

TTÜ Energiatehnoloogia instituut

**SOOJUSSLIVESTI (TES) ÜLEVADE. TÜRI JA
PALDISKI LINNADE TES KASUTAMISE
VÕIMALUSED**

**HEAT STORAGE (TES) OVERVIEW. POSSIBILITIES OF
USING TES IN TÜRI AND PALDISKI CITIES**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Konstantin Sidoruk

Üliõpilaskood 182956MASM

Juhendaja: Anna Volkova, uurimisrühmajuht

Tallinn 2020

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.

"26" Mai 2020

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

TalTech Instituudi nimetus

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Konstantin Sidoruk, 182956MASM

Õppekava, peeriala: MASM02/18 – Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika

Juhendaja(d): uurimisrühmajuht, Anna Volkova

Lõputöö teema:

Soojussalvesti (TES) ülevaade. Türi ja Paldiski linnade TES kasutamise võimalused.

Heat storage (TES) overview. Possibilities of using TES in Türi and Paldiski cities.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Hinnata (TES) akkumulatsioonipaakide paigaldamise efektiivsus
- 2.
- 3.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Töö ülesehituse kinnitamine	09.03.2020
2.	TES tehnoloogia kirjeldus	20.04.2020
3.	Türi ja Paldiski andmete küttesaamine	05.05.2020
4.	Andmete sisestamine	18.05.2020
5.	Analüüs ja järelduste tegemine	25.05.2020
6.	Lõpp töö esitamine	27.05.2020

Töö keel: eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: ".....".....2020.a

Üliõpilane: Konstantin Sidoruk ".....".....2020.a

/allkiri/

Juhendaja: ".....".....2020.a

/allkiri/

Konsultant: ".....".....2020.a

/allkiri/

Programmijuht: ".....".....2020.a

/allkiri/

Türi Tehnika, Türi Vabriku ja Paldiski katlamajade statistika on SW Energia omand ning ei kuulu avalikustamisele.

SISUKORD

EESSÕNA	7
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	8
SISSEJUHATUS	10
1. SOOJUSENERGIA SALVESTAMINE	12
1.1 Energia salvestamise ajalugu	12
1.2 Määratlused	13
1.3 Klassifikatsioon.....	14
1.3.1 Soojusenergia salvestamise meetodid	15
1.3.2 Salvestusaeg	16
1.3.3 TES kasutatavad materjalid	17
1.3.4 Salvestite liigid	19
1.4 Faasimuutuseta soojusenergia salvestamine	20
1.4.1 Füüsilise soojuse salvestamine	23
1.4.2 Madalatemperatuurilised veesüsteemid (alla 100 °C).....	23
1.4.3 Kõrgtemperatuurilised veesegud (> 100 °C), aurukumulaator.....	25
1.4.4 Termoõlisüsteemid	26
1.4.5 Sulatatud soolaga salvestussüsteemid	27
1.4.6 Soojuse salvestamine tahketes materjalides	27
1.5 Faasimuutusega soojusenergia salvestamine.....	29
1.5.1 Materjalid	31
1.5.2 Orgaanilised PCM materjalid	33
1.5.3 Anorgaanilised PCM-d	34
1.5.4 Eutektilised materjalid	35
1.6. Termokeemiline energia salvestamine	36
2 SOOJUSENERGIA SALVESTAMISE RAKENDAMINE SOOJUSVÕRKUDES	38
2.1 Soojusvõrgud	38
2.2 TES rakendamine soojus- ja elektrienergia koostootmisega (CHP)	40
2.3 TES-i kasutamine töös katlamajadega	41
2.4 TES kasutamine alternatiivselt soojuse allikutega	41
3 SOOJUSENERGIA SALVESTAMISE KASUTAMISE TÕHUSE ANALÜÜS SOOJUSVÕRKUDES	43
3.1 TES Arvutamine.....	44
3.1.1 EnergyPro programm.....	46
3.2 Majandus arvestus	47

3.3 Uuringuobjektid.....	51
3.3.1 Türi	52
3.3.2 Türi linna katlamajad	53
3.3.3 Paldiski	56
3.4 Sisendandmed.....	58
4 TULEMUSED	61
KOKKUVÕTE	67
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	68
LISAD	70

EESSÕNA

Esiolgselt sarnast probleemi pakkus uurida autori tööandja. Tööde käigus, autori juhendaja abiga, oli lõplikult sõnastatud magistritöö teema.

Antud uurimistöö autor avaldab tänu kõigile, kes on jaganud infot ja oma teadmisi.

Analüüsi teostamisel on kasutatud andmeid, mis oli esitatud firma SW Energia OÜ poolt. Tulemused olid saavutatud andmeanalüüsiga kasutades selleks Microsoft Office Exeli tabelitöötluste tarkvara.

Tänud tööandjale Stroicom OÜ, kes andis võimaluse uurimistöode läbiviimiseks.

Erilised tänuavaldused lähevad uurimisrühmajuhile Anna Volkovale, kes oli nõus olema magistritöö juhendajaks.

Võtmesõnad: Soojusesalvestamine, TES, akkumulatsioonipaak

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

a	Termiline difusioon	[m ² /s]
b	Termoeraldus	[J/(m ² Ks ^{1/2})]
cp	Spetsiifiline soojusmaht	[J/(kgK)]
λ	Soojusjuhtivus	[W/(mK)]
ρ	Tihedus	[kg/m ³]
Q	Soojus	[J]
m	Mass	[kg]
t	Temperatuur	[C]
Δt	Temperatuuride vahe	[C]
qlat	Varjatud suujus	[J]
qmol	Molaarne soojus	[J/mol]
tf	Sulamisi punkt	[C]
hf	Materjali sulamise entalpia	
R	Molaarse gaasi konstant	
V	Maht	[m ³]
h	aeg	[t]
H	Tühjenemisaeg	[t]
η	Kasutegur	[%]
ge	Puiduerikulu	
A	Pindala	[m ²]
R	Raadius	[m]
PP	Tasuvusaeg	
ARR	Arvestusliku rentaabluse meetod	[%]
NPV	Nüüdispuhasväärtus	
IRR	Sisemine tasuvuslävi	
PI	Kasumiindeks	[%]
Cft	Rahavoog antud aegadel	[t]
Io	Investeeringute algsumma	
CFcr	Puhas tulu	
NCF	Puhas rahavoog antud momentides	
d	Diskontmäär	[%]
n	Ajavahemik	[t]
TES	Soojusenergia salvestamine	
PCM	Faasimuutusega material	
CHP	Kogeratsiooni paigaldis	

THS	Termokeemiline salvestus
SHS	Faasimuutuseta (ilmne soojus)
LHS	Faasimuutusega (varjatud soojus)
HTF	Soojuskandja
AA	auruakumulaator
LMP	Madal sulatamise piir
EKM	Euteetiline komposiit materaalid

SISSEJUHATUS

Kaugküte on väga tähtis ja populaarne soojusvarustuse liik karmi ja külma kliimaga riikides. Eesti on üks neist riikidest, kus laialdaselt kasutatakse kaugkütet, kusjuures selle osakaal kogu riigi soojatarbimises on lähenemas 70 protsendile.

Vaatamata üsna heale kättesaadavusele on kaugkütel ka mitmeid puudusi. Autori arvates on üks kõige olulisem neist soojusenergia tootmine taastuvatest madalatemperatuurilistest energiaallikatest ning sellega seotud toodetud soojusenergia kaod.

Minu lõputööks valitud teema on hetkel väga aktuaalne, kuna viimasel ajal on riik erinevate tõukefondide abil toetanud uute, kohalikul taastuenergiaal – hakkpuidul, töötavate katlamajade ehitamist, sest nagu teada, on hakkpuit madalatemperatuurilise soojusenergia allikas. Nimetatud küsimuse uurimiseks andsid autorile tõuke paljud publikatsioonid TES kasutamise perspektiividest erinevates energiatootmise seadmetes. Selle turu hindamine andis lootustäratavaid numbreid kasvuks seoses Pariisi kokkuleppega CO₂ heite vähendamise kohta.

Töös kirjeldab autor TES klassifikatsiooni erinevaid parameetreid, nagu nt kasutamise koht, rakendatav materjal, samuti soojusenergia salvestamiseks kasutatava materjali liik. Siin antakse ülevaade kõige sagedamini kasutatavatest energia tootmise tehnoloogiatest koos töös eraldi käsitletava tehnoloogiaga.

Käesolevas töös käsitletakse soojusvarustussüsteeme, samuti nende rakendamist ja regulatsiooni Eestis. Arutletakse võimalikke variante TES juurutamiseks energia tootmise ja jaotamise süsteemides.

Töös leiab selgitamist ja lahtimõtestamist kasutatav metodoloogia, samuti tuuakse välja, milliseid andmeid kasutati, kuidas neid töödeldi, millised tulemused saadi ning milliseid neist kasutati edaspidi analüüsi tegemisel. Uuringus on kasutatud programmi EnergyPro. Esitatud on nimetatud programmi kirjeldus ja selle kasutusvaldkonnad. Töös on saadud tulemuste kontrollimiseks kasutatud nende visualiseerimist graafikute abil, aga ka TES töö tsüklilisuse uuringu mitmete aspektide täpsustamist.

Uuringu objektideks olid Türi ja Paldiski linnade katlamajad ja soojusvarustussüsteemid. Andmed uuringu teostamiseks esitas energiatootmise ja soojusvarustussüsteemide teenindamisega tegelev ettevõtte SW Energia.

Uuringu aineks on akumulatsioonipaigaldise (TES) rakendamise tõhusus.

Uuringu käigus uuriti soojusenergia tootmist, tarbimist ja sellega seotud näitajaid nimetatud linnades. Vaatluse all olid akumulatsioonipaigaldise majandusliku tõhususe võimalused.

Tulenevalt töö eesmärgist püstitati järgmised lõputöö ülesanded:

- Kinnitada või ümber lükata kütuse kokkuhoiu võimalus
- Määrata rakendatava TES otstarbekohane ja mõistlik maht
- Määrata investeeringute otstarbekus sarnaste paigaldiste püstitamiseks
- Kavandada edasised uuringuteed selles valdkonnas

Magistritöös on kasutatud järgmisi meetodeid: matemaatilist, loogilist, praktilist ja teoreetilist.

1. SOOJUSENERGIA SALVESTAMINE

1.1 Energia salvestamise ajalugu

Inimkond on kogu oma ajaloo vältel tihti kasutanud passiivselt kogunenud energiat. Selle näiteks on kunstliku või loodusliku päritoluga koopad, milles temperatuur erineb sõltuvalt aastaajast ümbritseva keskkonna omast, talvel on seal soojem, suvel aga jahedam. Aastaaegadega seotud temperatuurikõikumised ei tunginud sügavale maa alla ja seda kasutasidki meie eellased ära.

Samuti on teada lõunalaiuskraadidel elanud inimeste energia salvestamise tehnoloogiad. Nad ehitasid elamud, mis päeval kogusid endasse päikeseenergiat. Inimesed saavutasid sellega olukorra, mil elamutes salvess pidevalt mugav temperatuur, sest öösel, ümbritseva keskkonna madalatel temperatuuridel soojendas seinte ja katuse abil kogutud temperatuur elamu siseruume. Päeval aga, vastupidi, soojenesid päikesekiirguse toimel öö jooksul jahtunud seinad.

Teada on palju näiteid jääkambritest, kus eelnevalt talvel kogutud jääd kasutati suvisel ajal jahutamiseks.

Kaasaegse näitena võib tuua koduse veesoojendi ühele perele. Energia kokkuhoiu eesmärgil on sellised soojendid võimelised hoidma soojendatud vett pika aja vältel, kuna perekond ei kasuta sooja vett pidevalt. Tarbimise kõrgpunkte tasandatakse eelnevalt kogutud kuuma veega.

Üheks kõige varasemaks tehnilise energia salvesti tüübiks kujunesid suured veemahutid, mis olid mõeldud energiavajaduse tipu alandamiseks. Selliseid mahuteid kasutatakse laialdaselt tsentraliseeritud soojusvarustuse süsteemides, peale selle ka soojusenergeetikas päikesevalguse ööpäevase intensiivsuse kõikumisega seotud soojusenergia kättesaadavuse suurendamiseks. Päikesevalguse intensiivsuse muutumine toob kaasa iganädalase ja hooajalise energia salvestamise vajaduse.

Seitsmekümnendate alguse naftakriis tekitas huvi soojusenergia suuremahulise hooajalise salvestamise vastu. Algselt oli soojusenergia hooajalise salvestamise eesmärgiks salvestada energiat alates suvest kuni talveajani. Sellist energiat kasutati peamiselt elamute soojendamiseks. Ühe soojusallikana käsitleti ka soojust sisaldavaid tootmisjätmeid.

Viimastel aastatel on kerkinud üha suuremaks probleemiks jahutamine ja seoses sellega kasvab Euroopas nõudlus keskjahutussüsteemide järgi. Siiani kasutati nendes süsteemides passiivselt salvestatud külma, kuid nüüd me näeme kasvavat huvi suuremahuliste hooajaliste külma salvestamise süsteemide vastu.

Milliseid eeliseid, peale majanduslike, annavad sellised salvestussüsteemid? Me võime näha tootjate huvi süsteemi töö parandamise vastu tervikuna nii tootmise kõrgpunktide

tasandamise kui ka energia tagamise eesmärgil avarii korral. Seetõttu peab salvestamise energia olema odavam salvestamise ajal, kui energia maksumus selle kasutamise ajal. Selline hinnavahe peab olema piisavalt suur, et katta kulud investeeringutele, teenindamisele, kasutamisele ja energiakaole. Tänapäeval tuntakse palju majanduslikult otstarbekaid energia salvestamise rakendusi, oma töös ma toon välja praegu olemasolevad salvestamise tehnoloogiad ning arutlen nende majandusliku otstarbekuse üle. [1]

1.2 Määratlused

Soojus ja külm on füüsilises mõttes energia vormid, mida võib salvestada erineval viisil ja erinevatel eesmärkidel.

Soojusenergia salvestamise vajadus on tarvilik nendel juhtudel, kus tootmine ei vasta tarbimisele.

Akumulatsioonisüsteemid võimaldavad nende rakendamisel kasutada tõhusalt olemasolevat või toodetavat energiat, „waste heat“ korral toimub aga energia kokkuhoid.

Soojusenergia salvestamine (Thermal energy storage või TES) on teatud kontseptsioon nõudluse ja pakkumise mittevastavuse tasakaalustamiseks kas kütmisel või jahutamisel, millega kompenseeritakse erinevus soojuse /jahutuse tootmise aja ja hulga vahel. TES võib aidata parendada süsteemi tootlikkust nõudluse ja pakkumise kõikumiste ja süsteemi temperatuurikõikumiste tasandamise, samuti soojendus- ja/või jahutusallika töökindluse tõstmise arvel.

Energia salvestamise süsteemi võib kirjeldada järgmiste iseloomulike terminitega.

- Maht määratakse energiaga, mis on kogutud süsteemi ning see oleneb salvestamise protsessist, keskkonnast ja süsteemi suuruselt;
- Võimsus määrab, kui kiiresti süsteemi salvestatud energia võib olla tühjendatud (ja laetud);
- Tõhusus – see on kasutajale edastatud energia suhe salvestussüsteemi laadimiseks vajalikku energiasse. See arvestab energiakadu salvestamisaja ja tühjendamise-/laadimistsükli perioodi jooksul;
- Salvestusperiood määrab, kui kaua energia salvestatakse ja kestab tundidest kuudeni (see tähendab, tunde, päevi, nädalaid ja kuid hooajaliseks salvestamiseks);
- Laadimis- ja tühjendamisaeg määrab, kui palju aega kulub süsteemi laadimiseks/ tühjendamiseks; ja
- Maksumus puudutab kas salvestussüsteemi mahtu (€/ kWh) või võimsust (€/ kW) ja sõltub salvestusseadmete kapitali- või kasutuskuludest ja selle kasutusajast (s.t tsüklite arvust). [2]

Maht, võimsus ja tühjenemisaeg on vastastikku sõltuvad ja vahelduvad, kusjuures mõnedes salvestussüsteemides võivad maht ja võimsus samuti üksteisest sõltuda. Näiteks, TES süsteemides tähendab suur võimsus parendatud soojusedastust (nt, lisaribid soojusvahetis), mis vähendavad nimetatud mahu jaoks aktiivse materjali hulka salvestamiseks ning järelkult, ka mahtu. [2]

Peab meeles pidama, et mis tahes soojuse salvestamine tekitab salvestamise ajal energiakadu. See kadu on salvestusaja funktsioon, mis sõltub temperatuurist, mahust, salvestuskohast ja soojuskandja omadustest.

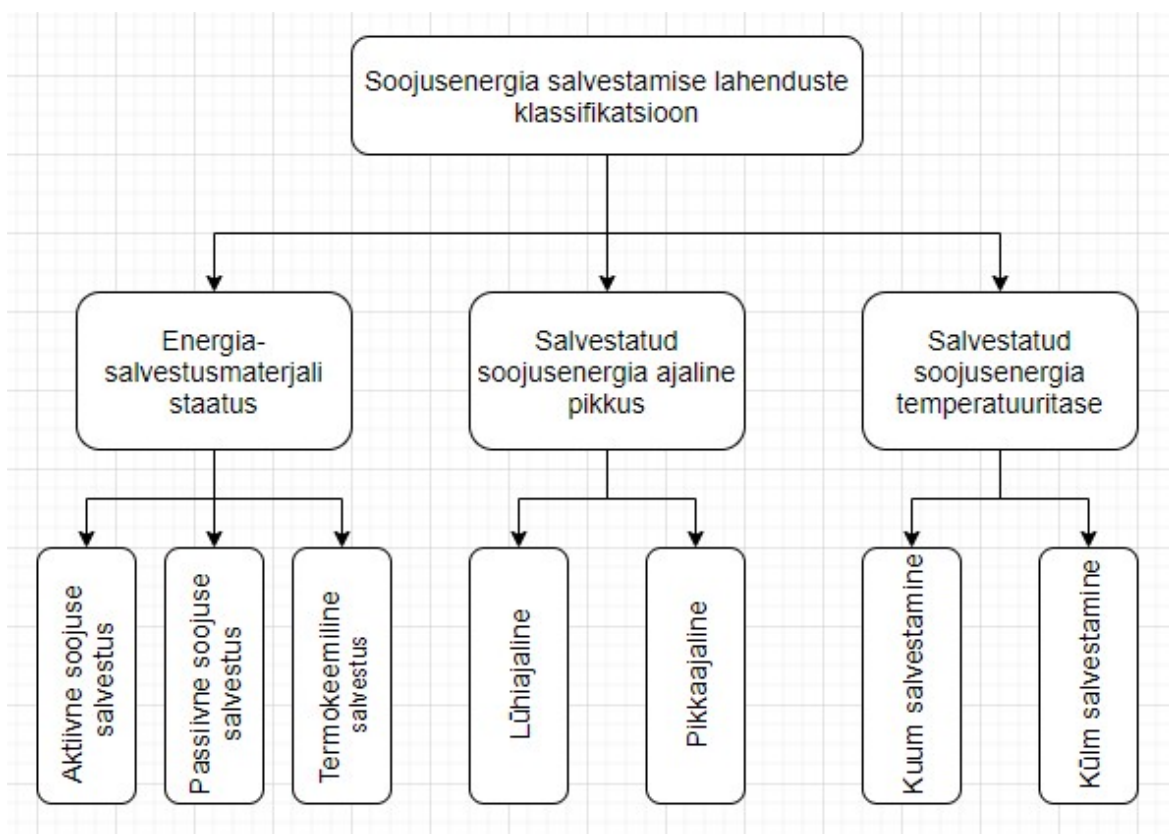
Soojusenergiat (s.t sooja ja külma) võib salvestada kui mõistlikku soojust soojuskandjates, kui varjatud soojust, mis on seotud faasimuutusega (PCM) materjalidega või kui termokeemilist energiat, mis on seotud keemiliste reaktsioonidega (s.t termokeemilist salvestamist) töötemperatuuridel vahemikus alates -40 °C kuni üle 400 °C. Tüüpilised TES süsteemidele näitajad on esitatud tabelis 1, sealhulgas maht, võimsus, tõhusus, salvestusaeg ja kulud. [3]

Tabel 1. TES süsteemi tüüpilised parameetrid

Süsteem	Maht kWh/t	Võimsus MW	Tõhusus %	Laadustamis periood	Maksumus €/kW/h
Faasimuutuseta (kuum vesi)	10 - 50	0,001 - 10	50 - 90	päev / kuu	0,1 - 10
Faasimuutmisega materiaal (PCM)	50 - 150	0,001 - 1	75 - 90	tund / kuu	10 - 50
Termo keemiline soojus	120 - 250	0,01 - 1	75 - 100	tund / päev	8 - 100

1.3 Klassifikatsioon

Energia salvestussüsteemidele omaste tunnuste klassifikatsiooni võib kujutada nii, nagu joonisel 1.[4]

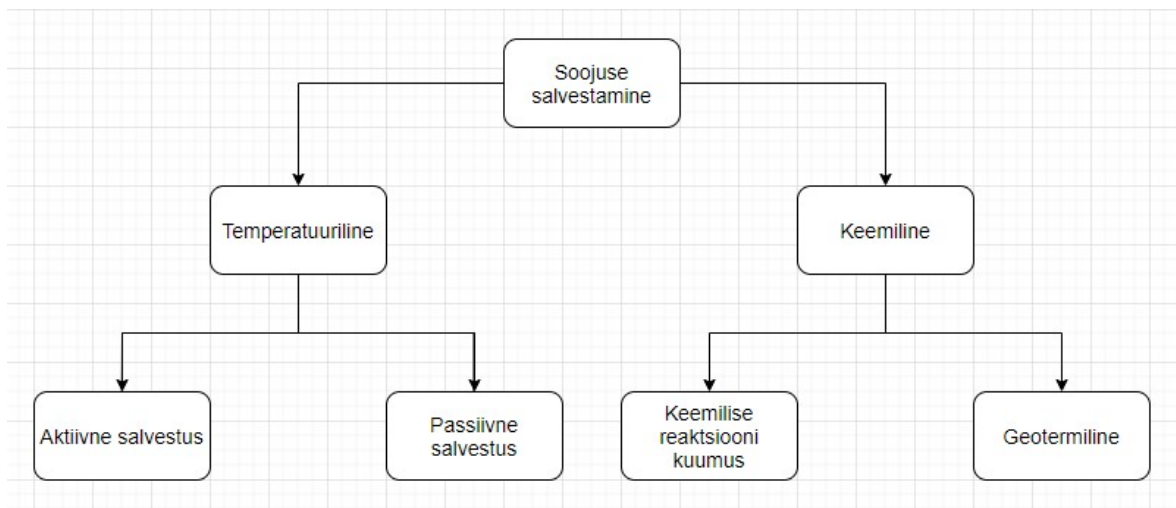


Joonis 1 Soojuse salvestamise klassifikatsioon

TES puhul kasutatavad lahendused jagunevad: materjali oleku järgi – varjatud soojus, füüsikaline (ilmne) soojus või termokeemilised reaktsioonid, salvestuse kestuse järgi eristatakse lühi- ja pikaajalisi lahendusi, salvestatava temperatuuri liigi järgi aga nii sooja kui ka külma. [5]

1.3.1 Soojusenergia salvestamise meetodid

TES puhul kasutatavad meetodid jagunevad omakorda: soojuse varjatud, ilmseks ja termokeemiliseks salvestamiseks, joonisel 2.[2]



Joonis 2 Salvestamise meetod

Soojuse ilmne salvestamine põhjustab salvestusmaterjali temperatuuri tõusu või langust, kogutud energia on proportsionaalne kasutatava materjali temperatuuri erisusega.

- Soojuse varjatud akumulatsioon on seotud salvestusmaterjali faasimuutusega (faasimuutusega materjalid - PCM), mis tavaliselt muudavad nende füüsilise faasi tahkest vedelaks või, vastupidi. Faasimuutus on alati seotud soojuse neeldumise või eraldumisega ning see toimub püsiva temperatuuri juures. Seega, lisatud või eraldatud soojust ei saa kindlaks teha, see on ilmselt, varjatud. Kogutud energia on ekvivalentne sulamissoojusega (entalpiaga) ja külmutamisega.

- Soojuse termokeemiline salvestamine põhineb termokeemilistel pöördreaktsioonidel. Energia salvestatakse endotermiliste reaktsioonide poolt loodud keemiliste ühendite vormis ja see taastub taas ühendite rekombineerumise teel eksotermilises reaktsioonis. Salvestatav ja eralduv soojus on ekvivalentsed reaktsiooni soojusega (entalpiaga).

Taalised TES süsteemid, nii ilmsed kui varjatud, töötavad tavaliselt salvestuskeskkonnas ilma massivahetuse ja keemiliste reaktsioonideta. Vastupidi, TES keemilised süsteemid kasutavad soojuse salvestamiseks termokeemilisi pöördreaktsioone.

Termokeemilise energia akumulatsioonisüsteemid on oma olemuselt keerulisemad võrreldes ilmse ja varjatud soojuse süsteemidega, kuna TES hõlmab mitte ainult soojusvahetuse ilminguid, vaid ka massiülekande ja keemiliste reaktsioonide kineetikat.[3]

1.3.2 Salvestusaeg

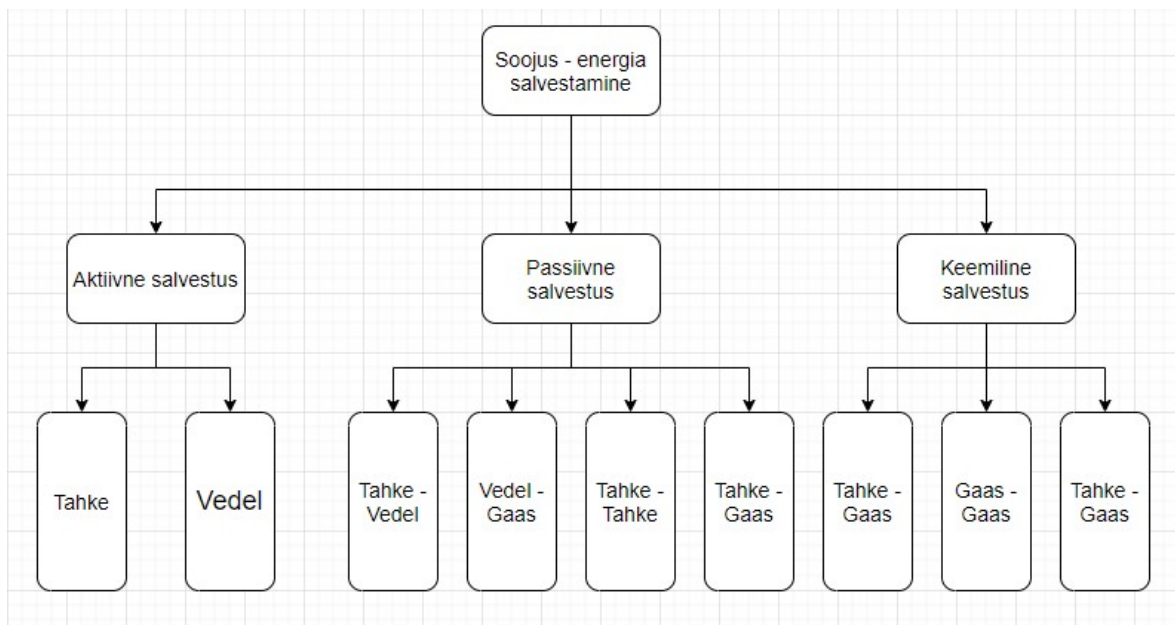
Põhiline kasu energia kogumisest ja salvestamisest seisneb selle ülekandes ajas ja ruumis, mis võimaldab ebasobival ajal toodetud energia kasutamist seal, kus see on vajalik ja siis, kui see on vajalik. Vaatleme järgnevalt ülekande liike ajas.

Teatakse lühi- ja pikaajalist salvestamist. Lühiajalise soojusenergia salvestamise näiteks on kogutud energia ülekanne ööperioodist päevale. Pikaajaline soojusenergia salvestamine on hooajaline, mille puhul külma energia kantakse talvelt üle suvele ja vastupidi, salvestatud päikese soojusenergia jms kantakse suvekuudelt üle talvekuudele. Võrdluseks on allpool esitatud tabel lühi- ja pikaajalise salvestamise kohta.[6]

1.3.3 TES kasutatavad materjalid

Igal salvestuskontseptsioonil on omad sobivamad materjalid, mis võivad olla erinevates füüsikalistes faasides, täpsemalt tahkete ainetena, vedelikena või pärineda faasimuutuse tagajärjest. Allpool on esitatud klassifikatsioon energiat akumul eeriva materjali liigi järgi, kus eristatakse:

- ilmne soojus: kuumades vedelikes ja tahketes ainetes,
- varjatud soojus: sulamites ja aurudes
- keemiline soojus: sulamites, gaasides ja tahketes ainetes.[5]



Joonis 3 Kasutatavad materjalid

Näiteks toon materjalid ja nende ühendid või keemilised reaktsioonid, mida saab kasutada TES-is. [4]

Tabel 3 Materiaalide kasutamine

	Aktiivne soojus	Passiivne soojus	Keemiline soojus
Tahke	Teras, kivi, betoon.		
Vedel	Vesi, õli, sulatatud soolad		
Tahke Vedel	- Vesi-veeris, õli-malm	Vesi-jää, parafiinid, soolahüdraadid	
Tahke Tahke	-	Soolad-soolad	
Keemilise reaktsiooni tüübid			Gaasilised ühendid katalüütiliseks reaksiooniks, dissotsieeruvad tahked või vedelikud, sorpsiooniprotsessid.

Kasutatavatele soojust akumuleerivatele materjalidele esitatakse järgmised nõuded:

- Suur gravimeetriline maht (suur soojusmaht, varjatud soojus või reaktsioonisoojus)
- Suur ruumimaht (suur tihedus ja eespool loetletud gravimeetrilised näitajad)
- Pikk kasutusiga, mittetoksiline, mittesüttiv, mitte plahvatusohtlik, lihtne kasutada (näiteks hügrokoopne)
- Ei tekita kaitsekatte, soojusvaheti ja soojusvahetust parandavate struktuuride (näiteks, ribide) korrosiooni; odavate konstruktsioonimaterjalide kasutamine
- Võime olla laadimis –tühjakslaadimistsükli osa ilma tootlikkuse kaota ja salvestusmaht mitmete tsüklite jooksul (suur tsüklilisus ja termiline stabiilsus)
- Sobivad materiaalsed kulud, hea kättesaadavus
- Kõrged temperatuurijuhtimise ja soojusväljastuse näitajad (soojusülekanne suured kiirused)
- Tiheduse väikesed muutused sõltuvalt temperatuurist, et minimeerida termomehaanilist pinget
- Soojuskandja otsustavaks teguriks on selle hind ja kasutamisega seotud kulud. Pikk kasutusiga ja suur stabiilsus tsüklilisel kasutamisel on heaks eelduseks majanduses kasutamiseks, s.t hinnalt ja konkurentsivõimelt sobiv olemasolevate materjalidega. Materjalide energia mahu- ja gravimeetrilised tihedused avaldavad otsustavat mõju salvestussüsteemi mahule, kus suur soojusmahtuvus vähendab soojuse akumulatsioonisüsteemi salvestusmahtu.[4]

Kasutatavate materjalide temperatuurijuhtivust (a) ja tõhusust (b) hinnatakse reeglina allpool toodud valemite abil:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (1)$$

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad (2)$$

kus λ – soojusjuhtivus, ρ – tihedus, c_p – mahuline soojusmahtuvus. [4]

Materjali suur temperatuurijuhtivus ja akumulereiv soojus tagavad kiire reaktsiooni temperatuurikõikumistele, s.t kiire laadimise ja tühjakslaadimise. Suur soojusväljastus tekitab suure soojushulga salvestamise. Suur temperatuurijuhtivus parandab ülemineku soojusülekannet ja järelikult, lühendab laadimise ja tühjakslaadimise protsessidele kuluvat aega. Soojusefekt on tähtis soojusjuhtivuse üleminekuprotsessidele materjalides, mis muudavad faasi seisundit soojuse ülekandmisel ja eeldavad püsivaid temperatuuri piirtingimusi. Metallid ja grafiit sobivad kõige paremini kiireks laadimiseks ja tühjakslaadimiseks (kõrge temperatuurijuhtivus a) ja suure soojushulga jaoks, mida salvestatakse teatud aja jooksul (suur soojustõhusus b). Teised tahked materjalid, nagu nt kivid, on hoopis vähem kasulikud. Nende vastavad näitajad on kordi väiksemad.

Termokeemiline salvestussüsteem võib kasutada veel väiksemate difusiooni koefitsiendi ja tõhususe näitajatega pulbertäidiseid. Väikesed tiheduse muutused olenevalt temperatuurist võivad minimeerida termomehaanilise pinge ilminguid. Peab arvestama, et soojusfüüsikalised omadused ei ole alati kättesaadavad ja nende väärtused võivad erineda erinevates kirjanduslikes allikates. Mõned soojusfüüsikaliste omaduste väärtused, nagu nt grafiidi väärtused, sõltuvalt suuresti temperatuurist. Peale selle võivad ainete lisandid oluliselt omadusi muuta. Näiteks tekitavad metallide lisandid soojusjuhtivuse väärtuste langust.[4]

1.3.4 Salvestite liigid

Eristatakse järgmisi salvestite liike (TES - Thermal energy storage) ja nende tähendusi: akumulereiv soojussalvesti, mis hõlmab mahutit (TTES), karjääri (PTES), puurauke (BTES), veekandekihi salvestit (ATES) ja Rock Cavern (CTES) kui soojusenergia kogujat. Kusjuures ATES, BTES, CTES tehnoloogiad on laialdasemalt levinud maa-aluse salvestamise süsteemid, mida kasutatakse hooajalistes rakendustes ning neid iseloomustavad suured ja odavad salvestuse mahud võrreldes ülejäänud liikidega.

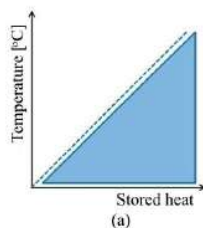
Elektrilised salvestussoojendid. Soojuse varjatud akumulatsiooni puhul kasutatakse erinevaid faasimuutusega materjalide tüüpe, tähis (PCM), kuid soojuse termokeemiline

akumuleerimine (THS) kuulub keemiliste pöördreaktsioonide kasutusalassee soojuse suure hulga salvestamiseks kompaktses mahus.

TES tehnoloogiad jaotatakse temperatuurivahemikus alates -40 °C kuni üle +400 °C keemilisteks ja termilisteks. [3]

1.4 Faasimuutuseta soojusenergia salvestamine

Kõige lihtsamaks soojuse salvestamise viisiks on ilmsee soojuse salvestamine / Sensible Heat Storage (SHS) viis. Nimetatud meetod on kõige lihtsam ja kõige odavam energia salvestamise ja ülekande viis, kus sellise energia kandjateks ja salvestajateks on sellised materjalid, nagu vesi, liiv, kivid, sulatatud sool. Taolise salvestamisviisi puhul kasutatakse aine või materjali üht tasakaaluolekut ilma teise faasi üleminekuta materjali enda omaduste kvaliteedi muutusega. Seetõttu nimetatakse nimetatud energia salvestamise liiki ka *faasimuutuseta soojusenergia salvestamiseks*. [2]



Joonis 4 SHS töö

Vesi on kõige odavam, populaarsem ja levinum energia salvestamise vahend. Näiteks on maa-aluste koobaste kasutamine vee soojuse hooajaliseks salvestamiseks üks kõige odavam energia salvestamise viis. Nimetatud viisil on autori arvates komertsedu ning seda võib kasutada Eesti territooriumil Ida-Virumaal vanades nii veega täitunud kui ka tühjades kaevandustes, kus kaevetööd on lõppenud.

Käsitletava SHS süsteemi eelised, peale juba eespool nimetatud odavuse, on ka veel toksilisusega seotud riskide puudumine. SHS süsteem kasutab laadimise ja tühjaks laadimise protsessis soojusmahtuvust ja soojuskandja temperatuuri muutust. Salvestatava soojuse hulk sõltub keskkonna erisoojusest, temperatuuri muutusest $\Delta T = T_2 - T_1$ ja salvestatava aine hulgast.

$$Q_s = \int_{t_i}^{t_f} mc_p dt = mc_p(t_f - t_i) \quad (3)$$

где Q_s – kogutud soojus J; m – soojuskandaja mass, v kg; c_p erisoojus, J / (kg*K); t_i – alg temperatuur, C; t_f – lõpp temperatuur, C. [7]

SHS tehnoloogias enim kasutust leidnud materjalid on esitatud koondtabelis 4. Tulenevalt niisugustest näitajatest, nagu maksumus ja soojusmahtuvus, võib teha järelduse, et temperatuuride juures kuni 100 °C, on vaieldamatuks favoriidiks vesi. Temperatuuride juures üle 100 °C on mõistlik kasutada selliseid kandjaid, nagu sulatatud soolad, metallid ja õlid. [2]

Tabel 4 Materialide nimikiri Aktiivne soojuse jaoks

	Materiaali tüüp	Temperatuur	Tihedus	Erikuumus
		C	kg/m ³	J/(kg*K)
Liiv	-	20	1555	800
Kivi	-	20	2560	879
Telis	-	20	1600	840
Tsement	-	20	2240	880
Graniit	-	20	2640	820
Alumiinium	-	20	2707	896
Malm	-	20	7900	837
Vesi	-	0-100	1000	4190
Glitserin HT43	Oil	12-160	867	2200
Õli	Oil	≤160	888	1880
Ethanol	Organic liquid	≤78	790	2400
Propan	Organic liquid	≤97	800	2500
Butan	Organic liquid	≤118	809	2400
Isobutan	Organic liquid	≤100	808	3000
Isopentanol	Organic liquid	≤148	831	2200
Octane	Organic liquid	≤126	704	2400

Kõrge temperatuuriga/ja sagedamini kasutatud materjalide omadused esitan tabelis 5.[2] Töökeskonna temperatuur 200 °C – 1200 °C ja soojusjuhtivuse head näitajad materjalide madala maksumuse kõrval tagavad suured võimalused tööstusharus kasutamiseks. Puuduseks võib lugeda nende väikest soojusmahtuvust vahemikus 0,56 kuni 1,3 kJ/(kg C), mis võib teha salvestamise ühiku ebareaalselt suureks.

Tabel 5 Tahke olekus aktiivne soojuse salvestamise materjalid

Salvestamise materiaal	Töö temperatuur	Tihedus	Soojuse juhtivus	Erikuumus
	C	kg/m ³	W/(m*K)	J/(kg*K)
Liiv-kivi	200-300	1700	1.0	1.3
Raudbetoon	200-400	2200	1.5	0.85
Malm	200-400	7200	37.0	0.56
NaCl	200-500	2160	7.0	0.85
Teras	200-700	7800	40.0	0.60
Shamot telis	200-700	1820	1.5	1.00
Magneesia telis	200-1200	3000	5.0	1.15

Soojuse ilmse salvestamise viisi korral eristatakse kahte salvestamise liiki – otset ja kaudset.

Soojuse otsene salvestamisviis ei nõua suuri mahutusi uurimise ja töötlemisega seotud valdkondadesse konstruktsioonide ja kasutatavate materjalide lihtsuse tõttu, mis ei mõjuta ka ümbritsevat keskkonda. Kõige lihtsamaks otsese salvestamise kontseptsiooniks on kuuma töövedeliku lisamaht soojuse salvestamiseks. See kontseptsioon on majanduslikult tõhus, kui keskkonnal on madal partsiaalrõhk, et vältida hinnalt kallite rõhumahutite kasutamist, kusjuures keskkond ise on odav (näiteks, vesi).

Paljusid vedelikke ei saa salvestada otse, erinevate, nendele materjalidele omaste omaduste tõttu. Selliseid materjale kasutatakse kaudsel salvestamisel, kus energia tuleb edastada soojuskandjale. Põhjused soojuskandja ja HTF (heat transfer fluid) eraldamiseks võivad olla:

- Kasutatavate materjalide kõrge hind.
- Nii soojuskandja kui ka HTF erinevad olekud.
- HTF (nt auru) väike soojusmahtuvus.

Kaudsed salvestamise süsteemid nõuavad soojuse suure kiirusega ülekannet HTF-lt salvestuskeskkonnale. Kaudse salvestamise kõikides kontseptsioonides on töövedeliku maksimaalne temperatuur tühjakslaadimise protsessis madalam, kui laadimisprotsessis temperatuuride vältimatu erinevuse tõttu töövedeliku ja salvestatava materjali vahel.

Peale selle, HTF ja andmekandja võivad omada otsest või kaudset liiki kontakti. Kaudne kontakt võib olla teostatud välise soojusvaheti või integreeritud torusoojusvaheti abil salvestusmahus. Andmete süstematiseerimise eesmärgil salvestussüsteemides esitan soojusenergia salvestamise kontseptsioonide koondtabeli 6.[4]

Tabel 6 Aktiivne soojuse salvestamise kontseptsioon

	Üks akumulatsiooni paak, koos stratificatsiooniga	Kaks akumulatsiooni paakid, koos stratificatsiooniga
HTF otse laadustamine	HTF Ilma faasimuutuseta	Ilma faasimuutuseta
	HTF faasimuutusega	
HTF otse laadustamine koos tahke lisandega	Otse kontakt HTF ja mahuti	Mitte kasutusel sest materiaal pole stratifitseeritakse
Mitte kontaktne ladustamine HTF	Otse kontakt HTF ja mahuti	Otse kontakt HTF ja mahuti
	Mitte kontaktne HTF ja mahuti	Mitte kontaktne HTF ja mahuti

1.4.1 Füüsikalise soojuse salvestamine

Vedelikud on kõige tõhusamad energia salvestamise ja ülekande vahendid. Vedelike hulgas on laia leviku saavutanud termoõli ja vesi. Salvestamisel vedelike kasutamisega rakendatakse ühe või kahe reservuaariga kontseptsioone. Kahe reservuaari rakendamise korral kasutatakse kahte erineva temperatuuri ja vedeliku tasemega mahutit. Ühes soojuse salvestamisereservuaaris on soovitatav termostratifikatsioon, kuna kõrgetemperatuurilise soojuse väärtus salvestatakse mahuti ühes osas, samas kui madalatemperatuuriline vedelik (tagasivooluna soojuse tarbijalt) võib ikka veel olla salvestatud mahuti teises osas. Tahked täitematerjalid võivad summutada vaba konvektsiooni vedelikus ja seega, parendada termokihistumist. Ebavajaliku sisemise soojusjuhtivuse ülemineku tõttu stratifikatsioon aja jooksul laguneb isegi väga hästi isoleeritud anumates. Teiste keskkondade jaoks, peale vee, moodustab vedel salvestuskeskkond sageli suurima osa kogu salvestussüsteemi maksumusest. Niisugustel juhtudel võivad salvestamiseks kasutatavad odavad tahked täitematerjalid asendada kalleid vedelaid salvestusmaterjale (näiteks, malm õlis, termokliin sulatatud soolaga). Tänu vedela ja tahke täitematerjali kontaktile on nende kokkusobivus tagatud.[4]

Tabelis 7 on esitatud vedelike omadused atmosfäärirõhu tingimustes.[4] Peab märkima, et kõrgetemperatuuriline salvestamine nõuab niisuguste vedelike kasutamist, nagu sulatatud leelismetallid. Nende eeliseid, nagu termostabiilsust ja suurt soojusjuhtivust, kasutatakse töös aatomireaktoritega. Suurte kulude tõttu ohutuse tagamiseks nendega töötamisel suure reaktsioonilisuse tõttu õhu või vee vastastikusel toimel, ei ole need leidnud laialdast kasutust, välja arvatud aatomienergeetikas. Sellest tulenevalt ei kujuta need ka praeguse töö jaoks huvi ja edaspidi käsitlemist ei leia.

Tabel 7 Vedeliku omandused

Material	T, C	ρ , [kg/m ³]	c_p , [kJ/(kg·K)]	λ , [W/(m·K)]	$10^6 \times a$, [m ² /s]	$10^{-3} \times b$, [J/(m ² Ks ^{1/2})]
Vesi	20	998	4.183	0.59	0.142	1.58
Silicone oil (AK250)	25	970	1.456	0.168	0.118	0.49
Transformer oil	60	842	2.09	0.122	0.069	0.46
Molten salt (K-NaNO ₃)	230	1950	1.57	0.50	0.16	1.24
Paraffin (liquid)	20	900	2.13	0.26	0.14	0.71
Sodium	100	927	1.385	85.84	66.85	10.50

1.4.2 Madalatemperatuurilised veesüsteemid (alla 100 °C)

Kõige populaarsem ja laialdaselt kasutatav soojuskandja (HTF) on vesi. Esitame siinkohal selle, kui HTF, eelised ja puudused.[8]

Eelised:

- Suured varud, kasutusodavus.
- Suhteliselt suure soojusmahtuvusega ($b = 1,58 \times 10^3 \text{ Jm}^{-2} \text{ K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$).
- Suhteliselt madala temperatuuriline aine difusiooni koeffitsientiga ($a = 0,142 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{c}$); mis on kuumaveepaagis termilise kihistumise eelis.
- Võib salvestada igat liiki konteineris
- Veesüsteemide juhtimine on väga paindlik ja sageli kaasaegne
- Vett võib kasutada ilma soojusvahetiteta
- Lihtne kasutada, ei ole toksiline, ei ole süttiv
- Seguneb kergesti lisanditega (antifriis, korrosioonivastane)

Puudused:

- Piiratud töövahemik alates 0 °C kuni 100 °C
- Tekitab korrosiooni
- Auru kõrge rõhk ($p > 5 \text{ bar}$) temperatuuridel $> 155 \text{ °C}$
- Võttes arvesse vee nii positiivseid kui ka negatiivseid omadusi, toome allpool selle kasutamise näited.
- Aururõhku saab vähendada, kui kasutatakse veeseгу teiste kemikaalidega; näiteks, 50% H₂O ja 50% NaOH segu võib kasutada temperatuuril kuni 140 °C ilma rõhu all oleva mahutita.

Kuuma vee salvestuspaake kasutatakse tööstuses ja elamuehituses. Neid tarnitakse mõõtmetega alates 0,1 m³ (kuuma vee salvestamiseks olmekasutuses) kuni 12000 m³ (tsentraliseeritud soojusvarustuseks päikeseplatade abil). Veel üks näide – „päikeseenergia kombineeritud ladustamise viis“ mahuga umbes 0,5 m³, mis sobib nii kuuma veega varustamiseks kui ka maja kütmiseks.

Tavaliselt kasutatakse vett ka suurtes termaalsalvestistes nii salvestamiskeskonnana kui ka soojuskandjana. Suurtes salvestites (näiteks päikeseenergia hooajalistes salvestites) võib selle mahtu üle anda ainult üks kord või kõige enam – kolm korda aastas. Selline väike energiakäive teeb kogutud soojuse kalliks, kui salvestuskonteiner ise on odav. Terasreservuaaride majanduslik-tehniline piir on, ligikaudu, 100 000 m³. Maapealsete salvestite jaoks on veekindlus tõsine ning probleeme tekitav (näiteks, keevitusjärgne hermeetilisus, kividega läbitorge) katsumus. Selliste ohtude tasandamiseks kasutatakse polümeerist ja roostevabast terasest vahetükke. Niisugused salvestid ehitatakse peamiselt, betoonist ja need on täielikult või osaliselt maapinna sisse kaevatud. Nende võimsus moodustab umbes 80 kWh/m³. Suvel antakse kuuma vett vee ülemistesse kihtidesse, külm vesi aga juhitakse eemale alt, talvel juhitakse kuum vesi eemale ülemistest kihtidest, külma vett antakse aga alt.

Niinimetatud maakütte salvestistes salvestatakse madalatemperatuuriline soojus maapinnas või veerises. Soojuskandjaks on sellisel juhul vee ja tahkete osakeste segu. Niisuguste segude tiheduse ja erisoojuse võib leida kokkusegamise seadustest. Soojusjuhtivus sõltub tugevalt segu koostisest. Kuigi kirjandusest võib leida mitmeid matemaatilisi võrrandeid, mis on kasutamiseks rakendatavad ja õiged, siis andmed λ jaoks sõltuvad otseselt mõõdetest. Soojusvahetus maapinnaga toimub tavaliselt torude kaudu, mis sisaldavad tsirkuleerivat vedelikku-soojuskandjat, peamiselt vett. Need torud võivad olla paigaldatud pealispinna lähedusse. Suurtes salvestites (salvestatava vee maht üle 10000 m³) on soojusvaheti torude jaoks puuritud vertikaalavad. Mõnedes piirkondades leitakse geoloogiline niinimetatud veekande horisont, kuid on tarvis, et veekande horisont oleks pealiskihist eraldatud läbilaskmatu kihiga, näiteks savi või paekiviga. Taoliste soodsate tingimuste puhul võib üksteisest teatud vahemaa järel puurida kaks puurauku, kuuma vett võib aga sisestada suvel ja talvel välja juhtida. Probleemid võivad tekkida mineraalide lahustumise tõttu vees ning settimise tõttu torudele ja soojusvahetitele. Niinimetatud kunstlikud veekande horisondid ehitatakse mõõtmatega alates 10 000 m³, mullaõõnsused täidetakse veerise ja veega ning suletakse plastiklehtedega. Kõikidel juhtudel, kui soojuse salvestamiseks kasutatakse vee ja tahke materjali segu, peab salvestusmaht olema suurem, kui lihtsalt vee salvestamise korral. Tabelis 8 on esitatud mõned ligikaudsed andmed.[4]

Tabel 8 Salvestite maht ja tüüp võreldus veega

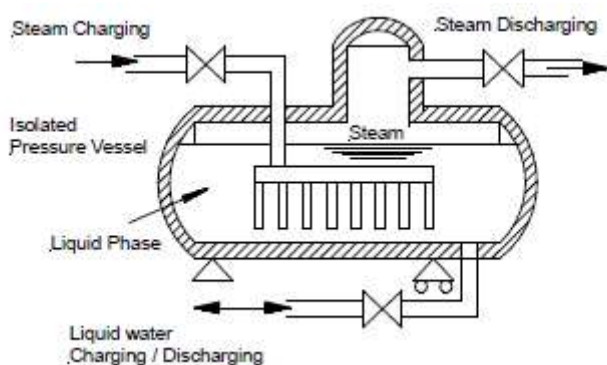
Salvestite materaal	Salvestite maht
Soe vee salvesti	1m ³
Veeris - vesi salvesti	1.3 - 2 m ³
Veehorisont salvesti	2 - 3 m ³
Puurauku salvesti	4 - 5 m ³

1.4.3 Kõrgtemperatuurilised veesegud (> 100 °C), aurukumulaator.

Kõrgtemperatuuriliste veesüsteemide hulka kuuluvad aurukumulaatorid (AA), mida nimetatakse ka Ruth storage süsteemideks. AA kasutamisel rakendatakse ilmse soojuse salvestamise süsteemi vedelas olekus rõhu all. Auru toodetakse küllastunud vedeliku rõhu alandamisel ümberlaadimise ajal. Kuna vett kasutatakse nii salvestuskeskkonnana kui ka töökeskkonnana, siis on võimalikud suured tühjakslaadimise kiirused, kuid piiranguks on töömahuti mahtuvus. Maksimaalne temperatuur on piiratud küllastunud vee kriitilise punktiga (374 °C, 221 bar). Nimetatud süsteemi miinuseks on rõhu all oleva mahuti kõrge hind Joonis 5.[4] Peale selle, salvesti ise piirab majanduslikku tõhusust. Salvesti maht vastab vedelikumahu tajutava energia muutusele tühjakslaadimise protsessi ajal. Kuna vesi asub mahutis küllastunud olekus, on

temperatuuri muutumine vastastikusel sõltuvusel ümberlaadimise protsessis tagatava küllastunud auru rõhu muutumisega. Kuigi rõhu suurem alandamine on eeliseks mahuti mahtuvuse seisukohast, võib rõhu lubatud muutmine olla piiratud tõhususe vaatevinklist. Logaritmilise korrelatsiooni tõttu küllastusrõhu ja küllastustemperatuuri vahel suureneb rõhu absoluutne alanemine suurematel rõhu tasemetel ümberlaadimise protsessi ajal selle sama energia tagamiseks.

Lühikese reaktsiooniaja tõttu võib seda kontseptsiooni kasutada puhversalvestina pilve läbimise kompenseerimiseks või teiste salvestuskäsitluste toetamiseks, mille salvesti maht on suurem ja mis nõuavad pikemat kõivitusprotseduuri.[4]



Joonis 5 Auruakkumulaator

1.4.4 Termoõlisüsteemid

Termiline õli on tavaline ja levinud materjal energia transportimiseks ja salvestamiseks. Eristatakse nii mineraalseid kui ka sünteetilisi õlisid. Mineraalõli võib kasutada keskkonna rõhu puhul temperatuuril kuni umbes 300 °C. Sünteetilised õlid on termostabiilsed kuni temperatuurini 400 °C, kuid kõrgematel temperatuuridel peavad need olema rõhu all, mis on sageli ebaökoonoomne. Termoõlisüsteemide eelised on:

- Täpne häälestus ja temperatuurijuhtimine
- Korrosiooni puudumine
- Suur tõhusus, mis on seotud võimalusega kõrge temperatuuri ülekandeks madalal rõhul.
- Kahjustuste puudumine külmumise korral tootmise seisaku ajal.
- Pikk kasutusiga.
- Suur soojusiners (süsteem salvestab kauem soojust).
- Ehituse madal maksumus kõrge rõhu puudumise tõttu.

Termoõlide rakendamine on piiratud mitme seesmise puudusega, täpsemalt:

- madal lagunemistemperatuur
- väike tihedus
- süttivus

Kuuma õli süsteem, reeglina, kujutab endast suletud kontuuriga kütteseadet, milles soojusallikaks on tavaliselt kuumutusega soojendi või mingi kasutatud soojuse taastamise plokk, s.t tehnoloogilised soojusvahetid.

1.4.5 Sulatatud soolaga salvestussüsteemid

Üle 100 °C temperatuuridega õlisüsteemide kõrval kasutatakse ka veel sulatatud soolaga võiioonvedelikega süsteeme. Ioonvedelikud, mis kujutavad endast madala sulamistemperatuuriga sooli, tekkisid kui uued, soojust akumuleerivad ja soojust vahetavad vedelikud madalate ja keskmiste temperatuuridega rakendustele. Nende olulised omadused hõlmavad erakordselt väikest lenduvust vedelas olekus, süttimatust, suhteliselt laia temperatuurivahemikku ja suurt hulka erinevaid koostisi, mis võimaldavad täpselt häälestada ioonvedeliku omadusi konkreetsete tarbijate jaoks. TES keskkonnana kasutamise puhul on ioonvedelikel piiratud töötemperatuuride vahemik, piiratud töötsükli aeg ja madalad lagunemistemperatuurid, kuigi neil on suurem soojustiheduse salvestamise maht. Kogu materjalivalikust, mida on uuritud erinevate omaduste suhtes, kujutavad sulatatud soolad üsna spetsiifilist rühma, millel on suur potentsiaal soojusenergia salvestajana ja soojuse kandjana. Neil on suur potentsiaal kasutamiseks päikeseenergeetikas.

Sulatatud sooli pakuti soojuskandjaks kõrgetel temperatuuridel vahemikus alates 250 kuni 1000 °C. Madala sulamistemperatuuriga sulatatud soolad (Low melting point - LMP) kujutavad soolterühma, mis jäävad vedelaks laias temperatuurivahemikus. Teised LMP soolade tähtsad omadused hõlmavad head soojus- ja elektrijuhtivust, suurt termilist ja keemilist stabiilsust, väikest venivust ja ökoloogilisust. Vedeliku vahemik eraldi sulatatud soola jaoks võib moodustada 150 kuni 600 °C.

Praegu kujutavad vedel soolsoojuskandja ja soojust akumuleeriv keskkond segu, mille koostises on 60% NaNO₃ ja 40% KNO₃ [13]. Vedeliku temperatuur jääb vahemikku 220-600 °C. Sellise soolasegu peamiseks puuduseks on kõrge sulamistemperatuur. Peale selle esinevad riskid, mis on seotud nn soolade külmumisega torustikus madalatel temperatuuridel. Selle omaduse ületamiseks tuleb rakendada temperatuuri toetavaid abiseadmeid, mis omakorda suurendavad investeeingu- ja ekspluatatsioonikuluseid.[9]

1.4.6 Soojuse salvestamine tahketes materjalides

TES tehnoloogiates on hästi tuntud ja rakendatavad tahked materjalid, mida kasutatakse üsna laias temperatuurivahemikus. Tahked salvestusmaterjalid on reeglina keemiliselt inertsed. Paljudel neist esinevad oksiidikihid või oksiidpealiskihid. Klassifitseeritakse need metallideks ja mittemetallideks, samuti võib need jagada kunstlikeks ja looduslikeks materjalideks. Toome võrdluseks tabeli 9.[4]

Tabel 9 Tahke materjalide amadused aktiiv soojuses

Material	T, C	ρ , [kg/m ³]	c_p , [kJ/(kg·K)]	λ , [W/(m·K)]	$106 \times a$, [m ² /s]	$10^{-3} \times b$, [J/(m ² Ks ^{1/2})]
Alumiinium	20	2700	0.95	238.4	93.3	25
Vask	20	8300	0.41	372	107	36
Teras	20	7850	0.46	59.3	16.3	15
Plii	20	11340	0.13	35.25	23.6	7
Telis	20	1800	0.84	0.50	0.33	0.87
Betoon	20	2200	0.72	1.45	0.94	1.52
Graniit	20	2750	0.89	2.9	1.18	2.67
Grafiit	20	2200	0.61	155	120	14.41
Paekivi	20	2500	0.74	2.2	1.19	2.02
Liivakivi	20	2200	0.71	1.8	1.15	1.68
Räbu	20	2700	0.84	0.57	0.25	1.13
Soodium cloriid	20	2165	0.86	6.5	3.5	3.5
Mulla savi	20	1450	0.88	1.28	1.0	1.28
Muld kruusa	20	2040	1.84	0.59	0.16	1.49

Looduslikke materjale esineb meie planeedil üsna rohkesti erinevate kivide vormis, veeristena jne ning need on hinnalt odavad. Neid võib kasutada energia salvestamiseks madalal temperatuuril nii maapealsetes kui ka maa-alustes salvestites. Selliseid materjale, nagu mehaanilise püsivusega basalt, graniit ja kvartsiit, võib kasutada salvestamiseks ka kõrgel temperatuuril.

Kunstlikud materjalid, nagu keraamika või betoonkonstruktsioonid on samuti oma tarbija leidnud, kusjuures neid kasutatakse nii madalatel kui ka kõrgetel temperatuuridel. Näiteks kasutatakse erinevat liiki telliseid nii kõrgetel temperatuuridel – šamott-tellised, kui ka madalatel temperatuuridel – elamutes barjäärina välis- ja sisemikrokliima vahel.

Grafiit on veel üks potentsiaalne tahke keskkond soojuse mõistlikuks salvestamiseks. Grafiidil on suur temperatuurijuhtivus ja see võib kuumeneda kuni väga kõrgete temperatuurideni, kuid temperatuuril umbes üle 400 °C on oksüdeerumise ennetamiseks vaja inertset atmosfääri.

Energeetikas on oma suure soojusjuhtivuse tõttu rakendust leidnud ka metallid. Nende sellist omadust kasutatakse salvestussüsteemide laadimise- tühjaks laadimise protsessis. Metalle, nagu vask ja alumiinium, millel on üks parimatest soojusjuhtivuse näitajatest, kasutatakse elektroonikas soojuse taandamiseks ja juhtimiseks. Sellist

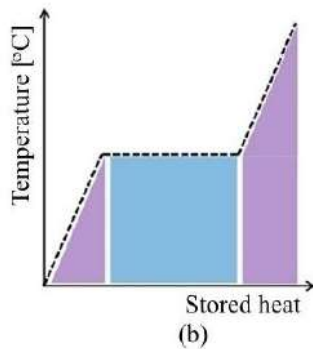
metalli, nagu malm, rakendatakse koos õlidega kõrgtemperatuurilisel salvestamisel. Kõige suurem metallide puudus on nende kõrge hind.

Tahked soojuskandjad salvestavad reeglina hästi soojust allasurutud sisemise (loomuliku) konveksiooni tõttu, järelkult on madal ka sisemine soojusjuhtivus. Tahkete sojussalvestajatega süsteemides kasutatakse tavaliselt energia üleminekuks laadimisel-tühjakslaadimisel vedelikku, nagu nt vesi, õlid, sulatatud sool, aga ka auru ja õhku. Nimetatud ained töötavad nii otseses kontaktis, s.t kandja voolab vahetult (otsene kontakt) kui ka vahendatult läbi soojusvahetite (kaudne). Soojuse tõhusaks ülekandes vee või õhu abil on tarvis voolu suurt ristlõiget. Juhul, kui soojuskandja on mitmekihiline, või kasutatakse kiviveerise tüüpi materjali, siis suureneb rõhu langus, mille peavad hüvitama kompressorid või ventilaatorid. Peab märkima, et kirjeldatud süsteemides on kohustuslikuks tingimuseks ka soojuskandja suur energiamahutus. Otsese kontakti kasutamisel soojuse ülekandmisel tuleb arvesse võtta soojuskandja mehaanilisi omadusi, nagu mehaaniline vastupidavus hõõrdkulumisele, hügroskoopsus ja temperatuurijuhtivus.

Selliste omaduste tõttu, nagu termiline stratifikatsioon (kihistumine), suur kandja maht ja kandja enda pragunemisoht kõrgetel temperatuuridel, ei ole nimetatud salvesti liik leidnud laia rakendust majanduses. Töö kirjutamise ajal õnnestus autoril leida mitu ehitatud prototüüpide kirjeldust. Ent kirjeldatud eksperimentide autorid märkisid kasutuse perspektiivikust tingimusest, et leitakse soojuskandja sobiv geomeetria ja soojusjuhtivuse suurenemine materjali sisemuses. Käesolevas töös seda tüüpi soojuskandjat, kui peamist, ei käsitleta.

1.5 Faasimuutusega soojusenergia salvestamine

Varjatud soojuse salvestamise materjale (LHS) nimetatakse ka faasimuutusega (PCM) materjalideks, kuna need muudavad oma füüsilist faasi tahkelt vedelaks ja, vastupidi. Energia salvestamise tihedus suureneb ja järelkult, LHS puhul maht väheneb (joonis 6)[4]. Soojus salvestatakse peamiselt faasi muutuse protsessis (üsna püsival temperatuuril) ja see on otseselt seotud aine varjatud soojusega. Faasimuutus on alati seotud soojuse neeldumisega tahke aine sulamisel – sulamissoojusega ja soojuse eraldumisega vedeliku tahkestumisel.



Joonis 6 PCM töö

LHS kasutamiseks salvestamise käsitluse peamiseks eeliseks on võimalus salvestada energiat kitsas temperatuurivahemikus, mis on lähedane faasi ülekande temperatuurile. Ühest kristallilisest vormist teise üleminekut ilma aine füüsiliste omaduste muutuseta käsitletakse samuti, kui ühte LHS vormi. Selliste üleminekute korral on eralduv soojus väiksem kui soojus, mis saadakse, näiteks vedeliku tahkestumisel. Üleminekul vedelast olekust gaasilisse tavaliselt ei rakendata varjatud salvestamiseks faase gaasilise faasi suure mahu tõttu. Üleminekut tahkest olekust vedelasse kasutatakse laialdaselt, kusjuures mahu muutus moodustab taolistel üleminekutel mitte üle 10%. (võrrand 4).[10] Soojus või entalpia ($p = \text{const.}$), mis salvestatakse faasi muutusel, võrdub latent a Δh_m varjatud soojus.

$$q_{\text{lat}} = \Delta h m. \quad (4)$$

Soojusandja energeetilist mahtu - Q_s saab LHS süsteemi kasutamisel (PCM) materjalides määrata valemi järgi:

$$Q_s = m_s [c (t_f - t_{\min}) + h_f + c_p (t_{\max} - t_f)] \quad (5)$$

kus m_s - aine mass, kg, c ja c_p - ; c_p - tahke ja vedela faasi keskmine erisoojus t_f ja t_{\min} vahel, $\text{kJ} / (\text{kg K})$, t_f sulamispunkt kraadides $^{\circ}\text{C}$, t_{\max} ja t_{\min} materjali maksimaalne ja minimaalne temperatuur üleminekuprotsessis, h_f - materjali sulamisentalpia.[10]

Erinevate faasimuutusega materjalide umbkaudse sulamissoojuse hinnangu võib saada allpool esitatud valemist. Paljude pooljuhtide, eutektiliste ja anorgaaniliste ühendite molaarne sulamissoojus Δh_m , mol asub vahemikus, mis on esitatud võrrandis 6, kus sulamistemperatuur T_m on antud Kelvinites, R on aga molaarne gaasikonstant.[10]

$$2.5RT_m < \Delta h_{m,\text{mol}} < 5RT_m \quad (6)$$

See võrrand näitab, et sulamissoojus suureneb faasimuutuse temperatuuri tõusuga ja väikese molaarmassiga ühendid on soodsad sulamissoojuse kõrgete väärtuste seisukohast vastavas ühikus, J/g. Kui materjali kuumutatakse algtemperatuurist T_1

kuni sulamistemperatuurini T_m ja sulatist kuumutatakse täiendavalt T_2 -ni, siis üldist salvestatud soojust määratakse võrranditega 7 ja 8.[4]

$$Q_{total} = Q_{sensible,solid} + Q_{latent} + Q_{sensible,liquid} = q_{total} \cdot m$$

$$Q_{total} = m \cdot c_{p,solid} (T_m - T_1) + m \cdot \Delta h_m + m \cdot c_{p,liquid} (T_2 - T_m) \quad (7) \quad (8)$$

kus c_p – erisoojus tahkes ja vedelas faasis.

Sulamistemperatuur (või heat of melting) on palju kõrgem, kui ilmne soojus käsitletavas peatükis materjalidel (Sensible heat). Järelikult, faasimuutusega materjalidel on suurem energia salvestamise ruumiline maht kui materjalidel, mida kasutatakse ilmse soojusega süsteemides, on õige käsitlemise korral väikestes temperatuurivahemikes.

LHS põhiprobleemid

- Väike soojusjuhtivus: soojuse juhtimisel PCM-ist moodustub kiiresti soojusvaheti seinale PCM tahke kiht. Tahkel PCM-l on tavaliselt madal soojusülekanne koefitsient ja järelikult, soojuse ülekanne süsteemist pärast sellise tahke kihi moodustumist, suhteliselt palju aeglasem.
- Termostabiilsus: mõned segud ja PCM euteetik ei näita ideaalset käitumist segunemisel, mis toob kaasa mittekongruentse sulamise ja soojusfüüsikaliste omaduste muutuse järgnevate soojusüklite ajal.[11]

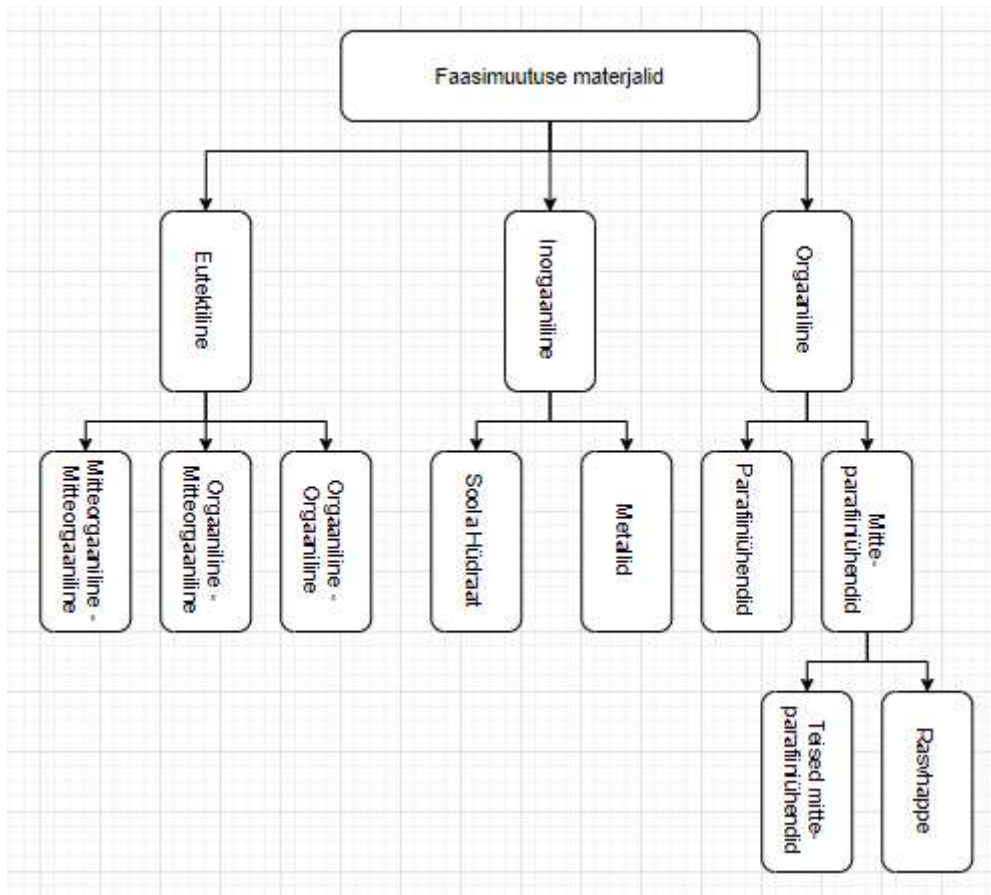
1.5.1 Materjalid

Peale p 1.5 loetletud üldiste näitajate, mis on omased varjatud soojuse salvestamises kasutatavatele materjalidele, esitan veel mõned, s.t nendele materjalidele rakendatavad nõuded.

- Sobiv temperatuur faasi muutmisel
- Suur entalpia faasilisel üleminekul
- Sobiv temperatuuristabiilsus auru madalal rõhul ja kõrgel töötemperatuuril
- Mahu väike muutus
- Väike või täielik ülekülmumise võimaluse puudumine külmumisel, samuti väike või täielik küllastumise puudumine sulamise ajal
- Suur soojusmahtuvus ilmse soojuse kasutamisel
- Ei ole toksiline, on tuleohutu
- Madal hind ja kerge ligipääsetavus

Nagu oli esitatud Skeemil 3, LHS-is kasutatavad materjalid jagunevad füüsilise oleku järgi gaasideks, vedelateks ja tahketeks. Edasi võib materjale rühmitada orgaanilisteks,

anorgaanilisteks ja eutektilisteks (kergestisulavateks). Millistesse rühmadesse missugused ained kuuluvad on skemaatiliselt esitatud allpool toodud Joonisel 7. [5]



Joonis 7 Faasimuutuse materjalide klassifikatsioon

Tulenevalt nimetamissagedusest on kõige laialdasemad TES salvestites kasutatavad orgaanilised materjalid parafiinid ja rasvhapped, anorgaanilised materjalid aga – soolahüdraadid.

Hetkel on meil olemas suur hulk süstematiseeritud PCM materjale. Teades nende töötemperatuuri, soojusvahetuse pinda ja salvesti mahtu, saab valida sobiva rakendusala. Mõned materjalid koos neile omaste omadustega ja rakendusvariantidega esitan allpool tabelis 10.[12]

Tabel 10 Materiaalide omadused ja kasutusala

Material	Sulamispunkt	Sulami soojus	Eri-soojus	Soojus-juhtivus	Kasutamine
	C	KJ.kg	K. KJ-kg	Wm.K	
Vesi	0	333	2	1.6-2.2	
CaCL ₂ * 6H ₂ O	26-29	190	1.088	-	Kasvuhoones
Acetamid	82	263	1.94	0.5	Päikese paneelid
N-octadecane	27	243	1.943	0.148-0.358	Ehituses
Sodium acetat trügidraat	56	199	3.18	0.41-0.65	Termosalvestuses

N-eicosan	36.7	247	2.46	0.1505	Ehituses, telefonide jahutuses
Steariline hape 80-20%	61-65	190.9	-	-	Päikese TES
Climsel C28 Soola hüdraat	28	126	-	0.5-0.7	Kiivri jahutus
0.9 H ₃ CONH ₂ +0.1Ca(NO ₃) 2.4 H ₂ O	27.июл	141	2.51	-	Kasvuhoones

PCM süsteemide projekteerimine algab temperatuurivahemiku valimisest. Materjal peab omaduste poolest vastama töötemperatuuridele. Temperatuuride puhul alla 120 °C võib kasutada orgaanilisi PCM materjale. Temperatuuride puhul aga üle 120 °C valitakse orgaanilised materjalid hoolikalt, kusjuures sellised omadused, nagu termostabiilsus, vastastikune toime hapnikuga ja aururõhud, võivad olla kriitilised näitajad, mis piiravad nende kasutusvõimalusi. Selliseid puudusi võib parandada, kasutades näiteks, suletud salvestussüsteeme, kuid see omakorda tõstab energiasalvestuse kulu.

1.5.2 Orgaanilised PCM materjalid

Orgaanilistel PCM-del, jaotatuna kahte rühma, on sellised omadused, nagu võime tahkestuda ja sulada ilma faase lahutamata, materjalid kristalliseeruvad ilma ülejahtumiseta ning on mitteagressiivsed ained – ei korrodeeru.[4]

Parafiinid

Toatemperatuuril parafiinid on vahataolised tahked ained. Nende sulamispunktid ja sulamissoojus suurenevad molaarmassiga, keskmiselt on see vahemik 5 kuni 80 °C.

Parafiinidel on järgmised eelised:

- Odavad ja kättesaadavad
- Nagu mainitud eespool, ei ole toksilised ja ei tekita korrosiooni
- Madal tihedus ja keemiline stabiilsus
- Kiire faasimuutus
- Kristalliseeruvad ilma ülejahtumiseta

Samuti on neil mitmeid puudusi:

- Suhteliselt madal energeetiline tihedus
- Madal soojusjuhtivus
- Hajuv sulamispunkt
- Suhteliselt suur mahu muutus
- Kergesti süttivad
- Ei ühildu polümeeridega

Mitteparafiiniga ühendused

Eristatakse suurt hulka tugevalt erinevate omadustega orgaanilisi ühendeid, nagu liiteetrid, rasvhapped, piiritused jms. Peamised omadused, mis piiravad nende kasutamist, on kõrge sulamistemperatuur, madal soojusjuhtivus, ebastabiilsus kõrgetel

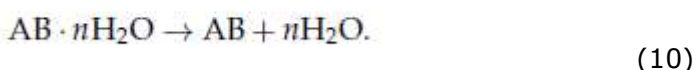
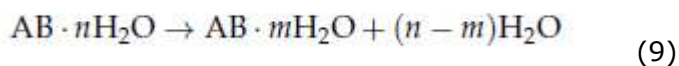
temperatuuridel. Kõrge süttivus ja madal plahvatustemperatuur teevad nende kasutamise ohtlikuks.[4]

1.5.3 Anorgaanilised PCM-d

Anorgaanilisi PCM kasutatakse eelistatuna temperatuuridel alates 120 °C. Nende kasutamine on keeruline, kuna kõrgel temperatuuril ebastabiilne, madalal temperatuuril aga hanguvad. Eristatakse kaht peamist materjalide rühma – soolahüdraadid ja metallid.

Soolahüdraadid (Salt hydrates)

Hüdraatide faasi muutuseks loetakse tahke aine muundumist vedelikuks. Tahke hüdraadi kristallid eristavad teatud temperatuuril (või temperatuuriintervallil) kristalliseeritud vett ja veetu sool lahustub selles vees. Selline protsess muutub täielikult vastupidiseks, kui soojus on ära võetud. Paljud soolahüdraadid on üsna odavad; need on ainult kergelt sööbivad ja kergelt toksilised. Need näitavad ainult väikesi muutusi mahus faasimuutuse ajal ja neil on suhteliselt kõrge sulamistemperatuur (võrreldes orgaaniliste ühenditega) madalal sulamistemperatuuril. Need kujutavad anorgaaniliste soolade (AB) sulameid ja n mooli vett, moodustades tüüpilise kristallilise tahke aine üldvalemiga $AB \cdot nH_2O$, mille üleminek, tahke aine – vedelik, kujutab endast faktiliselt soola dehüdratsiooni ja hüdratsiooni. Soola hüdraat sulab tavaliselt soola hüdraadiks vee väiksema moolide arvuga, valem 9 või selle veetus vormis, valem 10[2]



Sulamispunktis kristalli hüdraadid lagunevad veetuks soolaks ja veeks või kõige madalamaks hüdraadiks ja veeks. Enamike hüdraatide üheks probleemiks on mittekongruentse sulamise (vedeliku koostis ei ühti tahke faasi koostisega) probleem, mis on põhjustatud faktist, et kristalliseerivat vett ei ole piisavas koguses olemasoleva tahke faasi lahustamiseks. Tiheduse erinevuse tõttu madalam hüdraat (või veetu sool) settib konteineri põhja. Soolahüdraate on laialdaselt uuritud soojuse akumulatsioonisüsteemides nende positiivsete näitajate tõttu: kõrge varjatud sulamissoojus mahuühiku kohta, suhteliselt suur soojusjuhtivus (peaaegu kaks korda suurem, kui parafiinil), madal korrosiooniaktiivsus ja ühilduvus plastmassidega. Puudused hõlmavad järgmist: mittekongruentne sulamine ja ülejahtumine, mida võib lahendada erineval viisil (paksendajate lisamisega, mehaanilise segamisega, PCM kapseldamise teel jagunemise vähendamiseks jne). Teised probleemid hõlmavad soolahüdraatide spontaansust ja veemoolide väiksemat arvu tühjakslaadimise protsessi ajal. Kemikaalide lisamine võib ennetada madalamate soolahüdraatide teket, mis

eelistatavalt tõstab madalamate soolahüdraatide lahustuvust võrreldes algsete soolahüdraatidega suure arvu vee moolidega.[2]

Metallid

Siaa rühma kuuluvad madala sulamistemperatuuriga metallid, samuti nende sulamid. Põhiliselt kasutatakse selliseid materjale suure võimsusega elektrijaamades. Enamlevinud metallide loendi esitan tabelis 11.[2][4]

Tabel 11 Sulamispunkt ja passivsoojuse sulamine

Materiaal	Sulamispunkt	Passiv soojus KJ/kg
Gallium-gallium antimony eutectic	29.8	-
Gallium	30.0	80.3
Cerro-low eutectic	58.0	90.9
Bi-Cd-In eutectic	61.0	25.0
Cerro-bed eutectic	70.0	32.6
Bi-Pb-In eutectic	70.0	29.0
Bi-In eutectic	72.0	25.0
Bi-Pb eutectic	125.0	-

Toome mõned huvitavad materjalide eripärad:

- Madal sulamissoojus massiühiku kohta
- Kõrge sulamissoojus mahuühiku kohta
- Suur soojusjuhtivus
- Madal erisoojus
- Auru suhteliselt madal rõhk

Töö keerukuse ja metallidega agregaatide teenindamise tõttu neid praktiliselt ei kasutata akumulatsioonisüsteemides.[2]

1.5.4 Eutektilised materjalid

Eutektilisteks koostismaterjalideks nimetatakse eutektilisi sulameid või eutektilisele koostisele lähedasi sulameid, milles tugevdava faasina esinevad suunitlusega kristallid, mis moodustuvad suunatud kristalliseerumise protsessis. Soojuse akumulatsiooniks valitakse sarnaste sulamis- ja külmumispunktidega materjalid. EKM kuuluvad termodünaamiliste tasakaalusüsteemide klassi, seetõttu materjalid ei kihistu sulamisel või külmumisel ja neil on suur soojusjuhtivus. EKM perspektiivi nähti selles, et moodustades protsendilise koostise, võib valida töötemperatuuri.[2]

Näiteks, jää kasutamisega jahutussüsteem nõuab madalatemperatuurilist jahutajat. Seetõttu asendatakse vesijahutid glükooljahutite vastu, mis omakorda tarbivad rohkem energiat. Kui me aga kasutame eutektilist lahust faasiülemineku üle 0 °C, siis tõstame järsult kogu süsteemi tõhusust, kasutades looduslikku jahutit, ilma kallid glükoolidega süsteemi rakendamiseta.

Eutektilised materjalid rühmitatakse kahte kategooriasse: „orgaanilised ühendid“ ja „soolaproduktid“. Põhinõuded eutektilistele lahustele on: 1. Stabiilne lahus (ilma jagunemiseta või lagunemiseta) 2. Minimaalne ülejahtumine /soojenemine ja 3. Lähedus külmumis- ja sulamistemperatuurile.[13]

1.6. Termokeemiline energia salvestamine

Kuuma vee salvestitel on mitmeid puudusi, mida ei esine või on viidud miinimumini energia salvestamise termokeemilistes süsteemides. Kui veemahutil on salvestamise aja jooksul kaod ümbritsevasse keskkonda üpris suured, siis faasimuutusega materjalidega termokeemilistel salvestussüsteemidel need praktiliselt puuduvad.

Peale mitteoluliste kadude on nimetatud tehnoloogial sellised omadused, nagu suur energia salvestamise tihedus, 10 – 15 korda, kompaktsus ja salvestuse pikaajalisus. Peale selle ei ole vajalik teostada eraldi komponentide isolatsiooni, ent keemilised elemendid tuleb hoida lahus.

Selline viis on alternatiivne lahendus soojuse hooajaliseks salvestamiseks. [14]

Termokeemilistes soojuse salvestites salvestatakse soojus keemilistes või füüsilistes seostes, salvesti laadimise/tühjakslaadimise protsess aga on endotermiline / eksotermiline reaktsioon. [15]



Võrrandis 11 kujutavad A ja B materjale, sageli tahkeid või vedelaid, samuti gaasi, mis reageerib produktile AB ning eristab soojust ('HR).

Sorptsiooni soojuse salvestamist üldistatakse tavaliselt samuti termokeemilise energia salvestamise terminiga, vaatamata isegi sellele, et laadimis-/tühjakslaadimise protsess ei ole mitte reaktsioon, vaid desorptsiooni ja adsorptsiooni protsess.

Soojuse keemilise salvestamise tsükli võib jagada soojuse salvestamise protsessiks ja soojuse eraldamise protsessiks, milliseid võib korrata keemilise pöördreaktsiooniga. Igas operatsioonis reaktsiooniline gaas teisaldub reaktor-aurusti ja reaktor-kondensaatori vahel rõhkude erinevuse, kui liikuva jõu, mõjul.[4]

Erinevate temperatuurivahemike jaoks uuriti paljusid keemilisi soojust akumulereivaid materjale. Erinevate, tüüpiliste reaktsioonipaaride soojuse salvestamise temperatuur ja soojuse salvestamise tihedus, on kokku võetud tabelis 12.[8] [6]

Tabel 12 salvestatud energijate tihedus

Töö paarid	Laadimis temperatuur	Passiv soojus KJ/kg
MgSO ₄ /H ₂ O	150	2458
Na ₂ S/H ₂ O	83	3841
SrBr ₂ /H ₂ O	80	900
MgCl ₂ /H ₂ O	130	1717
Li ₂ SO ₄ /H ₂ O	103	457
LiOH/H ₂ O	64	1440
NH ₄ Cl/NH ₃	48	1652
NaBr/NH ₃	51	1804
BaCl ₂ /NH ₃	56	1469
SrCl ₂ /NH ₃	96	1832
CaCl ₂ /NH ₃	99	22443
MnCl ₂ /NH ₃	152	1508
FeCl ₂ /NH ₃	186	1620
NiCl ₂ /NH ₃	259	1829

2 SOOJUSENERGIA SALVESTAMISE RAKENDAMINE SOOJUSVÕRKUDES

Eelnevates peatükkides on käsitletud soojusenergia salvestamise süsteemiga seotud uuringu sisu. Ülevaade on andnud võimaluse järeldada, et küttesüsteemides sobivad kõige enam kasutamiseks madalatemperatuurilised veesüsteemid. Nimetatud valik põhineb sellel, et ülejäänud kirjeldatud süsteemid, nagu: kõrgtemperatuurilised ja faasimuutusega süsteemide eksploatatsioon on keerulisem, järelikult ka kallim. Õilil või soolal põhinevad soojuskandjad ei ole eriti levinud soojuse tootmise protsessis Eestis ja selle tõttu on need kallimad võrreldes veesüsteemidega. Autor veendunud, et TES arenemisega tekib soojatootjatel huvi soola- ja õlisüsteemide, samuti eutektiliste materjalide vastu, sest need võimaldavad kasutada suuremat temperatuuridevahemikku ning ei nõua, võrreldes MVS-iga, eriti suuri kapitalimahutusi. Praegu teevad vee vaieldamatud eelised, nagu, lai levik, odavus, kasutuslihtsus, mittesüttivus ja mittetoksilisus sellest populaarse ja alternatiivitu soojuskandja. Peale selle, vee füüsikalised omadused võimaldavad seda kasutada nii energia kandjana kui ka energia salvestajana.

Valides töömaterjaliks vee, peetakse silmas, et salvestamine toimub salvestusmahutitesse, mis võivad olla metallist, plastikust või betoonist. Otstarbekas on paigutada mahutid nii katlamajade territooriumidele kui ka nende vahetust lähedusest eemale. Olenevalt vaba ruumi olemasolust, võib mahuteid paigaldada nii maa peale kui ka maa alla. Soojuskad on väiksemad soojustatud maa-aluse mahuti puhul. Soojuse salvestamine veekande horisondis või järvedes nõuab konkreetse paiga süvauuringuid, mis praeguses töös käsitlemist ei leia.

Käsitletud on aga soojusenergia salvestamise erinevad tehnoloogiad ja süsteeme. Samuti valiti välja ja kirjeldati salvesti liiki, mida vaadeldakse töös edaspidi. Samas loetakse vajalikuks kirjeldada soojusvõrke ja nende võimalusi töötamiseks salvestussüsteemidega.

2.1 Soojusvõrgud

Üldmõiste „soojusvõrgud“ hõlmab torustikusüsteemi ja seal paiknevaid seadmeid, mille kaudu toimub soojuse ülekanne energiaallikalt tarbijatele ning järgnev soojuskandja tagasipöördumine allika juurde.

Olenevalt soojusallikast eristatakse tsentraliseeritud ja detsentraliseeritud võrke. Tsentraliseeritud on võrgud soojusallikaga, milleks on katlamaja, soojuselektrijaamad,

aatomi- ja muud jaamad, mis varustavad suurt hulka tarbijaid. Detsentraliseeritud, vastupidi, on kohalikud ja individuaaljaamad, mis varustavad soojaga korterit või maja. Torustiku paigaldamise viisi järgi eristatakse maa-aluseid ja maapealseid torustikke. Torude liigi järgi kasutatakse nii eelisoleeritud kui ka isolatsiooniga torustike, mille paigaldus toimub pärast soojustorustiku montaaži.

Soojusvõrgud kuuluvad tavaliselt munitsipaaliteedi või jaotusorganisatsioonide omandisse.

2016. aastal moodustas soojustarbimine Eestis 12,5 TWh või 43% kogu energiatarbimisest, millest majapidamised tarbisid 57%, kusjuures sellest 50% moodustas tsentraalne soojusvarustus. Ülejäänud elanikud kasutasid kohalikke soojustusseadmeid.

Küte moodustab 3,5% majapidamiste keskmisest kulust. Näiteks, energiatarbimisele kulub 4,5% sissetulekutest, telekommunikatsiooniteenustele aga üle 5%. [16]

Eestis on kokku 239 soojusvõrku, kusjuures omavalitsustele kuulub neist 149, hõlmates umbes 1400 km soojustrassi.[17]

Suhteid sooja tootmise, jaotuse ja müügi valdkonnas reguleerib Eestis kaugkütte seadus. Seaduses on esitatud soojusvarustusega seotud määratlused, samuti seaduse rakendamise piirid. Nimetatud seaduse eesmärk on tagada tõhus, tõrgeteta soojusvarustus, mis vastab keskkonna ja tarbijate nõudmistele. Kuna soojusvarustus on monopoolne ala, reguleerib seadus ka hinnakujunduse korda ja maksimaalsete hindade kooskõlastamise korda.

Kooskõlastatud hinnad avaldatakse Konkurentsiameti kodulehel, peale selle avaldavad soojusvarustusega tegelev organisatsioon ja omanik hinnad veel ka oma saitidel internetis.

Statistikaameti andmetel soojatootmine pidevalt väheneb, mis on muuhulgas seotud soojatarbimise vähenemisega kodumajapidamistes. Tarbimise prognoositav langus on 1,5% aastas. [17][18]

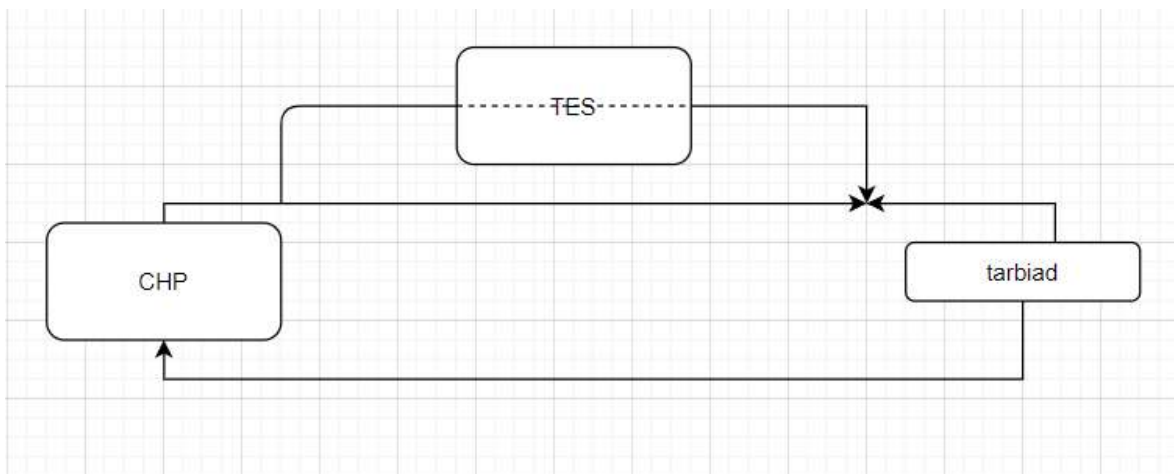
Esmaste energiaallikate struktuur on soojatootmises praegu selline: biomass 44,4%, gaas 33,2%, põlevkivigaas 7,3%, põlevkiviõli 2,8%, põlevkivi 11,4%, muud allikad 0,9%. [18]

Vaatamata sellele, et Eestis kasutatakse torustike rajamisel kaasaegseid eelisoleeritud torusid soojusjuhtivusteguriga $\lambda \approx 0,025 \text{ W/mK}$, on peamised probleemid soojuse edastamisel soojusenergia ülekandega seotud kaod. Kuigi keskmised kaod on suhteliselt väikesed ja moodustavad ligikaudu 15-30%, siis mõnedes lõikudes võivad kaod moodustada suveperioodil 50% (Trassikadu Türi Tehnika tn).

2.2 TES rakendamine soojus- ja elektrienergia koostootmisega (CHP)

TES-I kasutatakse koos CHP-ga sel ajal, kui puudub koormus või siis, kui energiatootmine ületab koormust.

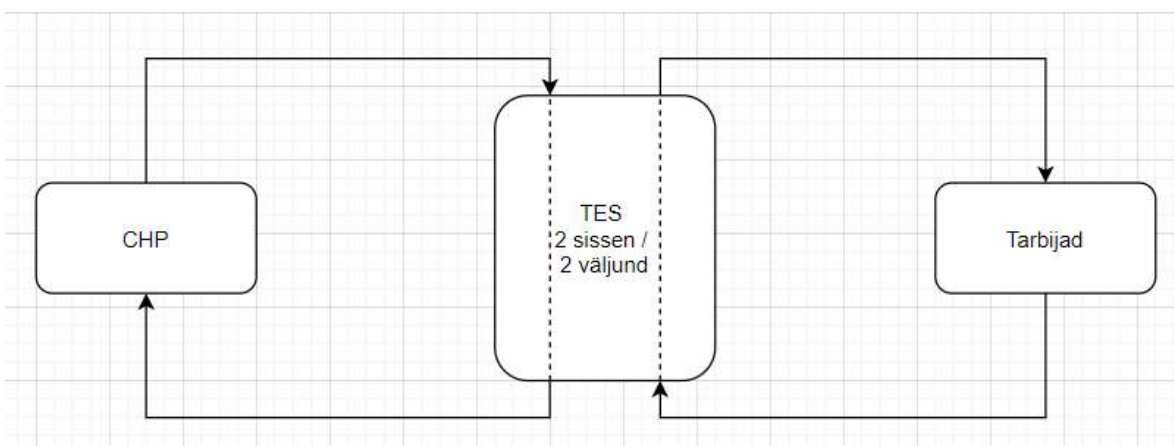
Eristatakse kaht liiki ühendust: 1. Üks sisend, üks väljund, joonis 8. Kaks sisendit, kaks väljundit, joonis 9. Esimese variandi puhul suureneb salvestuse maht soojuskandja hulga arvelt. Nimetatud viisi ei saa kasutada koostootmise (kogeneratsiooni) ajal ja ühtivate koormuste ajal.



Joonis 8 üks sissend üks väljund süsteem

Süsteemi tõhusus sõltub võimalusest koostootmine energia salvestamise kasuks välja lülitada.

Teises variandis on energia laadimise ja tühjakslaadimise süsteemidel kaks erinevat kontuuri ning aine TES-i sees on nii energiakandja kui ka selle salvestaja



Joonis 9 kaks sisendi ja kaks väljundi süsteem

Teise süsteemi eeliseks on TES-i võime töötada koostootmisjaama enda mis tahes koormuste ajal ja see sõltub ainult energia hulgast mahutis sees. Tõhusus tõuseb

termilise kihistumise arvelt, mida põhjustab erinev tihedus külma ja kuuma kandja vahel.

Esimese või teise variandi valik sõltub kasutusstrateegiast ja soojusallikast. [19]

2.3 TES-i kasutamine töös katlamajadega

TES-i kasutamiseks töös katlamajadega on esmalt vaja kindlaks määrata, milliseid eeliseid peetakse silmas, mida tehnoloogia võib tootjatele anda. Täpsemalt:

- Koormustippude vähendamine
- Tootmissüsteemi üldtõhususe suurendamine
- Kontrolli suurendamine süsteemide üle
- Tõrgeteta varustamise tagamine
- CO₂ heidete vähendamine

Kõiki nimetatud nõudmisi salvestussüsteemid täidavad. Töös on kirjeldatud süsteemi kvantitatiivne- ja kvaliteedijuhtimine koostootmise ajal. Samuti võimaldab eelnevalt loodud energiavaru nii tippkoormusi vähendada kui ka tagada tarbijate tõrgeteta varustamine. Sarnaseid süsteeme käsitletakse ja kirjeldatakse, näiteks töös „BIOMASSIL TÖÖTAVA KOOSTOOTMISJAAMA SOOJUSE AKUMULATSIOONIPAAKIDE PAIGALDAMISE EFEKTIIVSUSE HINDAMINE“ [20], milles Maksim Adrijaškin esitab andmed laialtlevinud akumulatsioonipaakide kohta koos nende kasuteguriga ja orienteeruva maksumusega.

Viimastel aastatel on Eestis aset leidnud paljude vanade, ressursid ammendanud katlamajade, ümberehitamine. Euroopa Liidu Ühtekuuluvusfond on katlamajade uuendamise seotud projektide kaasrahastamise allikas.

Ümberehituse eesmärgiks on katlamajade ülemineku tagamine kohalikule taastuvkütusele, aga ka tõhususe ja keskkonnasõbralikkuse tõstmisele. Käesoleva töö autorile teadaolevalt ei ole praegu Eestis ehitatud ühtki TES süsteemi. Töö eesmärgiks on selgitada konkreetsete näidete põhjal kapitalimahutuste otstarbekust.

2.4 TES kasutamine alternatiiselt soojuse allikutega

Alternatiivsed energiaallikad, nagu maaküte, tuuleenergia ja päikesepatareid on hoogsalt sisenenud nii Eestisse kui leidnud kasutust üle kogu maailma. Nendest mitmete puhul juba kasutatakse TES süsteeme või tehakse arvestusi nende kasutuse otstarbekuse väljaselgitamiseks.

Nii alternatiivsete kui ka teiste energiaallikate puhul esineb TES sisseehitamiseks energiavarustuse ja energia genereerimise süsteemi kaks põhjust:

- Energiatootmise kõrgpunktide leevendamine tarbimise tasakaalustamiseks tootmise ajas nihutamise teel.
- Tootlikkuse tõstmine

Rakendatava aja järgi kui ka laialt levinud energiaallikate kasutamise puhul eristatakse lühiajalist ja pikaajalist salvestusperioodi.

Alternatiivsete energiaallikatega süsteemidel esinevad ainult neile omased puudused:

- Lisakoormus energiasüsteemile elektri jõul töötavate soojuspumpade või teiste küttesüsteemide tõttu.
- Soojuse või elektrienergia tootmise piiratud aeg nii päikesepatareidel kui ka tuulegeneraatoritel.
- Energia tootmise ja tarbimise mittevastavus.

Nimetatud puudusi on võimalik kompenseerida ka TES tehnoloogia rakendamise teel.

Peab märkima, et TES salvestussüsteemid, eriti nende kasutamisel koos alternatiivsete energiaallikatega, nõuavad intelligentsete juhtimissüsteemide integreerimist. See on vajalik reaalajas järelevalve teostamiseks salvestussüsteemide üle ja kiirreageerimiseks. Peale selle, sisseehitatud jälgimissüsteemid mõjuvad tervikuna positiivselt kogu süsteemile, tootmisele ja jaotamisele.

Tasakaalu väljaarvutamine olemasolevate ja alternatiivsete soojusallikate vahel ei ole praegu võimalik, kuid märgitakse, et alternatiivsete allikate turgu ja soojusenergia salvestamise turgu ootab ees kasv.

Kui 2017. aasta jooksul oli maailmaturu maht 6 miljonit dollarit, siis arvestades aastatel 2013 kuni 2017 kasvutendentsi 18,5% aastas, peaks 2024. aastaks turu maht moodustama 55 miljonit USA dollarit. Peamisteks selle turu liikumapanevateks jõududeks on päikeseelektrijaamade arvu suurenemine, samuti jahutustehnoloogiad, mis kasutavad mahuteid soojusenergia salvestamiseks ning riiklik toetus energiasäästu ja CO₂ väljaheite vähendamise seotud tehnoloogiatele.

3 SOOJUSENERGIA SALVESTAMISE KASUTAMISE TÕHUSE ANALÜÜS SOOJUSVÕRKUDES

Töö eesmärk on katlamaja töö tõhususe tõstmise küsimus katlamaja tootlikkuse suurendamise teel akumulatsioonipaagi kasutamise abil suvisel, küttevälisel perioodil. Tehakse ka ehituse maksumuse arvestus, samuti investeeringute tõhususe määramine.

Algandmed analüüsi tegemiseks: katlamajade energia tootmise näitajad kuus ja aastas, katlamajade ja torustike kasutegur samal ajaperioodil, on edastanud ettevõtte SW Energia OÜ. Ümbritseva keskkonna temperatuurinäitajad on võetud avalikust allikast ilmavaatlused.ee. Võrkude töö temperatuurirežiimid, andmed rekonstrueerimise kohta ja täpsustav info torustike ja katlamajade kohta on võetud kohalike omavalitsuste tellimisel koostatud energiaauditi aruannetest. Arvestustes kasutatud soojuse hinnad on võetud Konkurentsiameti ja SW Energia.ee kodulehtedelt. Ehituse maksumuse arvestamisel saadi hinnad ettevõtete esindajatega läbiviidud intervjuude käigus.

Andmete esialgne analüüs näitas, et katlamajad töötavad suveperioodil mittetäieliku koormusega, mille vähenemisel aga langeb kasutegur ning suureneb kütuse (hakkpuidu) erikulu. Koefitsient näitab kütte ülekulu kasuteguri vähenemisel. Selline asjaolu võimaldas püstitada hüpoteesi, et kui kasutada soojusenergia salvestamise mahutit ja mahuti laadimisel käivitada katlamaja tööle maksimaalsel võimsusel, siis see võimaldab vähendada kulusid energia tootmisele ja saadav kokkuhoid võimaldab tasa teha oletatavad seadmed ning tulevikus saada kasumit paigaldatud mahuti kasutamise arvelt. Peale selle, mahutit võib kasutada ka talveperioodil energiatarbimise kõrgpunktide leevendamiseks ning lisaks ka energiaallikana avarii tekke korral.

Hüpoteesi analüüsimiseks on pakutud järgmine strateegia, mille järgi paaki kasutatakse koos katlamajaga:

- Katlamaja töötab maksimaalsel koormusel ja maksimaalse kasuteguriga kuni paagi täieliku täitumiseni
- Katlamaja peatub, kuid akumulatsioonipaak töötab kuni täieliku tühjakslaadimiseni ning pärast seda tsükkel kordub.

Kolme stsenaariumi parameetrid on arvestatud järgmiselt:

Stsenaarium A: paagi tühjakslaadimine toimub 24 tunni jooksul

Stsenaarium B: paagi tühjakslaadimine toimub 48 tunni jooksul

Stsenaarium C: paagi tühjakslaadimine toimub 72 tunni jooksul

Nimetatud stsenaariumite järgi saadud parameetreid võrreldakse katla tööga ilma paagita, kui katel töötab minimaalsel koormusel ja minimaalse kasuteguriga.

Stsenaariumite võrdlemiseks valiti järgmised parameetrid:

1. Tehnilised parameetrid:
 - a. paagi suurus
 - b. hakkpuidu kulu
 - c. katla töö aeg paagi täitmiseks
 - d. paagi tühjakslaadimise aeg
 - e. paagi soojuskaod
2. Majanduslikud parameetrid:
 - a. ehituse maksumuse arvestus
 - b. projekti tasuvustähtaeg
 - c. projekti rentaablus
 - d. projekti tulusus

Pärast võimsuse määramist arvutame välja soojuskaod valitud paakidel. Seejärel arvestame hakkpuidu tarbimise katlamaja töö juures 100% koormusega keskmiselt aastas ja minimaalse koormusega. Saadud andmed võimaldavad välja selgitada kokkuhoiu, mis saadakse erinevatel katlamaja töö tasanditel.

Järgmine arvestus on juba majanduslik ning selle abil selgitame välja tasuvustähtaja ja muud finantsnäitajad. Andmete saamise järjekorras need kantakse tabelisse. Saadud andmete kontrollimiseks ja seadme töö modelleerimiseks kasutame programmi Energy Pro. Programm annab visualiseeritud arvestused graafikute vormis, mis samuti lisatakse tööle.

Arvestustes rakendatud valemid on võetud energiatehnoloogia kursuse õppematerjalidest, samuti leitud saidilt engineeringtoolbox.com.

3.1 TES Arvutamine

1) Tes võimsus

Valemi 12 järgi arvestame võimsus kolme stsenaariumi jaoks kus on salvesti tühjestamine toimub 24, 48 ja 72 tundi eest.

$$Q_{tes} = H * \left(\frac{Q_{tarbimine}}{h}\right) \quad (12)$$

Kus

H = ära laadustamis aeg 24, 48, 72 tundi

Q_{tarbimine} – linna tarbimine kuu eest

h – tunnid kuu eest 720t

2) TES vee maht

Peale võimsuse kättesaamist arvestame salvestite maht, kus hojame soojuskandja. Arvestatakse ka kolme stsenaariumi jaoks.

$$V = \frac{Q_{st}}{C_{pv} * P_w * \Delta T_{st}} \quad (13)$$

Kus

Q_{tes} – salvestite võimsus

C_{pv} – 4,2 kJ/kg°C veesoojusjuhtivus

P_w – 997 kg/m³ vee tihedus

ΔT – 25 C nominaal vahe pealevoolu ja tagasi voolu vahel

3) Hakkpuidu kulu

Kütusekulu, hakkpuidu arvutamine näitab, kui palju saame antud parameetritega kokku hoida. Selgitame välja katlamaja töö ajal tarbimise erinevuse minimaalse kasuteguri ja maksimaalse efektiivsusega, nende erinevus annab süsteemile kasu. Lisaks kasutatakse neid andmeid ka majandusnäitajate arvutamisel.

Arvestatud, et igasse katlamajas paigaldatud erineva võimsusega katlad Türi Vaabriku 3 MWh, Türi Tehnika 2 MWh ja Paldiskis 5,6 MWh

$$Hakekulu \text{ m}^3 = \left(\frac{Q_{tes} + Q_{tarbimine}}{P_{boiler} * \eta} \right) * ge \quad (14)$$

Kus

Hakekulu m³ – Hakkpuidu maht

Q_{tes} – salvestite võimsus

$Q_{tarbimine}$ – Tarbimine linnas

P_{boiler} - katla võimsus

η – kasutegur Lisa 1a, 1b, 1c.

ge – puidu erikulu Lisa 1a, 1b, 1c.

4) Mahuti laadustamis aeg

$$htäitmine = \frac{Q_{tes}}{P_{boiler} - \left(\frac{Q_{tarbimine}}{h} \right)} \quad (15)$$

Kus

$htäitmine$ – TES täitmisaeg

Q_{tes} – salvestite võimsus

$Q_{tarbimine}$ – tarbitud soojus

P_{boiler} - katla võimsus

h – tunnid kuu eest 720t

5) Soojuskaod

$$\text{Kogukaod: } Q_{kaod} = Q_{aurutusvedelik} + Q_{kiirgusvedelik} + Q_{seinad} \quad (16)$$

kus

Qaurustusvedelik + Qkiirgusvedelik – tabeli andmed Lisa 3

$$\text{Seinad: } Q_{\text{seinad}} = A * \alpha * \Delta t * 1,3 \quad (17)$$

Kus

$$A - \text{mahuti pindala} \quad A = 2\pi R * L + \pi R^2 \quad (18)$$

α - soojusjuhtivus 90 C juures = 0,045 W/mK

$$\Delta t - \text{temperatuuri vahe} \quad \Delta t = t_{\text{kandja}} - t_{\text{välis}} \quad (19)$$

tvälis – tabel Lisa 2

1,3 – varutegur

Edasi, arvestades soojuskaod, kui kaua kasutame kogutud soojus. Selle jaoks kuu tarbimine, mis on lisas 10, leiame teoreetiline tunni tarbimine ja arvestame TES tühjenemisaeg.

$$H = \frac{Q_{\text{tes}} - Q_{\text{kaod}}}{(Q_{\text{tarbimine}}/h)} \quad (20)$$

Kus

H – tühjenemisaeg

Q_{tes} – salvestite võimsus

$Q_{\text{tarbimine}}$ – tarbitud soojus

Q_{kaod} – salvestite kogu kaod

h – tunnid kuu eest 720t

Arvestatud andmed sisestame programisse Energy Pro ja leiame tsüklide kogus.

3.1.1 EnergyPro programm

EnergyPro programmi kasutatakse töös vastuvõetud andmete juhtimiseks ja disainiüksuse töö simuleerimiseks.

See programm on mõeldud energiasüsteemide analüüsimiseks. Programm võimaldab kogu aasta vältel teha tunniarvestusi ja seejärel analüüsida tulemusi erinevate, nii tehniliste kui ka majanduslike strateegiate alusel.

Mudeli peamine eesmärk on aidata välja töötada energia kavandamise strateegiaid, mis põhinevad erinevate energiasüsteemide ja investeeringute mõju teostatavusuuringul.

Mudel keskendub erinevate modelleerimisstrateegiate analüüsile, rõhuasetusega soojuse ja energia koostootmise (CHP) koostoimele ja taastuvate energiaallikate kõikumistele.

Mudel on sisend- / väljund mudel. Ühised lähteandmed on vajadused, taastuvad energiaallikad, elektrijaamad, kulud ja mitmed valikulised erinevad modelleerimisstrateegiad, mis rõhutavad importi / eksporti ja liigset elektritootmist. Tulemused on energiabilansid ja nendega seotud aastased tootmismahud, kütusekulu, import / eksport ja kogukulud, sealhulgas elektrienergia börsidelt saadav tulu.

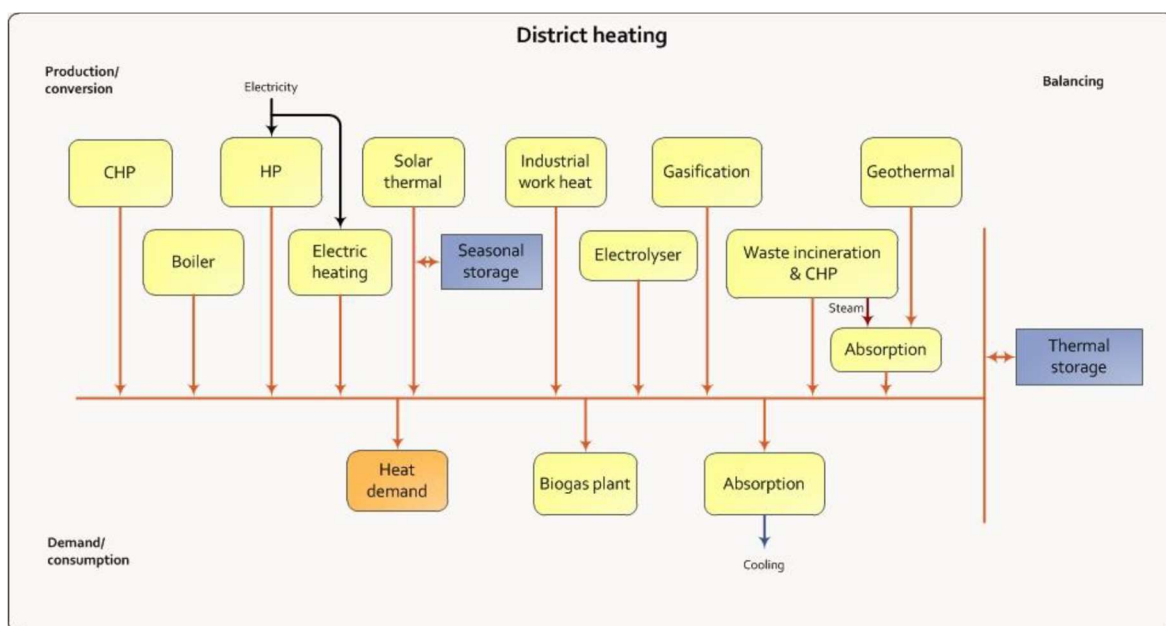
Tehniline analüüs

Selles analüüsis kirjeldab sisend energiavajaduse, tootmisvõimsuse ja tõhususe ning energiaallikate kirjeldust. Väljund koosneb iga-aastastest energiabilanssidest, kütusekulust

Majandusanalüüs

Kaubanduse ja vahetuse analüüs rahvusvahelistel elektriturgudel. Sel juhul vajab mudel turuhindade määramiseks ja turuhindade reageerimist impordi ja ekspordi muutustele täiendavat sisendit. See uuring ei vaja sellist analüüsi ja EnergyPro programmi raames majandusanalüüsi ei tehta.

Programmi põhimõtte on esitatud selle esimesel lehel:



Joonis 10 EnergyPro

Elektrisüsteemi peamine sisend koosneb järgmistest osadest:

- energiavajadus (soojus, elekter, transport jne)
- Rajatised ja ressursid energiatootmiseks (tuuleturbiinid, elektrijaamad, õliküttekadlad, hoidlad jne), sealhulgas seadmed energia muundamiseks, näiteks elektrolüsaatorid, biogaasi tootmiseks ja gaasistamiseks mõeldud seadmed, samuti hüdروgeenimisjaamad.
- Simulatsioon (iga installi ja süsteemi simulatsiooni ja toimimise määratlus, sealhulgas tehnilised piirangud, näiteks läbilaskevõime jne)
- kulud (kütusekulud, maksud, muutuv- ja fikseeritud tegevuskulud ning investeerimiskulud).

3.2 Majandus arvestus

Nagu eespool mainitud, teostame lisaks tehnilisele arvutamisele ka kavandatud toote majandusliku arvutuse. Arvutuste jada on esitatud allpool:

- 1) Projekti maksusmus
- 2) Investeeringute otstarbekuse hindamine
 - Projekti tasuvusaeg
 - Arvestusliku rentaablus
 - Nüüdispuhasväärtus
 - Sisemine tasuvuslävi
 - Kasumiindeks
- 1) Projekti maksumus

Toode, TES salvesti akkumalatsiooni pakk, arvestuse jaoks on vaja koostada tehnilised tingimused. Tehnilised tingimused kirjeldavad nõudeid, millele kavandatud, kavandatud toode või süsteem peavad vastama. Dokument koosneb tavaliselt järgmistest osadest:

- objekti kirjeldus või omadus,
- lähteandmed või dokumendid,
- määrused, normatiiv- ja muud aktid
- Lisanõuded või dokumendid, mida tuleb projekti või kalkulatsiooni koostamisel arvestada.
- Kooskõlastuse tingimused
- Tingimuste kestvus

Vastavalt Energy Storage Outlook 2019 aruannale energia salvestamise süsteemide turg on üsna noor ning seetõttu pole autori esitatud nõuded lõplikud ja lisanduvad, kuna selle valdkonna teadmised süvenevad. Sellest hoolimata võib anda miinimumnõuded:

- Toode asub katlaruumis või selle vahetus läheduses. See on loodud hoolduse hõlbustamiseks ja olemasoleva süsteemiga ühendamiseks.
- Ruumiline asend peaks olema vertikaalne, kuna vertikaalseid mahuteid peetakse soojusenergia salvestamise tõhusamaks. Mida suurem on paagi kõrgus, seda suurem on temperatuuri erinevus ülemise ja alumise kihi vahel. Kuuma vee kiire tarbimise korral on see temperatuuride erinevus suurem ja kui veetarbimist ei toimu, muutub temperatuur paagis väga aeglaselt ühtlaseks.
- TES-i mahud on toodud tabelis 13
- Tootmismaterjal teras
- Isolatsioon min 300mm
- Töörõhk 4 bar

Tabel 13 TES maht

		A	B	C
Türi parandatud	Vabriku m3	189,98	379,95	569,93
Türi Tehnika	m3	92,04	184,07	276,11
Paldiski	m3	686,85	1 373,70	2 060,55

Tankide eeldatavad hinnad saadi mitmelt ettevõttelt, kes tegelesid surveeadmete projekteerimise, valmistamise ja paigaldamisega Eestis.

Ettevõtte esindaja ESTANC OÜ sõnul on isolatsioonimahuti enda maksumus järgmine: 100 m³ - 50 000 €, 250 m³ - 150 000 €. Mahutid 500 m³ on töökoja individuaalseks tootmiseks liiga suured ja on tavaline, et neid toodetakse edasise kasutamise kohas.

STROICOM OÜ hindas oma kogemustele tuginedes selliste paakide paigaldus- ja ühendamiskuludeks 30-50% paagist endast.

Ettevõtte esindaja HeatConsult OÜ hindas projekteerimiskulude taotlust, et see töö moodustab umbes 10% projekti maksumusest. Kuna arvutuste tegemiseks ei olnud Eestis 500 m³ mahuga ehituskulusid võimalik kindlaks teha, võeti erinevates uurimistöodes tsiteeritud keskmised Euroopa hinnad[20][3][21]

Tabelis 14 toodud oruenteeruv maksumus.

Tabel 14 Töö maksumus

		100 m ³	250 m ³	500 m ³
Projekteerimine	10%	7 000,00 €	21 000,00 €	
Mahuti valmistamine		50 000,00 €	130 000,00 €	
Mahuti paigaldamine	30 - 50%	20 000,00 €	60 000,00 €	
€ / kWh				10,00 €
Q _{st} = kW				19 973,00
Kokku		77 000,00 €	2110,00 €	199730,00 €

2) Investeeringute otstarbekuse hindamine

Ükskõik millise projekti realiseerimine nõuab teadaolevalt investeeringuid. Mahutuste otstarbekust ja tõhusust määrab investor paljude parameetrite järgi, mis võivad olla nii majanduslikud, sotsiaalsed, demograafilised kui ka muud. Kõik need mõjutavad projekti realiseerimist, kuid kõige objektiivsema hinnangu annab finantsanalüüs. Oma töös autor rakendab 5 investeeringute tõhususe hindamise meetodit:

- Investeeringuprojektide hindamise statistilised meetodid

Investeeringuprojekti tasuvustähtaeg (*PP, Payback Period*)

Investeeringuprojekti rentaablus (*ARR, Accounting Rate of Return*)

- Investeeringuprojekti hindamise dünaamilised meetodid

Nüüdispuhasväärtus (*NPV, Net Present Value*)

Sisemine tasuvuslavi (*IRR, Internal Rate of Return*)

Kasumiindeks (*PI, Profitability index*)

Investeeringute või investeeringuprojekti tasuvustähtaeg (*Payback Period, PP, tasuvusperiood*) – nimetatud koefitsient näitab perioodi, mille jooksul algsed

investeeringud (kulud) investeerimisprojekti end ära tasuvad. Selle näitaja majanduslik mõte seisneb selles, et näidata perioodi, mille jooksul investor saab oma panustatud raha (kapitali) tagasi. Nimetatud koefitsienti kasutatakse, reeglina, alati koos teiste näitajatega, mida me käsitleme allpool. Näitaja eelised on selle kiirus ja arvestuse lihtsus. Sellise koefitsiendi puudus on silmnähtav – selle arvestamisel kasutatakse pidevat rahavoogu. Reaalsetes tingimustes on üsna keeruline prognoosida kindlaid tulevase rahalisi laekumisi, seetõttu võib tasuvustähtaeg oluliselt muutuda.

Investeeringute või investeerimisprojekti arvestuslik tasuvusmäär (*ingl. k. Accounting Rate of Return, ARR, ROI, arvestuslik tasuvusmäär, investeeringute rentaablus*) – näitaja, mis kajastab investeeringuteobjekti tasuvust ilma hinnaalandi rakendamiseta. Nimetatud näitajat kasutatakse erinevate alternatiivsete investeerimisprojektide võrdlemiseks. Mida suurem on arvestuslik tasuvusmäär, seda suurem on investori huvi selle projekti vastu. Reeglina kasutatakse nimetatud näitajat juba olemasolevate projektide hindamiseks, kus on võimalik jälgida ja statistiliselt hinnata kõnealuse investeeringu rahavoo moodustumise tõhusust. Koefitsiendi eeliseks on arvestuse lihtsus. Nimetatud koefitsiendi puudusteks võib lugeda tulevaste rahaliste laekumiste/projektist saadava tulu prognoositavuse keerulisust.

Nüüdispuhasväärtus (*ingl. k. Net Present Value, NPV, ajaldatud puhasmaksumus, puhaskasum, nüüdispuhasväärtus*) – näitaja, mis kajastab rahavoogude muutumist ja näitab erinevust diskonteeritud rahalise tulu ja kulu vahel.

Nüüdispuhasväärtust kasutatakse selleks, et valida investeerimise seisukohast välja kõige kõitvam projekt.

Sisemine tasuvuslävi (*ingl. k. Internal Rate of Return, IRR, sisemine tasuvusnorm, sisemine rentaabluslävi, sisemine tasuvusmäär*) – näitab diskonteerimismäära, mille puhul diskonteeritud tulu võrdub nulliga.

Sisemise tasuvusläve (IRR) eelised ja puudused:

Eelised

- Võimalus võrrelda omavahel erineva investeerimishorisonidiga investeerimisprojekte;
- Võimalus võrrelda mitte ainult projekte, vaid ka alternatiivseid investeeringuid, näiteks panga panust. Kui projekti IRR moodustab 25%, panga panus aga on 15%, siis projekt on investeerimisseisukohast meeldivam.
- Projekti ekspresshinnang edasise arengu otstarbekuse seisukohast.

Puudused

- Ei kajastu investeerimisprojekti tasuvuse absoluutne kasv;
- Sageli on rahavoogudel süstemaatiline struktuur, mis raskendab antud näitaja õiget arvestust.

Investeeringute kasumiindeks (ingl. k. Profitability index, PI, tasuvuse indeks, rentabluse indeks) – investeeringute tõhususe näitaja, mis kajastab panustatud kapitali tõhusust (tulusust). Tasuvuse indeks kujutab tulevaste rahavoogude diskonteeritud maksumuse suhet algsete investeeringute maksumusse. Selle koefitsiendi majanduslik mõte on lisaväärtuse hindamine iga panustatud euro kohta. Seda kriteeriumi kasutatakse mitme investeerimisprojekti omavaheliseks hindamiseks. Arvestustes kasutatavad valemid on esitatud tabelis 15.

Tabel 15 Majanduslik valemid

Nimetus		Valem	
Tasuvusaeg	PP	$PP = \frac{I_0}{CFcr}$	21
Arvestusliku rentabluse meetod	ARR	$ARR = \frac{CFcr}{I_0}$	22
Nüüdispuhasväärtus	NPV	$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{NCF}{(1-d)^i}$	23
Sisemine tasuvuslavi	IRR	$IRR = \sum_{t=0}^n \frac{Cft}{(1+IRR)^t}$	24
Kasumiindeks	PI	$PI = \frac{IL}{1+d}$	25
kus			
Cft	Rahavoog antud aegadel t		
I ₀	Investeeringute algsumma		
CFcr	Puhas tulu		
NCF	Puhas rahavoog antud momentides		
d	Diskontmäär		
n	Ajavahemik		

3.3 Uuringuobjektid

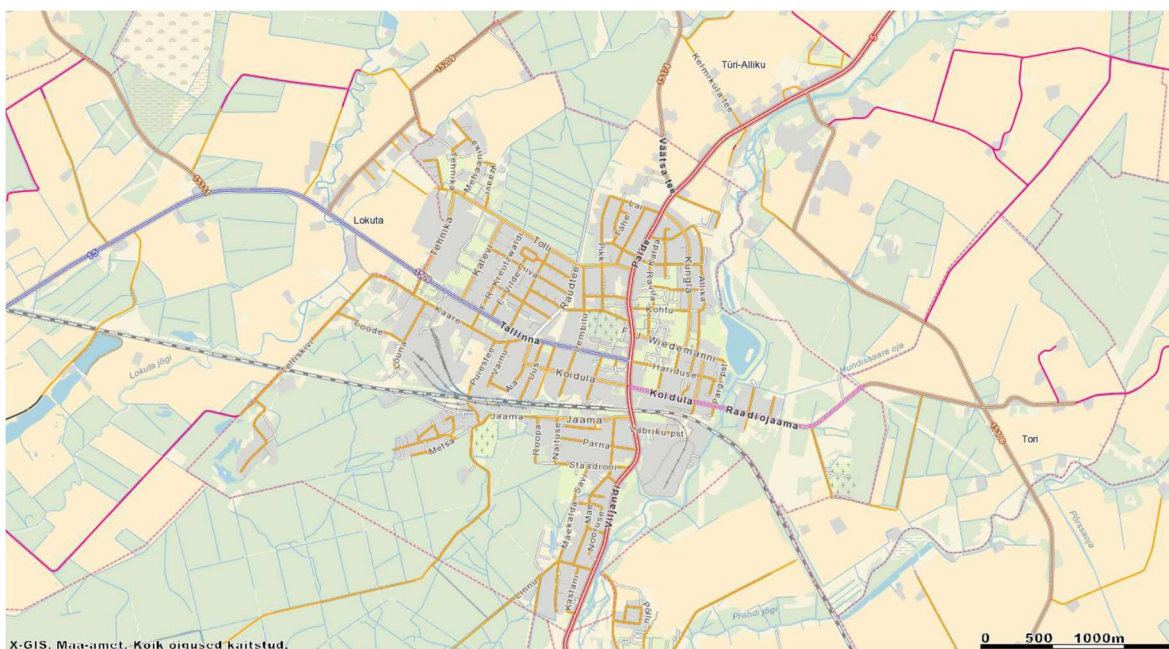
Töös käsitletakse Türi ja Paldiski linna küttesüsteeme. Kõigepealt tuleks kirjeldada Eesti kliimat. Eesti asub mõõdukas kliimavööndis, mida iseloomustavad järsud temperatuurikõikumised. Temperatuur võib keskmiselt (min., maks.) varieeruda vahemikus alates -6 °C kuni +21 °C. Kõige soojema temperatuuriga kuud on juuni,

juuli, august ning edaspidi töös käsitletakse just nimelt neid. Lisas 2 on esitatud keskmise temperatuuri tabel.

3.3.1 Türi

Türi linn asub Kesk-Eestis Järvemaal Pärnu jõe kaldal. Maakonna keskuse Paide kõrval on Türi maakonna kahest linnast väiksem ja sõbraliku keskkonnaga. Türi linn on Türi vallas kesksel positsioonil.

Türi linna pindala on 9,79 km². Linnas elab 1. jaanuari 2017. a seisuga 5 149 inimest. 2. juulil 1926. a. sai Türi linnaõigused. 20. detsembril 1990 sai Türi tagasi omavalitsuse staatuse. Türi linna elanikkond on keskmisest eakam. Võrreldes 2012. aastaga on Türi valla elanike arv 2017. aastaks vähenenud 476 inimese ehk 5,0% võrra. Kõige enam on elanike arv vähenenud Türi linnas, seda 349 inimese võrra.[22]



Joonis 11 Türi linn

Türi linna jaotavad, teed, tinglikult pooleks, ida-lääne suunas kulgev Tallinn–Viljandi raudtee ja põhja-lõuna suunas Pärnu–Rakvere–Sõmeru mnt. Lisaks ka Türi linna läbib Pärnu jõgi.

Türis asub kaks eraldi kaugküttevõrku (Tehnika ja Vabriku). Võrgud paiknevad korterelamute ja tootmisettevõtete piirkonnas. Türi linna lääne piirkond (Tehnika) ja ida piirkond (Vabriku) osas varustades soojusega korterelamuid, õppeasutusi, kauplusi ja mõningaid tootmisettevõtteid.

Asutatud 2000 aastal äriühing OÜ Türi Linnavara vastutab soojamajanduse toimimise eest Türi Linnavara omandis Türi linna katlamajad (Vabriku ja Tehnika tn katlamajad) kui ka kaugküttevõrgud terves linnas. SW Energia OÜ on katlamajade operaator, kellega

on sõlmitud rendileping. Katlamajades kasutavad hakkpuidu katlad, aga põlevkiviõlil töötavaid katlaid kasutatakse enamasti hakkpuidukatelde avariide või remondi korral lühiajaliselt. OÜ Türi Linnavara koostöös SW Energia`ga on korrastanud katlamajade seadmeid. Vabriku tänava katlamajas on renoveeritud katel, vahetatud on katlamaja vanad torud ja lisaks paigaldatud uus soojusisolatsioon.

Türi linna probleemiks olnud kehvast seisusest kaugküttevõrgu torud on enamjaolt rekonstrueeritud. Türi linnas sooja vee andmine kütteperioodivälisel ajal, on tehniliselt ja organisatsiooniliselt keerukas. Sest ainult sooja vee koormusega töötavad katlad saavad koormuse alampiiril, mistõttu on süsteemi kasutegur sel perioodil madal. Sooja vee tootmist ainult ühe katlaga (parem katla töörežiim ja suurem efektiivsus) ei võimalda kahe eraldi asuva ja teineteisest tehniliselt sõltumatu katlamaja ja soojusvõrgu olemasolu. Katlamajade hooldustööde käigus kasutatakse põlevkiviõli katlad.

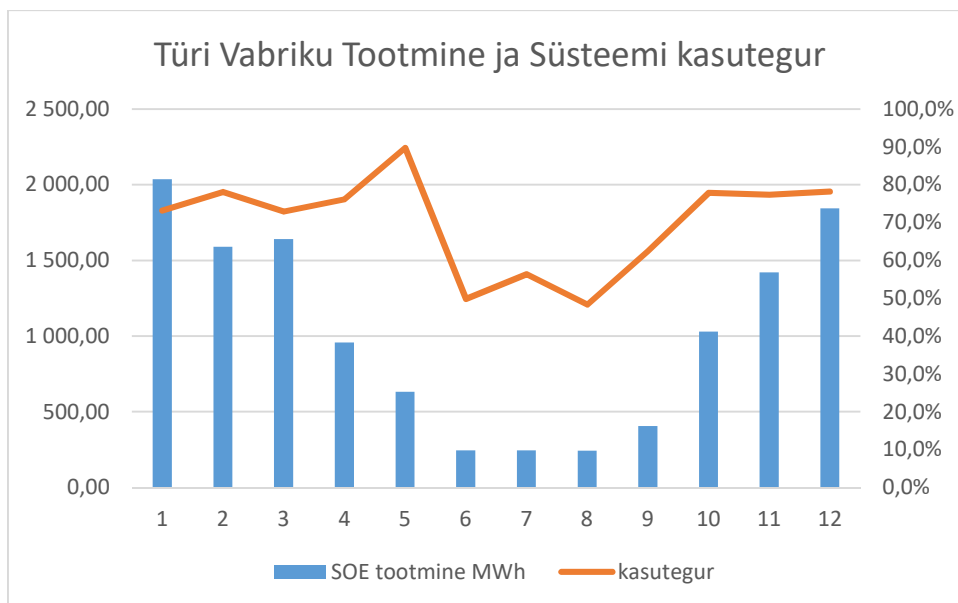
Türi linnas kahel ettevõttel oma soojusvarustuse süsteem ja kohalik katlamaja, mida käitab tarbiv ettevõtte ise.[22]

3.3.2 Türi linna katlamajad

Nagu eespool mainitud, on Türi linna kahe katlamaja omanik Türi Linnavara OÜ, katlamajade operaator on ettevõtte SW Energia OÜ, kellega on leping sõlmitud kuni 2029. a juulini. Alates 17. juulist 2019 on soojusenergia müügihind Türi kaugküttetarbijatele 59,75 €/MWh, millele lisandub seadusega ettenähtud käibemaks. Hinnatõusu põhjuseks on puiduhakke hinnatõus.

Türi Vabriku tn katlamaja.

Katlamaja toodang viimases aastates on olnud 12 300 MWh aastas. Renoveeritud aastatel 2018-2019 Vabriku tänaval katlamaja katab peamiselt Türi linna ida osas paiknevate kaugkütte tarbijate sooja vajadused. Põhiseade on 2 biokütuse katlad võimsusega: 1. Kalvis 0,95MW õlikatel ja 2. Justsen 3MW puiduhakke katel. Peamiselt kasutusel on Justsen puiduhakke katel, õlikatel Kalvis kasutatakse avariidel koormuse katmiseks. Süsteemi keskmine kasutegur on üle 80%. Talvel Vabriku kaugküttevõrgus on koormusvõimsus keskmiselt 3–4 MW, see annab võimalus töötada heas tööpiirkonnas. Suvine koormus on aga 300–400 kW. Joonisel 12 on toodud Süsteemi tootmine ja kasutegur.



Joonis 12 Türi Vabriku tootmise ja kasuteguri suhe.

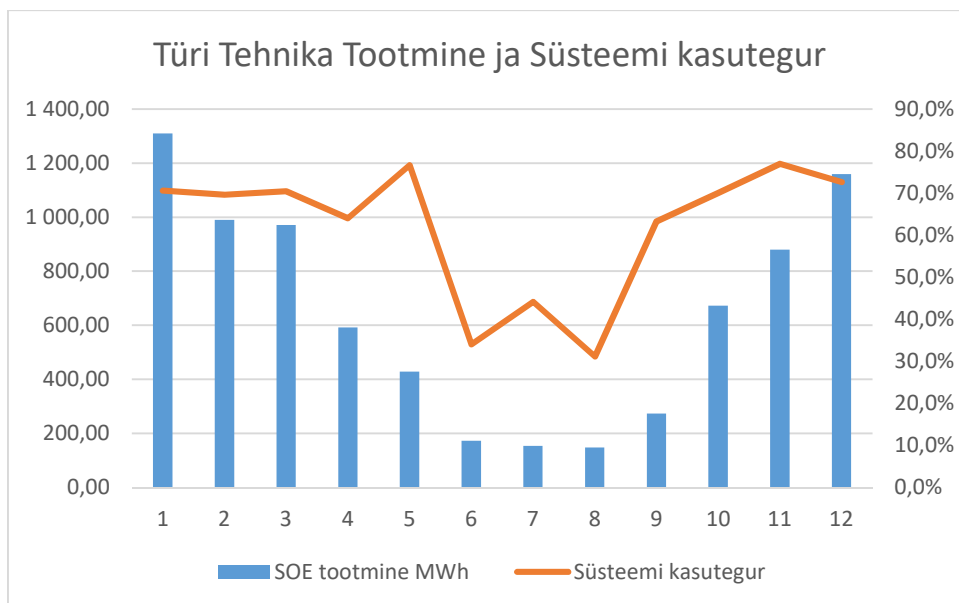
Tabeli Lisa 1a andmetest näeme, et kõige suurema kao moodustab trassikadu, mis hõlmab suveperioodil kuni 34%. Tarbimise suurenemisel, eriti on see märgatav septembrist kuni maini, aga need vähenevad. Suve perioodil, vähe koormuse tõttu, kasutatakse automaatset sisse/välja lülitust, sest kataseade võimaldab töötada antud madala koormusega. Kaua aega töötamine ei ole katla töödele pikemas perspektiivis hea lahendus.

Türi Tehnika tn katlamaja.

Tehnika tänaval 5 on asuv uus katlamaja mis oli renoveeritud, aastatel 2018-2019, nagu Vabri katlamaja. Antud katlamaja katab Türi linna lääne osas kaugkütte tarbijate soojavajadus. Soojustoodang, viimasel aastal, oli 7 700 MWh. Põhikütteseadmeteks on 2 biokütusel põhinevat katelseadet. Kalvis on õlikatel võimsusega 0,95 MW ja Justsen puiduhakke katel, võimsusega 2 MW. Peamiselt on kasutusel puiduhakke katel, õlikatelt kasutatakse vaid avariidel. [22]

Nagu Vabriku tn katlamaja puhul, täheldatakse ka Tehnika tn katlamaja puhul järgmisi sarnaseid parameetreid:

- Katla kasutegur talvisel perioodil on hea 80–88%.
- Tehnika kaugküttevõrgu koormusvõimsus on talvisel perioodil keskmiselt 1–1,5 MW, võimaldades katlal töötada heas töövahemikus.
- Suvine sooja vee tootmise koormus on aga vaid 250–300 kW Lisa 1b.



Joonis 13 Türi Tehnika tootmise ja kasuteguri suhe.

Joonisel 13 on toodud Süsteemi tootmine ja kasutegur.

Türi linna kaugküttevõrk

Nagu katlamajad, Türi linnas on kaks kaugküttevõrgud ka: Tehnika ja Vabriku. Võrgu pikkus on 10 km. Viimases 5 aasta jooksul on rekonstrueeritud ning asendatud kahetorulise eelisoleeritud torustikuga 7,5 km ehk (75%). Maapealne rekonstrueerimata torustik on kahes kohas esimene on endiselt Tehnika katlamajast väljuv lõik ning teine on Vabriku kaugküttevõrgus raudteed ületaval lõigul. Kaugküttevõrgu seiskord on peale rekonstrueerimist hea.

Kaugküttevõrk Türi linnas on suhteliselt hajutatud. Nagu varem mainitud, Tehnika kaugküttevõrk paikneb linna lääne pooles ning Vabriku kaugküttevõrk paikneb Türi linna ida pooles. Kaugküttevõrkude vaheline kõige väikseim kaugus on ca 500 meetrit, magistraal torudel vahekaugus on suurem ca 800–900 m. Tarbijad paiknevad katlamajast, nii Tehnika kui ka Vabriku, küllaltki kaugel. Põhiliste torustike läbimõõt vastab vajadusele.

Türi linna kaugküttesüsteem töötab temperatuurigraafikus 95/70 °C arvutuslikul välisõhu temperatuuril -22 °C. Vastavalt temperatuurigraafikule on talvisel perioodil võrguvee temperatuur olnud 85/60 °C ja suvisel perioodil 60/40 °C.[22]

Kokkuvõte Türi

Toetudes Türi linna soojussüsteemi andmetele, mis hõlmavad nii mõlemat katelt kui ka soojustorustikku, on näha, et peamise soojuskao moodustab trassikadu. Suvisel ajal ulatub see kuni 35%-ni. Töötades perioodil oktoobrist kuni maini umbes 70%

koormusega, moodustab trassikadu 10%. Leian, et soojuste akumulatsiooni (TES) rakendamise korral võib soojustüsteemi tõhusust oluliselt suurendada.

Arvan, et selline rakendus on otstarbekas, sest soojustuskadude säästmise ja kasuteguri tõstmise võimalused on Türi linnas praktiliselt ammendatud. Juba on vana, kaasaegsetele standarditele mittevastav torustik välja vahetatud uue, eelisoleeritud torude vastu. Nende torude arvestuslik kasutusiga kuni vastuvõetava soojustjuhtivuse minetamiseni on 30 aastat. Tulenevalt „Türi valla Türi linna soojustmajanduse arengukava aastateks 2018–2025“ aruande andmetest, on uus torustik töötanud alles kolmandiku oma tähtajast ning isolatsiooni soojustjuhtivuse protsent ei ole veel sel määral langenud, et peaks mõtlema torustiku teise vastu väljavahetamise peale.

Samuti on lõpptarbijate (kliientide) tarbimise vähenemise tõttu vältimatu koormuse vähenemine katlamajadele, mis on tekkinud majade soojustamise või madalatemperatuurilisele soojustamisele, nagu soojustad põrandad, ülemineku tagajärjel. Koormuse vähenemisel katlamajadele hakkavad suurenema ka soojustuskadud. Kui talvine tarbimine ei lange alla 70%, siis probleemid kadudega suvisel ajal ainult suurenevad. Soojuste salvestamise peaesmärk seisneb selles, et kui katel on eelnevalt töötanud teatud koormusel maksimaalse võimaliku kasuteguriga ning tarbimata jäänud energia salvestatakse, saab energiavajaduse katta mittetöötava katlaga

3.3.3 Paldiski

Paldiski on väikelinn mis asub 50 km kaugusel pealinnast Tallinnast. Pindala suuruselt Paldiski on Eesti teine linn, territoorium hõlmab Pakri poolsaart, Suur- ja Väike-Pakri saart. Linna üldpindala 5,4 km² ja tiheasustus on 102 km². Omab ühine merepiir Padise vallaga, maismaal piirneb linn Keila vallaga. Ülejäänud Eestiga Paldiskil on hea ühendus nii maanteed kui raudteed mööda. Paldiskis on kaks sadamat, Lõuna- ja Põhjasadam. Sadamad on aastaringselt jäävabad. Lõunasadam teenindab praamiliine Soome ja Rootsi suunal. Linnas töötab kaks põhikooli, lisaks eesti- ja venekeelne lasteaed.

Paldiski asutatud 1718, Vene tsaar` iga Peeter I. Kuni 1764. aastani kandis asula nime Rogerwiek. Edasi sai nime Baltiiski Porti ja 1783. aastal Katariina I andsid praeguse nime Paldiski

Nõukogude Liidus paldiski oli suletud sõjaväelinn.



Joonis 14 Paldiski linn

Alates 2015. aastast Paldiski linnas soojusenergia tootmise ja jaotamisega teostab SW Energia OÜ. Paldiski linna kaugküttepiirkonnas on Konkurentsiameti poolt määratud kaugkütte soojuse piirhind määratud 22.12.2014 määrusega nr 7.1-3/14-094. Soojusenergia piirhind antud piirkonnas seisuga Aprill 2020 on 52,75 €/MWh.

Paldiski katlamaja

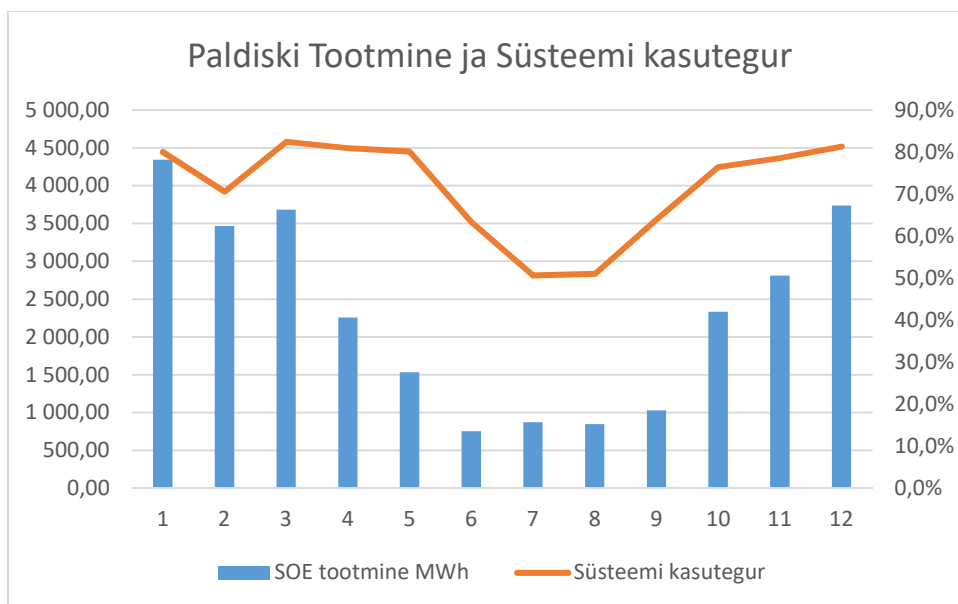
Paldiski linnas on üks katlamaja mis on hallatav SW Energia poolt. Katlamajas on üks hakkepuidul ning üks põlevkiviõlil töötavad katlad. Katlamaja oli ehitatud nõukogude ajal nõukogude armee poolt sõjaväebaasi rajamisel Paldiskisse. Eesmane rekonstrueerimine oli teostatud Rootsi abiga nõukogude armee lahkudes 1993. aastal. Baaskoormus tagab on hakkepuidu katel Witermo 8. Reserv- ning tipukoormuse tagavad õlikatlad Tubox ning K-80. Katlamaja varustatud liikuva pörandaga hakkepuiduladu. Katlamajas on kolm põlevkiviõli mahutit, nende mahtuvus on 50/50/10 m³. Vee kvaliteet tagab katlamajas paigaldatud veepehmendi. Katlad käivituvad ning seiskuvad automaatselt ja katlamaja automaatika juhtimine toimub interneti vahendusel läbi kontrolleri. Soojus antakse otse soojusvõrguveele st nn. lahtine süsteem. Katlamaja tehniline seisukord on rahuldav. [23]

Paldiski kaugküttevõrk

Paldiski linna katlamajas toodetakse soojust aastaringselt, mis tähendab, et katlamaja kasutatakse ka sooja tarbevee tootmiseks. Võrgu pikkus on 6 376 m. 2018 aastal, Kik abil, oli rekonstrueeritud viimased 3 000 m vananenud lõigud. Peale rekonstrueerimist, kütte sesoonil 2018/2019, võrgukaod oli 2563 MWh mis moodustas 9,3% Võrgu üldine seisukord on rahuldav, Kontrollitakse regulaarselt visuaalse ülevaatus käigus.[23]

Kokkuvõte Paldiski

Pärast katlamaja ja torustiku kohta saadud andmete analüüsimist võib kinnitada, et peamise soojuskao moodustab trassikadu, mis on keskmiselt 9,3% vt joonis 15.



Joonis 15 Paldiski tootmise ja kasuteguri suhe.

Küttehooaja välisel perioodil maist kuni septembrini moodustavad kaod 20% kuni 35%. Koormuse suurenemisel kütteperioodil trassikadu väheneb ja moodustab 2,2 kuni 13%. Sarnane olukord on ka katla kasuteguriga (tabel Lisa c), küttehooaja välisel perioodil koormus langeb ja koos sellega langeb ka katla kasutegur. Tulenevalt eespool kirjeldatust, me näeme, et olukord soojuskadudega nii Türis kui ka Paldiskis on praktiliselt sarnane. Pean oluliseks märkida, et küttehooaja perioodil septembrist maini on torustiku soojuskadud (trassikadud) väikesed: kuni 13% Paldiskis ja 10% Türis. Paldiskis toimus viimane torustiku uuendamine 2018. aastal. Uuendatava lõigu pikkus oli 4,2 kilomeetrit. Tänu sellele õnnestus soojuskadu vähendada 2000 MWh võrra. Peale selle, uue soojustorustiku tööiga on nüüd vähemalt 30 aasta.

Vastavalt firma Heat Consult OÜ 2016. aastal tehtud aruandele jätkab soojuse tarbimine linnas vähenemist. Arvan, et nimetatud väide on kohane ja õige ka praegu mitte ainult Paldiski linna, vaid ka teiste Eesti linnade ja asulate suhtes.

3.4 Sisendandmed

Sisendandmed ja lubatud näitajad, mida arvestatakse TES-i ja akumulatsioonipaagi käsitlemisel Türi Vabriku, Türi Tehnika ja Paldiski katlamajades. Vaatluse all on kolm akumulatsioonipaagi töö stsenaariumi: variant A, paagi töö 24 tundi, variant B, paagi töö 48 tundi, variant C, paagi töö 72 tundi. Siin ja edaspidi tähistatakse iga katlamaja varianti tähtedega A, B ja C.

Iga katlamaja lühikirjeldus:

1. Türi Vabriku katlamaja võimsus on 3 MWh, kütusena kasutatakse on hakkpuitu, katlamaja keskmine kasutegur on 85%, minimaalne kasutegur aga 74 ning maksimaalne 90%. Katlamaja katab soojuse ja sooja vee tarbimise talvel ja ainult sooja vee tarbimise suvel. Tulenevalt TES-ile etteantud töötundidest, on iga paagi liigi jaoks loodud tehniliste parameetrite järgi koondtabel 16.1. Paakide maht leitakse kasutades valemit (13), TES võimsuse arvestamisel kasutati valemit (12)

Tabel 16.1 Türi Vabriku stsenaariumid

TES töötamis stsenaariumid			A	B	C
TES töötamis aeg	H1		24	48	72
	Qtes	MW	5,52	11,05	16,57
TES võimsus	MWh to kJ	KJ	19 887 600,00	39 775 200,00	59 662 800,00
TES maht	V	m3	189,98	379,95	569,93

Paak on valmistatud terasest, töö rõhk on 4 bar, isolatsiooni paksus 300 mm, isolatsiooni soojusjuhtivus 0,045 W/m C.

2. Türi Tehnika katlamaja võimsus on 2 MWh, kütusena kasutatakse hakkpuitu, katlamaja keskmine kasutegur on 85%, minimaalne kasutegur aga 73% ja maksimaalne 90%. Katlamaja katab soojuse ja sooja vee tarbimise talvel ja ainult sooja vee tarbimise suvel. Tulenevalt TES-ile etteantud töötundidest, on iga paagi liigi jaoks loodud tehniliste parameetrite järgi koondtabel 16.2. Paakide maht leitakse kasutades valemit (13), TES võimsuse arvestamisel kasutati valemit (12)

Tabel 16.2 Türi Tehnika stsenaariumid

TES töö stsenaariumid			A	B	C
TES töö aeg	H1		24	48	72
	Qtes	MW	2,68	5,35	8,03
TES võimsus	MWh kuni kJ	KJ	9 634 800,00	19 269 600,00	28 904 400,00
TES maht	V	m3	92,04	184,07	276,11

Paak on valmistatud terasest, töö rõhk on 4 bar, isolatsiooni paksus 300 mm, isolatsiooni soojusjuhtivus 0,045 W/m C.

3. Paldiski katlamaja võimsus on 2 MWh, kütusena kasutatakse hakkpuitu, katlamaja keskmine kasutegur on 85%, minimaalne kasutegur aga 73% ja maksimaalne 90%. Katlamaja katab soojuse ja sooja vee tarbimise talvel ja ainult sooja vee tarbimise suvel. Tulenevalt TES-ile etteantud töötundidest, on iga paagi liigi jaoks loodud tehniliste parameetrite järgi koondtabel 16.3. Paakide maht leitakse kasutades valemit (13), TES võimsuse arvestamisel kasutati valemit (12)

Tabel 16.3 Paldiski stsenaariumid

TES töö stsenaariumid		A	B	C	
TES töö aeg	H1	24	48	72	
	Qtes	MW	19,97	39,95	59,92
TES võimsus	MWh kuni kJ	KJ	71 902 800,00	143 805 600,00	215708 400,00
TES maht	V	m ³	686,85	1 373,70	2 060,55

Paak on valmistatud terasest, töö rõhk on 4 bar, isolatsiooni paksus 300 mm, isolatsiooni soojusjuhtivus 0,045 W/m C.

Majanduslikud andmed: Konkurentsametiga kooskõlastatud energia hind Türi jaoks on 59,75 €/MWh, Paldiski jaoks on 52,75 €/MWh. NPV arvestades kasutatud kapitali rendi marginaali suurettevõtjale, suurusega d - 3%.

Tööde maksumus arvestati selles valdkonnas töötava ettevõtte esindajatega vestluse käigus saadud andmete alusel. Tööde maksumus mahutite puhul mahuga 500 m³ ja enam, on võetud allikast (Danish Energy Agency 2012). Andmed on esitatud tabelis 14.

Tabel 14 Ehitus maksumus

		100 m ³	250 m ³	500 m ³
Projekteerimine	10%	7 000,00 €	21 000,00 €	
Mahuti valmistamine		50 000,00 €	130 000,00 €	
Mahuti paigaldamine	30—50%	20 000,00 €	60 000,00 €	
€/ kWh				10,00 €
Qst = kW				19 973,00
Kokku		77 000,00 €	211 000,00 €	199 730,00 €

4 TULEMUSED

Katlamajade paakide arvestus andis ühe laadimise-tühjakslaadimise tsükli jaoks järgmised tulemused:

Paakide maht, mis leiti valemi 12 järgi ja on toodud tabelites Türi Vabriku 16.1, Türi Tehnika 16.2 ja Paldiski 16.3, näitas süsteemi energiamahu kolme erineva stsenaariumi jaoks. Kasutades neid andmeid, määrati valemi 13 järgi paagi füüsiline maht. Andmed on toodud ka eespool esitatud tabelites 16.1, 16.2, 16.3.

Energiatootmiseks vajalik hakkpuidu kulu määrati valemi 14 järgi, mis näitas selle kütuse kulu maksimaalse koormuse juures maksimaalse kasuteguriga. Andmed koormuse, kasuteguri ja hakkpuidu kulu kohta võeti lisadest 1a, 1b, 1c. See võimaldas koostada võrdlevad koondtabelid 17.1, 17.2, 17.3.

Tabel 17.1 Türi Vabriku, Hakkpuidu kulu

TES töötamis stsenaariumid				A	B	C
Hakkpuidu kulu min. Kasuteguriga	n1 - 74%	m3		120,88	124,78	128,67
Hakkpuidu kulu max. Kasuteguriga	n2 - 90%	m3		99,33	102,53	105,73
Hakkpuidu kulu vahe	vahe	m3		21,55	22,25	22,94
Hakkpuidu kulu vahe	MWh	MWh		33,75	34,84	35,93
TES täitmis aeg	h täitmine	tundi		1,99	3,99	5,98
TES kaod	Qkaod	Wm2	10	154,80	10 599,53	10 993,50
		MWh		0,0102	0,0106	0,0110
TES tühjenemisaeg	H2	tundi		23,96	47,95	71,95

Tabel 17.2 Türi Tehnika, Hakkpuidu kulu

TES töötamis stsenaariumid				A	B	C
Hakkpuidu kulu min. Kasuteguriga	n1 - 73%	m3		94,82	97,88	100,94
Hakkpuidu kulu max. Kasuteguriga	n2 - 90%	m3		77,17	79,66	82,15
Hakkpuidu kulu vahe	vahe	m3		17,66	18,23	18,80
Hakkpuidu kulu vahe	MWh	MWh		29,56	30,51	31,47
TES täitmis aeg	h täitmine	tundi		1,42	2,83	4,25
TES kaod	Qkaod	Wm2	5 816,61	6 279,73	6 689,98	
		MWh		0,0058	0,0063	0,0067
TES tühjenemisaeg	H2	tundi		23,95	47,94	71,94

Tabel 17.3 Paldiski, Hakkpuidu kulu

TES töötamis stsenaariumid					A	B	C
Hakkpuidu kulu min. Kasuteguriga	n1 - 73%	m3	204,32	210,91	217,50		
Hakkpuidu kulu max. Kasuteguriga	n2 - 90%	m3	180,93	186,76	192,60		
Hakkpuidu kulu vahe	vahe	m3	23,39	24,15	24,90		
Hakkpuidu kulu vahe	MWh	MWh	34,45	35,56	36,67		
TES täitmis aeg	h täitmine	tundi	4,19	8,38	12,57		
TES kaod	Qkaod	Wm2	6 793,62	7 681,95	8 531,19		
		MWh	0,0068	0,0077	0,0085		
TES tühjenemisaeg	H2	tundi	23,99	47,99	71,99		

Saadud andmed näitavad, et rakendatav lähenemine annab tulemuse hakkpuidu kokkuhoius, mis on väljendatud real „Hakkpuidu kulu vahe“ ja „Hakkpuidu kulu MWh´ides“. Järgnevad, allpool tabelis toodud arvestused on tehtud valemi 15 järgi – mahuti täitmise aeg, 16 – kadude arvestus ja 17 – TES töö aeg. Nende põhjal on selgelt näha, et töötamisel tekkivad soojuskaod ei ole suured. Samuti ei ole suur laadimisaeg, mis võimaldab kasutada TES-i katlamajade remondi ja hoolduse tegemise ajal ilma neid soojusvarustusest välja lülitamata. Samas on nendest andmetest ka näha, et mahuti mahu suurendamisel ei toimu hakkpuidu kokkuhoidu. Nimetatud väide on õige kõikide arvestatud mahutite puhul ja järelikult, kui kasutada suurt mahutit, siis tasuvustähtaeg pikeneb, mis iseenesest ei räägi projekti kõitvuse kasuks. Lisaks, uurimistöodes oli teostatud arvutused suve perioodi jaoks ning juhul kui kasutada TES talve perioodil, siis on vaja suurendada paaki maht, mis omas korras veel suurendab ka maksumust.

Edasi, ehituse maksumuse arvestus ja majandusnäitajad, nagu PP, NPV, IRR, ARR ja PI teostatakse ainult variandile A, mis on majanduslikult kõige otstarbekam.

Tuletame meelde, et saadud andmed käivad ühe laadimise-tühjakslaadimise tsükli kohta, tsüklite arvu arvestus koos ja selle visualiseerimine tehti programmi Energy Pro abil, mille andmed esitame allpool.

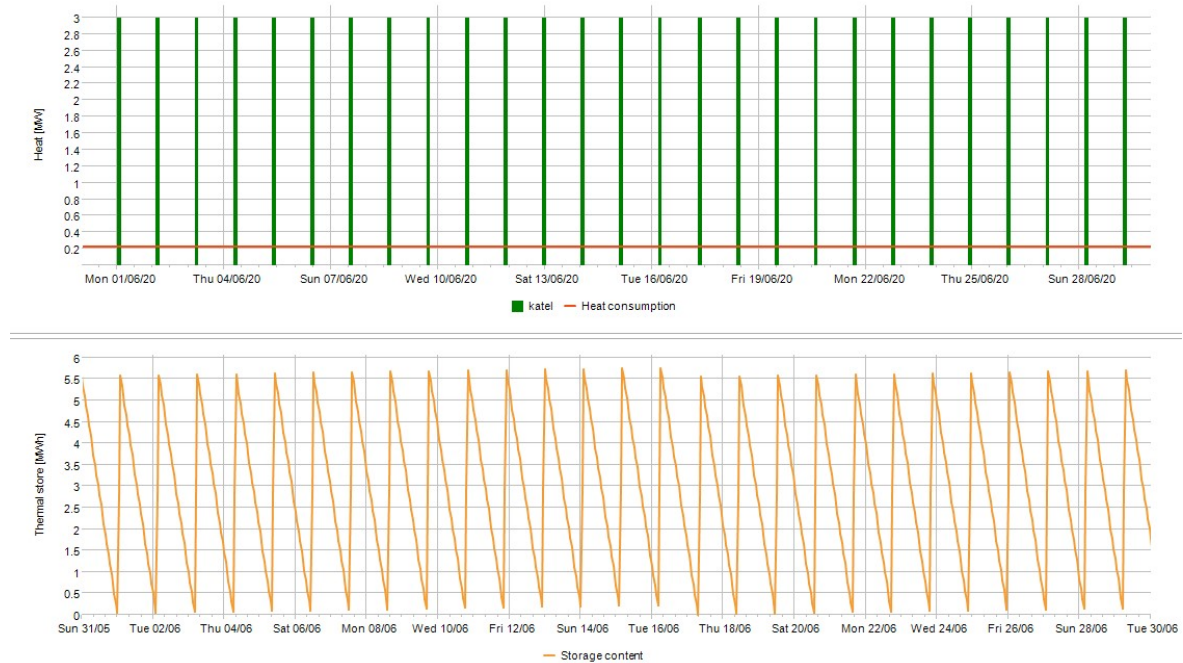
Tes tühjenemise aeg, vastavalt tabeli 17.1, 17.2 ja 17.3, igal katlamajal on sama, seda arvestades saadud tühjenemise – laadustamise graafikut Variant A, B, C.

Programmiga EnergyPro oli teostatud põhiandmete kontroll mis näitas järgmine situatsioon.

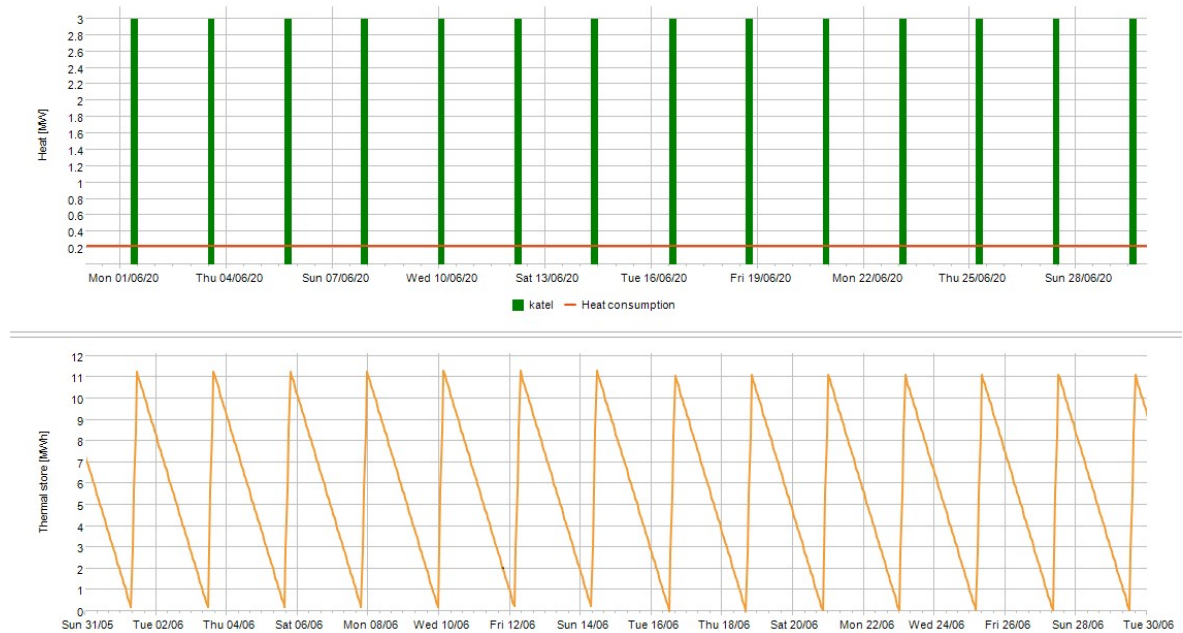
Lisas 4 on toodud väljatrükk, kus on näha, et soojus kaod ei ületa 1MWh nagu väikse mahuga TES. Sama on toodud meie arvutuses, Tabelises 17.1, 17.2 ja 17.3, reas TES kaod. Suures mahutis soojuskaod on 2 MWh, mis on ka veapiires. Üldmainitud tabelite ja EnergyPro väljatrüki võreldusega on näha, et üldiselt on erinevused väikesed ja seotud tunni arvestusega. Joonisel 14 saame näha, et katlaseade võimsus piisab vajaliku mahu

energijate täimiseks. Sealt saame ka näha tsüklide arvu Türi Vaabriku katlamajade jaoks. Situatsioon katlaseadme võimsusega ja tsükli arvudega Tehnika katlamajas on saarnased Vabriku katlamajaga. Aga joonisel 17 Paldiski katlamaja, on näha, et olemas olevat võimsust ei piisa vajaliku mahu täitmiseks, katel töötab kauem ja sellega vähendatakse ka tsüklide arv.

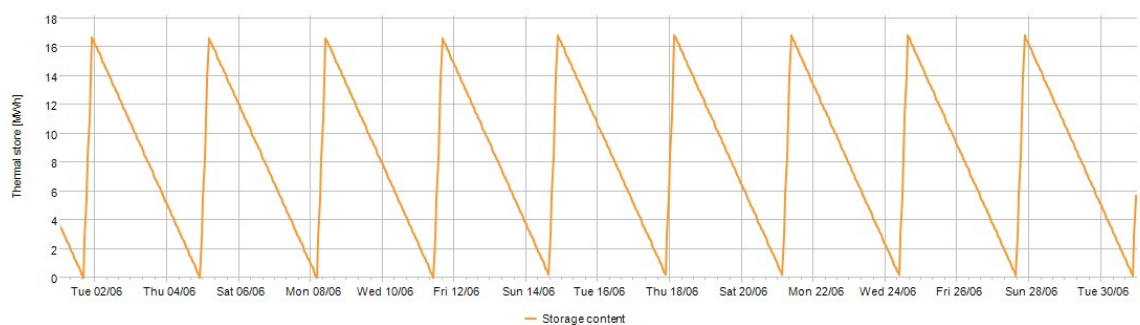
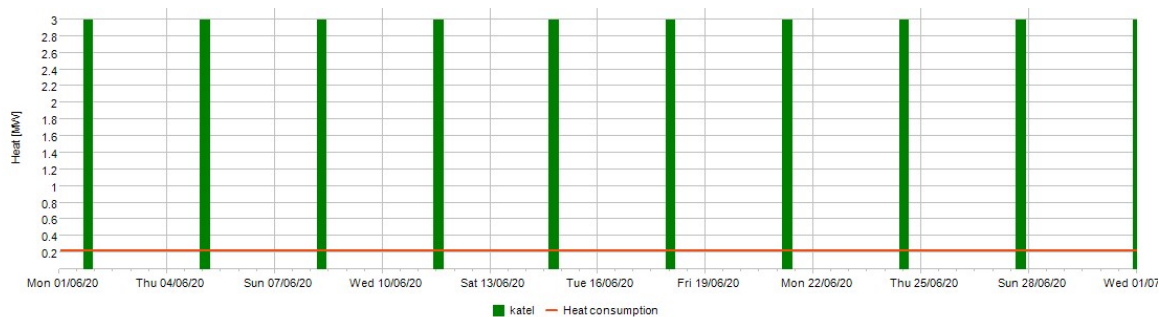
Joonis 16. Variant A Türi Vabriku



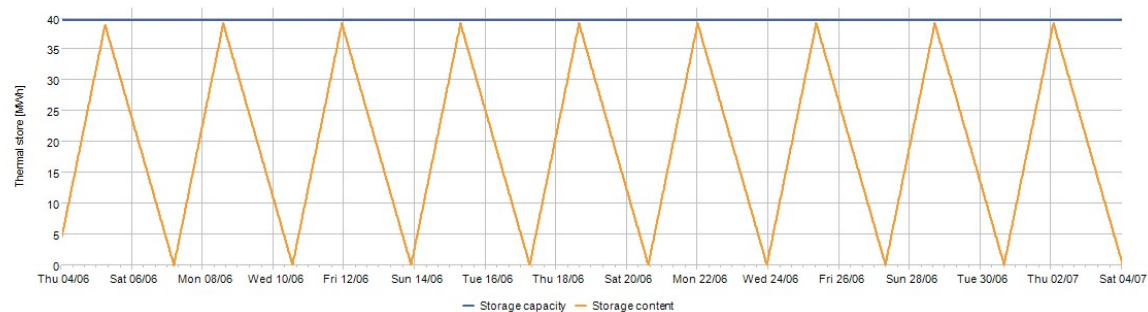
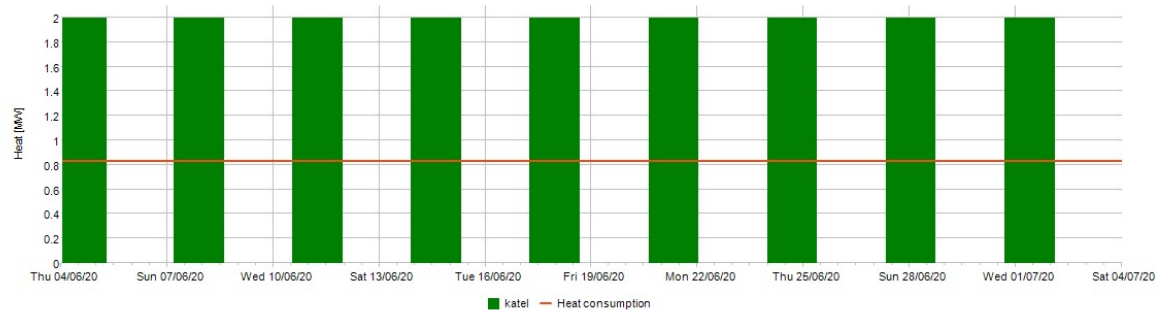
Joonis 16. Variant B Türi Vabriku



Joonis 16. Variant C Türi Vabriku



Joonis 17. Variant B Paldiski



Toetudes andmetele, mis on saadud salvesti füüsiliste omaduste, samuti eespool toodud töö graafiku arvestamise alusel, tehti projekti majandusliku otstarbekuse arvestus.

Saadud andmed, nagu PP, NPV, IRR, ARR ja PI esitame lisas 3, siin toome ka teostatud arvutuste lõpptulemused eraldi tabelina iga linna jaoks:

Tabel 18.1 Türi Vabriku majandustulemused

Nr	Nimetus	Meetod	Tulem
1	Tasuvusaeg	PP	104,64
2	Arvestusliku rentaabluse meetod	ARR	0,9557%
3	Nüüdispuhasväärtus	NPV	-146 800,78
4	Sisemine tasuvuslävi	IRR	-0,16%
5	Kasumiindeks	PI	-69,57%

Tabel 18.2 Türi Tehnika majandus tulemused

Nr	Nimetus	Meetod	Tulem
1	Tasuvusaeg	PP	43,60
2	Arvestusliku rentaabluse meetod	ARR	2,29%
3	Nüüdispuhasväärtus	NPV	-34 162,14
4	Sisemine tasuvuslävi	IRR	-4,13%
5	Kasumiindeks	PI	-44,37%

Tabel 18.3 Paldiski majandus tulemused

Nr	Nimetus	Meetod	Tulem
1	Tasuvusaeg	PP	110,06
2	Arvestusliku rentaabluse meetod	ARR	0,91%
3	Nüüdispuhasväärtus	NPV	-141 451,22
4	Sisemine tasuvuslävi	IRR	-0,24%
5	Kasumiindeks	PI	-70,73%

Tulemustest näeme, et kolmest projektist igal on lühike tasuvustähtaeg, mis on kahtlemata, plussiks.

ARR andmeid on raske hinnata enne projekti käivitamist, kuid me näeme, et tulemus pole negatiivne, mis pole sugugi halb, kuid selle väärtus on suhteliselt väike, mis räägib projekti tagasihoidlikust köitvusest. Võrreldes käesolevas töös uuritud kolme arvestuslikku projekti, on ARR näitaja järgi kõige köitvam Türi Tehnika katlamaja oma näitajaga 2,29%, Paldiski 0,91% või Türi Vabriku 0,95 vastu.

NPV näitaja on kõige kolme projekti puhul negatiivne, mis on juba tõestuseks sellele, et projekte ei saa pidada investeerimise seisukohast köitvateks, sest finantsvood ei tee esmainvesteeringuid lühiajalise perioodi jooksul täies mahus tasa.

Arvestuslik IRR, nagu ka eespool esitatud näitaja, on negatiivne, see aga ei lisa köitvust, võrreldes panustatud määraga, keskmiselt 5-7%, negatiivse IRR väärtusega projektid

tavaliselt ei realiseeru. Ent kolme projekti võrdluses on mahutuste seisukohast kõige soodsama tulevikuga Türi Vabriku projekt.

Seaduspäraseks tulemiks on see, et PI indeks, mis on arvestatud saadud NPV väärtuste põhjal, osutus samuti negatiivseks.

KOKKUVÕTE

Teostatud töö põhjal võime teha järgmised järeldused:

- TES-i kasutamine katlamajades toob kaasa kütuse kokkuhoiu efekti.
- Kasutatava paagi suurus ei mõjuta kokkuhoitud kütuse kogust olulisel määral.
- TES-i kasutamine katlamajades, mille energiaallikaks on hakkpuit ning kus toimub ainult soojusenergia tootmine, ei ole investeeringute seisukohast otstarbekas.

Selles artiklis ei käsitletud katlaruumi sisse- ja väljalülitamise (on / off) mõjuga seotud küsimust. Ilmselt on eelistatavamad vähem jaama stardid ja peatused. Selles töös ei võetud arvesse jaama sarnasel režiimil töötamise tõenäolist majanduslikku ega muud mõju, kuna need vajavad täiendavat põhjalikku uurimist.

Kõik nimetatud, tehtud töö tulemusel saadud mitteoptimistlikud järeldused kõnelevad sellest, et tehnoloogiate kaasaegsel arenemisel, mis nõuavad suuri kulutusi, energia salvestamine, tõenäoliselt, arengut ei saavuta. Selle tunnistuseks on nende tagasihoidlik juurutamine nii Eestis kui ka mujal maailmas. Peab märkima, et väike majanduslik efekt on siiski olemas, ent see on ebapiisav nimetatud tüüpi ja suurusega mahutite käsitlemisel. Olukorda saab muuta, kui kasutada taoliste projektide toetamiseks riiklikke abifonde. See tõstab projektide majanduslikku kõitvust, nende väljatöötamine aga peab avalduma hinnas projekti maksumuse vähenemise suunas. TES-i kasutamisel on samuti ka positiivsed mõjud. Peale juba nimetatud kütuse kokkuhoidu mõjub tehnoloogia rakendamine positiivselt tarbijate varustatuse stabiilsusele, tõstab soojusvarustussüsteemi üldist kasutegurit, alandab katlamaja kasutamise ressursi.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] T. Schmidt *et al.*, "Large-scale Thermal Energy Storage Large-scale Thermal Energy Storage," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. January, pp. 56–72, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2009.07.036.
- [2] I. Sarbu and C. Sebarchievici, "", *Sustain.*, vol. 10, no. 1, 2018, doi: 10.3390/su10010191.
- [3] I. Renewable and E. Agency, "Thermal Energy Storage Technology Brief E17," no. January, 2013.
- [4] T. Bauer, W.-D. Steinmann, D. Laing, and R. Tamme, "Thermal Energy Storage Materials and Systems," *Annu. Rev. Heat Transf.*, vol. 15, no. 15, pp. 131–177, 2012, doi: 10.1615/annualrevheattransfer.2012004651.
- [5] A. Haselbacher, "An Overview of Thermal Energy Storage," no. January 2012, 2015.
- [6] A. Volkova, "Energia salvestamine," 2020.
- [7] A. Kumar and S. K. Shukla, "A Review on Thermal Energy Storage Unit for Solar Thermal Power Plant Application," *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 462–469, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.728.
- [8] M. Johnson, M. Fiss, T. Klemm, and M. Eck, "Test and analysis of a flat plate latent heat storage design," *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 662–671, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.221.
- [9] R. G. Reddy, "Molten Salts: Thermal Energy Storage and Heat Transfer Media," *J. Phase Equilibria Diffus.*, vol. 32, no. 4, p. 269, 2011, doi: 10.1007/s11669-011-9904-z.
- [10] N. V Khartchenko and V. M. Kharchenko, *Advanced Energy Systems*. CRC Press, 2013.
- [11] K. Nithyanandam and R. Pitchumani, "Optimization of an encapsulated phase change material thermal energy storage system," *Sol. Energy*, vol. 107, pp. 770–788, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.06.011>.
- [12] A. Shukla, "Latent heat storage through phase change materials," *Resonance*, vol. 20, no. 6, pp. 532–541, 2015, doi: 10.1007/s12045-015-0212-5.
- [13] S. S. Narayanan *et al.*, "Development of sunlight-driven eutectic phase change material nanocomposite for applications in solar water heating," *Resour. Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 272–279, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.12.004>.
- [14] A. J. De Jong, F. Trausel, C. Finck, L. Van Vliet, and R. Cuypers, "Thermochemical heat storage - System design issues," *Energy Procedia*, vol. 48, no. January 2015, pp. 309–319, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.02.036.

- [15] B. Mette, H. Kerskes, and H. Drück, "Concepts of long-term thermochemical energy storage for solar thermal applications - Selected examples," *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 321–330, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.11.038.
- [16] "2017 06 Utilitas_Eesti Biokütuste Liit." .
- [17] Eesti Arengufond, "Kaugkütte energiasääst," pp. 1–102, 2013, [Online]. Available: https://energiatalgud.ee/img_auth.php/4/46/Eesti_Arengufond._Kaugkütte_energiäsääst.pdf.
- [18] R. Vaks, "Current and future developments of district heating in Estonia District Heating in Estonia," 2018.
- [19] J. M. Sala, "20 - Thermal energy storage (TES) systems for cogeneration and trigeneration systems," in *Woodhead Publishing Series in Energy*, L. F. B. T.-A. in T. E. S. S. Cabeza, Ed. Woodhead Publishing, 2015, pp. 493–509.
- [20] T. Energy, S. Assessment, F. O. R. Biomass, C. Heat, and P. Station, "BIOMASSIL TÖÖTAVA KO OSTOOTMISJAAMA SOOJUSE THERMAL ENERGY STORAGE ASSESSMENT FOR BIOMASS COMBINED HEAT," 2018.
- [21] Department for Business Energy & Industrial Strategy, "Evidence Gathering: Thermal Energy Storage (TES) Technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, pp. 1–85, 2016, [Online]. Available: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/545249/DELTA_EE_DECC_TES_Final__1_.pdf.
- [22] T. Vallavalitsus, "Türi valla Türi linna soojusmajanduse arengukava," no. 4, 2018.
- [23] I. Krupenski, "Paldiski Linna Soojusmajanduse Arengukava Aastateks 2016-2026," no. 096048, p. 39, 2016, [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/aktiivisa/4211/0201/6053/arengukava.pdf>.

LISAD

Lisa 1a Türi Vabriku

Values	01.01.2019	01.02.2019	01.03.2019	01.04.2019	01.05.2019	01.06.2019	01.07.2018	01.08.2018	01.09.2018	01.10.2018	01.11.2018	01.12.2018	Üldkokkuvõte
SOE tootmine MWh	2 037,10	1 591,00	1 641,10	958,40	632,40	245,60	245,50	242,50	406,80	1 029,70	1 420,50	1 843,90	12 294,50
SOE müük MWh	1 841,23	1 419,90	1 447,53	820,89	514,47	165,73	162,05	163,73	320,15	899,93	1 267,71	1 658,30	10 681,62
Trassikadu MWh	195,87	171,10	193,57	137,51	117,93	79,87	83,45	78,77	86,65	129,77	152,79	185,60	1 612,88
Trassikadu %	9,6%	10,8%	11,8%	14,3%	18,6%	32,5%	34,0%	32,5%	21,3%	12,6%	10,8%	10,1%	13,1%
Õli kulu KG	4 675,93	4 600,75	315,68	1 382,24	0,00	0,00	0,00	4 368,71	2 781,52	1 591,52	835,61	569,24	21 121,20
Õli kulu MWh	50,50	49,69	3,41	14,93	0,00	0,00	0,00	47,18	30,04	17,19	9,02	6,15	228,11
HAKE kulu M3	3 080,60	2 209,00	2 475,80	1 259,00	661,60	384,60	359,40	366,60	603,20	1 423,20	2 038,20	2 644,20	17 505,40
HAKE kulu MWh	2 464,48	1 767,20	1 980,64	1 062,88	572,95	332,10	287,52	293,28	482,56	1 138,56	1 630,56	2 115,36	14 128,09
GAAS kulu M3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gaasi kulu MWh	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ELEKTER kulu MWh	29 813,00	24 030,00	23 384,00	17 026,00	10 920,00	0,00	8 695,00	9 259,00	10 431,00	17 896,37	22 133,00	27 223,00	200 810,37
Elektri kulu KWh müüdnud SOE MWh	16,19	16,92	16,15	20,74	21,23	0,00	53,66	56,55	32,58	19,89	17,46	16,42	18,80
Õlikatla tootmine MWh	42,11	41,43	2,84	12,45	0,00	0,00	0,00	39,34	25,05	14,33	7,53	5,13	190,21
Õlikatla tootmise osakaal %	2%	3%	0%	1%	0%	0%	0%	16%	6%	1%	1%	0%	2%
Puidukatla tootmine MWh	1 994,99	1 549,57	1 638,26	945,95	632,40	245,60	245,50	203,16	381,75	1 015,37	1 412,97	1 838,77	12 104,29
Puidukatla tootmise osakaal %	98%	97%	100%	99%	100%	100%	100%	84%	94%	99%	99%	100%	98%
Gaasikatla tootmine MWh	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gaasikatla tootmise osakaal %	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Õli erikulu KG/MWh	111,04	111,04	111,04	111,04	0,00	0,00	0,00	111,04	111,04	111,04	111,04	111,04	111,04
Õli erikulu L/MWh	121,64	121,64	121,71	121,71	0,00	0,00	0,00	120,12	120,12	120,78	121,73	121,73	121,07
Puidu erikulu	1,54	1,43	1,51	1,33	1,05	1,57	1,46	1,80	1,58	1,40	1,44	1,44	1,45
Gaasi erikulu M3/MWh	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Puidukatla kasutegur	80,9%	87,7%	82,7%	89,0%	110,4%	74,0%	85,4%	69,3%	79,1%	89,2%	86,7%	86,9%	85,7%
Õlikatla kasutegur	83,4%	83,4%	83,4%	83,4%	0,0%	0,0%	0,0%	83,4%	83,4%	83,4%	83,4%	83,4%	83,4%
Gaasikatla kasutegur	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Katlamaja keskmise kasutegur	81,0%	87,6%	82,7%	88,9%	110,4%	74,0%	85,4%	71,6%	79,4%	89,1%	86,6%	86,9%	85,6%
Süsteemi kasutegur	73,2%	78,2%	73,0%	76,2%	89,8%	49,9%	56,4%	48,3%	62,5%	77,9%	77,3%	78,2%	74,4%

Lisa 1b Türi Tehnika

Values	01.01.2019	01.02.2019	01.03.2019	01.04.2019	01.05.2019	01.06.2019	01.07.2018	01.08.2018	01.09.2018	01.10.2018	01.11.2018	01.12.2018	Üldkokkuvõte
SOE tootmine MWh	1 310,00	990,00	970,90	591,80	428,60	172,50	153,50	147,60	272,90	672,30	880,00	1 160,00	7 750,10
SOE müük MWh	1 126,23	863,38	885,18	474,33	316,41	80,29	68,82	71,56	183,89	570,01	762,88	1 006,11	6 409,09
Trassikadu MWh	183,77	126,62	85,72	117,47	112,19	92,21	84,68	76,04	89,01	102,29	117,12	153,89	1 341,01
Trassikadu %	14,0%	12,8%	8,8%	19,8%	26,2%	53,5%	55,2%	51,5%	32,6%	15,2%	13,3%	13,3%	17,3%
Õli kulu KG	1 818,19	0,00	0,00	1 240,56	94,57	0,00	0,00	3 957,11	2 673,97	745,45	246,63	0,00	10 776,48
Õli kulu MWh	19,64	0,00	0,00	13,40	1,02	0,00	0,00	42,74	28,88	8,05	2,66	0,00	116,39
HAKE kulu M3	1 968,80	1 550,60	1 569,60	863,60	506,80	288,80	194,80	240,40	327,40	976,00	1 219,00	1 722,20	11 428,00
HAKE kulu MWh	1 575,04	1 240,48	1 255,68	726,88	411,44	235,52	155,84	192,32	261,92	805,16	988,20	1 384,48	9 232,96
GAAS kulu M3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gaasi kulu MWh	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ELEKTER kulu MWh	21 702,50	17 312,30	18 291,80	11 932,90	9 213,00	0,00	5 683,30	5 671,10	7 232,40	11 673,90	16 064,60	19 172,40	143 950,20
Elektri kulu KWh müüdüd SOE MWh	19,27	20,05	20,66	25,16	29,12	0,00	82,58	79,25	39,33	20,48	21,06	19,06	22,46
Õlikatla tootmine MWh	16,37	0,00	0,00	11,17	0,85	0,00	0,00	35,64	24,08	6,71	2,22	0,00	97,05
Õlikatla tootmise osakaal %	1%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	24%	9%	1%	0%	0%	1%
Puidukatla tootmine MWh	1 293,63	990,00	970,90	580,63	427,75	172,50	153,50	111,96	248,82	665,59	877,78	1 160,00	7 653,05
Puidukatla tootmise osakaal %	99%	100%	100%	98%	100%	100%	100%	76%	91%	99%	100%	100%	99%
Gaasikatla tootmine MWh	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gaasikatla tootmise osakaal %	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Õli erikulu KG/MWh	111,04	0,00	0,00	111,04	111,04	0,00	0,00	111,04	111,04	111,04	111,04	0,00	111,04
Õli erikulu L/MWh	119,77	0,00	0,00	119,77	119,77	0,00	0,00	121,11	119,77	119,76	119,76	0,00	120,26
Puidu erikulu	1,52	1,57	1,62	1,49	1,18	1,67	1,27	2,15	1,32	1,47	1,39	1,48	1,49
Gaasi erikulu M3/MWh	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Puidukatla kasutegur	82,1%	79,8%	77,3%	79,9%	104,0%	73,2%	98,5%	58,2%	95,0%	82,7%	88,8%	83,8%	82,9%
Õlikatla kasutegur	83,4%	0,0%	0,0%	83,4%	83,4%	0,0%	0,0%	83,4%	83,4%	83,4%	83,4%	0,0%	83,4%
Gaasikatla kasutegur	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Katlamaja keskmise kasutegur	82,1%	79,8%	77,3%	79,9%	103,9%	73,2%	98,5%	64,3%	94,0%	82,7%	88,8%	83,8%	82,9%
Süsteemi kasutegur	70,6%	69,6%	70,5%	64,1%	76,7%	34,1%	44,2%	31,2%	63,3%	70,1%	77,0%	72,7%	68,6%

Lisa 1c Paldiski

Values	01.01.2019	01.02.2019	01.03.2019	01.04.2019	01.05.2019	01.06.2019	01.07.2018	01.08.2018	01.09.2018	01.10.2018	01.11.2018	01.12.2018	Üldkokkuvõtte
SOE tootmine MWh	4 340,90	3 468,20	3 685,10	2 256,90	1 533,70	753,60	875,40	846,90	1 032,50	2 332,10	2 813,10	3 737,60	27 676,00
SOE müük MWh	4 094,78	3 263,82	3 467,41	2 086,31	1 360,75	599,19	573,63	541,12	720,34	2 011,34	2 739,57	3 654,44	25 112,70
Trassikadu MWh	246,12	204,38	217,69	170,59	172,95	154,41	301,77	305,78	312,16	320,76	73,53	83,16	2 563,30
Trassikadu %	5,7%	5,9%	5,9%	7,6%	11,3%	20,5%	34,5%	36,1%	30,2%	13,8%	2,6%	2,2%	9,3%
Õli kulu KG	3 552,26	11 029,18	10 393,51	1 905,25	1 094,87	547,43	17 734,16	7 561,27	4 295,87	9 062,34	16 102,87	3 917,78	87 196,79
Õli kulu MWh	38,36	119,12	112,25	20,58	11,82	5,91	191,53	81,66	46,40	97,87	173,91	42,31	941,73
HAKE kulu M3	6 073,60	5 356,60	4 889,40	3 018,00	2 042,80	1 102,60	1 170,60	1 193,00	1 309,20	3 024,80	4 045,60	5 328,00	38 554,20
HAKE kulu MWh	5 077,88	4 507,60	4 093,76	2 556,68	1 686,40	939,40	941,88	979,56	1 080,16	2 533,28	3 312,24	4 450,00	32 158,84
GAAS kulu M3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gaasi kulu MWh	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ELEKTER kulu MWh	57 631,00	47 930,00	46 512,00	26 538,00	18 146,00	0,00	12 309,00	12 873,00	13 755,00	28 730,00	36 335,00	46 293,00	347 052,00
Elektri kulu KWh müüdüd SOE MWh	14,07	14,69	13,41	12,72	13,34	0,00	21,46	23,79	19,10	14,28	13,26	12,67	13,82
Õlikatla tootmine MWh	31,99	99,32	93,60	17,16	9,86	4,93	159,70	68,09	38,69	81,61	145,01	35,28	785,25
Õlikatla tootmise osakaal %	1%	3%	3%	1%	1%	1%	18%	8%	4%	3%	5%	1%	3%
Puidukatla tootmine MWh	4 308,91	3 368,88	3 591,50	2 239,74	1 523,84	748,67	715,70	778,81	993,81	2 250,49	2 668,09	3 702,32	26 890,75
Puidukatla tootmise osakaal %	99%	97%	97%	99%	99%	99%	82%	92%	96%	97%	95%	99%	97%
Gaasikatla tootmine MWh	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gaasikatla tootmise osakaal %	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Õli erikulu KG/MWh	111,04	111,04	111,04	111,04	111,04	111,04	111,04	111,04	111,04	111,04	111,04	111,04	111,04
Õli erikulu L/MWh	121,36	121,99	121,97	121,36	121,10	121,10	120,75	120,88	120,80	120,55	121,64	121,49	121,29
Puidu erikulu	1,41	1,59	1,36	1,35	1,34	1,47	1,64	1,53	1,32	1,34	1,52	1,44	1,43
Gaasi erikulu M3/MWh	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Puidukatla kasutegur	84,9%	74,7%	87,7%	87,6%	90,4%	79,7%	76,0%	79,5%	92,0%	88,8%	80,6%	83,2%	83,6%
Õlikatla kasutegur	83,4%	83,4%	83,4%	83,4%	83,4%	83,4%	83,4%	83,4%	83,4%	83,4%	83,4%	83,4%	83,4%
Gaasikatla kasutegur	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Katlamaja keskmise kasutegur	84,8%	75,0%	87,6%	87,6%	90,3%	79,7%	77,3%	79,8%	91,7%	88,6%	80,7%	83,2%	83,6%
Süsteemi kasutegur	80,0%	70,6%	82,4%	81,0%	80,1%	63,4%	50,7%	51,0%	64,0%	76,5%	78,6%	81,3%	75,9%

Lisa 2 Temperatuur Eestis 2018 / 2019

	Jaauuar	Veebruar	Märts	Aprill	Mai	Juuni	Juuli	August	September	Oktoober	November	Detsember	
Eesti keskmine õhutemperatuur 2018/2019	-4,3	0,2	1,1	2,2	10,6	17,6	19,9	18,3	14,2	7,8	3,5	-1,4	°C
paljuaastane keskmine	-3,5	-	-	4,6	10,4	14,4	17,4	16,3	11,5	6,7	1,4	-2	°C

<https://www.ilmateenistus.ee/kliima/kuukokkuvotted/>

Lisa 3 Soojuskadu

Vee Temperatuur (°C)	Soojuskadu vedelikupinnast		
	(w/m2)		
	Aurustumise kao	Kiirguskao	Kokku
30	252	158	410
35	504	221	725
40	757	284	1040
50	1135	347	1482
55	1513	426	1939
60	2081	504	2585
65	2711	567	3279
70	3468	662	4130
75	4350	741	5091
80	5485	820	6305
85	6809	914	7724
90	8449	1009	9458
100	10214	1135	11349

Sours: https://www.engineeringtoolbox.com/heat-loss-open-water-tanks-d_286.html

Lisa 4												
Turi 1				Turi 1				Turi 1				
energyPRO 4.6.797 25.05.2020 20:08				energyPRO 4.6.797 25.05.2020 20:18				energyPRO 4.6.797 25.05.2020 20:18				
Energy conversion, monthly, 24 h				Energy conversion, monthly, 48 h				Energy conversion, monthly, 72 h				
Calculated period: 01/2020 - 12/2020				Calculated period: 01/2020 - 12/2020				Calculated 01/2020 - 12/2020				
Heat demand [MWh]				Heat demand [MWh]				Heat demand [MWh]				
165,3 170,8 170,8				165,3 170,8 170,8				165,3 170,8 170,8				
Energy unit: katel				Energy unit: katel				Energy unit: katel				
Fuel consum. [MWh]				Fuel consum. [MWh]				Fuel consum. [MWh]				
186,6 193,3 186,6				186,6 186,6 193,3				186,6 186,6 193,3				
Heat Storage Loss (total for site) [MWh]				Heat Storage Loss (total for site) [MWh]				Heat Storage Loss (total for site) [MWh]				
0 0 0				1 1 1				1 1 1				
Tsüklide kogus				Tsüklide kogus				Tsüklide kogus				
27				13				9				
<hr/>												
Turi 2				Turi 2				Turi 2				
energyPRO 4.6.797 25.05.2020 20:46				energyPRO 4.6.797 25.05.2020 20:55				energyPRO 4.6.797 25.05.2020 21:14				
Energy conversion, monthly,24				Energy conversion, monthly,48 h				Energy conversion, monthly,72h				
Calculated 01/2020 - 12/2020				Calculated 01/2020 - 12/2020				Calculated 01/2020 - 12/2020				
Heat demand [MWh]				Heat demand [MWh]				Heat demand [MWh]				
79,8 82,4 82,4				79,8 82,4 82,4				79,8 82,4 82,4				
Energy unit: katel				Energy unit: katel				Energy unit: katel				
Fuel consum. [MWh]				Fuel consum. [MWh]				Fuel consum. [MWh]				
86,7 93,3 90				89,4 91,7 91,7				88,9 90 94,4				
Tsüklide kogus				Tsüklide kogus				Tsüklide kogus				
28				14				9				
<hr/>												
Paldiski				Paldiski				Paldiski				
energyPRO 4.6.797 25.05.2020 21:23				energyPRO 4.6.797 25.05.2020 21:27				energyPRO 4.6.797 25.05.2020 21:30				
Energy conversion, monthly, 24 h				Energy conversion, monthly, 48 h				Energy conversion, monthly, 72 h				
Calculated 01/2020 - 12/2020				Calculated 01/2020 - 12/2020				Calculated 01/2020 - 12/2020				
Heat demand [MWh]				Heat demand [MWh]				Heat demand [MWh]				
597,5 617,4 617,4				597,5 617,4 617,4				597,5 617,4 617,4				
Energy unit: katel				Energy unit: katel				Energy unit: katel				
Fuel consum. [MWh]				Fuel consum. [MWh]				Fuel consum. [MWh]				
659,9 692,7 681,6				660,5 699,4 669,9				656,6 706 673,3				
Tsüklide kogus				Tsüklide kogus				Tsüklide kogus				
18				9				6				