2.3. Eelisolatsioon ühe ja kahe-torulise toruelemendi erinevus [26].

Kui võtta kasutusele optimeeritud suurusega eelpingestatud ja eelisolatsioon kahe või kolme torulise elemendi, saaks soojuskadu vähendada veelgi suuremal määral võrreldes kahe eraldiseisva eelisolatsioon toru kasutamisega [25]. Asetades pealevoolu toru keskele ning tagasivoolu toru isotermsel kaugusele isolatsioon, sellega on võimalik torudevaheline soojusvahetus kõrvaldada, vähendades torude soojuskadu. Lisaks on võimalik torudele lisada difusioon- ja soojuskiirguskaitseid, et vähendada soojusülekanne kiirguse teel [16].

Kolmetorulise elemendi kasutamist on uuritud sellepärast, et kolme voolutoruga oleks võimalik edastada soojuskandjat kahel erineval läbimõdul, mis oleks väga kasulik just suve perioodil, kui voolukiirus ja tarbimine on väga madal, sest väiksem läbimõõt vähendaks soojustrassi soojuskadu [16].

2.2.4. Keemise oht

Madalam vee temperatuur vähendab ohtu, et rõhu langemise tõttu vesi läheks kaugküttetorustikus keema ja tekiks kahefaasiline voolamine, mis põhjustab voolamises tühikuid ehk kavitatsiooni [25].

2.2.5. Leketega kaasnev oht

Suurema lekke korral on potentsiaalne oht, et inimese nahk saab põletada kokkupuutel kuuma veega, kui vee temperatuur on kõrgem kui 65°C. Madalamatel temperatuuridel töötamine kõrvaldaks selle ohu [25].

2.3. Tarbija

2.3.1. Põlvkonna vahetust raskendavad tegurid

Neljanda põlvkonna kohaselt madalamatele temperatuuridele üleminek ja rakendamine traditsioonilise kaugkütte süsteemides on raskendatud, sest olemasolevad süsteemid nagu võrk, soojussõlmed ja radiaatorid on projekteeritud ja ehitatud selliselt, et tarbijate küttevajaduse katmiseks on vajalik kõrgetemperatuuriline soojuskandja [25].

Soojuskandja temperatuuri muutus olemasolevates küttesüsteemides tähendaks küttesüsteemide väljavahetust või täiendamist, et tarbijate küttevajadus oleks kaetud. Neljanda põlvkonna küttesüsteemid peavad suutma rahuldama tarbijate küttevajadust umbes 40°C pealvoolu temperatuuriga ning on oluline, et tagasivool oleks kõrgem kui ruumitemperatuur. See tähendab, et uute süsteemide välja ehitamisel oleks mõistlikum kasutusele võtta pörandavõi seinaküte. Vanadele olemasolevatele radiaator süsteemidele on võimalik lisada lisaks paneele, et tagada nõutav soojusväljastus ning madal soojuskandja tagasivoolu temperatuur [20].

2.3.2. Legionella bakter

Legionelloos ehk leegionäride haigus on ägeda kulu ja bakteriaalse päritoluga nakkushaigus, mille põhihaigusvormiks on kopsupõletik. Legionelloosi tekitaja on bakter Legionella pneumophila, mis kasvab vees ja niisketes keskkondades. Legionella on väliskeskkonnas ulatuslikult levinud jõe ja järvevees, muudes veekogudes, kust nad satuvad tarbevee süsteemidesse [24].

Legionella bakterite säilimist ja paljunemist veetorustikes soodustavad vee temperatuur, vanus, mõõtmed, pinna struktuur, liitekohad, materjalid, sademed [29], rooste, muda, bioloogilised kiled, amööbid ja teised bakterid. Nimetatud tegurite koosmõjul võib legionellasid leiduda ka sellistes joogivee ja soojavee torustikes, mida ei ole mõnda aega kasutatud, veekeskuste ja basseinivees, dušivees ning kliima- ja jahutusseadmetes [24].

Oluline on Legionella paljunemise vältimine veevarustussüsteemides. Legionella võib pikemat aega säilitada eluvõime külmas ning seisvas vees.

Bakteri paljunemine on optimaalne temperatuuril 30 kuni 45°C, [25] kuid ei paljune temperatuuril alla 20°C ning üle 60°C [24]. Bakteri puhangu vältimiseks ja ohutuse tagamiseks soovitatakse hoida 5°C vahe tema optimaalse paljunemise temperatuurist [25]. Seega, külma tarbevee süsteemis peab olema tagatud vee temperatuur alla 20°C ja kuumavee süsteemis 55 – 60°C. Vähemalt 90% mikroobidest hävib 50°C juures 80 – 124 minuti jooksul ning 60°C juures kahe minuti jooksul. Kloori suhtes on bakterid piisavalt vastupidavad, biotsiidid hävitavad eeskätt bioloogilise kile. Tähtis on veevärgi süsteemide korrashoidmine ja korrapärane kontrollimine; torustikes vee seiskumise vältimine, nende regulaarse mehaanilise puhastuse ja läbivoolutamise teostamine [24].

Legionella bakteri potentsiaalne oht on minimaalne, kui välistada soojavee mahutite kasutamine ja hoida minimaalne soojatarbevee hulk tsirkuleerivas torustikus soojusvaheti ja kraanide vahel [20]. Väiksem soojatarbevee hulk tsirkuleerivas torustikus koos soojusvahetiga võimaldab langetada soojuskandja pealevoolu temperatuuri kuni 40°C-ni [16].

2.3.3. Targad süsteemid

Neljanda põlvkonna kagukütte arendamisel on oluline kasutada energiat efektiivselt ja säästlikult. Seega on oluline, et kaugkütte võrk ja selle tarbijad on omavahel integreeritud. Tarbijate küttesüsteemide ja kaugküttevõrgu optimaalse töö saavutamiseks tuleks võtta kasutusele tarku seadmeid, mis kontrollivad ja automatiseerivad küttesüsteemi tööd vastavalt vajadusele. Küttesüsteem arvutaks eluruumide nõutavad küttekoormused vastavalt välisõhu temperatuurile ja ilmaennustusele, ning rakendaks saadavat informatsiooni ventiilis, mis reguleerib vooluhulka küttesüsteemis. Sellise küttesüsteemi efektiivsus tõuseks veelgi, kui süsteem arvestaks põranda ja seinte soojusmahtuvusest tuleneva soojuse eraldusega, et tarbida soojusenergiat mõistlikult ning vältida soojusenergia liigset väljastust eriti päevasel ajal, kui soojust on võimalik saada päikeseenergiast. Selline informatsioon aitaks optimeerida võrgu soojusenergia edastust ja tarbijate soojusenergia kasutust ning mugavust [16].

Tootjatel on raske reageerida järsule soojusenergia tarbimise tõusule, mistõttu võiksid targad süsteemid tarbijate poolel ennustada tarbimise kasvu ning muudaks tarbimise stabiilsemaks mõlema poole jaoks. Üks moodus oleks kasutada ära hoone soojusmahtuvust ning kütta hoonet enne tipukoormust natuke rohkem kui vaja, et siluda tipukoormuse nõudlust varasematele aegadele [3].

Pikaajalised optimaalsed elektrienergia süsteemid on sellised, mis kasutavad elektrienergiat targalt ja on sealjuures suure efektiivsuse ja energia säästlikkusega [18]. Targa energia süsteemi välja arendamiseks on vaja integreerida ja tekitada sünergia kaugkütte-, elektri ja gaasivõrkude vahel, et saavutada optimaalne lahendus igale iseseisvale sektorile ja üleüldisele energia süsteemile [21]. Targa elektrivõrk ei arvesta öise ja päevase elektrihinna erinevust, vaid tuule- ja päikeseenergia tootlikkusest muutuvat elektritariifi. Targad seadmed saaksid vastavat infot elektrivõrgust ning suunaksid kütte, boileri ja külmiku automaatselt kokkuhoiurežiimile, kui elektrienergia hind on kallis. Selline tark tarbimine säästab ning hoiab elektri- ja küttekulu stabiilsena just hinnatundlikule tarbijale ning lisaks ühtlustab kogu energiatarbimist [13].

Tarkade süsteemide rakendamine aitab kaasa taastuvate energiaallikate kasutamisele ning on üks osa üleminekul fossiilsetelt kütustelt taastuvatele energiaallikatele. Oluline on rõhutada, et

targad süsteemid suhtes peavad suutma reageerida ning tulema toime kõikivate börsi hindadega ning taastuva energiaallikate muutuvate tootlikkustega [15].

3. ARVUTUSNÄIDE

Arvutusnäites ei lähtuta kindlast situatsioonist ja sellega seonduvatest spetsiifilistest erinevustest vaid keskendutakse kaugkütte kolmanda ja neljanda põlvkonna olulisema erinevuse väljatoomisele – soojuskandja jaotustemperatuurile. Näitena on kasutatud uut teoreetilist ühiselamute arendust, mille soojusvarustuseks ehitatakse soojusvõrk koos biokütustel töötava katlamajaga. Arvutused on tehtud kahele soojusvarustuse alternatiividele.

Alternatiiv 1 kasutab traditsioonilise kaugkütte lahendust. Kahe toru süsteem eraldiseisva eelisoleeritud peale- ja tagasivooluga torud. Soojuskandja temperatuurid peale- ja tagasivoolul: 85 / 55 °C ($\Delta t = 30$ °C). Kasutusel on steel conti terastorud soojusjuhtivusteguriga 0,023 W/mK. Soojusvõrku toodetakse soojusenergiat biomassi kütusel töötavat katlaga.

Alternatiiv 2 kasutab neljanda põlvkonna kaugkütte lahendust. Kahe-torulise element eelisoleeritud torud. Soojuskandja temperatuurid peale- ja tagasivoolul: 50 / 20 °C ($\Delta t = 30$ °C). Kasutusel on steel conti kahe-torulise element teras torud soojusjuhtivusteguriga 0,022 W/mK. Soojusvõrku toodetakse soojusenergiat biomassi kütusel töötavat katlaga, millele on lisatud suitsugaaside kondensaator.

3.1. Tarbijad

Näitena on kasutatud uut teoreetilist ühiselamute arendust. Viis uut kortermaja, sissepuhke ja väljatõmbe ventilatsiooniga. Ühe hoone köetav pindala on 5200 m². Ühiselamu köetav pindala on võetud ehitusregistris olevate ühiselamute keskmine [5]. Energiatarve on uue ehituse korral 120 kWh/m²a, mis hõlmab soojatarbevee, kütte ja ventilatsiooni koormuse. Hoone energiatarve on võetud riigiteataja energiatarvuse miinimumnõude järgi [6]. KredEx mõõdetud andmete järgi on soovitatud tasakaalutemperatuuriks võtta 13°C, kui on tegemist uute kortermajadega. Samal tasakaalutemperatuuril on valitud viimase aasta (2014) kraadpäevade arv ja normaalaasta kraadpäevade arv (viimased 10 aastat) Tallinna piirkonnas [12]. Aastasest küttekoormusest 15% tarbitakse soojatarbeveena ning 85% kütte ja ventilatsioonina [8].

Tabel 3.1.1 Tarbija parameetrid.

Parameeter	Tähis	Väärtus	Ühik
Hoonete köetava pinna pindala	A_H	26 000	m ²
Energiatõhususe soojusenergiatarve	E	120	kWh/m ² a
Tasakaalutemperatuur	t_k	13	°C
Arvutuslik välisõhutemperatuur	t_v	-23	°C
2014 aasta kraadpäevade arv - KRP	$Steg$	2706	°C öp
Normaalaasta kraadpäevade arv	S_N	2994	°C öp
Soojatarbevee tarbimise osakaal	-	15	%
Kütte ja ventilatsiooni tarbimise osakaal	-	85	%

Soojusvõrgus olevate hoonete arvutuslik soojustarbimine saadakse:

$$Q_A = E \cdot A_H \quad (3.1)$$

kus Q_A – aastane arvutuslik soojustarbimine, kWh/a;
 E – energiatõhususe soojusenergiatarve, kW/m²a;
 A_H – hoonete köetavapinna pindala, m².

Tarbija soojatarbevee tarbimine ei sõltu välisõhutemperatuuridest ning loetakse konstantseks aastaringselt. Antud näite korral võtame kogemuslikult soojatarbevee tarbimise osakaaluks 15% arvutuslikust soojustarbimisest.

Tarbijate tegelik soojustarbimine saadakse välisõhu temperatuuri kõikumise kompenseerimisega:

$$Q_{teg} = (Q_A - Q_{tv}) \cdot \frac{S_N}{S_{teg}} + Q_{tv} \quad (3.2)$$

kus Q_{teg} – normaalaasta tegelik soojustarbimine, kWh/a;
 Q_A – arvutuslik aastane soojustarbimine, kWh/a;
 Q_{tv} – soojatarbevee soojustarbimine, kWh/a;
 S_N – normaalaasta kraadpäevade arv tasakaalutemperatuuril, °Cöp;
 S_{teg} – 2014 aasta kraadpäevade arv tasakaalutemperatuuril, °Cöp.

Kraadtundide arvu kraadpäevadest saadakse kraadpäevade arvu korrutamisel 24-ga:

$$KRT = KRP \cdot 24 \quad (3.3)$$

Tarbijate soojustarbimine ilma soojatarbeveeta arvutatakse:

$$N_{sk} = \frac{Q_{kv}}{KRT} \quad (3.4)$$

kus N_{sk} – süsteemi soojustarbimine sõltuvalt välisõhu- ja tasakaalutemperatuuri vahest;
kW/°C

Q_{kv} – kütte ja ventilatsiooni soojustarbimine, kWh/a;

KRT – kraadtundide arv aastas, °Ch/a.

Valemist (3.4) järeldub, et ühiselamute hoonete summaarne erisoojustarbimine on 45 kW/°C ning ühe hoone erisoojustarbimine on 9,01 kW/°C.

Tabel 3.1.2. Soojusvõrgu soojuskoormuse parameetrid.

Parameeter	Tähis	Väärtus	Ühik
Aastane arvutuslik soojustarbimine	Q_A	3 120 000	kWh/a
Soojatarbevee soojustarbimine	Q_{tv}	439 222	kWh/a
Soojatarbevee keskmine võimsus	N_v	50	kW
Normaalaasta tegelik soojustarbimine	Q_{teg}	3 405 316	kWh/a
Kütte ja ventilatsiooni soojustarbimine	Q_{kv}	2 925 928	kWh/a

Süsteemi soojusvõimsuse tipu arvutamine arvutusliku välisõhu- ja tasakaalutemperatuuri vahel arvutatakse:

$$N_k = N_{sk} \cdot (t_K - t_V) + N_v \quad (3.5)$$

kus N_k – soojustarbimise koguvõimsus, kW;

N_{sk} – soojustarbimine, kW/°C;

t_K – tasakaalutemperatuur, °C;

t_V – arvutuslik välisõhutemperatuur, °C;

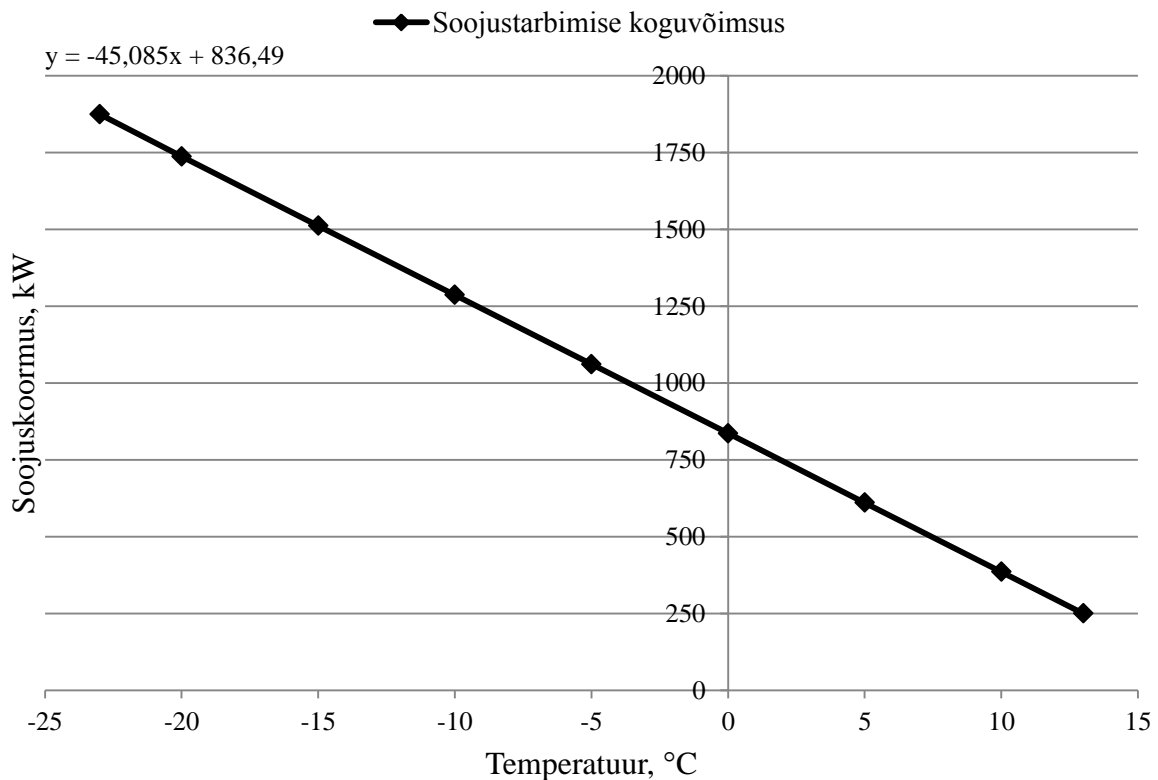
N_v – soojatarbevee võimsus; kW.

Eesti tingimustes soojusvarustuse tipukoormuse projekteerimiseks kasutan välisõhutemperatuuri -23°C ning tasakaalutemperatuuri +13°C.

Valemist (3.5) järeldub, et ühiselamute tarbijate soojusvõimsuse tippkoormus on 1875 kW, mis teeb ühe hoone soojustarbimise tippkoormuse võimsuseks 375 kW.

Soojusvõrgu soojuskoormus sõltuvalt välisõhutemperatuurist (vt. sele 3.1.1.) lähteandmed on toodud lisas 1.

Sele 3.1.1. Soojusvõrgu soojuskoormus sõltuvalt välisõhtutemperatuurist.



Soojusvõrgule soojuskoormuse kestvusgraafiku määramiseks on vaja teada aasta kuu lõikes kraadpäevade või kraadtundide arvu. Kestvusgraafikule märgitakse soojatarbevee võimsus eraldi kütte ja ventilatsiooni koormusest.

Kütte ja ventilatsiooni soojuskoormus arvutatakse:

$$Q_{kv} = N_{sk} * \Delta t * Kp * 24 = N_{sk} * KRP * 24 = N_{sk} * KRT \quad (3.6)$$

kus Q_{kv} – kütte ja ventilatsiooni soojuskoormus kuus, kWh;

N_{sk} – soojustabrimine, kW/°C;

KRT – kraadtundide arv kindlas kuus tasakaalutemperatuuril, °Ch.

Igakaise soojuskoormuse võimsus kütte ja ventilatsioonile arvutatakse:

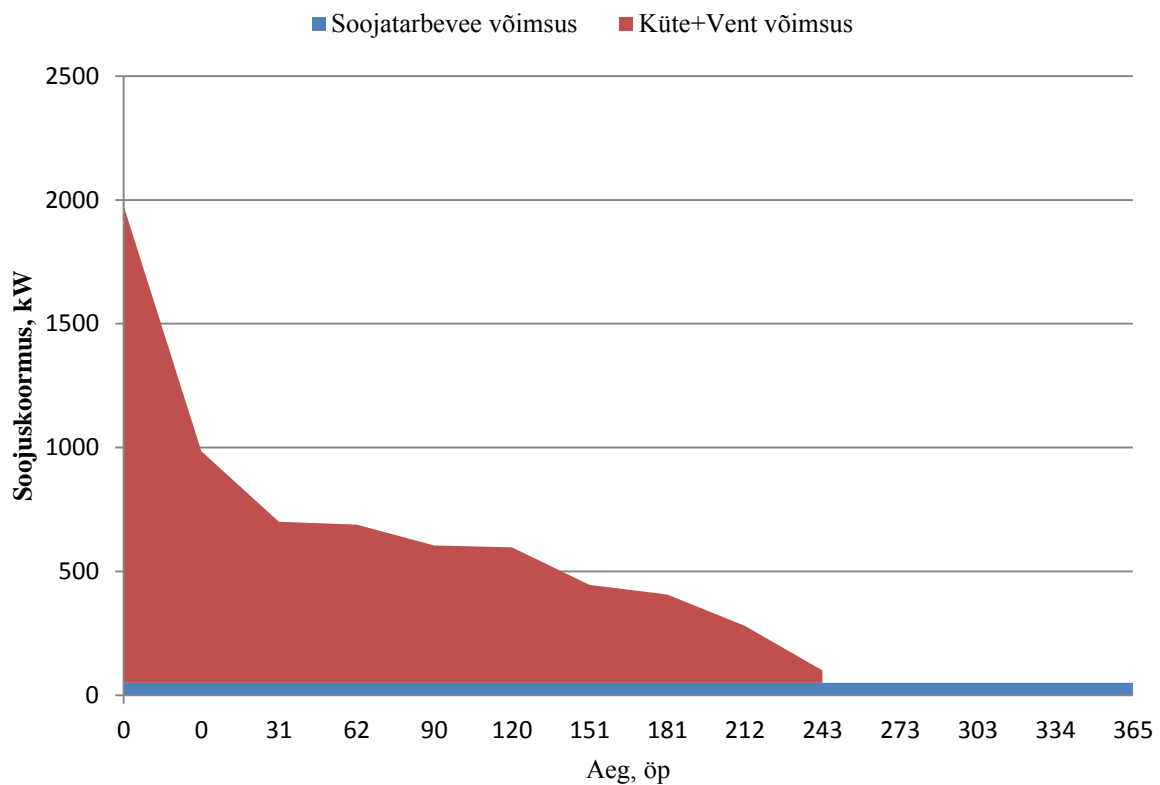
$$N_{kv} = \frac{Q_{kv}}{Kp \cdot 24} \quad (3.7)$$

kus N_{kv} – soojuskoormuse võimsus ühes kuus, kW;

Q_{kv} – kütte ja ventilatsiooni soojuskoormus kuus, kWh;

Kp – kuupäevade arv ühes kuus, öp.

Sele 3.1.2. Tarbimise soojuskoormuse kestvusgraafik.



Soojusvõrgu soojuskoormuse kestvusgraafiku (vt. Sele 3.1.2.) lähteandmed on toodud lisas 2.

3.2. Kaugküttevõrk

Kaugküttevõrgu arvutused on teostatud Logstor A/S programmis. Programmi käitamiseks on vaja sisestada kaugküttevõrgu lõikude pikkused ja võimsused ning teostada toru valik. Programm optimeerib kaugküttevõrgu läbimõõdud vastavalt sisestatud toru valikule, pikkusele ning võimsusele [14].

Alternatiivi 2 (vt. Tabel 3.2.2.) reaalne soojusväljastus katlamajas on väiksem tänu väiksematele soojuskadudele ja asjaolule, et sooja tarbevee tootmiseks kasutatakse osaliselt ka elektrienergiat (elektrienergia kasutus on alla 2% tarbijate energiavajadusest kütte, ventilatsiooni ja tarbevee tootmiseks, vt. ptk. 2.3.2. elektri kasutuse olulisusest). Kaugküttevõrgu parameetrite arvutamine ja hindamine on lihtsustamise eesmärgil tehtud Alternatiiv 1 (vt Tabel 3.2.1) algandmete järgi.

Seles 3.2 on näidatud kaugküttevõrku lihtsustatud eskiisskeem lõikude pikkustega.

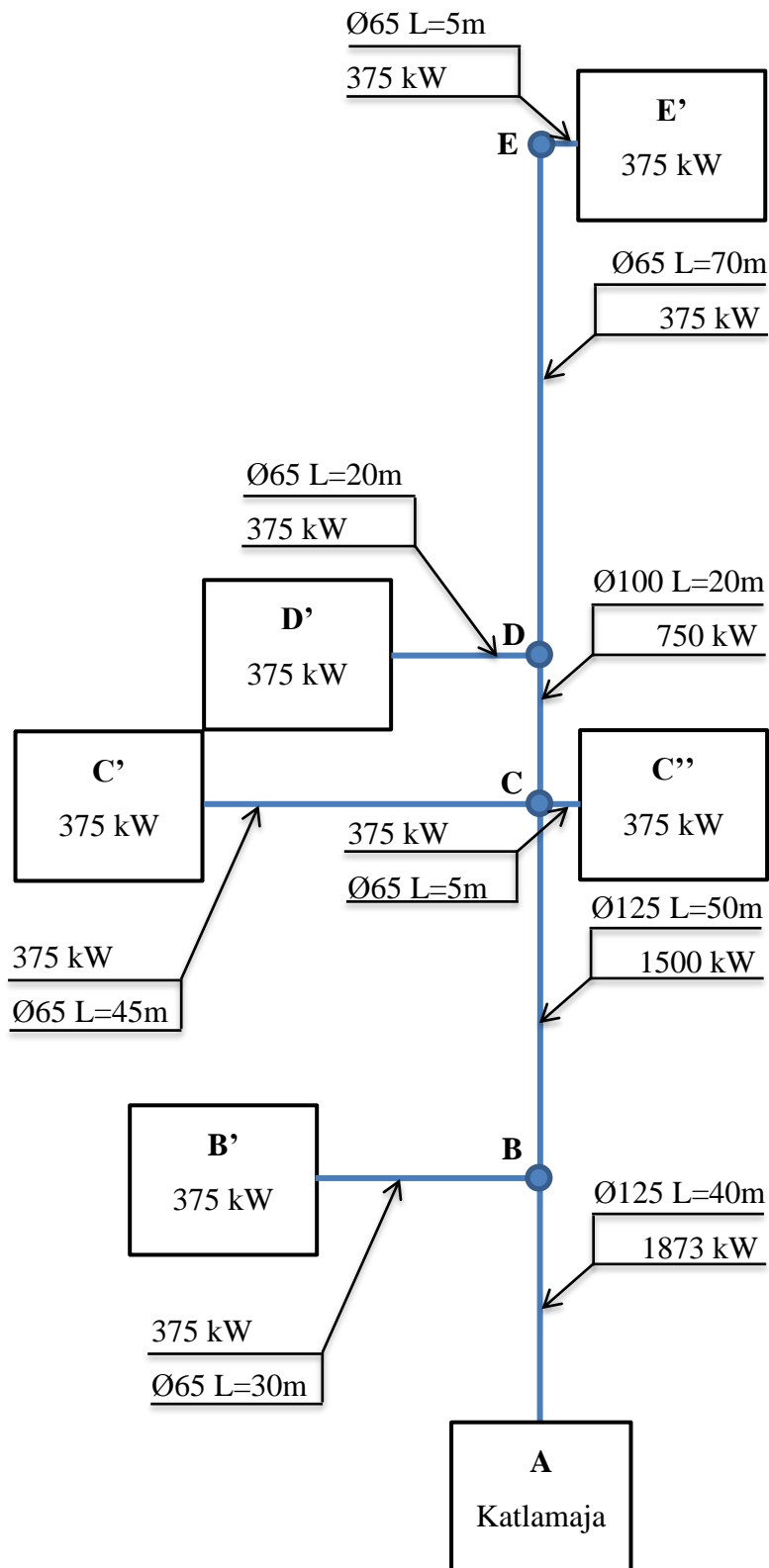
Tabel 3.2.1 Kolmanda põlvkonna kaugkütte arvutus.

Lõik	Pikkus	Võimsus	Läbimõõt	Erirõhulang	Kiirus	Massi kiirus	Rõhukadu	Soojuskadu	Soojuskadu,
	L, m	N, kW	D, mm	R, Pa/m	V, m/s	Q, m/s	ΔP , kPa	Q_{kadu} , W/m	Q_{kadu} , MWh/a
E'-E	5	375	65	99	0,79	2,98	1,01	21,59	0,95
E-D	70	375	65	99	0,79	2,98	14,18	21,59	13,24
D'-D	20	375	65	99	0,79	2,98	4,05	21,59	3,78
C-D	20	750	100	44	0,68	5,95	1,79	23,83	4,18
C''-C	5	375	65	99	0,79	2,98	1,01	21,59	0,95
C'-C	45	375	65	99	0,79	2,98	9,12	21,59	8,51
C-B	50	1500	125	57	0,89	11,9	5,78	26,98	11,82
B'-B	30	375	65	99	0,79	2,98	6,08	21,59	5,67
B-A	40	1875	125	87	1,11	14,86	7,12	26,98	9,45
SUM:	285					SUM:	50,14	SUM:	58,54

Tabel 3.2.2 Neljanda põlvkonna kaugkütte arvutus.

Lõik	Pikkus	Võimsus	Läbimõõt	Erirõhulang	Kiirus	Massi kiirus	Rõhukadu	Soojuskadu	Soojuskadu,
	L, m	N, kW	D, mm	R, Pa/m	V, m/s	Q, m/s	ΔP , kPa	Q_{kadu} , W/m	Q_{kadu} , MWh/a
E'-E	5	375	65	101	0,78	2,99	1,05	5,25	0,23
E-D	70	375	65	101	0,78	2,99	14,67	5,25	3,22
D'-D	20	375	65	101	0,78	2,99	4,19	5,25	0,92
C-D	20	750	100	45	0,67	5,98	1,86	3,43	0,60
C''-C	5	375	65	101	0,78	2,99	1,05	5,25	0,23
C'-C	45	375	65	101	0,78	2,99	9,43	5,25	2,07
C-B	50	1500	125	58	0,88	11,96	5,95	3,43	1,50
B'-B	30	375	65	101	0,78	2,99	6,29	5,25	1,38
B-A	40	1875	125	89	1,1	14,94	7,29	3,43	1,20
SUM:	285					SUM:	51,78	SUM:	11,35

Sele 3.2. Kaugküttevõrk.



3.3. Alternatiivide võrdlus

3.3.1. Kaugküttevõrgu efektiivsus

Kaugküttevõrgu efektiivsust on võimalik hinnata soojuskaoteguriga, mis näitab võrgu suhtelist soojuskadu. Suhtelist soojuskadu on lihtsasti leitav võrgusoojuskao ja võrku toodetud soojusenergia suhtena. Suhteline soojuskadu oleneb kaugküttevõrgu isolatsioonist, torude läbimõõdust, pikkusest ning temperatuurirežiimist.

Soojuskaotegur ehk võrgu suhteline soojuskadu on järgmine:

$$q_{ssk} = \frac{Q_{sk}}{Q_A} = \frac{K_{\ddot{u}} \cdot \left(\frac{A}{L}\right) \cdot \int \theta d\tau}{\left(\frac{Q_A}{L}\right)} \quad (3.8)$$

kus Q_{sk} – võrgu soojuskadu aastas, MWh/a;

Q_A – aastas toodetud soojusenergia, MWh/a;

$K_{\ddot{u}}$ – võrgu soojusläbikandegur, W/m²K;

A – torustiku pindala, m²;

L – torustiku pikkus, m;

θ – temperatuuriintegraal, °Ch.

Mida madalam on kaugküttevõrgu jaotustemperatuurid, seda väiksemad on soojuskaod ning temperatuurirežiimi temperatuuriintegraal:

$$\int \theta d\tau = \left(\frac{t_p + t_t}{2} - t_{\ddot{o}}\right) \cdot \tau \quad (3.9)$$

kus θ – temperatuuriintegraal ehk kraadtundide arv, °Ch;

t_p – pealevoolu temperatuur, °C;

t_t – tagasivoolu temperatuur, °C;

$t_{\ddot{o}}$ – keskmine välisõhutemperatuur aastas, °C;

τ – kütteperioodi aeg aastas, h.

Kaugkütte võrgu keskmine diameeter on järgmine:

$$d_k = \frac{\left(\frac{A}{L}\right)}{2 \cdot \pi}, \text{ m} \quad (3.10)$$

Kaugküttevõrgu soojusisolatsiooni efektiivsust on võimalik hinnata soojuslábikandeteguriga. Mida väiksem soojuslábikandetegur, seda efektiivsem soojusisolatsioon ja soojuskaod. Soojusvõrgu üldine soojuslábikandetegur on leitav järgmiselt:

$$K_{\ddot{u}} = \frac{q_{ssk}}{\left[\frac{\left(\frac{A}{L}\right) \cdot \int \theta d\tau}{\left(\frac{Q}{L}\right)} \right]}, \frac{W}{m^2K} \quad (3.11)$$

Jaotustegur on kaugkütte proportsionaalsustegur, mis väljendab soojuskadude vähendamise võimalust soojusisolatsiooniga. Mida väiksem on jaotustegur, seda väiksem on soojuskaotegur. Üldine jaotustegur on arvatav:

$$q_{jt} = \frac{\left(\frac{A}{L}\right) \cdot \int \theta d\tau}{\left(\frac{Q_A}{L}\right)}, \frac{m^2K}{W} \quad (3.12)$$

Tabel 3.3.1. Alternatiivide kaugküttevõrgu parameetrid.

Parameeter	Tähis	Alternatiiv 1	Alternatiiv 2	Ühik
Soojusenergia toodang	Q_A	3464	3417	MWh/a
Soojusenergia tarbimine	Q_{teg}	3405	3405	MWh/a
Soojuskadu	Q_{sk}	58,54	11,35	MWh/a
Suhteline soojuskadu	q_{ssk}	1,69	0,33	%
Temp. integraal	Θ	3,756	1,715	$10^5 \text{ } ^\circ\text{Ch}$
Torustiku pikkus	L	285	285	m
Keskmine diameeter	d_k	0,086	0,086	m
Torustiku pindala	A	155	155	m^2
Torude eripind	A/L	0,5	0,5	m^2/m
Soojusvõrgu erikoormus	Q/L ,	12,154	11,988	MWh/m
Soojusvõrgu erikadu	Q_{sjk}/L	0,205	0,04	MWh/m
Soojuslábikandetegur	$K_{\ddot{u}}$	0,101	0,043	W/m^2K
Jaotustegur	q_{jt}	0,168	0,078	m^2K / W

Tabel 3.3.1. tulemustest saab järeldada, et alternatiiv 2 on igas parameetris parem kui alternatiiv 1. Alternatiiv 2 omab - väiksemat suhtelist soojuskadu, soojusvõrgu erikadu, soojuslábikandetegurit ning jaotustegurit.

3.3.2. Võrgukaod

Kolmanda põlvkonna võrgu soojuskadu on 58,54 MWh/a. Neljanda põlvkonna võrgu soojuskadu on 11,35 MWh/a. See tõestab, et temperatuuride alandamine ja kahe-toruline

element toru vähendab võrgu soojuskadu ligi 5 korda. Põhiline soojuskaod võit tuleneb soojuskandja temperatuuride alandamisest 35°C võrra. Kolmanda põlvkonna soojuskandja pealevoolu temperatuur on 85°C ning neljanda põlvkonna soojuskandja pealevoolu temperatuur on 50°C. Lisaks vähendab kahe-toruline element soojuskaod kahe kõrvuti asetseva toru ja maapinna vahel. Rahaliselt tähendab 47,19 MWh/a sääst 849 €/a kokkuhoidu, kui kasutada sama katelt.

3.3.3. Kaugküttevõrgu torud

Kaugküttevõrgu torude hindamiseks küsisin kaugküttetorude vahendajatelt erinevate toru süsteemide ja paigalduse hinnapakumised. Kaugkütte torusid müüakse jaomeetrina 12 meetrit tükk [28].

Neljanda põlvkonna kahe-toruline element toru kogu maksumus on suurem, kuid peamine võit nende toru kasutamisega tuleb paigaldus kuludega. Arvutustel eeldati, et kahe-torulise element toru paigaldamine on keskmiselt 10% odavam, kui kahe iseseisva toru paigaldamine. Kulude kokkulöömisel ilmnes, et neljanda põlvkonna lahenduste kasutamine tõi 558 €-se säästu [27, 28].

Tabel 3.3.3. Kaugküttesüsteemi andmed.

Parameeter	Alternatiiv 1			Alternatiiv 2			ühik
Toru läbimõõdud	65	100	125	65	100	125	mm
Toru lõigupikkus	175	20	90	175	20	90	m
Toru hind: L=12m	17	28	32	50	68	85	€/jm
Toru lõike	30	4	16	15	2	8	Jm
Torude maksumus	510	112	512	750	136	680	€
Torud maksumus kokku	1134			1566			€
Torude paigaldus kulu	345	440	490	311	396	441	€/jm
Torude paigalduse maksumus	5175	880	3920	4665	792	3528	€
Torude paigaldus kokku	9975			8985			€
Kogu maksumus	11 109			10 551			€

3.3.4. Võrgu pumpamiskulud

Kolmanda põlvkonna ja neljanda põlvkonna võrgu rõhu kao erinevus on antud süsteemi arvutuste juures tühine. Lihtsustatud arvutuse tõttu loeme rõhukaod soojussõlmedes

põlvkondade vahel võrdseks ning vaatame ainult kahe erineva toru mõju rõhu kadudele. Kolmanda põlvkonna süsteemi rõhu kadu on 50,14 kPa. Neljanda põlvkonna süsteemi rõhu kadu on 51,78 kPa. See teeb erinevuseks 1,64 kPa neljanda põlvkonna süsteemi kahjuks. Rõhu kao erinevus ei ole suur, sest mõlema süsteemi toru läbimõõdud jäid sellisesse vahemikku, et on võimalik kasutada nii kahte eraldiseisvat toru, kui ka kahe-torulise element toru. Suurematel läbimõõdudel ei ole kahe-torulise elemendi kasutamine võimalik, sest nii suuri torusi (>125mm) ei tehta.

Leidmaks lihtsustatud elektrikulu rõhu kaost tingitud lisa pumpamiseks võib kasutada järgmist valemit:

$$\Delta P = \frac{\Delta H \cdot Q}{367 \cdot \eta} \quad (3.13)$$

kus ΔP – pumba võimsus, kW;
 ΔH – survekõrgus, mH₂O;
 Q – voolukiirus, m³/h;
 η – pumba kasutegur, %.

Arvutades mõlema põlvkonna süsteemi rõhu kao kompenseerimiseks vaja minevat pumba erivõimsust on võimalik leida, kui palju lisaks peab üks süsteem töötama võrreldes teisega ning kuidas see rahaliselt avaldub:

$$C_p = (\Delta P_2 - \Delta P_1) \cdot \tau \cdot C_e \quad (3.14)$$

kus C_p – Elektrienergia kulu, €/a
 ΔP – pumba võimsus, kW
 τ – pumba tööaeg, h;
 C_e – elektri hind lõpptarbijale, €/kWh.

$$C_p = (0,0407 \text{ kW}) \cdot 8760 \text{ h} \cdot 0,106 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 37,79 \text{ €/a}$$

Elektrienergia hinna ümardame kõikuval elektri hinna turul 38 €/a, ning ei arvesta elektri hinnaga kaasnevat lisatasust, sest katlamajal on omatarve, ning elektrienergia tarbimine ei ole seotud ainult soojuskandja pumpamisega. Antud juhul on arvutatud ainult rõhu kaost tekkinud lisa elektrienergia tarbimine.

3.3.5. Tarbijate küttesüsteem

Alternatiiv 2 kasutab madalaid soojuskandja temperatuure, seega on efektiivseim meetod küttevajaduste rahuldamiseks põrandaküte. Alternatiiv 1 korral on põrandaküte kõrgete temperatuuride tõttu on otstarbekam paigaldada radiaatoreid.

Radiaatorid on kallimad kui põrandakütte seadmed. Põrandakütte korral on paigalduskulud suuremad võrreldes radiaatorkütte paigalduskuludega. Lõppkokkuvõttes on mõlema süsteemide kulu enam vähem võrdväärne, mistõttu ei too seda hilisemates võrdlustes välja [28].

3.3.6. Soojusenergia tootmine

Antud kaugküttevõrgu tippkoormuse katmiseks on vaja kasutada katelt võimsusega 1,9 MW.

Vajaliku katla võimsuse arvutamiseks koos suitsugaaside kondensaatoriga on järgmine:

$$P = \frac{N_k}{1 + \eta_k} \quad (3.15)$$

kus P – katla nimivõimsus, MW;

N_k – süsteemi soojusvõimsuse tipp, MW;

η_k – kondensaatori lisavõimsus, %

Valemit kasutades saame katla nimivõimsuseks 1,28 MW. See tähendab, et kondensaatori lisavõimsus on 0,64 MW ehk 50% nimivõimsusest.

Suitsugaaside kondensaatori kasutamine võimaldab hoida kokku kulu kasutades väiksema võimsusega katelt, sest suitsugaaside kondenseerumisega on võimalik väga madala tagasivoolu temperatuuriga saada suurel hulgal lisavõimsust. Alternatiiv 1'le on võimalik samuti lisada suitsugaaside kondensaator, aga kõrgete soojuskandja temperatuuride pärast ei ole see nii efektiivne kui madalate soojuskandjate temperatuuridega.

Vaatame olukorda, kus alternatiiv 1 kasutab 1,9 MW tahkekütusekatelt ning alternatiiv 2 kasutab 1,28 MW katelt ning 0,64 MW suitsugaaside kondensaatorit.

Puiduhakkel töötava katla erimaksumus on 300 000 €/MW, mis teeb 1,9 MW katla maksumuseks 570 000 € ning 1,28 MW katla maksumuseks 390 000 €. See on märkimisväärne sääst, mille võib saavutada kasutades suitsugaaside kondensaatorit koos madala soojuskandja temperatuuridega võrgus. 180 000 € sääst tähendab seda, et kondensaatori ühikmaksumuseks võib arvutada 280 500 €/MW. Sellisel juhul on 1,28 MW ja 0,64 MW suitsugaaside kondensaatoriga katel sama kallis, kui 1,9 MW-e katel. Kui suitsugaaside kondensaatorit on võimalik soetada odavamalt kui 280 500 €/MW ehk antud juhul 180 000 €, siis on antud lahendus on parem kondensaatoriga.

Lisaks tuleb arvestada suitsugaaside kondensaatori elektrimaksumust, mis etteantud elektrikulu ja elektrihinna juures on ~596 €/a. See ei ole suur kulutus, kuid tuleb kuluna kirja panna.

$$C = P_k \cdot C_k \cdot \tau \cdot C_e \quad (3.16)$$

kus C – Elektrienergia kulu, €;

P_k – kondensaatori võimsus, kW;

C_k – kondensaatori elektrienergia erikulu, kW/MW;

τ – kondensaatori tööaeg, h;

C_e – elektri hind lõpptarbijale, €/kWh.

Tabel 3.3.6. Suitsugaaside kondensaatori valik.

Parameeter	Tähis	Väärtus	Ühik
Süsteemi soojusvõimsuse tipp	N_k	1,9	MW
Tahkekütuse katla kasutegur	η	85	%
Katla nimivõimsus	P_1	1,9	MW
Kütuse niiskus (puiduhake)	W	50	%
Parameeter	Tähis	Väärtus	Ühik
Tagasivoolu temperatuur	T_t	20	°C
Lisavõimsus kondensaatorist		50	%
Kondensaatoriga katla nimivõimsus	P_2	1,28	MW
Kondensaatori nimivõimsus	P_k	0,64	MW
Kondensaatori elektrierikulu	Z	1	kW/MW
Elektri hind lõpptarbijale	C_e	0,106	€/kWh
Kondensaatori elektrimaksumus	C	596	€/a
Katla erimaksumus		300 000	€/MW

3.3.7. Kütusekulu

Uue tahkekütuse katla keskmine kasutegur on 85%. Kasutades suitsugaaside kondensaatorist saadud lisavõimsust, muutub katla kasutegur järgmiselt:

$$\eta = \eta_k * (1 + \eta_{ko}) \quad (3.17)$$

kus η – katla summaarne kasutegur, %;

η_k – katla kasutegur, %;

η_{ko} – kondensaatori lisavõimsus katlavõimsusest, %.

Eelnevat valemit rakendades, saab alternatiiv 2 suitsugaaside kondensaatori kasutamisega kasuteguriks 127,5 %.

Kütusekulu arvutamiseks on vaja teada, kui palju kaugküttesüsteemi soojusenergiat toodeti.

Soojusenergia tootmine kaugküttevõrku on mõjutatud katla kasutegurist ning võrgu kaost.

Soojusenergia aastane toodang arvutatakse järgmiselt:

$$Q_t = Q_{teg} + Q_{kadu} \quad (3.18)$$

kus Q_t – Soojusenergia toodang võrku, MWh/a;

Q_N – Soojusenergia tarbimine normaalaastal, MWh/a;

η – katla kasutegur, %;

Q_{kadu} – kaugkütte võrgukadu, MWh/a.

Tahkekütusena kasutame biomassi ehk puiduhaket. Kütuse hind on 18 €/MWh. Kütteväärtus 3,2 MWh/t. See teeb kütuse hinnaks 57,6 €/t.

Tabel 3.3.7 Alternatiivide kütusekulu.

Alternatiiv	Kasutegur, %	Soojusenergia toodang, MWh/a	Kütuse kulu, t/a	Kütuse maksumus, €	Rahaline kokkuhoid, €
1 – kondensaatorita	85	3464	1 274	73 382	0
2 – kondensaatoriga	127,5	3417	838	48 269	25 114

Suitsugaaside kondensaator koos madala soojusvõrgu temperatuuridega on palju efektiivsem, kui seda kõrgemate soojuskandja temperatuuridega. Tulemused kinnitavad, et madala temperatuuriline kaugküttevõrk koos madalate soojuskadudega ja suitsugaaside kondensaatoriga tagavad märkimisväärse kütuse kulu vähenemise ning rahalise kokkuhoiu.

3.3.8. Elektrienergia kulu

Alternatiiv 2-ga tulenev lisa elektrienergia tarbimine on põhjendatud peatükis 2.3.2 ja 3.2. Neljanda põlvkonna kaugkütte kohaselt on kuumatava soojuskandja temperatuur 50°C, kuid tarbijate juures on vajalik soojatarbevee temperatuur 55°C. See tähendab, et elektrienergia lisa kulu tarbijate juures tuleneb vajadusest tõsta soojatarbevee temperatuuri 5°C võrra.

Kui külma tarbevee temperatuur võtta 15°C, siis see tähendab, et soojusvõrk tõstab vee temperatuuri 35°C võrra, ning elektrienergia arvelt 5°C võrra. Tinglikult saame sel juhul jagada soojatarbevee tarbimise suhtesse 7:1. Kogu soojatarbevee tarbimisest 7/8 saadakse kaugküttevõrgust ning 1/8 lisa elektrienergiast. Arvestades, et soojatarbevee vajadus on 439 222 kWh/a, siis elektrienergiat soojatarbeveeks kasutatakse 54 903 kWh/a. Elektrihind lõpptarbijale on 0,106 €/kWh, mis teeb lisa elektrienergia kulutuseks ~5820 €/a.

3.4. Alternatiivide kokkuvõte

Erinevate kaugküttevõrgu alternatiivide lihtsustatud analüüsil selgus, et alternatiiv 2 ehk neljanda põlvkonna kaugküte on parem lahendus uue arenduse korral, kui traditsiooniline kaugküte.

Järgnevas tabelis (vt. tabel 3.4) on välja toodud eelnevalt analüüsitud alternatiivide investeeringute võrdlus.

Tabel 3.4. Alternatiivide investeeringute kokkuvõte.

Investeering	Ühik	Alternatiiv 1	Alternatiiv 2	Võrdlus
Torude kogu maksumus	€	11 109	10 551	558
Pumpamise elektrienergia erikulu	€/a	0	38	-38
Katla maksumus	€	570 000	390 000	180 000
Suitsugaaside kondensaatori maksumus	€	0	130 000	-130 000
Kondensaatori elektrienergia erikulu	€/a	0	596	-596
Kütuse kulu	€/a	73 382	48 269	25 113
Soojatarbevee elektrienergia erikulu	€/a	0	5820	-5 820
Investeeringute kogu maksumus	€	654 491	585 274	69 217
Torustikku eluiga	a	40	40	
Katla eluiga	a	20	20	
Kondensaatori eluiga	a	0	15	

Investeering	Ühik	Alternatiiv 1	Alternatiiv 2	Võrdlus
Amortisatsiooni kulu	€/a	28 778	28 430	348
Kulutused koos amortisatsiooniga alter	€/a	102 160	83 153	19 007
Soojusenergia tarbimine	MWh/a	3405		
Soojusenergia tootmise hinna vahe	€/MWh	5,58		

Alternatiiv 2 eelised saab kokku võtta järgmiselt:

1. Madalama soojuskandja temperatuuri kasutamine optimeeritud kahe-torulise element torus vähendab kaugküttevõrgu soojuskadu pea 5 korda. Alternatiiv 1 võrgu soojuskadu on 58,54 MWh/a ning Alternatiiv 2 võrgu soojuskadu 11,35 MWh/a.
2. Kõik uuritud kaugküttevõrgu efektiivsus näitajad on alternatiiv 2 kasuks. Neljanda põlvkonna kaugkütte suhteline soojuskadu, soojusvõrgu erikadu, soojuslábikande tegur ja jaotustegur on väiksemad ehk efektiivsemad võrreldes traditsioonilise kaugküttega.
3. Kahe-torulise element toru soojuslábikande tegur on arvutuste põhjal 2,3 korda väiksem ning jaotustegur 2,15 korda väiksem.
4. Kahe-torulise element toru kasutamine suurendab alginvesteeringut kallimate torude näol, kuid paigalduskulud on madalamad ning tagavad kokkuvõttes soodsama investeeringu.
5. Kahe-torulise element toru kasutamine suurendab võrgu rõhukadu, kuid see ei ole märkimisväärne, kui kaugküttevõrk on optimeeritud. Teistsuguste torude kasutamine alternatiiv 2 korral suurendab üldist rõhukadu ainult 1,64 kPa.
6. Madalamate soojuskandja temperatuuride kasutamine ei põhjusta suuri lisa kulutusi võrgule, sest temperatuurigradient ($\Delta t = 30^{\circ}\text{C}$) jääb samaks mõlemate alternatiivide kasutamisel.
7. Madalamate soojuskandja temperatuuride kasutamine muudab suitsugaaside kondensaatori töö efektiivsemaks, väljastades 20°C soojuskandja tagasivooluga 50% lisavõimsust katla võimsusest. 50°C tagasivooluga on kondensaatori väljastav lisavõimsus kõigest 26%, mis on ligi 2 korda vähem.
8. Suitsugaaside kondensaatori kasutamisel on võimalik kasutada väiksema võimsusega katelt, mis on odavam. Alternatiivide võrdluses on arvatud, kui suitsugaaside kondensaator soetada maksumusega 280 500 €/MW, siis on alternatiiv 2 ikkagi kasulikum ning odavam kui alternatiiv 1. Kui suitsugaaside kondensaator soetada veel odavama ühikmaksumusega, siis see muudab soojusenergia tootmise hinda oluliselt soodsamaks.

9. Suitsugaaside kondensaatori kasutamine vähendab oluliselt soojusvõrgus kasutatava kütuse kulu, sest kondensaatorist saadav lisavõimsus tõstab katla üldist kasutegurit, mistõttu on kütuse kulu väiksem. Alternatiivide võrdluses on arvatud, et katlas väheneb kütuse kulu 1,5 korda tänu suitsugaaside kondensaatorile.
10. Väiksem kütuse kulu avaldub koheselt ka kasulikult kütuse maksumuses, mis katlas koos suitsugaaside kondensaatoriga on samuti 1,5 korda väiksem.
11. Alternatiivide investeeringute võrdluses on alternatiiv 2 investeeringute üldine kogu maksumus 69 217 € odavam ning iga-aastased kulutused koos amortisatsiooniga on samuti 19 007 € odavam.
12. Alternatiiv 2 soojusenergia tootmise hind on 5,58 €/MWh odavam kui alternatiiv 1.
13. Alternatiiv 2 saavutab suurema küttekulude kokkuhoiu tarbijatele, tootes soojusenergiat odavamalt kui alternatiiv 1.

KOKKUVÕTE

Kaugküttevõrgu süsteem tinglikult koosneb kolmest osast: tootja, võrk ning tarbija. Olemasolevate soojusvarustussüsteemide arendus ja tõhustamine saab toimida ainult tarbija ja tootja mõistvas ja heas koostöös alusuuringute tegemiseks, et leidmaks lahendusi probleemidele, mis tekivad põlvkondade vahetusega.

Neljanda põlvkonna eesmärk on:

- kasutada madala temperatuurilist soojuskandjat (~30 – 70°C) kaugküttevõrgus, tagades sellega kõikide olemasolevate ning uute võrguga liituvate hoonete soojusvarustus;
- optimeerida võrku vastavalt madalatemperatuurilistele soojuskandja tingimustele, vähendades sellega soojuskadu ning kütusekulu soojusenergia tootmises;
- soodustada koostootmist ning kohalikke taastuvate energiaallikate kasutust, vähendades kasvuhoonegaaside emissiooni;
- muuta elektri- ja soojusenergia tarbimist säästlikumaks, rakendades tarku süsteeme.

Lõputöös täideti seatud eesmärgid tutvustada kaugküttevõrgus osalejatele neljanda põlvkonna arendusi ja madala temperatuurilise soojuskandja eeliseid kaugküttevõrgus. Lõputöö sisaldab meetmeid, kuidas rakendada taastuvaid energiaallikaid, tõhustada tootmist ning kaugküttevõrku ja lahendada leegionäritõve puhangut neljanda põlvkonna kaugküttega. Bakalaureusetöö on igati kasulik, sest töö kirjutamise hetkel ei leidnud ühtegi ülevaatliku eesti keelset neljanda põlvkonna kaugkütte materjali.

On ilmne, et iga kaugküttevõrk on erinev ning ühtseid meetmeid põlvkonna vahetuseks ei ole, sest võimalusi on mitmeid ning igaüks neist nõuab spetsiifilisemat majanduslikku analüüsi. Põhiline on, et järgitakse neljanda põlvkonna kaugkütte eesmärgi ja alustatakse säästlikumat mõtteviisi. Töös tehtud kontrollarvutused olid positiivsed neljanda põlvkonna kaugkütte kasutamise osas ja annavad optimismi, et praegustel tingimustel uue arenduse korral võib neljanda põlvkonna kaugkütte pakkuda keskkonna säästliku ja majanduslikult soodsa soojusvarustuse.

Lõputöö järgne eesmärk on innustada tootjaid, võrku ja tarbijaid töötama ühtselt kaugkütte efektiivsemaks muutmisel. Edaspidi võib kasutada bakalaureusetööd, et uurida ja täpsemalt analüüsida väljatoodud tegureid vastavalt situatsioonile ja arendusele. Edasist uurimist vajab iga Eesti kaugküttevõrk eraldi, et leida sobivaim ja säästlikum investeering, mis oleks kõigile kasulikum lahendus, et neljas kaugkütte põlvkond leiaks laialdasemat kasutust.

SUMMARY

District heating system conventionally consists of three parts – producer, grid and consumer. Further development towards system efficiency of existing district heating can only function in good faith and collaboration between producer and consumer, to start research and case studies in order to solve technical difficulties that arise from district heating generation change.

Fourth generation district heating purpose is:

- ability to supply and use low-temperature district heating (~30 – 70°C) in district heating for heating and domestic water, while being able to fulfil the heating needs for existing consumers and new consumers;
- to optimize district heating grid for low supply and return temperatures in order to lower heat losses and reduce fuel use for thermal energy;
- to predispose the use of combined heat and power plants in district heating combined with renewable energy sources in order to reduce greenhouse gases emission;
- to reduce consumption of electricity and thermal energy in district heating with smart energy systems.

Purpose of bachelor's thesis can be considered a success, as low-temperature district heating advantages were introduced and summarized in Estonian, as during writing of thesis, fourth generation district heating lacked compendious public research in Estonian. The bachelor's thesis included methods how to implement renewable energy sources to the district heating system in favour of green energy production and how to solve legionella bacteria spread in district heating systems.

It is evident that every district heating system is different and generation change cannot be resolved with same methods because there are many possibilities and factors to cover and each one of them requires specific economic analysis. It is essential to follow fourth generation district heating concept and goals toward economical and green mind set. Calculations were in favour of using fourth generation district heating and give optimism that new development offers favourable economic environment and better district heating compared to third generation district heating.

Bachelor's thesis goal is to encourage producers, grid and consumers of district heating collaborate in order to make district heating system more effective. For future research of fourth generation district heating the bachelor's thesis can be used to carry out specific research and analysis of fourth generation technological methods for certain real life situations and developments. As said before, every Estonian district heating system requires its own research in order to find the best and the most economic investment for generation change to fourth generation district heating.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. 4DH. [WWW] <http://www.4dh.dk> (15.03.2015)
2. Arengufond. (2013). Kaugkütte energiasääst. [WWW] http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/4/46/Eesti_Arengufond._Kaugk%C3%BCtte_energias%C3%A4%C3%A4st.pdf (18.05.2015)
3. Connolly D, Lund H, Mathiesen BV, Østergaard PA, Möller B, Nielsen S. (2013) Smart energy systems: holistic and integrated energy systems for the era of 100% renewable Energy.[WWW] http://vbn.aau.dk/files/78422810/Smart_Energy_Systems_Aalborg_University.pdf (18.05.2015)
4. Eelisolieritud kaugküttetorustike projekteerimine ja paigaldamine: juhendmaterjalid. Osad 1.-8. Saksamaa Kaugkütte Ühing. Tallinn: Eesti Jõujaamade ja Kaugkütte Ühing, 2014. (Pärnu: Gutenbergi Pojad).
5. Ehitusregistri koduleht. [WWW] <https://www.ehr.ee> (18.05.2015)
6. Energiatõhususe miinimumnõuded. Riigiteataja I, 05.09.2012, 4.
7. Frederiksen, Svend. Werner, Sven. District heating and cooling. Lund: Studentlitteratur, 2013.
8. Ingermann, Karl. Soojusvarustusüsteemid. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2003.
9. Kask, Ülo. (2013) Kaugküte: mugav, tõhus ja soodne: teatmik kohalike omavalitsuste spetsialistidele, kinnisvara arendajatele ja haldajatele, korteriühistute juhtidele. Tallinn: Ortwil, 2013.
10. Katlamajade maksumuse, tehnilise lahenduse ja tegevuskulude eksperthinnang. [WWW] http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/2/2c/AF_Estivo._Katlamajade_maksumuse_tehnilise_lahenduse_ja_tegevuskulude_eksperthinnang.pdf (18.05.2015)
11. Kaugküte. [WWW] <http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Kaugk%C3%BCtte> (15.03.2015)
12. KredEx'i koduleht. [WWW] <http://www.kredex.ee/en/> (18.05.2015)
13. Lehtveer, Urmo. Trapido Toomas. Taastuvenergia käsiraamat. Tartu: Eestimaa Looduse Fond, 2007. (Tartu: Guttenberg, 2007).
14. Logstor'i koduleht. [WWW] <https://www.logstor.com/EN/Pages/frontpage.aspx> (18.05.2015)

15. Lund, Henrik. Andersen, Anders N. Østergaard, Poul Alberg. Mathiesen, Brian Vad. Connolly, David. From electricity smart grids to smart energy systems – A market operation based approach and understanding. - Energy 2012, 42, 96-102 [Online] ScienceDirect (18.05.2015)
16. Lund, Henrik. Werner, Sven. Wiltshire, Robin. Svendsen, Svend. Thorsen, Jan Eric. Hvelplund, Frede. Mathiesen, Brian Vad. (2014) 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. - Energy, 2014, 68, 1-11. [Online] ScienceDirect (15.03.2015)
17. Maasoojus Eestis. [WWW] http://geothermal.org.ee/doc/Maasoojus_Eesti.pdf (18.05.2015)
18. Mathiesen BV, Lund H. Comparative analyses of seven technologies to facilitate the integration of fluctuating renewable energy sources - Renewable Power Generation I, 2009, 3-2, 190-204. ISSN: 1752-1416 [Online] IEEE Xplore Digital Library (18.05.2015)
19. Ots, Arvo. Soojustehnika aluskursus. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2011.
20. Recommendations for prevention of Legionella growth in installations inside buildings conveying water for human consumption. Standard: CEN/TR 16355:2012. Tallinn, Eesti Standardikeskus, 2015.
21. Ridjan, Iva. Mathiesen, Brian Vad. Connolly, David. Duić, Neven. The feasibility of synthetic fuels in renewable energy systems. - Energy, 2013, 57, 76-84. [Online] ScienceDirect (18.05.2015)
22. Riigi tegevus soojusvarustuse jätkusuutlikkuse tagamisel. Tallinn: Riigikontrolli aruanne Riigikogule, 4. Märts 2011.
23. Säästva arengu sõnaseletusi kodulehekülg. [WWW] <http://www.seit.ee/sass/?ID=1> (18.05.2015)
24. Terviseameti kodulehekülg. [WWW] <http://www.terviseamet.ee> (15.03.2015)
25. Toward 4th Generation District Heating [WWW] http://energia.fi/sites/default/files/iea_annex_x_final_report_2014_-_toward_4th_generation_district_heating.pdf (15.03.2015)
26. Twin steel pipe. [WWW] <http://www.vitalenerginetworks.co.uk/pre-insulated-pipes/> (18.05.2015)
27. Uponor eelisoleeritud tarbe ja küttevõetorud. [WWW] <http://www.torujyri.ee/torud/uponor> (18.05.2015)
28. Uponor koduleht. [WWW] <https://www.uponor.ee/> (18.05.2015)
29. X. Yang, H. Li, S. Svendsen. Review of various solutions for avoiding critical levels of Legionella bacteria in domestic hot water system: the 8th Sustainable Development of

Energy, Water and Environment Systems, SDEWES conference 2013, Dubrovnik, Croatia.

LISAD

Lisa 1. Soojusvõrgu soojuskoormus sõltuvalt välisõhtutemperatuurist.

Välisõhu temperatuur, °C	Soojustarbimise- Võimsus, kW	Ühe hoone võimsus, kW
-23	1875	375
-20	1737	347
-15	1512	302
-10	1287	257
-5	1062	212
+0	836	167
+5	611	122
+10	386	77
+13	251	50

Lisa 2. Soojuskoormuse graafik.

Kuu -	Kp, öp	KRP, °C öp	KRT, °C h	Δt, °C	t _K -t _V , °C	Tarbimine, Q _{kv} , kWh	Võimsus, N _{kv} , kW	Soojatarbevesi N _v , kW
Jaanuar	31	609	14614	19,65	-6,6	658 496	885	50
Veebruar	28	366	8784	13,07	-0,1	395 746	588	
Märts	31	342	8208	11,03	2	369 796	497	
Aprill	30	230	5520	7,67	5,3	248 693	345	
Mai	31	124	2976	4,00	9	134 078	180	
Juuni	30	37	888	1,23	11,8	40 007	56	
Juuli	31	1	24	0,03	13	1081	1,5	
August	31	3	72	0,10	12,9	3244	4,4	
September	30	34	816	1,13	11,9	36763	51	
Oktoober	31	211	5064	6,81	6,2	228 149	306	
November	30	336	8064	11,20	1,8	363 308	504	
Detsember	31	413	9912	13,32	-0,3	446 566	600	
	365	2706	64944	7,44	5,6	2 925 928		

Tasakaalutemperatuuri ja välisõhutemperatuuride vahe Δt on arvatud järgmiselt:

$$\Delta t = \frac{KRP}{Kp}$$

kus Δt – temperatuuride vahe, °C;

KRP – Kraadpäevade arv kuus, °C öp;

Kp – kuupäevade arv ühes kuus, öp.

Välisõhu keskmise temperatuuri on võimalik seejärel avaldada järgmiselt:

$$t_{vk} = \Delta t - t_K$$

kus t_{vk} – välisõhu keskmine temperatuur, °C;

Δt – temperatuuride vahe, °C;

t_K – tasakaalutemperatuur, °C.