

Energiatehnoloogia instituut

**REOVEE JÄÄKSOOJUSE KASUTAMISE
POTENTSIAAL KEILA KAUGKÜTTEVÕRGUS**

**THE POTENTIAL OF IMPLEMENTING WASTE HEAT FROM
SEWAGE WATER TO THE DISTRICT HEATING NETWORK
IN KEILA**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Grete-Marie Kajandi

Üliõpilaskood: 179375EACB

Juhendaja: Lektor Igor Krupenski, PhD

Tallinn 2020

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"02" juuni 2020

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetööle esitatud nõuetele

"....." 202.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Grete-Marie Kajandi (sünnikuupäev: 25.12.1995),

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Reovee jääksoojuse rakendamise potentsiaal Keila kaugküttevõrgus“,

mille juhendaja on Igor Krupenski,

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.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkiri)

02.06.2020

Energiatehnoloogia instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Grete-Marie Kajandi, 179375EACB
Õppekava, peeriala: Keskkonna-, energia- ja keemiatehnoloogia, EACB
Juhendaja(d): Lektor Igor Krupenski, PhD

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Reovee jääksoojuse kasutamise potentsiaal Keila küttevõrgus

(inglise keeles) The potential of implementing waste heat from sewage water to the district heating network in Keila

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Kaugküttesüsteemi kirjeldus
2. Jääksoojuse rakendamise kirjeldus kaugküttevõrku
3. Reoveepuhastusjaama kui jääksoojuse allika potentsiaali väljaselgitamine Keila kaugküttevõrgus

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse läbitöötamine	22.05.20
2.	Teoreetilise osa koostamine	22.05.20
3.	Arvutusliku osa läbitöötamine	26.05.20

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "02" juuni 2020.a

Üliõpilane: ".....".....202....a
/allkiri/

Juhendaja: ".....".....202....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....202....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	6
Lühendite ja tähiste loetelu	7
SISSEJUHATUS	8
1. KAUGKÜTE.....	10
1.1 Kaugkütte struktuur	10
1.2 Kaugkütte areng	13
2. JÄÄKSOOJUSE RAKENDAMINE KAUGKÜTTEVÕRKU	16
2.1. Jääksoojuse allikad.....	16
2.1.1 Kõrgetemperatuurilised jääksoojuse allikad	16
2.1.2 Madalatemperatuurilised allikad	17
2.2 Jääksoojuse rakendamise eeldused	20
3. JÄÄKSOOJUSE RAKENDAMINE EUROOPAS	24
4. REOVEE JÄÄKSOOJUSE RAKENDAMINE KEILAS	28
KOKKUVÕTE	35
SUMMARY	37
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	39
LISAD.....	43

EESSÕNA

Antud töö on kirjutatud Tallinna Tehnikaülikooli keskkonna-, energia- ja keemiatehnoloogia eriala bakalaureuseõppe lõputööks. Töö teema, reovee jääsoojuse kasutamise potentsiaal küttevõrgus, pakuti välja töö juhendaja Igor Krupenski poolt. Töö uurimismeetod põhineb kirjanduse analüüsil, kasutati nii trükituid kui ka internetipõhiseid allikaid. Käesolevas töös uuriti kaugkütte põhimõtteid, kaugkütte ajalugu, jääsoojuse allikaid, jääsoojuse rakendamise eeldusi ning reovee jääsoojuse rakendamise võimalust Keila kaugküttevõrku. Töö valmimisele aitasid kaasa juhendaja soovitusel ja tähelepanekud.

Töö autor tänab oma juhendajat Igor Krupenski, kõiki teisi õppejõude, kes bakalaureuseõppe jooksul oma teadmisi jaganud on ning oma pere ja sõpru lakkamatu toe eest.

Lühendite ja tähiste loetelu

MW megavatt

TWh teravatt-tund

MJ megadžaul (= 10^6 J)

PJ petadžaul (= 10^9 MJ)

COP jõudluskoefitsent (*coefficient of production*)

PJ/a petadžauli aastas

SISSEJUHATUS

Energeetika, kui pidevalt arengus olev valdkond vajab pidevalt uudseid lahendusi. Eriti aktuaalne on see paikades, kus välitemperatuur talveperioodil langeb madalatesse miinuskraadidesse. Võrdlemisi külmade talvetega Eesti on hea näide riigist, kus soojusenergia tootmine on väga olulisel kohal.

Eestis kasutatavatest küteliikidest on kõige suurem osakaal kaugkütel, mis moodustab soojusvarustustest umbes 70%.^[1] Kaugkütte piirkondi esineb kõikjal üle Eesti, neist suurimate klientide arvuga asuvad Eesti suurimates linnades – Tallinnas, Tartus ja Pärnus.

Kaugküte võimaldab reguleerida süsihappegaasi ja suitsugaaside emissioone, reguleerides koostootmisjaamade poolt atmosfääri väljastatavaid heitmeid.

Minevikus on Eestis energiaallikana peamiselt kasutatud energiarikast maavara – põlevkivi. Põlevkivist energia tootmise käigus suure hulga jääkproduktide tekke tõttu on aastatega üle mindud biomassile, milleks on peamiselt puiduhake. Nii põlevkivist kui biomassist energia tootmise näol on tegemist põlemisprotsessiga, mille käigus eraldub süsihappegaas. Puiduhakke puhul aga loetakse süsihappegaasi eralduskogust nulliks, mis on tingitud süsinikuringlusest - puiduhakkeks kasutatavad puud seovad kasvujärgus olles süsihappegaasi samal määral, kui neist põlemise käigus eraldub. Sellele vaatamata on tegemist protsessiga, mis nõuab suurel määral tekkivate keskkonda saastavate heitmete kinni püüdmist, ladustamist ning võimalusel teistel aladel rakendamist.

Jääksoojust võib, kasutamata jättes, käsitleda kui energia raisku lahtmist. Seda eriti juhul, kui tegemist on jääksoojusallikaga, mille potentsiaali rakendamiseks on olemas välja töötatud tehnoloogia ning allikas asub kaugküttevõrgu läheduses.

Antud töö põhieesmärgiks on uurida reoveest tuleneva jääksoojuse rakendamise potentsiaali Keila kaugküttevõrgu näitel. Töö käigus tutvustatakse esmalt kaugkütte kontseptsiooni ja kaugkütte arengut läbi aastate. Seejärel tuuakse välja erinevaid jääksoojusallikaid, nimetatud allikate rakendamise eeldusi ning jääksoojuse allikate kasutamist ja potentsiaali Euroopas.

Jääksoojusallikaid uuritakse aina laialdasemalt. Tehtud on suurel määral kaardistamisi potentsiaalsetest jääksoojusallikatest, nende rakendamise võimalikkusest ning tasuvusest. Suurel osal on pööratud tähelepanu serveriparkidele kuna tegemist on aina

enam maad ja energiat nõudva sektoriga. Küll aga on aina rohkem huvi tuntud ka olemasolevatele ja ajaloos varasemalt kasutatavatele jääsoojusallikatele. Sealhulgas on hiljuti uuritud ka reovee jääsoojuse rakendamist Tallinna kaugküttepiirkonnas, mille jääsoojusallikana uuriti Paljassaare reoveepuhastusjaama.

Lisana on toodud Keila reoveepuhastusjaama aeratsioonimahuti temperatuurid 1. jaanuarist 2019 kuni 1. jaanuarini 2020.

1. KAUGKÜTE

Kaugkütet defineeritakse kui sooja toimetamist ühe või suurema arvu tarbijani läbi kaugküttevõrgu. Selleks suunatakse kaugküttetorustikku kuuma vett või veeauru, mis on toodetud üldiselt koostootmisjaamas tööstuse jääksoojusest või spetsiaalsest küttesüsteemist. Laiemas mõttes võib soojakandja olla muu peale vee ja veeauru. [2]

Kaugküte on peamisi Eestis kasutatavaid kütтелиike, mis moodustab soojusvarustusest umbes 70 protsenti. Üle Eesti on moodustatud kaugküttepiirkondi, mille ulatuses on olemas kaugküttevõrgustik. Kaugküttevõrgustiku kaudu varustatakse kaugküttepiirkonnas olevaid hooneid soojusenergiaga. Kohalikul omavalitsuse volikogul on õigus määrata oma haldusterritooriumi piires kaugküttepiirkond, mille piires võib teisi kütтелиike kasutada omavalitsuse volikogu määratud korras ja tingimustel. [3] Kokku on Eestis 230 kaugküttepiirkonda. [1]

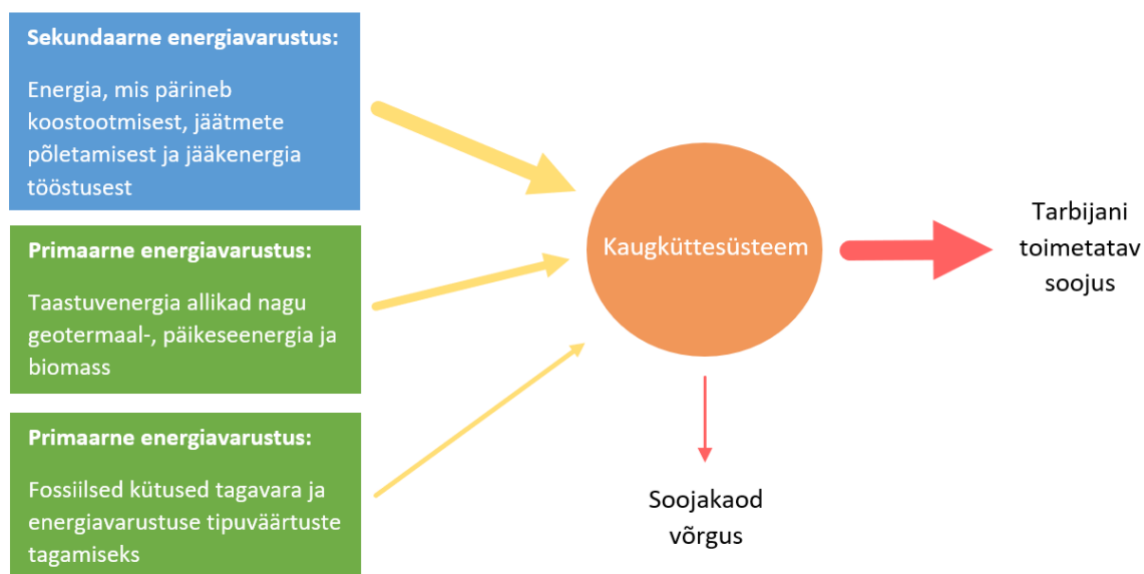
1.1 Kaugkütte struktuur

Kaugkütet kasutatakse peamiselt hoonete soojustamiseks ja hoonete sooja veega varustamiseks. Kaugkütte tehnoloogia on jaotatud nelja suuremasse ossa: toiteüksused, jaotusvõrk, tarbijate alajaamad ja tarbijate soojasüsteemid. Toiteüksuste alla käivad soojuselektrijaamad, jäätmepõletusjaamad ja tööstuslikud protsessid. Toiteüksusest suunatakse energia jaotusvõrku, mille alla käib kaugküttetorustik, mis koosneb paralleelselt jooksvatest peale- ja tagasivoolu torudest, mis on soojakandjate vältimiseks isoleeritud. Tarbija alajaamas pealevoolu soojakandja annab oma soojusenergia soojusvahetis üle tarbija soojasüsteemis olevale soojuskandjale. Tarbijate soojasüsteemid juhivad soojuskandja vastavalt, kas radiaatoritesse, põrandaküttesse või sooja vee tootmisesse. [4]

Konkurentsivõimelise kaugküttesüsteemi tunnused on sobilik, soodsa hinnaga soojusenergia allikas, nõudlus soojusturul ja torud, mis ühendavad nõudluse ja allika. Kõik kolmest peavad olema lokaalsed, et minimaliseerida investeringuid. [4]

Peamine energiavoog kaugküttesüsteemis on toodud joonisel 1. Sellel on eristatud primaarsed ja sekundaarsed energiaallikad. Primaarse energiavarustuse alla on loetud taastuvate energiaallikate ja fossiilsete kütuste otsene kasutus. Teisase ehk sekundaarse energiavarustuse alla on loetud koostootmisjaamad, jäätmepõletus ja jääkenergia tööstusest, sest nende käigus toodetav soojusenergia on kõrvalprodukt, nende protsesside primaarseteks eesmärkideks on vastavalt elektri tootmine,

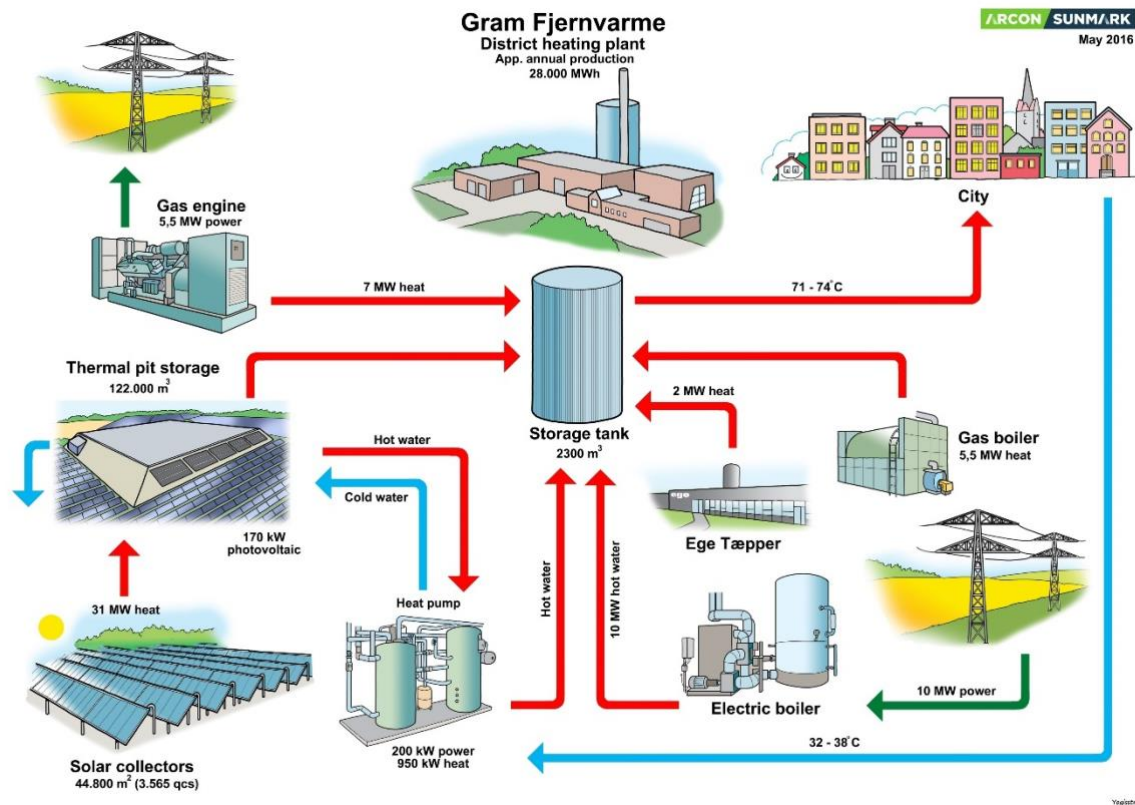
jäätmekäitlus ja tööstuse produktid. Soojakaod võrgus tulenevad torustiku ebapiisavast isolatsioonist ja hüdraulilistest tingimustest.



Joonis 1. Peamine energiavoog kaugküttesüsteemis [4]

Kaugsoojussüsteeme klassifitseeritakse erinevatel tehnilistel määratlustel, üheks neist on liigitus sooja tootmise järgi. On olemas tsentraliseeritud ja detsentraliseeritud süsteemid. Varasemate generatsioonide puhul on kasutatud peamiselt ühte või mõnda tsentraliseeritud soojusgeneraatorit, milleks üldiselt on olnud koostootmisjaamad, mis töötavad kivisüsi, gaasi või õli peal. Sellised süsteemid kasutavad tihtipeale vaid vähesel määral energia varundamist süsteemi tasakaalustamiseks ja elektri tootmise maksimeerimiseks. Aina enam tõuseb aga detsentraliseeritud kaugküttesüsteemide arv, mis kasutavad mitut erinevat detsentraliseeritud soojusenergia tootmise rajatist. [2]

Detsentraliseeritud küttesüsteemi näide on joonisel 1, milles on kujutatud Taani linna Grami kaugküttesüsteem, milles on rakendatud päikeseenergiat päikesekollektorite näol (*solar collectors*), maagaasil põhinevat koostootmist gaasimootori näol (*gas engine*), tootmisest tulenevat jääsoojust, soojuspumpa (*heat pump*), elektriboilerit (*electric boiler*) ja energia ladustamist (*thermal pit storage, storage tank*). Joonisel on punaste nooltega näidatud kuuma vee liikumine, siniste nooltega külma vee liikumine ning roheliste joontega elektrienergia liikumise suund. Samuti on näidatud toodetavad võimsused ning linna suunatud ja tagastava vee temperatuurid.



Joonis 2. Taani linna Grami detsentraliseeritud kaugküttesüsteem [5]

Viis praegu peamiselt kasutatavat, sobilikku ja strateegilist kohalikku sooja ja kütuse ressursi on soojus- ja elektrienergia koostootmisjaamad, prükipõletusjaamad, tööstusprotsessidest ja kütuse tootmisest tulenev jääksoojus, kütused, mida on raske rakendada väikestes boilerites, nagu puidujääk, pilliroog ja oliivijääk ning looduslikud geotermaalsed allikad. [4] Detsentraliseeritud kaugküttesüsteem võimaldab, siiani peamiselt fossiilsetele kütustele toetuvasse, kaugküttevõrku rakendada mitut energiaallikat korraga, muuseas geotermaalenergiat, päikeseenergiat ja jääksoojust erinevatest allikatest. [2]

Kaugküttesüsteemide üks peamisi eeliseid on jääksoojuse (või jääkjahutuse) potentsiaali ära kasutamise võimalus, suunates selle tarbijani. Mitmete linnade puhul on kaugkütte ainus tehnoloogia, mis võimaldab jääksoojuse utiliseerimist ja väljastamist. Linnade otsingutel puhta, lokaalse ja madalahinnalise soojusallika järgi mängivad jääksoojusallikad tuleviku soojussüsteemides olulist rolli. [6]

1.2 Kaugkütte areng

Maailma vanim siiani töötav kaugküttesüsteem asub Prantsusmaal. See rajati geotermaalse allika peale ning alustas tööd 14. sajandil. Kaugküttevõrgustik kasutas algselt Vana-Rooma veevõrgustiku tehnoloogiat, hiljem jooksis kuum vesi läbi puuritud puutüvede, mida kasutati torustikuna. [4]

Kaugküte on aastate jooksul arenenud ning selle arengu jooksul on eristatavad kaugkütte erinevad generatsioonid. Muudatused on tulenenud nii energiaallikate muutusest kui ka kaugsoojusvõrgustiku ja hoonete soojapidavuse tõhustamisest.

Peamised eesmärgid uute kaugküttevõrgu tehnoloogiate väljatöötamisel on olnud investeerimiskulude, ruuminõudluse, paigaldusaja ja jooksvate kulude vähendamine. [4]

Kaugküttesüsteemide esimene generatsioon võeti kasutusele 1880ndatel Ameerika Ühendriikides ning kasutas energiakandjana veeauru. Tüüpiliste komponentidena betoonkanalitest jooksvast aurutorustikust, aurulõksudest ning kompensaatoritest koosnev küttevõrk iseloomustab süsteeme, mida rajati 1930. aastani. Energiakandja ringlus saavutatakse aururõhu abil ja energiat toodeti peamiselt kivisüsi. Hoonetes olevad küttevõrguga ühendatud radiaatorid küündivad temperatuurilt üle 90°C. Tihti puudusid esimese generatsiooni kaugküttesüsteemidel tagasivoolutorud kondensaadile, kasutati avatud ringi, milles kondensaat suunati kanalisatsiooni. [7] Tagastuva kondensaadi suunamine kanalisatsiooni väldib küll algseid väljaminekuid, kuid seekaudu kaob osa auruenergiast (lausa 15%) ja asendusaurule kuluvad kulutused on võrreldavad. Üks kondensaadi probleemidest on, et see seob hapniku ja süsihappegaasi, mis muudab selle väga söövitavaks ning lühendab torustiku eluiga. [4] Tänapäevaks on tegu aegunud süsteemiga, kuna kõrged auru temperatuurid põhjustavad suuri energiakadusid ning soojustrassid on rõhu tõttu plahvatusohtlikud. [7]

Kaugküttesüsteemide teine generatsioon kasutas soojuskandjana rõhustatud kuuma vett. See süsteem töötati välja 1930ndatel ja seda rakendati 1970ndateni. Küttevõrgustik koosnes betoonkanalitest jooksvast veetorustikust, kest-toru soojusvahetist ning massiivsetest ventiilidest. Uue süsteemi kasutuselevõtu peamiseks põhjuseks oli primaarenergia säästmise, mis tulenes soojus- ja elektrienergia koostootmisest. Energia saamiseks kasutatakse peamiselt kivisüsi ja õli põletamist. Teist generatsiooni iseloomustab pealevoolutemperatuur, mis peamiselt ületas 100°C. [2] Nii kambrid ventiilidega, torude isolatsioon kui ka muid torustiku elemente pannakse kaugküttesüsteemide teise generatsiooni puhul kohapeal kokku. Torusid isoleeritakse

kiulise mineraalvillaga ning kaitsva kattega. Kuni vill püsib kuiv, on tegemist hea isolatsiooniga. Kohapealse kokkupanekuga seoses oli peamiseks põhjuseks uute konstruktsioonide kaalutlemiseks algsete investeeringute ja torustiku paigaldamisele kuuluva aja vähendamine. [4]

Eesti kaugküttevõrgustik jääb oma kõrgetemperatuurilise soojusvõrgustikku suunatud pealevooluga, mis ulatub 120°C-ni, samuti teise generatsiooni alla.

Kaugküttesüsteemide teise ja kolmanda generatsiooni vahepealsel ajal arendati kahte alternatiivset suunda teisele generatsioonile. Esimene suund oli modifikatsioon kanalivõrgustikust, milles kasutati erinevaid täitematerjale. Teine suund oli aga torustiku asetamine otse maa alla, kasutades kontsentrilist asetust vahemikuga, mis võimaldab aksiaalset soojusliikumist. [4]

Kaugküttesüsteemide kolmas generatsioon võeti kasutusele 1970ndatel. Kaugküttevõrgustiku iseloomustavad kokkupanekud, eelisoleeritud torud, mis on ilma betoonkanaliteta maasse kaevatud, kompaktsed alajaamad roostevabast terasest plaatsoojusvahetitega ja materjalisäästlikud komponendid. [7] Kolmandale generatsioonile iseloomulik soojustorustiku otse maasse kaevamine ei vähenda vaid torustiku rajatiste mõõtmeid, vaid ka torustikuga kaasnevate komponentide arvu. Varasemalt kasutuses olnud lõõtsaga kompensaatoritele, mis deformatsioonidele järgi annavad, asendatakse torude paindliku olemusega. [4] Soojuskandjaks on rõhustatud kuum vesi aga erinevalt teisest generatsioonist, jääb pealevoolu temperatuur üldiselt alla 100°C. Madalam pealevoolu temperatuur viib ka radiaatorite madalama temperatuurini (70 °C). Alates kolmandast generatsioonist tuuakse enam sisse põrandaküte. [7] Kolmanda generatsiooni kaugkütte väljatöötamiseni viis peamiselt varustuskindlus – peale kahte õlikriisi toetatakse rohkem kivisüsile, biomassile ja jäätme põletusele. [2]

Primaarallikate efektiivse kasutuse nõuete tõus ning eesmärgid energiasektori mõju keskkonnale vähendada ja hooneid energiasäästlikumaks muuta, viivad vajaduseni ja võimalusteni kaugküttesüsteemide optimeerida. [8]

Viimaste aastate jooksul on aina rohkem huvi pälvinud kaugküttevõrgustiku tõhusus, eriti madalatemperatuuriliste lahenduste puhul. Samuti on uuritud uute soojusenergiaallikate rakendamist, energia salvestamist ning erinevaid soojusenergia kontseptsioone. Nende teemade kombineerimisel, milles leitakse viise rakendamaks madalatemperatuurilisi lahendusi, rakendades uusi soojusallikaid, uurides uute soojusallikatega kaasnevaid keerukamaid süsteeme ja viise energiasalvestuseks ning

kõige selle kujutamises tuleviku linnade ja energiasüsteemide kontekstist, on antud alus neljanda generatsiooni kaugküttesüsteemile. [2]

Kaugküttesüsteemi neljas generatsioon on saadaval lähiaastate jooksul, kuid väljakutseks saab olema praeguste teise ja kolmanda generatsiooni süsteemide viimine neljanda generatsiooni tasemele. Neljanda generatsiooni küttesüsteem rakendab endas mitmeid erinevaid soojusenergia allikaid, erineval tasemel soojussalvestust, kaasaegset mõõtmistehnikat ja arenenud infotehnoloogiat, muutumaks paindlikumaks, töökindlamaks, intelligentsemaks ja konkurentsivõimelisemaks. [9]

Mitmed uuringud on jõudnud järelduseni, et kaugküte mängib tulevikus olulist rolli jätkusuutlike energiasüsteemide rakendamisel. Samad uuringud aga rõhutavad, et selleks peab praegune kaugküttesüsteem läbima muutuse madalama temperatuuriga kaugküttevõrgustiku suunas, integreerides madala temperatuuriga jääsoojusallikaid ning madala soojusnõudlikkusega hooneid. [7]

Täitmaks oma rolli tuleviku jätkusuutlikes energiasüsteemides, peab kaugküttesüsteem suutma madala võrgutemperatuuriga tagada olemasolevatele, renoveeritud ja uutele hoonetele ruumide soojustuse ja sooja tarbevee ning seda madalate soojuskadudega. Samuti on olulisel kohal suutlikkus rakendada madalatemperatuurilist jääsoojust ja taastuvaid soojusenergia allikaid nagu päikese- ja geotermaalenergia ning olema integreeritud osa nutikast energiasüsteemist, suutes lahendada taastuvenergiaallikatega seonduvaid saadava energia kõikumisi ja rakendada energiasalvestust. [10]

2. JÄÄKSOOJUSE RAKENDAMINE KAUGKÜTTEVÕRKU

Aina enam tuuakse välja nõudeid parendamiseks suurte tootmisüksuste kui energianõudliku tööstuse mõju keskkonnale ning juhitakse tähelepanu energiakasutuse haldamisele. See soodustab jääksoojuse rakendamise kasutuselevõttu ning võimaldab potentsiaalselt jääksoojuse allikate rakendamist kaugküttevõrku. [8]

2.1. Jääksoojuse allikad

Jääksoojuse rakendamine on küll pigem energia efektiivselt kasutamise põhimõte, kuid seda käsitletakse tihtipeale taastuva energiaallikana.

Jääksoojuse allikaid võib jaotada kaheks. Tuntumad on kõrgetemperatuurilised jääksoojusallikad, mida on osaliselt juba rakendatud ning, mille rakenduse näiteid leiab üle maailma. Nende kõrval on aga rakendatavad ka madalatemperatuurilised jääksoojuse allikad, mille rakendamine pole veel niivõrd levinud ning, mille kasutamine nõuab erilisemaid tingimusi.

2.1.1 Kõrgetemperatuurilised jääksoojuse allikad

Üheks tavapärasemaks jääksoojuse allikaks on soojuselektrijaamade elektritoodangu protsess. Soojuselektrijaamasid nimetatakse ka põletusjõujaamadeks, kuna toodetav energia saadakse põlemisprotsessi teel. Kütuse põletamise teel rakendatakse põlemisel tekkinud rõhku või veeauru, et panna pöörlema turbiini labad, mis omakorda käivitab elektrigeneraatori. Kogu soojusenergiat pole aga võimalik elektrienergiaks muundada, mistõttu tekib tootmisel jääksoojus. [11] Koostootmisjaamades suunatakse elektrienergiaks mitte muundatus soojusenergia kaugküttevõrku. Sellisest protsessist tulevat jääksoojust rakendatakse juba väga edukalt kaugküttevõrku. Eestis on kasutusel mitu koostootmisjaama, mis rakendavad soojusenergiat kaugküttevõrku. Suuremad neist on näiteks Vao koostootmisjaam, Iru Elektriijaam, Mustamäe koostootmisjaam ja Tartu Elektriijaam.

Lisaks koostootmisjaamadele on üheks jääksoojuse allikaks jäätmepõletus. Jäätmepõletusjaamade põhieesmärgiks on jäätmekäitlus, mis muudab jäätmepõletusest tuleneva soojusenergia jääksoojuseks. Prügipõletamise eesmärk on vähendada selle kogust ja ohtu, samal ajal püüdes või hävitades potentsiaalselt ohtlikke ühendeid, mis võivad põlemise ajal eralduda. [12] Segaolmejäätmete põletamine

vähendab prügilate koormust ning kõrvalproduktina toodetud soojus on rakendatav kaugküttevõrku. Eestis on segaolmejäätme põletusplokk Iru Elektrijaamas. [13]

Tööstuses tuleneb jääksoojus seadmete ebaefektiivsusest ning seadmete ja protsesside termodünaamilistest piirangutest. See tingib tootmisel tekkivad suured energiakaod. Tootmisprotsessist keskkonda juhitud jääksoojuse vähendamine või rakendamine vähendaks selle mõju keskkonnale ning samuti vähendaks see tootmise maksumust. [14] Jääksoojus kaasneb soojuskandjaga, milleks võivad olla gaasivood (näiteks heitgaas, madalakvaliteediline aur, jahutusõhk), vedelikuhood (näiteks kuum õli, jahutusvesi) ja tahked kandjad (tooted ja produktid nagu näiteks kuum teras).

Kõrgetempertuurilised jääksoojuse allikad on peamiselt tahked kandjad, kuid tahkete kandjate jääksoojuse rakendamiseks pole siiani lahendust leitud. [15] Küll aga on rakendatud viise mittetahkete soojuskandjate jääksoojuse kasutamiseks näiteks jääksoojuse suunamises tagasi tööstusportsessi, millest jääkenergia on tekkinud või suunatud jääksoojus tööstuspiirkonnale lähedal olevasse elamurajooni koduküttesse. [14] Tööstusest tulenevat jääksoojust saab kasutada tehaste õhu ja vee eelsoojendamiseks ning ka kaugküttevõrku suunamiseks. [8]

Eestis tööstus tegeleb põlevkivi kaevandamisega, laevaehitusega, fosfaatide, elektrimootorite, ekskavaatorite, tsemendi, mööbli, rõivaste, tekstiili, paberi, jalanõude ja kehakatete tootmisega. Eesti on kasvanud oma tööstussektorit peamiselt elektroonikas, tsemendi, kemikaalide ja metsasaaduste tootmise ja töötlemisega. [12] Eesti tööstuse teoreetiline jääksoojuse potentsiaal on 2 TWh, millest suurimad osad – kumbki 20% moodustavad mitte-mineraalsete metallide ning puidu ja puidutoodete tööstus. Euroopa üldpildis moodustab see jääksoojuse rakendamise potentsiaalilist 0,2%. [14]

Tööstusest ja soojuselektriyaamast tuleneva jääksoojuse rakendamisel kaugküttevõrku on oluline osa efektiivsel ja vastupidaval kütte- ja ka jahutussektoril. Sellel on potentsiaali toetamiseks tööstust, majandust ja ka tööhõivet. Nendel jääksoojusallikatel on olenevalt asukohast potentsiaali katmaks vähemalt 25% kaugküttevõrgu soojustootmisest. [16]

2.1.2 Madalatemperatuurilised allikad

Jääksoojusallikaid on kõikjal meie ümber. Üheks potentsiaalseks jääksoojusallikaks on teenindussektori hooned. Nende alla käivad kontorid, haiglad, õppehooned,

kaubanduskeskused, poed, samuti avaliku halduse hooned, logistikakeskused ja teised asutused, mida läbib suur arv inimesi ning, kus on oluline hoida kindlat sisekliimat. Kõik nendest hoonetest vajavad jahutussüsteemi või kliimaseadet, näiteks toidupoodide laoruumid ja külmikud, haiglate operatsioonitoad või restoranide külmikud ja külmaruumid. [17] Jääksoojus, mida on vaja teenindussektori hoonetest eemaldada, säilitamiseks nende sobivat sisetemperatuuri, on võrdne nende hoonete jahutusnõudlusega, mistõttu kujutab jahutustehnoloogia endast jääksoojuse rakendamise keskmises olevat süsteemi. Lisaks eemaldatava soojuse kogusele, räägib teenindussektori hoonete poolt ka nende asukohad, mis on üldiselt elamupiirkondade ja teiste teenindussektorite hoonete lähedal, mis hõlpsustaks jääksoojuse rakendamist. Teenindussektori hooned kui jääksoojusallikaid ei ole veel laialdaselt uuritud. 2015. aastal oli Eesti jahutusnõudlus 159,8 MJ/m². [18]

Üheks enamuuritud madalatemperatuuriliseks jääksoojusallikaks on serveripargid. Serveriparkide energiatõhusus on olulisem teema, mida rohkem andmeid salvestatakse, töödeldakse ja kantakse ühest kohast teise, pakkumaks digitaalseid teenuseid. Infotehnoloogia sektor võttis aastal 2013 enda alla 10% maailma elektritarbest. Serveriparkidesse suunatud elekter muundatakse peaaegu täielikult soojuseks, seega kulub palju energiat serverite jahutamiseks, peamiselt õhkjahutuse näol. Põhjamaad tagavad hea keskkonna serveriparkidele, kuna saavad tänu oma kliimale pakkuda loomulikke ja odavat jahutusenergiat. Kuna serveripargid nõuavad rohkelt energiat, on neid kõige efektiivsem ehitada elektrijaamadele võimalikult lähedale. Kui elektrijaama näol on tegu koostootmisjaamaga, mille soojusenergia suunatakse kaugküttevõrku, on hea võimalus lisada kaugküttevõrku serveripargi jääksoojus kui madalatemperatuuriline jääksoojusallikas. Soomes tehtud uuringu põhjal on serveripargi energiatarbimisest 97% jääksoojust võimalik ära kasutada. Uuring andis tulemuse, et 1 MW serveripargi, mis töötab poole võimsuse peal, võib oma jääksoojusega rahuldada 30 000 m² hoonete soojavajadust aastas. [19]

Serveriparkide puhul on oluliseks eeliseks nende töökoormuse vähene või puuduv kõikumine. Serverite öine varuliiklus ja päevane serveriteenuse liiklus moodustavad ühtlase andmeliikluse profiili, mis jaotub ühtlaselt ööpäevase ja ka aastase tsükli peale. Selle põhjal sobivad serveripargid oma stabiilsusega hästi jääksoojuse allikateks kaugküttevõrku. Eestis oli 2016. aasta seisuga 10 serveriparki, mis kasutasid 2016. aastal 26 PJ elektrienergiat. [18]

Eesti suhtes vähem aktuaalsed, kuid mujal maailmas päevakohased potentsiaalsed jääksoojusallikad on maa-alused transpordisüsteemid. Metroo rongide elektrimootorid toodavad soojust oma elektrilisest ja mehaanilisest talitlemisest tingituna nii

kiirendades, kiirust hoides kui ka aeglustades. Umbes pool maa-aluse transpordisüsteemi jääsoojusest tuleneb rongide aeglustamisest – soojusenergia tuleneb pidurdussüsteemist. Samuti toodab jääsoojust, sarnaselt teenindussektori hoonetele, rongide ventilatsioonisüsteem. Euroopas on metropeatuste vaheline kaugus keskmiselt 1 kilomeeter ning kõik peatused asuvad tihedalt asustatud aladel, kus küttenõudlus on kõrge. Kasutades ära maa-aluste transpordisüsteemide jääsoojust tagab soodsama maa-aluse jaama sisekliima reisijatele ja töötajatele ning odavama ja väikese süsiniku jalajäljega jääsoojusest tuleneva kütte lõpptarbija. [20]

Jääsoojuseallikaks, mille potentsiaali oleks võimalik rakendada tavapäratumatest jääsoojusallikatest kõige enam ning, millele antud töö kõige rohkem tähelepanu pöörab, on reoveepuhastusjaamad. Reovee töötlemiseks rajatud süsteemid eksisteerivad kõikides linnades, seega on reovesüsteemidel suur jääsoojuse rakendamise potentsiaal. Reovee temperatuur on Euroopas keskmiselt 10-15°C ja võib ulatuda suveajal 20°C. [21] Linnades ehk tarbijate läheduses asub suur arv asula reoveepuhastusjaamasid, Euroopa piires ligikaudu 23 200 jaama. Nende jaamade jääsoojuse rakendamise suhtes on kasvav huvi, siiani on aga reovee jääsoojust selle potentsiaali arvestades rakendades vähesel määral. [18]

Reovesi on piiritletud energiaallikas, kuna saadav jääsoojus sõltub veekasutusest hoonetes. Arvestades pingutusi veekasutuse vähendamiseks tööstustes ja ka argikasutuses, tuleb reovee kogust pikemas tulevikuperspektiivis reovee jääsoojuse rakendamise planeerimisel analüüsida.

2.2 Jääksoojuse rakendamise eeldused

Kaks olulisimat probleemi jääksoojuse rakendamise juures on soojanõudlus ja tulusus. Soojust ei ole võimalik sama tõhusalt levitada energiaallikast kaugemale, kui elektrit. Seega peab soojanõudlus olema jääksoojuse allika lähedal.

Et kasutada taastuenergeetika ja jääksoojuse rakendamise potentsiaali, peab nii soojatarbimist, soojuse tarbijateni toimetamist kui ka soojuse tootmist edendama. [2]

Kaugküttesüsteemides on üheks soojuskadude selgitavaks parameetrik ja seega ka kaugküttevõrgu efektiivsuse näitajaks lineaarne soojustihedus, mis näitab soojanõudluse ja kaugküttevõrgu torustiku pikkuse suhet. Kaugküttesüsteemid peaksid säilitama piisavat lineaarset soojustihedust, mis tähendab vältimist madala asustustihedusega asukohtadesse laienemist. Erandiks on juhud, mil madala asustustihedusega piirkonna ulatuses on saadaval piisavat, lokaalset ja odavat taastuenergiat, mille puhul oleks kõrgemad soojuskaod aktsepteeritavamad. [22]

Jääksoojuse rakendamise teostatavuse hindamine nõuab jääksoojusallika ja võrgustiku voolu, millele soojust rakendatakse, iseloomustamist. Selle puhul on olulisemateks parameetriteks, mis kindlaks tuleb teha, kaugküttevõrgustiku madalaim lubatud temperatuur, jääksoojusallikast saadava energia hulk, jääksoojusallika temperatuur, jääksoojusallika koostis ning võrgustiku halduslikud parameetrid. [23]

Minevikus on kaugküttevõrgu pealevoolu temperatuurile seatud alumine piir, millest allapoole ei tohiks soojuskandja temperatuur laskuda. Selle põhjuseks on *legionella* bakter, mis põhjustab inimestel sisse hingates legionelloosi, mille põhihaigusvormiks on kopsupõletik. Legionella võib külmas ja seisvas vees oma eluvõime säilitada pikemat aega. [24] Et *legionella* kasv saavutaks kõrgeid kontsentratsioone, peavad nad arenema tehislikes veesüsteemides, kus saavutatakse optimaalne keskkond kasvuks püsiva temperatuuri, torustikku katte, hapnikurikkuse ja seisva veega. Bakterite kasvuks optimaalne temperatuur jääb vahemikku 32-42°C. [25]

Tänapäevaks on välja töötatud mitmeid viise *legionella* bakteri leviku kontrolli alla saamiseks. Nendeks on mehaanilised, milles kasutatakse bakterite välja filtreerimist, sterilisatsioon, kus kasutatakse bakterite elu pärssimiseks kemikaale või ioniseerimist ja samuti muudatusi tarbevee soojendamise süsteemi disainis. Torudes kasutatakse antibakteriaalseid materjale, kuid selle mõju on torude sisemise kulumise tõttu lühiajaline (ligikaudu 2 aastat). Efektiivsemate lahendustena on välja pakutud elektrilised lisakütteseadmed hoonetes, mis tõstavad kaugkütte pealevoolu

temperatuuri enne soojusvahetit või tarbevee temperatuuri peale soojusvahetit. Seadmete ostmisega kaasnevad lisakulutused, kuid pikemas perspektiivis tehakse see tasa kaugküttesüsteemi rakendatud madalamate peale- ja tagasivoolu temperatuuridega. [25]

Tarbijate temperatuuritasemel on oma roll kaugküttevõrgustiku minimaalse vajaliku temperatuuritaseme määramisel. Varieeruvate soojustussüsteemide tõttu varieeruvad ka vajalikud kaugkütte pealevoolutemperatuurid. Pealevoolutemperatuuri langetamiseks tuleks analüüsida olemasolevate radiaatorite ja muude tarbijapoolsete soojustussüsteemide poolt nõutavaid temperatuure. Varemehitatud hooned on tihtipeale projekteeritud soojustatamaks kõrgemate temperatuuridega. Paljudel juhtudel, eriti vanemate hoonete puhul, on võimalik energiatõhusust tõsta, muutes hoone isolatsiooni tõhusamaks. See muudab olemasolevad radiaatorid ülemõõdulisteks, mis jätab omakorda ruumi kaugkütte madalamatele pealevoolu temperatuuridele. [2]

Tuleviku hoonetel eeldatakse aina väiksemat soojanõudlust, vähemalt Euroopa Liidu piires, kus uutelt hoonetelt nõutakse kõrget energiatõhusust. Madalam soojanõudlus toob endaga kaasa võimaluse langetada kaugküttevõrgus olevat temperatuuri. [26]

Optimaalse sisekliima ja *legionella* bakteri riskita sooja vee tagamiseks madalate pealevoolu temperatuuride puhul, tuleb arvestada tarbijate hoonete võimekusega. Uusehituspiirkondade puhul, mida liidetakse kaugküttevõrgustiku, on võimalik hooned kujundada madalatemperatuurilise pealevooluga arvestamiseks. Selleks tuleks rakendada põranda- või pindsoojustus võimalikult suures ulatuses ning kohtades, kus see võimalik pole, kasutada radiaatoreid, mis on dimensioneeritud vastavalt kaugkütte temperatuuridele. Samuti tuleks tarbevee süsteemi puhul vältida veepaake ja pikka torustikku, vähendamaks *legionella* bakteri leviku riski. [2]

Lisaks mängivad jääksoojusallikate rakendamises kaugküttevõrgustiku rolli majanduslikud ja halduslikud aspektid. Näiteks ei tasu ennast ära jääksoojuse rakendamine väikesemahulistest tootmisprotsessidest, mille rakendamiseks puudub algkapital ning, mille tasuvusaeg kujuneb suuremahulistest tootmisprotsessidest pikemaks. Oma rolli mängivad ka käitusgraafikud – kui jääsoojus on rakendatav vaid kindla perioodi vältel, hakkavad soojusvahetit mõjutama suured temperatuurikõikumised, mis võivad lühendada soojusvaheti eluiga. Samuti on olulised jääksoojusallikatest saadava energia graafikud soojanõudluse aspektist, sellele vastavalt tuleb vajadusel kasutada lisasoojusallikaid perioodideks, kui jääksoojust ei ole saadaval. [23]

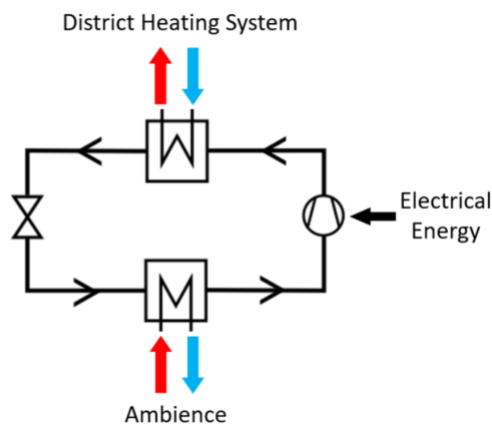
Majanduslikust aspektist vaadates on jääsoojuse rakendamisel barjäärid. Jääsoojuse rakendamise tehnoloogia madala küpsuse ja killustatud õigusraamistiku tõttu on võim tehnoloogia arenduse jaoks stiimuli loomiseks poliitikutel. Neil on võim toetada jääsoojuse kasutamist otseste stiimulite loomisel, nagu näiteks toetades rahaliselt soojuspumpadele kuluvat elektrienergiat, või suurendades süsihappegaasi eritamise maksumust, mis tuleks kogu rohelisele energiale kasuks. Toetuste ja rahastuse suurenemine soodustab jääsoojuse rakendamise võimalusi. Rahastuse poole pealt on aga tagasilöökk pikk tasuvusperiood, mis tuleneb suurtest alginvesteeringutest. Võrdlemisi uuendusliku tehnoloogiana puudub jääsoojuse rakendamisel õigusraamistik, mis seaks paika standardsed jääsoojuse rakendamise loamenetlused. See omakorda nõuab jääsoojuse rakendamisel olevate ettevõtete poolt lepingute iseseisvat koostamist, mis tõstavad projektile kuluvat kapitali, riski lepingust oluliste klauslite välja jätmiseks ning läbirääkimistele kuluvat aega. Olulisimateks sammudeks olukorra parendamiseks oleks õigusraamistiku kohandamine, võtmaks arvesse jääsoojuse rakendust, jääsoojuse rakenduste kohta teadlikkuse tõstmine, rahaliste stiimulite rakendamine ning rohkemate uurimustööde ja demonstratsioonide tegemine, muutmaks jääsoojuse rakendamist laialt levinuks ning seega potentsiaalsete investeerijate suhtes populaarsemaks. [27]

Soojuspumbad mängivad olulist rolli realiseerimaks taastuvatest energiaallikatest ja ka jääsoojusallikatest saadavad katkendlikku energiavoogu, integreerides elektri- ja soojusenergia sektorid. [28] Jääsoojuse rakendamise süsteemid toetuvad tihti soojuspumpadele, mis muudab süsteemi elektrist sõltuvaks ning seeläbi elektrihindade muutlikkuse süsteemi maksumuse üheks parameetrik. [27]

Soojuspumbad kasutavad väliseid energiasisendeid juhtimaks tsükli, mis tarbib energiat madala-temperatuurilisest allikast ja väljutab selle kõrgema temperatuuriga. Soojuspumba kasutuse teostatavus jääsoojuse rakendamisel on oluliseks kaalutluspunktiks jääsoojuse temperatuur ning soovitud temperatuuritõus. Soojuspumbas kasutatava tsükli tüüp ja töövedelik mõjutavad temperatuure, milles soojuspump on võimeline vedelike vastu võtma ja väljastama ning seejuures soovitud temperatuuritõusu. Väljastatava ja sisendtemperatuuri vahe tõustes väheneb soojuspumba efektiivsus. [23]

Madalatemperatuuriliste jääsoojusallikate puhul kasutatakse enim kompressorsoojuspumpasid. Selles toimub elektrienergia muundamine soojuspumba kompressori käitamise teel soojusenergiaks. Kompressor pumpab töövedelikku, mille

ülesandeks on soojusülekanne, suletud ringis soojuspumba sees. Soojusülekanne saavutatakse kahe soojusvahetiga soojuspumba sees, üks välise (jääh)soojusallika soojusenergia rakendamiseks ning teine juhtimaks soojusenergiat kaugküttevõrku. [2] Kirjeldatud protsessi on näha joonisel 3. Sellel on välja toodud vedeliku või gaasi vool ümbruskonnast, seehulgas jääsoojuse allikast, joonisel võetud allikana ümbritsev õhukeskkond (*ambience*), millest liigub voog soojusvahetisse, milles see annab oma energia töövedelikule. Seejärel liigub töövedelik kompressorisse, mille sisendiks on ka elektrienergia (*electrical energy*). Kompressorist väljuv töövedelik liigub teise soojusvahetisse, milles toimub soojusvahetus kaugküttesüsteemis (*district heating system*) voolava soojuskandjaga. Seejärel suundub jahutatud vedelik taas esimesse soojusvahetisse ja tsükkel jätkub.



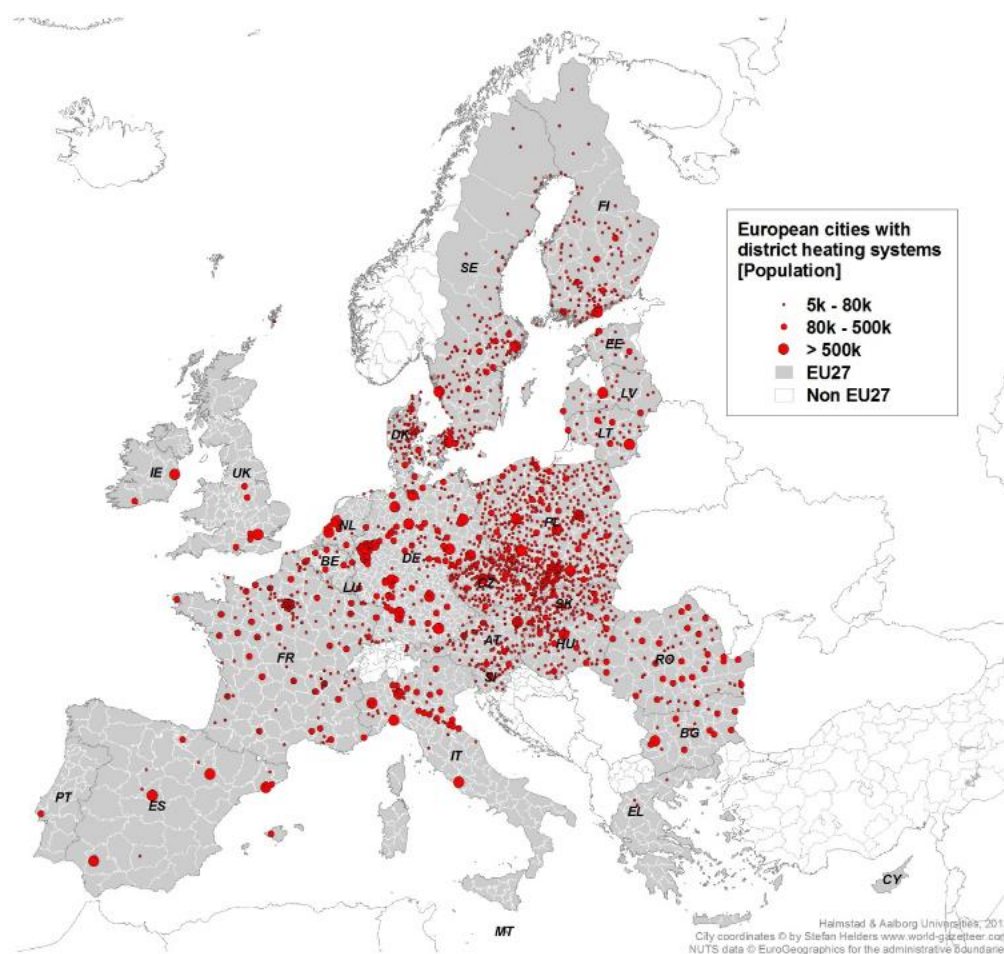
Joonis 3. Kompressorsoojuspumba tööpõhimõte [2]

Madalatemperatuurilised jääsoojusallikad, mille rakendamiseks on vajalik soojuspumpade olemasolu, nõuavad kõrgemaid investeeringuid ja on tundlikumad elektri hinnast tulenevale hinnakõikumisele. Vaatamata sellele on madalatemperatuurilistel kõrgetemperatuuriliste suhtes paar rahalist eelist – madalatemperatuurilised jääsoojusallikad on üldiselt soojanõudlusega piirkondadele lähemal, mis vähendab transpordikuluseid ja tihtipeale on madalatemperatuurilise jääsoojuse rakendamise tehnoloogia samuti odavam. [29]

3. JÄÄKSOOJUSE RAKENDAMINE EUROOPAS

Enamus praegusi kaugküttesüsteeme maailmas asuvad põhjapoolkeral. Euroopa Liidu siseselt on üle 5000 töös oleva kaugküttesüsteemi. Suurima kaugkütte ülekaaluga riigid on Taani, Rootsi, Soome, Poola, Eesti, Leedu ja Läti. Kaugküttesüsteemid on enamustel suurtematel Kagu-Euroopa linnadel. [4]

Joonisel 4 on toodud Euroopa kaugküttesüsteemid ja nende süsteemide suurused vastavalt vastava kaugküttesüsteemi tarbijate arvule aastal 2013.



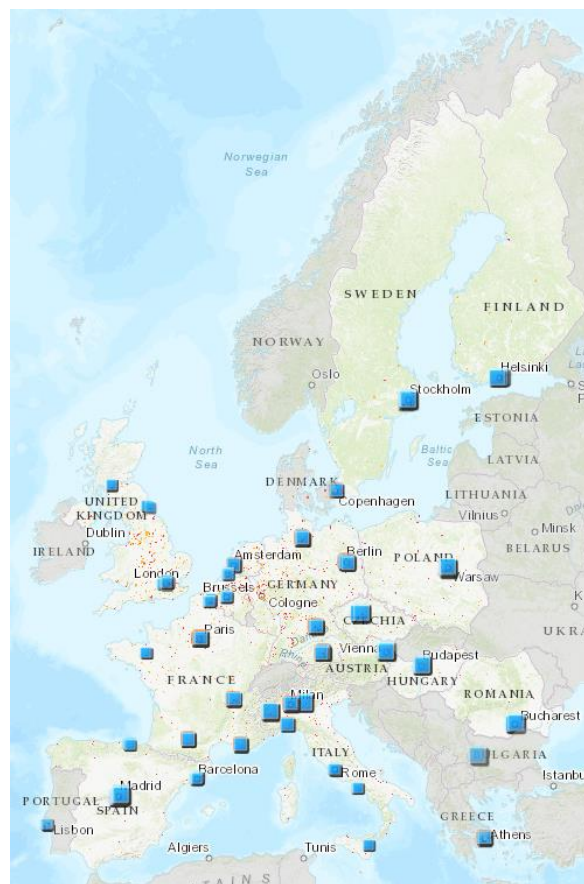
Joonis 4. Kaugküttesüsteemid Euroopas vastavalt populatsiooni suurusele

Aastal 2015 oli selleaegse 28 Euroopa Liidu liikmesriigi energianõudlus 6,532 TWh, millest 50% moodustas soojustus- ja jahutussektor. Hoonesoojustus moodustab sellest omakorda 53% ning on olulisel kohal igas Euroopa riigis, kaasaarvatud Lõuna-Euroopa riikides nagu Itaalia, kus hoonesoojustusnõudlus oli 2015. aastal 61%, Kreekas 50% ja Hispaanias 37% riigi soojustus- ja jahutussektorist. Seega võib hoonesoojustusnõudlust nimetada lõpptarbimise energianõudlusest kõige kõrgemaks. [22]

Kaugsoojus moodustab 13% Euroopa Liidu soojustussektorist. Üle 50% soojustussektorist moodustab kaugküte Taanis, Rootsis, Soomes, Eestis, Lätis, Leedus ja Poolas. Kõige suuremad kaugsoojussüsteemid Euroopa Liidus asuvad Saksamaal ja Poolas. [29]

Suvistel aegadel ulatub Londoni maa-aluste transpordisüsteemide jaamade sisetemperatuur kuni 30°C-ni. Laskmata jääsoojusel raisku minna, otsustas linn maa-aluse jaama ventilatsioonisüsteemi paigaldada soojusvaheti, mis rakendab jääsoojuse kaugküttevõrku. Soojuspumpade abil tõstetakse vee temperatuur kaugküttevõrgus sobivale tasemele (üldiselt üle 60°C). [6]

Joonisel 5 on näha Euroopas potentsiaalselt saadaval olev maa-aluse transpordisüsteemi jääsoojus. Siniste ruutudega on märgitud maa-alused transpordisüsteemid. Vastavalt ruutude suurustele on märgitud saadava energia kogused – suurimad ruudud tähistavad jääsoojuse kogust, mis ületab 13 TJ/a, keskmised tähistatud vahemikku 12-13 TJ/a ning väikseimate sümboolitega on märgitud allikad, millest saadava jääsoojuse kogus jääb alla 12 TJ/a.



Joonis 5. Maa-aluste transpordisüsteemide jääsoojuse potentsiaal Euroopas [30]

Joonise põhjal on näha, et enamused allikaid asub suurte linnade läheduses. Arvestades joonisel 5 näidatud maa-aluste transpordisüsteemide kattuvust joonisel 4 toodud kaugküttesüsteemidega, on näha, kui suur potentsiaal on transpordisüsteemidest tuleneva jääksoojuse rakendamisel kaugküttesüsteemi.

Rootsis on aastast 2017 planeeritud serveriparkidest tuleneva jääksoojuse rakendamist kaugküttevõrku. Rootsi soojusettevõtte Stockholm Exergi sõlmis suuremahulise jääksoojuse rakendamise kokkuleppe, mis on esimeseks juhtumiks ajaloos, kus olemasolevale serveripargile liidetakse jääksoojust rakendada võimaldav süsteem, mis võimaldab soojusega varustada kohalikku kaugküttevõrku. Osana Rootsi plaanist saavutada aastaks 2040 Stockholmis fossiilkütuste vabadus, loodetakse serveriparkidest tuleneva jääksoojuse abil varustada soojusega 35 000 kaasaegset elamukorterit, moodustades soojanõudlusest 10%. Serveriparkidest tuleneva jääksoojuse rakendamise teeb reaalsemaks ka asjaolu, et Stockholmis olevatest hoonetest kuulub ligi 90% kaugküttevõrku. [31]

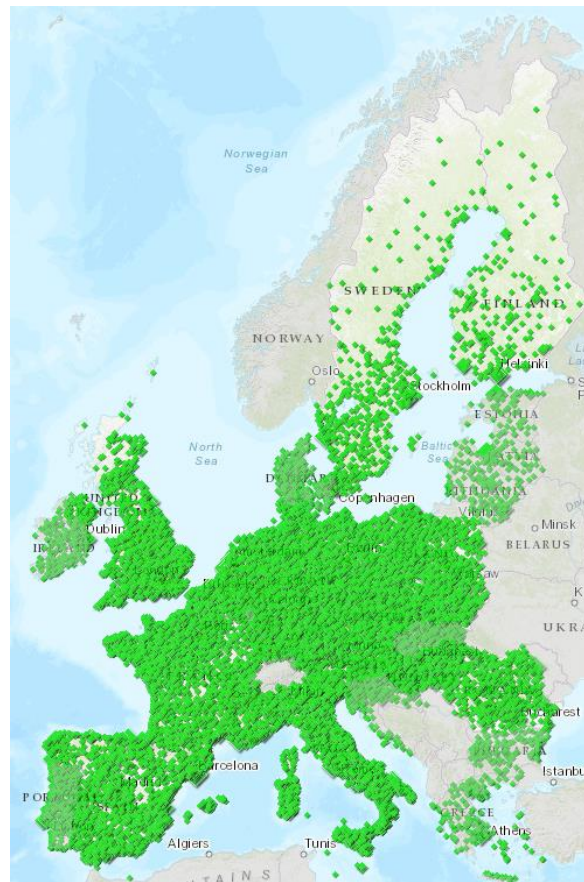
Väiksemahuline teenindussektorist tuleneva jääksoojuse rakendamise näited on olemas Saksamaal - Schwarze ja Schröderi pagarikodades. Neile on paigaldatud süsteem, mis võimaldab varem korstnatest väljuvat jääksoojust rakendada soojustussüsteemi ruumide ja tarbevee soojendamiseks. [32]

Kõige tuntum jääksoojusallikas Euroopas, vastavalt 2017. aastal tehtud uuringule, on reovee jääksoojus. Sellele oli 2017. aastal 57 näidet Norras, Rootsis, Soomes ja Šveitsis. Reovee jääksoojust on kasutatud aastast 1981. [16]

Skandinaavia riikides, eriti Rootsis, rakendavad mitmed vähemalt 1 MW-sed soojuspumbad reoveest tulenevat jääksoojust kaugküttevõrku. Puhastatud reovee temperatuurid Rootsi soojapumpades jäävad vahemikku 12-20°C, soojuspumbad tõstavad temperatuuri kaugküttevõrgu keskmiseni, milleks on 86°C pealevoolu puhul ning tagastuvaks temperatuuriks on 47°C. [2] Uuringud on näidanud, et Šveitsis saaks majade soojusega varustamiseks ja tarbevee soojendamiseks kasutada reovee jääksoojust umbes 2 TWh ulatuses. [33]

Joonisel 6 on toodud reoveepuhastusjaamast tuleneva potentsiaalselt kasutatava jääksoojuse kogus Euroopas. Roheliselt on näidatud reoveepuhastusjaamad ning vastavalt sümboli suurusele ulatub jääksoojus kuni 0,2 PJ/a, jääb vahemikku 0,2 kuni

1 PJ/a või ületab 1 PJ/a. Jooniselt on selgelt näha, kui suur potentsiaal on reovee jääksoojusel kui soojusallikal tänu selle asetustihedusele.



Joonis 6. Reovee jääksoojuse rakendamise potentsiaal Euroopas [30]

Maa-aluste transpordisüsteemide jääksoojuse potentsiaaliga samaväärselt on reovee jääksoojuse rakendamise potentsiaali puhul Euroopas näha kattuvust Euroopas eksisteerivate kaugküttevõrkudega. Reovee jääksoojuse potentsiaal on suurim suuremates linnades, kus reoveepuhastusjaamade koormused on suuremad. Suuremates linnades on suurem potentsiaal ka kaugküttevõrkudes, seega on suur potentsiaal neid süsteeme ühildada.

4. REOVEE JÄÄKSOOJUSE RAKENDAMINE KEILAS

Keila on Põhja-Eestis, Tallinnast 25 km kaugusel asuv väikelinn. Keila linna pindala on 11,25 km² ja elanike arv Keilas oli 2020. aasta 1. jaanuari seisuga 10 044. Keila idapiiril jookseb osaliselt Keila jõgi, mis suubub Keila-Joal Soome lahte. Keila on Lääne Harjumaa suurim linn. [34]

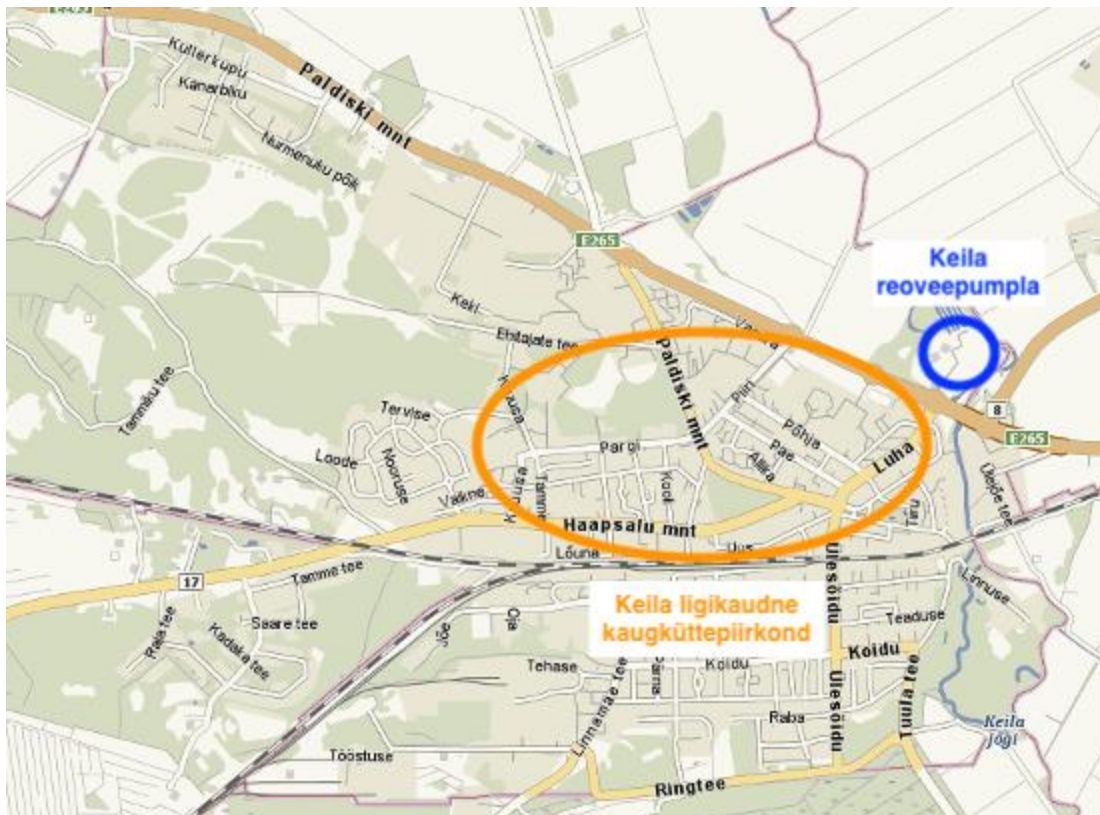
Keila linna kirdenurgas, Keila jõe ja Paldiski maantee vahelisel alal asuv reovee peapumbajaam rajati reoveepuhasti alale 2003. aastal peale uue reoveepuhasti ehitust. Sinna kogutakse Keila linna ja seda ümbritsevate alade reovesi ning peapumbajaama eesmärk on kollektorites kogutud reovee pumpamine puhastusjaama. Torusiku kaudu suunatakse pumbajaamast tulenev reovesi Keila reoveepuhastisse puhastamisele. Uus reoveepuhasti rajati aastal 2001. [35]

Keilas kehtestati 2016. aastal kaugküttepiirkond. Linnas asub kaks kaugkütte võrgupiirkonda, mis on eraldiseisvad. Keila linna võrgupiirkond katab ala Luha tänavalt kuni Pargi tänava pikenduseni. Nende soojustarbijatest moodustab põhilise osa (70%) korterelamud, millele lisaks on võrguga ühendatud eramud, kauplused, õppeasutused ja kohaliku linnavalitsuse halduses olevad hooned. Teiseks kaugkütte võrgupiirkonnaks on Keila tööstusküla võrgupiirkond, mis varustab soojusega AS Harju Elekter ja AS Harju KEK-ile kuuluvat Keila tööstuspargi territooriumi. Tööstusküla võrgupiirkonna soojustarbijateks on erinevad tööstusettevõtted. Lisaks nimetatud kaugküttevõrkudele on Keilas mitmel ettevõttel eraldi soojusvarustuse süsteem ja kohalik katlamaja, mida käitab kinnisvarafirma või ettevõtte ise. [36] Antud töös käsitletakse Keila linna võrgupiirkonda, mille haldajaks on ettevõtte AS Utilitas Eesti.

Põhja tänaval asuv Keila Katlamaja on ehitatud 1970ndate aastate alguses ja 2002. aastal täielikult renoveeritud. Põhiosa soojusest toodetakse hakkpuidust, mis moodustab 85-90% soojustoodangust. Tipukoormuste katmiseks ja puiduhakke katlate avariide või remondi korral kasutatakse soojuse tootmiseks põlevkiviõli. [36] Aastal 2021 on plaanis tipukoormuste katmiseks üle minna maagaasile. [37]

Keila linnas asuva kaugküttevõrgu kogupikkus on ligikaudu 13,11 kilomeetrit. Kaugküttevõrgu torustikust 8,15 kilomeetrit ehk 62% koosneb eelisoleeritud torustikust. Tänu eelisoleeritud torustiku tõhususele oli aastal 2019 keskmine soojusvõrgu kadu 12,71%. Kaugküttevõrgu pealevoolu ulatub temperatuurini kuni 105°C. [37] Ligikaudne kaugküttepiirkond ning Keila reoveepuhastusjaama asukoht on toodud joonisel 4. Keila kaugküttevõrgust enamused jääb linna keskel asuva katlamaja

lähedusse, kuid ulatub Luha tänavalt kuni Pargi tänava pikenduseni. Keila reoveepuhastusjaam asub kaugsoojustorustikust ligikaudu 0,5 kilomeetri kaugusel.



Joonis 7. Keila kaugküttepiirkonna ja reoveepumpila ligikaudsed asukohad

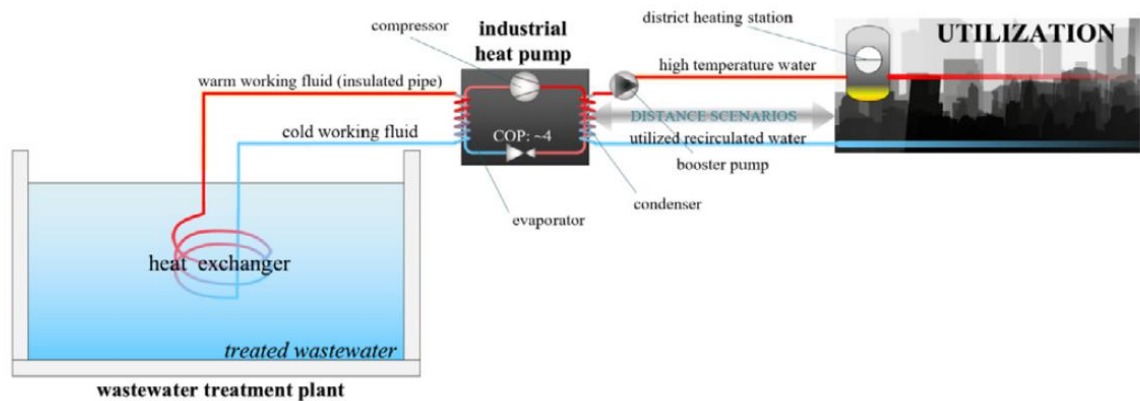
Reovee jääsoojuse rakendatavus oleneb reoveepuhastusjaama ja kaugküttevõrgustiku kaugusest. Sellest olenevad ka vajalike investeeringute ja tegevuskulude suurus. Väiksemates reoveepuhastusjaamades ning reoveepuhastusjaamade ja kaugküttevõrkude suurte vahemaade korral muutuvad soojuskadod liiga suurteks, muutes reovee jääsoojuse rakendamise süsteemi mõeldamatuks. [38]

Puhastusprotsessis puhastatakse reovesi esmalt mehaaniliselt võrede, liivapüüniste ja settebasseinide abil. Seejärel suunatakse reovesi bioreaktorisse ja järelsetitisse bioloogilisse puhastusse, kus toimub lahustunud orgaanilise reostuse, fosfori ja lämmastiku eemaldamine. Mehaanilise ja bioloogilise puhastuse läbinud veele rakendatakse vajadusel keemilist puhastust, kui bioloogilise puhastuse läbinud vee fosforitase ületab nõudeid. Puhastatud reovesi suunatakse läbi mõõtekambri biotiiki ning sealt edasi Keila jõkke. [36]

Reovee jääsoojuse rakendamiseks on hetkel kasutusel kolm erinevat tehnoloogiat. Esimese tehnoloogia puhul ühendatakse soojusvahetid otse kanalisatsioonitunnelite sisse. Soojusvahetite süsteem koosneb soojust vahetavatest pindadest, läbi mille voolab soojust vahendav vedelik, mis liigub läbi torustiku soojuspumpa. Teise kasutatava tehnoloogia puhul kasutatakse sõelutud reovett. Selles süsteemis läbib kanalisatsioonist tulev reovesi enne puhastusprotsessi, mis on oluline vältimaks tahkete osakeste sattumist soojusvahetitesse. See võimaldab kasutada väiksemaid soojusvaheteid ummistuste ohuta. Kolmanda tehnoloogia puhul kasutatakse soojusvaheteid mahutites, kus soojusvahetid saavad reovee jääsoojust kasutada. [39] Selles töös vaadeldakse võimalust kasutada jääsoojust puhastatud reovee mahutitest.

Reovee energiasisaldus mõjutab reovee puhastuse efektiivsust, kuna aktiivmudas sisalduvate mikroorganismide temperatuur jääb vahemikku 9-40°C, protsessi optimaalseimateks temperatuurideks on vahemik 20-25°C. Peale bioloogilist puhastust edasi suunatud vesi põhjustab soojusreostust talvistel perioodidel. [38] Reovee bioloogiline puhastusprotsess on temperatuuri suhtes tundlik, mistõttu on reoveepuhastusjaamas mõistlikum kasutada puhastatud reovee jääsoojust biotiigist, enne selle vabastamist jõkke.

Joonisel 5 on kujutatud reoveest tuleneva jääsoojuse rakendamise süsteemi kaugküttevõrgustikku. Skeemil on näha kolm põhikomponenti – reoveepuhastusjaam (*wastewater treatment plant*), tööstuslik soojuspump (*industrial heat pump*) ja võrgustik, kuhu soojus rakendatakse, joonisel tähistatud lihtsalt rakendusena (*utilization*). Esimeses etapis soojendatakse puhastatud reovee (*treated wastewater*) abil soojusvahetis soojuspumbas tagastuv külm töövedelik (*cold working fluid*) ja suunatakse soojendatud töövedelikuna (*warm working fluid*) mööda isoleeritud toru (*insulated pipe*) juhatakse soojuspumpa, kus soojendatud töövedelik annab oma energia üle soojuspumbas tsirkuleerivale töövedelikule auruti (*evaporator*) abil. Aurutist väljuva soojuspumbas tsirkuleeriva töövee temperatuur tõstetakse kompressori (*compressor*) abil kaugküttevõrgu poolt nõutud tasemele. Kaugküttevõrgus tsirkuleeriv töövesi suunatakse soojuspumbast peale rõhulangu voolukiiruse tõstmiseks läbi pumba (*booster pump*) ning suunatakse tarbijateni. Kõrgetemperatuuriline töövesi (*high temperature water*) juhatakse kaugküttejajaama (*district heating station*). Jahutatud, hoonete soojustamiseks kasutatud töövesi (*utilized recirculated water*) suunatakse uuesti soojuspumpa. Seega on süsteemis kolm veeringlust.



Joonis 8. Reovee jääsoojuse kaugküttevõrku rakendamise skeem [38]

Biotiik, millesse puhastatud reovesi suunatakse, on välisõhust mõjutatud ning seega mängib reovee jääsoojuse potentsiaalis mängu välisõhutemperatuur. Samuti mõjutab õhutemperatuur soojanõudlust.

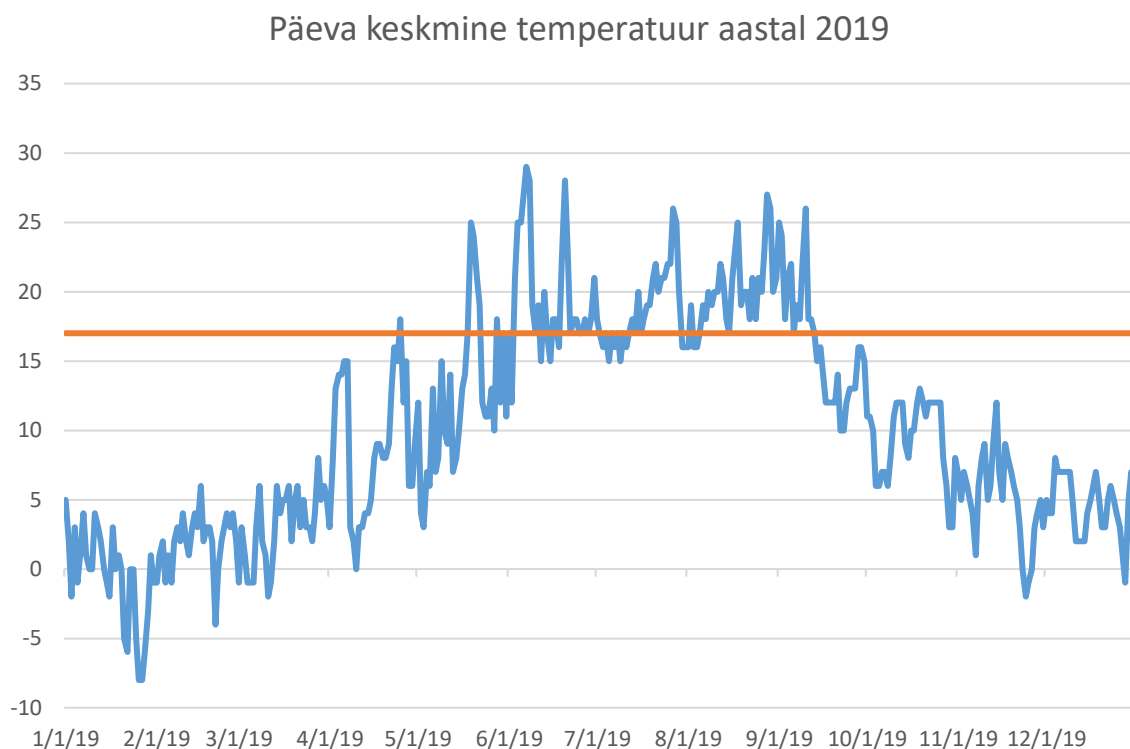
Lisas 1 on toodud aasta jooksul 1. jaanuarist 2019. aastal kuni 1. jaanuarini 2020. aastal võetud reoveetemperatuurid. Reovee temperatuuri mõõtepunkt asub aeratsioonimahutis. Aeratsioonimahutid on levinuimad avatud tüüpi bioreaktorid, milles puhastatakse mikroorganismidest koosneva aktiivmuda abil reovett orgaanilisest ainest.

Graafikult on näha, et temperatuur aeratsioonimahutis jääb ligikaudselt vahemikku 6-23°C ning ei lange kordagi alla 5°C. Temperatuuri mõjutavad eelkõige lume sulamisel tekkiv infiltratsioon ja puhastuse ajal esinevad välised miinuskraadid. Seetõttu on näha madalamat temperatuurivahemiku jaanuarist märtsini ning taas detsembris. Märtsi lõpu poole hakkab temperatuur tõusma ning püsib juunist septembri keskpaigani 20°C ümbruses. Reovee temperatuurikõikumised ei ole päevade kaupa suured aga hooegade kaupa on temperatuurimuutused arvestatavad.

Reoveest tulenevat soojust oleks potentsiaalselt võimalik efektiivselt kasutada suvistel perioodidel, kui ruumide soojendamiseks energiat ei kulu, tarbevee soojendamiseks. Potentsiaali tagab lisas 1 väljatoodud suvisele perioodile vastav kõrgem aeratsioonikambri oleva reovee temperatuur.

Õhutemperatuur päevade kaupa Keilas aastal 2019 on toodud joonisel 9 (sinine joon). [40] Oranži joonega on toodud õhutemperatuur, mis on võetud tingliku temperatuurina, millest alates hakatakse kütma, selleks temperatuuriks võeti 17°C. Võttes arvesse

valitud temperatuuri, on võimalik välja selgitada päevade arv, mille jooksul teoreetiliselt rakendatati 2019. aastal kaugkütet. Tulemuste põhjal langes päeva keskmine õhutemperatuur alla 17°C 287 päeval.



Joonis 9. 2019. aasta keskmised temperatuurid päevade kaupa

Keila Reoveepuhastusjaama 2019. aasta heitvee kogus oli 734 282 m³. [41] Arvutuste lihtsustamiseks tehakse eeldus, et heitveekogus püsis aasta jooksul konstantsena. Selle abil on leitav päevane heitvee mahtkulu kuupmeetrites päeva kohta.

$$\dot{V} = \frac{V_{aasta}}{365 \text{ päeva}}$$

Tulemuseks on mahtkulu $\dot{V} = 2011,73 \text{ m}^3/\text{päev}$ inimese kohta. Üheks oluliseks regulatiivses muutujaks teoreetilise potentsiaalse jääsoojuse koguse arvutamiseks on temperatuuride vahe. Üldiselt võetakse arvesse 3-5 kraadine vahe. [38] Selles töös võetakse arvesse 3 kraadine temperatuuride vahe ($\Delta T = 3K$). Arvutuses kasutatakse ka vee tihedust ja erisoojus, mille väärtusteks võeti vastavalt $\rho = 998,21 \text{ kg}/\text{m}^3$ ja $c_p = 4186 \text{ J}/\text{kg} \cdot K$. Reovee jääsoojuse teoreetilise jääsoojuse potentsiaali valem on järgmine.

$$Q = \dot{V} * \rho * c_p * \Delta T$$

Valemi tulemusel on Keila reoveejaamast saadav teoreetilise jääksoojuse potentsiaal $Q = 25\,218,10 \text{ MJ/päev}$. Jääksoojuse rakendatavuse arvutusel tuleks arvesse võtta ka kasutatava soojuspumba jõudluskoefitsienti ehk COPd (*coefficient of performance*). Soojuspumba jõudluskoefitsendiks võeti $COP = 3,40$ vastavalt Tallinna Paljassaare reoveepuhastusjaama põhjal tehtud uuringule, kus kasutati hinnangulist meetodit üheetapilise soojuspumba kohta [28].

$$Q_{potentsiaal} = \frac{Q * COP}{(COP - 1)}$$

Arvutuse põhjal saab päevaseks potentsiaalselt rakendatavaks soojuse koguseks $Q_{potentsiaal} = 35\,725,65 \text{ MJ/päev}$. See teeb aastaseks jääksoojuse teoreetiliseks potentsiaaliks $Q_{aasta} = 13\,039\,860,71 \text{ MJ} = 3622,18 \text{ MWh}$. Võttes arvesse vaid päevi, mil Keila õhutemperatuur langes alla 17°C , saame potentsiaaliks $Q_{aasta, kütteperiood} = 10\,253\,260,34 \text{ MJ} = 2848,13 \text{ MWh}$.

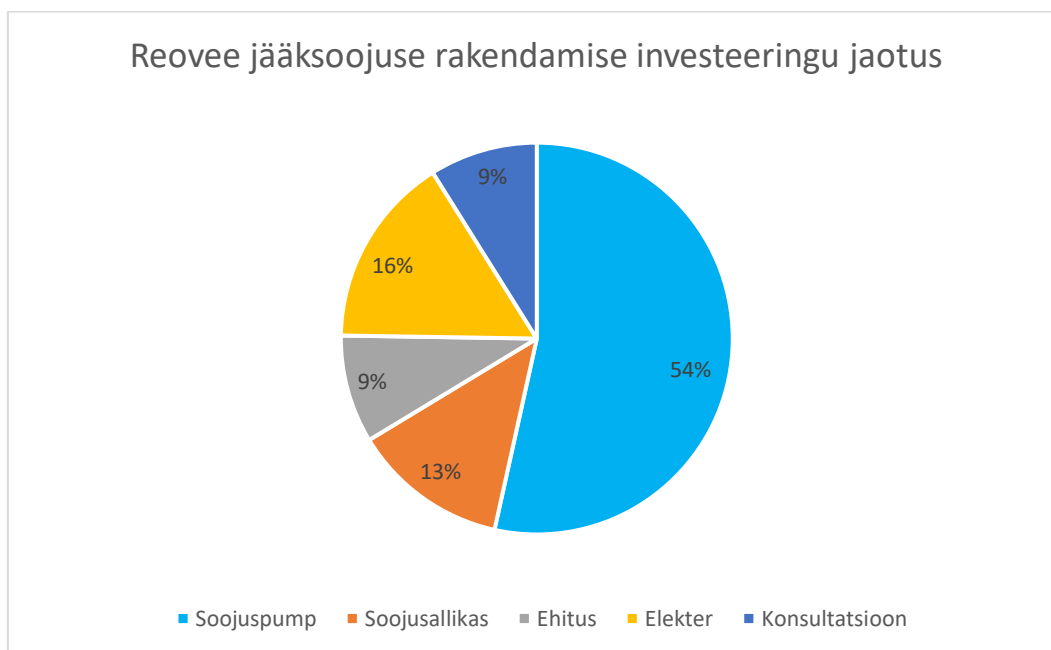
Keila soojuse tarbimine oli 2019. aastal $32\,605,35 \text{ MWh}$. Seega oleks võinud reovee jääksoojus moodustada $11,11\%$ soojanõudlusest, arvestamata soojuskadusid.

Puiduhakke alumine kütteväärtus on 800 kWh/m^3 . [42] Seega oleks 2019. aastal saanud reovee jääksoojuse rakendamise arvelt säästa vähemalt $4527,73 \text{ m}^3$ puiduhaket.

Keila reoveepuhastusjaam asub, nagu eelpool mainitud, Luha tänaval lõppevast kaugküttevõrgust ligikaudu 500 meetri kaugusel. Seega oleks Keila reoveepuhastusjaamast saadava jääksoojuse rakendamiseks lisaks soojusvahetile ja soojuspumbale, mis tõstab saadava soojusega vee temperatuuri kaugküttevõrgus olevale tasemele, vaja rajada vähemalt 500 meetri pikkune lisatorustik.

Reovee jääksoojuse rakendamiseks kasutatavad soojuspumbad nõuavad suuri alginvesteeringuid, eriti väiksemamahulise jääksoojuse puhul. Joonisel 10 on näha, kuidas jaotuvad reovee jääksoojuse rakendamiseks vajalikud investeeringud protsentuaalselt. Graafikult on näha, et suurim osa investeeringutest läheb soojuspumba rajamise alla (54%). Sellele järgnevad soojusallika poolt nõutavad investeeringud (13%), mis läheb reovee jääksoojuse rakendamiseks vajaliku soojusvaheti ning paigaldatud vajaliku puhastussüsteemi jaoks, mis tagaks sujuva töö.

Soojusallika pool nõutavale investeeringule järgnevad elektrialased investeeringud (16%), mille alla käivad elektrilised paigaldused, nagu ühendused elektrivõrguga ja kontrollsüsteemide paigaldus. Võrdset jagunevad investeeringud ehituse (9%) ja konsultatsiooni (9%) peale, mille alla käivad vajalike ehitiste ja torustikku paigaldused, millest on arvestamata jäetud küttevõrgu torustikku paigaldus, ning konsultatsiooni alla käib konsulteeriva firma ja projekteerijate osa.



Joonis 10. Reovee jääksoojuse rakendamise investeeringu jaotus [43]

Reovee jääksoojuse rakendamiseks vajalike investeeringute suurus ulatub alates 0,5 MW suuruse võimsusega soojuspumba paigaldamise puhul 1,91 miljoni euroni, kuid väheneb soojuspumba võimsuse kasvades 10 MW-se võimsuseni 0,62 miljoni euroni. [43]

KOKKUVÕTE

Kaugküttele on oluline roll tuleviku jätkusuutlikul energiatarbimises. Kaugkütet kasutatakse hoonete soojustamiseks ja sooja tarbeveega varustamiseks. Konkurentsivõimeliseks muudavad kaugküttesüsteemi sobiv ja soodsa hinnaga energiaallikas, piisav nõudlus soojusturul ning efektiivne soojapakkumise ja -nõudluse vahendajaks olev soojustorustik.

Kaugküttesüsteeme on kasutatud mitmeid sajandeid, kaugküttearengu esimese generatsiooni alguseks peetakse aga 19. sajandit. Sellest ajast saati on kaugküte läbinud mitmeid muutusi seoses hoonete ja kaugsoojustorustiku soojapidavuse tõhustumisega ning energiakandjate ja energiaallikate arenguga. Tänapäeval liigutakse maailmas kaugkütte neljanda generatsiooni suunas, mille kaugküttevõrgu soojuskandjate temperatuurid on madalamad, millest tulenevalt on soojusvõrgus madalamad soojuskaod ning madalamad kaugkütte pealevoolutemperatuurid võimaldavad rakendada suuremal määral erinevaid soojusallikaid, seehulgas erineva temperatuuritasemega jääksoojusallikaid.

Jääksoojuse rakendamine on energia efektiivne kasutamine, mida käsitletakse tihtipeale taastuva energiaallikana. Kõrgetemperatuurilisi jääksoojuse allikaid rakendatakse laialdaselt. Nende alla käivad tööstuse jääksoojus, soojuselektrijaamad ja jäätmepõletusjaamad. Soojuselektrijaamades ja jäätmepõletusjaamades toodetavad soojust saab tõlgendada jääksoojusena, kuna soojuselektrijaamade põhitoodang on elekter ning jäätmepõletusjaamade põhieesmärk on jäätmekäitlus.

Madalatemperatuurilisi jääksoojusallikaid on laialdaselt tiheda asutusega piirkondades. Potentsiaalsed madalatemperatuurilised jääksoojusallikad on teenindussektori hooned, seehulgas kontorid, poed ja haiglad, andmekäitlust vahendavad serveripargid, maa-alused transpordisüsteemid ja reovesi. Madalatemperatuuriliste jääksoojusallikate eelis on soojanõudlusega piirkondade lähedus aga nõuavad madalama temperatuuri tõttu erilisi tingimusi. Nende tingimuste alla käivad kaugküttevõrgustiku madalamad töötemperatuurid ja soojuspumpade rakendamine. Majandusliku poole pealt on piirangud vähesest jääksoojuse rakendamise teadlikkusest tulenevalt riikide poolt pakutavate toetuste ja potentsiaalsete investeerijate vähesuse tõttu.

Vaatamata madalatemperatuuriliste jääksoojusallikate rakendamise piirangutele, uuritakse ja rakendatakse jääksoojust Euroopas aina enam. Üle Euroopa on näiteid nii

maa-aluste transpordisüsteemide, serveriparkide, teenindussektori kui ka reovee jääksoojuse rakendamisest.

Jääksoojuse rakendamine muutub aina aktuaalsemaks, mida madalamaks muutuvad töötemperatuurid kaugküttevõrgus läbi kaugküttevõrgu tõhususe kasvule. Eestis on potentsiaali kasutada jääksoojust tööstusest, serveriparkidest ja reoveest. Reovee jääksoojuse suureks eeliseks on reovee puhastusjaamade paiknevus kõigis suuremates linnades.

Tulenevalt reovee kui jääksoojusallika suurest potentsiaalset uuriti töös reovee jääksoojuse rakendamist Keila kaugküttevõrku. Piirkond sai valitud olemasoleva kaugküttevõrgu ning linnas asuva reoveepuhastusjaama põhjal. Tulenevalt reovee puhastuse temperatuuritundlikkusest valiti jääksoojuse rakendamiseks puhastatud reovesi enne selle vabastamist jõkke.

Võttes arvesse Keila reoveepuhastusjaama potentsiaalset jääksoojust ja reoveepuhastusjaama kaugust kaugküttevõrgust, on reovee jääksoojusel Keila kaugküttevõrgus potentsiaali. 2019. aasta Keila reoveepuhastusjaama ja kaugküttesüsteemi andmete põhjal oleks reovee jääksoojuse potentsiaal võinud, soojuskadusid arvestamata, katta 11,11% aastasest soojanõudlusest, arvestamata soojuskadusid. Küll aga tuleb uurida lähemalt vajalikke investeeringuid ning reovee jääksoojuse rakendamise tasuvusaega. Antud tööd on võimalik arendada analüüsides kaugküttevõrgu töötemperatuuri alandamise võimalusi, mille abil on võimalik rakendada aina enam jääksoojusallikaid.

SUMMARY

District heating has an important role in sustainable future energy consumption. District heating is used for space heating and for the preparation of domestic hot water. A district heating system is able to compete in the energy market by having a suitable and inexpensive energy source, a high enough heat demand in the region and effective piping to connect the heat supply with the heat demand.

District heating systems have been used for centuries, but the 19th century is considered as the beginning of the development of district heating as that is the time that the first generation of district heating came to use. Since then district heating has foregone multiple updates as the heat carriers and heat sources as well as the insulation of buildings and district heating network have improved. Nowadays the district heating systems are moving towards the fourth generation of district heating, that has lower operation temperatures as well as smaller heat losses and the possibility to implement different heat sources including waste heat sources with different temperature levels.

Waste heat recovery is a way to use energy efficiently, but it is often regarded as a renewable heat source. High temperature waste heat sources are widely implemented. That includes waste heat from industries, heat and electricity cogeneration plants and waste incineration plants. The heat from cogeneration plants and waste incineration plants are considered as waste heat, because their primary objectives are respectively the production of electricity and waste management.

Low temperature waste heat sources are frequent in densely populated areas. Potential low temperature waste heat sources are service sector buildings such as offices, stores and hospitals, data centers, underground transportation systems and sewage. The advantage of low temperature heat sources is the proximity of the heat demand but the implementation requires special conditions. That includes lower district network operating temperatures and the use of heat pumps. From an economic standpoint, the disadvantage is the low awareness of waste heat implementation, that affects the possible financial support from governments and the number of potential investors.

Despite the limitations of implementing low temperature waste heat sources into district heating systems, the potential is being increasingly investigated and implemented in Europe. There are cases of the implementation of waste heat from underground transportation systems, data centers, service sector buildings and sewage water all over Europe.

The implementation of waste heat sources is becoming more relevant as the working temperatures of the district heating networks decreases. In Estonia, there is potential to use waste heat from industries, data centers and sewage water. The main advantage of sewage water waste heat potential is the fact that sewage water treatment plants exist in all of the bigger cities in Estonia.

Sewage water is a waste heat source with great potential. This theory was the basis of investigating the potential of implementing waste heat from sewage water to the district heating network of Keila. The region was selected based on an existing district heating network and the proximity of a sewage water treatment plant. Due to the temperature sensitivity of the sewage water treatment process, sewage water that has foregone the cleaning process was chosen as the heat source.

Considering the waste heat potential from the sewage treatment plant of Keila and the distance from the sewage plant to the district heating network, there is potential of implementing waste heat from sewage to the district heating network in Keila. From the data for the year 2019 obtained from the sewage treatment plant and district heating provider of Keila, the heat from sewage could have covered up to 11,11% of the yearly heat demand, without taking heat losses into consideration. However the needed investments and the payback period will have to be further investigated. The current thesis can be further developed by investigating ways to decrease the operating temperatures of district heating networks to further enable waste heat recovery.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] "Soojusmajandus | Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi." <https://www.mkm.ee/et/tegevused-eesmargid/energeetika/soojusmajandus> (accessed Apr. 01, 2020).
- [2] D. Rutz, C. Winterscheid, T. Pauschinger, S. Grimm, and T. Roth, *Upgrading the performance of district heating networks: A Handbook*, First. Munich, Germany: WIP Renewable Energies, 2019.
- [3] "Kaugkütteseadus - Riigi Teataja." <https://www.riigiteataja.ee/akt/103032017012> (accessed Apr. 01, 2020).
- [4] S. Frederiksen and S. Werner, *District Heating and Cooling*, First. Studentlitteratur, 2013.
- [5] "Sådan laves varmen - Vi fanger solen." <http://www.gram-fjernvarme.dk/firmaprofil/saadan-laves-varmen/> (accessed Apr. 10, 2020).
- [6] L. Riahi, C. Martinez, P. Lapuente, R. Savickas, Z. Chen, and Š. Prieskienis, "Study on district energy in cities to support Korea's Eco Energy Towns approach.," 2017.
- [7] H. Lund *et al.*, "4th Generation District Heating (4GDH)," *Energy*, vol. 68, pp. 1–11, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [8] J. Ziemele, R. Kalnins, G. Vigants, E. Vigants, and I. Veidenbergs, "Evaluation of the industrial waste heat potential for its recovery and integration into a fourth generation district heating system," *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 315–321, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.098.
- [9] H. Li and N. Nord, "Transition to the 4th generation district heating - possibilities, bottlenecks, and challenges," *Energy Procedia*, vol. 149, pp. 483–498, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.213.
- [10] H. Lund *et al.*, "The status of 4th generation district heating: Research and results," *Energy*, vol. 164, pp. 147–159, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.08.206.
- [11] "Power plant - Energy Education." https://energyeducation.ca/encyclopedia/Power_plant?fbclid=IwAR2tUcdZLr9TrKb3610uzHGNruko0IqamURD8qoXGF74furco16Uf7E3u4k (accessed Apr. 10, 2020).
- [12] H. Jouhara *et al.*, "Literature review of energy use and potential for heat recovery in the EU28 Report 6 June 2016," p. 218.
- [13] "Energia tootmine - Enefit Green." <https://www.enefitgreen.ee/energia-tootmine> (accessed Apr. 10, 2020).

- [14] G. Bianchi *et al.*, "Estimating the waste heat recovery in the European Union Industry," *Energy Ecol. Environ.*, vol. 4, no. 5, pp. 211–221, Oct. 2019, doi: 10.1007/s40974-019-00132-7.
- [15] M. Papapetrou, G. Kosmadakis, A. Cipollina, U. La Commare, and G. Micale, "Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 138, pp. 207–216, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.043.
- [16] A. David, B. V. Mathiesen, H. Averfalk, S. Werner, and H. Lund, "Heat Roadmap Europe: Large-Scale Electric Heat Pumps in District Heating Systems," *Energies*, vol. 10, no. 4, p. 578, Apr. 2017, doi: 10.3390/en10040578.
- [17] "Tertiary Buildings," *ReUseHeat*, Dec. 07, 2017. <https://www.reuseheat.eu/tertiary-buildings/> (accessed Apr. 12, 2020).
- [18] U. Persson, "Accessible urban waste heat," Halmstad University, Sweden, D1.4, Nov. 2018.
- [19] M. Wahlroos, M. Pärssinen, S. Rinne, S. Syri, and J. Manner, "Future views on waste heat utilization – Case of data centers in Northern Europe," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 1749–1764, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.058.
- [20] "Underground Transport Systems," *ReUseHeat*, Dec. 07, 2017. <https://www.reuseheat.eu/underground-transport-systems/> (accessed Apr. 12, 2020).
- [21] "Waste Water Management," *ReUseHeat*, Dec. 07, 2017. <https://www.reuseheat.eu/waste-water-management/> (accessed Apr. 12, 2020).
- [22] B. V. Mathiesen *et al.*, "Towards a decarbonised heating and cooling sector in Europe: Unlocking the potential of energy efficiency and district energy," Aalborg University, Denmark, Nov. 2019. Accessed: Apr. 19, 2020. [Online]. Available: <https://vbn.aau.dk/en/publications/towards-a-decarbonised-heating-and-cooling-sector-in-europe-unloc>.
- [23] I. Johnson and W. T. Choate, "Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry," p. 112, Mar. 2008.
- [24] "Legionellos | Terviseamet." <https://www.terviseamet.ee/et/node/1743> (accessed Apr. 10, 2020).
- [25] L. Karlsson and K. Ottosson, "Overcoming issues with Legionella in DHW in LTDH systems," Thesis for the Degree of Master of Science, Lund University, Sweden, 2018.

- [26] H. Averfalk and S. Werner, "Essential improvements in future district heating systems," *Energy Procedia*, vol. 116, pp. 217–225, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.05.069.
- [27] K. Lygnerud, E. Wheatcroft, and H. Wynn, "Contracts, Business Models and Barriers to Investing in Low Temperature District Heating Projects," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 15, p. 3142, Aug. 2019, doi: 10.3390/app9153142.
- [28] H. Pieper, V. Mašatin, A. Volkovac, T. Ommena, B. Elmegaarda, and W. B. Markussena, "Modelling framework for integration of large-scale heat pumps in district heating using low-temperature heat sources: A case study of Tallinn, Estonia," vol. 20, p. 20, 2019.
- [29] E. Wheatcroft, H. Wynn, K. Lygnerud, G. Bonvicini, and D. Leonte, "The Role of Low Temperature Waste Heat Recovery in Achieving 2050 Goals: A Policy Positioning Paper," *Energies*, vol. 13, no. 8, p. 2107, Apr. 2020, doi: 10.3390/en13082107.
- [30] "Peta4 – Heat Roadmap Europe." <https://heatroadmap.eu/peta4/> (accessed May 27, 2020).
- [31] "Three new data centers with heat recovery to be built in Stockholm," *Bioenergy International*, Nov. 12, 2019. <https://bioenergyinternational.com/heat-power/three-new-data-centers-with-heat-recovery-to-be-built-in-stockholm> (accessed May 27, 2020).
- [32] "Industrial bakery - Chimney Fans & Heat Recovery Systems | exodraft." <https://exodraft.co.uk/case-category/industrialbakery/> (accessed May 27, 2020).
- [33] F. Schmid and E. Fh, "Sewage water: Interesting heat source for heat pumps and chillers," p. 12, 2008.
- [34] "Tutvustus - Keila Linnavalitsus." <http://www.keila.ee/tutvustus-ja-asukoht> (accessed May 24, 2020).
- [35] V. Liiv, T. Piirsalu, and S. Ennok, "Keila linna ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni arendamise kava aastateks 2015-2026," Keila, 2015.
- [36] E. Jõgisu, "Keila linna soojusmajanduse arengukava aastateks 2016-2026," 2016.
- [37] "Andmed ettevõttelt AS Utilitas Eesti."
- [38] V. Somogyi, V. Sebestyén, and E. Domokos, "Assessment of wastewater heat potential for district heating in Hungary," *Energy*, vol. 163, pp. 712–721, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.07.157.
- [39] H. Erhorn, J. Görres, M. Illner, J.-P. Bruhn, and A. Bergmann, "'NeckarPark Stuttgart': District heat from wastewater," *Energy Procedia*, vol. 149, pp. 465–472, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.211.

- [40] "Keila, Harju, Estonia Weather Forecast | AccuWeather."
<https://www.accuweather.com/en/ee/keila/127966/weather-forecast/127966>.
- [41] "Andmed ettevõttelt Keila Vesi."
- [42] "Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika – Riigi Teataja."
<https://www.riigiteataja.ee/akt/122082019005> (accessed May 30, 2020).
- [43] H. Pieper, T. Ommen, F. Buhler, B. L. Paaske, B. Elmegaard, and W. B. Markussen, "Allocation of investment costs for large-scale heat pumps supplying district heating," *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 358–367, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.104.

LISAD

LISA 1 Keila Reoveepuhastusjaama reovee temperatuur 01.01.2019-01.01.2020

