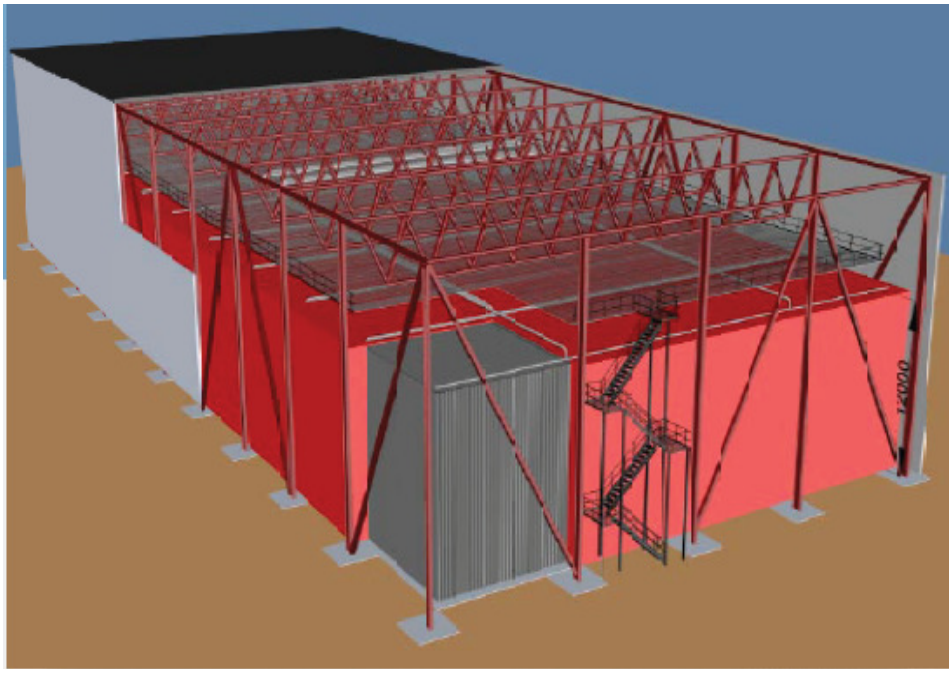
Kõrgtemperatuurse soojussalvesti kasutamise võimalused Eestis.



ARENGUFOND
ESTONIAN DEVELOPMENT FUND

Sisukord.

1. Sissejuhatus 3
2. Lühikokkuvõte 4
3. Kõrgtemperatuurne soojussalvesti(KTSS) 5
4. Kõrgtemperatuursete soojussalvestite(KTSS) kasutamise võimalused Eesti elektrijaamades ja katlamajades. 7

4.1 KTSS kasutamine kondensatsioonžiimis töötavas elektrijaamas 7
4.2. Koostootmisjaam 8
4.2.1. Koostootmisjaam aurumootori ja KTSS-ga 8
4.2.2. Koostootmisjaam auruturbiini ja KTSS-ga 8
4.2.3. KTSS kasutamine ORC tehnoloogial põhinevas koostootmisjaamas 10
4.3. Katlamaja 12
5. Soojuskoormused Eestis 14
6. KTSS paigaldamise majanduslik efekt 16
7. KTSS paigaldamise keskkonnamõju 17
8. Kokkuvõte 19
9. Kasutatud kirjandus 20

Lisad:

1. AF Consult hinnang potentsiaalsete CHP-de asukohtade kohta Eestis 22
2. Koormusgraafikud 23
3. Tüüpkoormusgraafik 24
4. Katlamajade asendamine(Excel)
5. Haapsalu soojusgraafik 26
6. Merirahu elemurajooni soojavee tarbimise graafik 28
7. Biomassi katel 28
8. Heitmed puidu põletamisel ja keskkonnatasud 29
9. Skeem. ORC tehnoloogia 30
10. Mobiilne katlamaja 31
11. Soojusülekande õlid 32
12. 5 MWs+1,25 MWe CHP(ORC) kõrgtemperatuurse soojussalvestiga(Excel)

1. Sissejuhatus

Eesti energiamajanduse pikaajalise arengukava uuendamisel on vajalik kaaluda kõikide võimalike tehniliste uuenduste rakendamise võimalusi elektri ja soojuse tootmisel. Tehnoloogiate kiire areng on andmas võimalust hajutada elektri tootmist ja suurendada elektri ja soojuse koostootmise osakaalu kasutades ära olemasolevat soojuse tarbimist. Sealjuures tuleb arvestada energiasäästu mõju eriti väikese tarbimisega kaugküttevõrkudes. Arengukava uuendamisel peame hindama väikeste kaugküttevõrkude jätkusuutlikust ja võrdlema kohaliku kütte ja kaugkütte majanduslikku efektiivsust. Samas tuleb hinnata ja võrrelda soojuse ja elektri koostootmisest tulenevat majanduslikku efekti võrreldes soojuse tootmisega katlamajas.

Seoses elektritootmises üha suuremat osakaalu omava muutuva iseloomuga elektritootmise arenguga on teravalt päevakorral energia salvestamine ja ajas kiirelt muutuva toodangu vastavusse viimine tarbimisega. Erilist tähelepanu on pööratud päikesesest ja tuulest toodetud energia salvestamisele. Välja on töötatud kõrgtemperatuursed soojussalvestid energia salvestamiseks ja vajalikul hetkel väljastamiseks.

Käesoleva töö ülesandeks on uurida kas on võimalik kasutada kõrgtemperatuurseid soojussalvesteid elektri tootmise efektiivistamiseks olemasolevates elektrijaamades ning katlamajade asendamiseks koostootmisjaamadega koos soojussalvestiga. Sealjuures soojussalvesti ülesandeks on koostootmises põletusprotsesside optimeerimine ja elektrijaama aastase tööaja pikendamine.

Täiendavalt hindame KTSS kasutamise võimalust katlamajde töö optimeerimisel.

2. Lühikokkuvõte.

Tahkele soojuskandale kõrgtemperatuurse soojuse salvestamine on uus trend energia salvestamisel. Norra firma Nest AS on välja töötanud betoonist soojussalvesti, kus soojuskandjaks kasutatakse termoõli ja salvestatakse soojust 400^0C juures.

Soojuse kõrgtemperatuurset salvestamist on võimalik kasutada katlamajades katelde töö optimeerimiseks. Sellisel juhul on vajalik olemasoleva katla ümberehitamist termõli kuumutamiseks vajalike küttepindade lisamisega. Elektritootmise suurendamiseks ja tootmise hajutamiseks on mõistlik asendada katlamaja koostootmisjaamaga, mis töötab ORC tehnoloogial. Soojussalvesti ORC skeemis võimaldab toota elektrit börsihinna suuremate väärtuste korral ja maksimeerida elektri tootmist.

Olemasolevatesse elektrijaamadesse(CHP) kõrgtemperatuurse soojussalvesti paigaldamine ei anna majanduslikku efekti, kuna need elektrijaamad on ehitatud kõige sobivamad olemasoleva koormuse suhtes. Kondensatsioonrežiimil töötavasse elektrijaama on soojussalvesti paigaldamine mõistlik ainult siis, kui jaama režiimid kõiguvad suurtes piirides ja on võimalik saavutada kütuse kokkuhoidu katla töö optimeerimisel. Puidukatla ümberehitus ja KTSS paigaldus ei anna piisavat majanduslikku efekti. Põlevkiviõli katla asendamine ORC tehnoloogial töötava koostootmisjaamaga koos KTSS on majanduslikult tasuv ja võimaldab alandada soojuse hinda kaugküttevõrgus. Väikeste katlamajade asendamine soojussalvestite ja mobiilse katlamajaga, mis toidab salvesteid on esialgsetel hinnangutel majanduslikult mõistlik. Lisaks tuleb hinnata kõiki tehnilisi aspekte ja ohutust. Samas on see väikeste soojusvõrkude säilumise üheks võimalikuks lahenduseks ja ka soojuse hinna alandamiseks.

Hinnangud on antud tuginedes Norra firma Nest AS uuringutele. Vajalik on uurida KTSS tootmisvõimalusi Eestis koos meile sobivate betoonisegude väljatöötamisega ja soojuskandjaks olevate termoõlide katsetamisega.

Soojussalvestite arendamisel oleks vaja pöörata tähelepanu võimalusele kasutada soojuskandjana termoõli asemel kuuma õhku.

3. Kõrgtemperatuurne soojussalvesti.

Kõrgtemperatuurne soojussalvesti (KTSS) on ette nähtud soojuse salvestamiseks. Esimesed uuringud teostati salvestitele temperatuurivahemikus 80-350 ^{0}C. Salvestuskeskkondi on kolm:

1. Salvestamine tahkele soojuskandjale
2. Salvestamine soojuskandja oleku muutust arvestades(tahke-vedel, vedel-gaas)
3. Keemilise reaktsiooni kasutamine salvestamisel

Oleme vaatluse alla võtnud soojuse salvestamise tahkele soojuskandjale. Tahke soojussalvesti katseeksemplar töötati välja Saksa valitsuse finantseeritud projekti „Midterm Storage Concepts-Futher Development of Solid Media Storage Systems“ raames 2001-2003.a. Töötati välja 350 kW/h katsesalvesti. Soojuskandjaks valiti termoõli ja salvestuskeskonnaks betoon. Betooni näitajad:

1. Tihedus 2700 kg/m3
2. Soojusmahtuvus 910 J/kgK 200^{0}C juures
3. Soojusjuhtivus 1,0 w/mK
4. Termiline paisumine 9,3 10^{-6}/K
5. Mahtuvus 0,68 kWh/m3K
6. Hind kg betooni kohta 0,04 €/kWh
7. Maksumus kwh kohta 0,78 €/kWh

Mineraalse õli näitajad:

1. Temperatuuri vahemik 200-300^{0}C
2. Tihedus 770 kg/m3
3. Termiline juhtivus 0,12 W/mK
4. Soojusmahtuvus 2,6 kJ/kgK

5. Mahtuvus 55 kWh/m3
6. Hind kg 0,23 €/kWh
7. Maksumus kWh 3,2 €/kWh

Arendustegevust on jätkanud mitmed firmad. Vaatleme Norra firma Nest AS avaldatud materjale projekti „Nest Thermal storage experimental“ põhjal. Raport on avaldatud TNO report 060-DTM-2012-00672/A 25.apr.2012.a.

Töö ülesandeks oli selgitada tahke soojussalvesti keskkonnana kasutatava betooni termiline ja füüsikaline käitumine korduva kuumutamise ja jahutamise tingimustes. Samuti uuriti kasutatud tsemendipasta käitumist korduval salvesti laadimisel ettenähtud temperatuurile ja tühjendamisel.

Tehtud uuringu ja katsete tulemusel NEST AS kinnitab,et uuritud salvestuselement omab järgmisi andmeid:

1. Soojusmahtuvus Qmax 408 MJ/m3 80-350^{0}C juures
2. Temperatuur stabiliseerus 2-3 tsükli jooksul
3. Tekkivad praod ei takista soojusvahetust
4. Soojussalvesti mass vähenes ja stabiliseerus 13-14 tsükli jooksul 350^{0}C töötemperatuuri korral vaba vee aurustumise tõttu.

Järeldus oli, et betoonsalvesti on sobilik kõrgtemperatuurseks soojussalvestiks. Soovitus oli jätkata uuringuid salvesti sobiva konfiguratsiooni leidmiseks.

Nest AS on välja töötanud kõrgtemperatuurse soojussalvesti elemendid. Salvestuselemente saab erineva mahtuvuse saavutamiseks paigutada konteineritesse ja seejärel isoleerida. Välja on töötatud kontsept 1000 MWh soojussalvestuse jaoks. KTSS koosneb soojusvahetist soojuskandjaks oleva termoõli kuumutamiseks laadimistsüklis ja auru genereerimiseks tühjendamistsüklis ning salvestuselementidest koos reguleerimisseadmetega, mis asuvad isoleeritud konteineris. Salvestustemperatuur on 600^{o}C või rohkem. Kõige kriitilisem on soojuskandjaks oleva õli temperatuuritaluvus ja selle hind.

4. Kõrgtemperatuursete soojussalvestite(KTSS) kasutamise võimalustest Eesti elektrijaamades ja katlamajades.

Vaatleme, kas on **tehniliselt** võimalik KTSS võimalik kasutada ja millist efekti on võimalik saavutada erinevates elektrijaamades ja katlamajades:

4.1. Kondensatsioon elektrijaam
4.2. Koostootmiselektrijaam(CHP)
  4.2.1. Aurumootor
  4.2.2. Auruturbiin
  4.2.3. ORC
4.3. Katlamaja

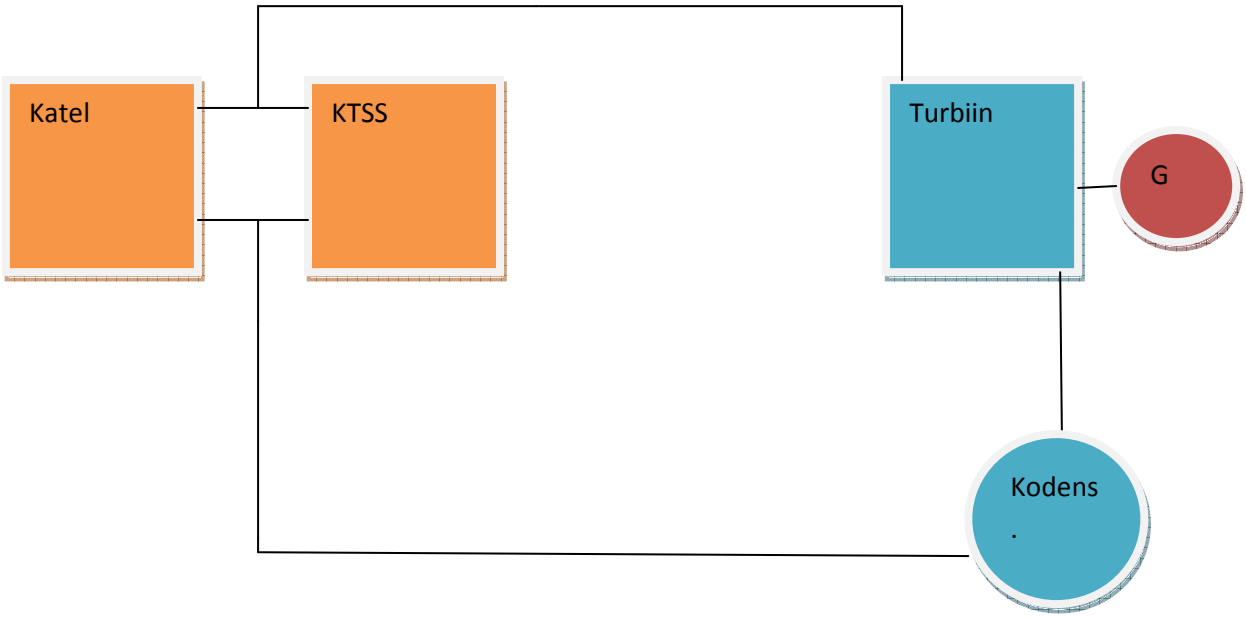
Eelduseks on võetud kohaliku kütuse(biokütus) kasutamine.

Eraldi vaatleme KTSS kasutamise võimalusi katlamajade töö optimeerimisel ja KTSS kasutamist soojuse transpordiks soojusallika juurest tarbijani või mobiilse katlamaja ehitust paiksete tarbijate juures asuvate soojussalvestite kütmiseks.

4.1. KTSS kasutamine kondensatsioonrežiimis töötavas elektrijaamas.

Olemasolevas SEJ on põletusržiimide optimeerimiseks ja elektritootmise maksimeerimiseks tarbimise tipu ajal (elektri hind börsil kõrgem) võimalik paigaldada olemasolevasse skeemi KTSS koos aurugeneraatori ja turbiini ning generaatoriga. Öisel ajal salvestatakse soojus KTSS ja soojust kasutatakse tipu ajal elektri tootmiseks läbi lisaks paigaldatud turbiini ja generaatori.. Katel töötab ühtlase režiimiga. Olemasoleva turbiini ja generaatori tööd saab optimeerida labi KTSS laadimise režiimi valiku.

Uute SEJ planeerimisel on võimalik optimeerida katla ja KTSS võimsust vastavaks auruturbiini ja generaatori nimivõimsusele. Selline skeem võimaldab katlal töötada optimaalses režiimis (Joonis nr.1). Öisel ajal salvestatakse soojus KTSS-sse ja tipu ajal töötatavad katel ja KTSS paralleelselt tootes maksimaalselt elektrit.



Joonis nr. 1 Kondensatsioonržiimil töötava elektrijaama ja KTSS põhimõtteline skeem.

4.2. Koostootmiselektrijaam.

Vaatleme eraldi aurumootori, auruturbiini ja ORC tsükliga elektrijaamadesse KTSS paigutamise võimalusi.

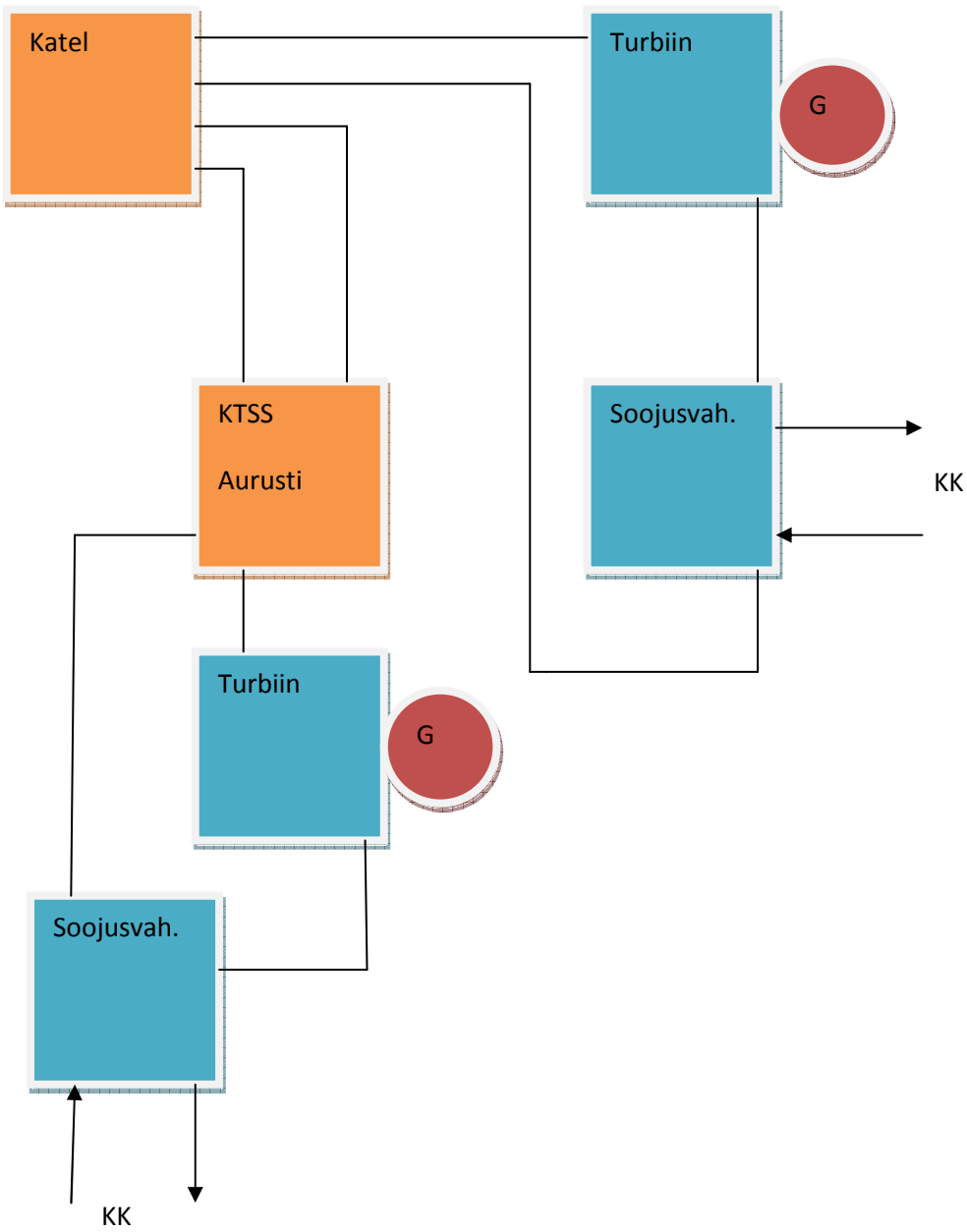
4.2.1 Koostootmisjaam aurumootori ja KTSS kasutamisega.

Aurumootorit kasutatakse koostootmisrežiimil elektrijaamades väikeste võimsuste korral. Aurumootoriga CHP suurus valitakse nii, et ta kataks kuni 55% soojuskoormusest. KTSS paigaldamine aurumootoriga CHP skeemi ei ole otstabekas, kuna nõuab nii soojussalvesti ja aurusti paigaldamist ja majanduslikult ei ole mõttekas.

4.2.2 Koostootmisjaam auruturbiini ja KTSS-ga.

Auruturbiiniga koostootmisjaam on klassikaline ja enim kasutatud viis toota soojust ja elektrit. Tänaseks välja ehitatud jaamad on optimeeritud soojuskoormuse katmiseks ja nende skeemides KTSS paigaldamise ei anna efekti. Uute jaamade planeerimisel on analoogselt kondensatsioonelektrijaamaga võimalik optimeerida katla nimivõimsust ja KTSS võimsust vastavaks auruturbiini ja generaatori nimivõimsusega saavutamaks maksimaalset elektritoodangut. Samuti on võimalik ehitada aurukoormuse olemasolul vasturõhuturbiin ja auru koormus katta KTSS vahendusel.

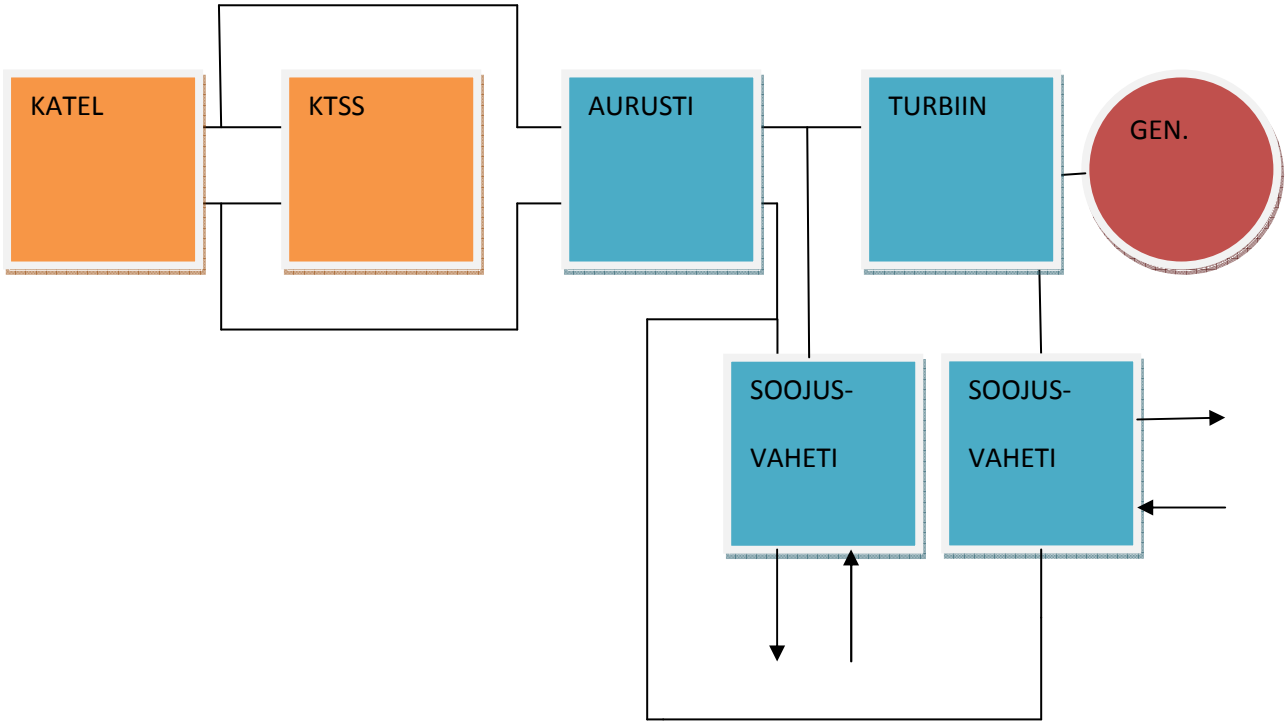
Suurimaks küsimuseks on auruparameetrite piisavus kõrge kasuteguriga salvestamiseks. Kui ehitada katel kahe erineva soojuskandja (vesi+termoõli) jaoks , on võimalik kasutada KTSS elektrijaama töö optimeerimiseks ja elektri tootmise maksimeerimiseks(joonis.nr.2) Suurim efekt saavutatakse KTSS paigaldamisega tsüklilise tarbimise iseloomuga elektrijaama skeemi. Lisas nr.3 on toodud näidisgraafik tööstusliku soojatarbija tarbimise kohta. KTSS paigaldamisel on võimalik tõsta elektrijaama nimivõimsust ja läbi salvestusseadme katta kogu soojuse vajadus.



Joonis nr.2 KTSS auruturbiiniga koostootmisjaamas.

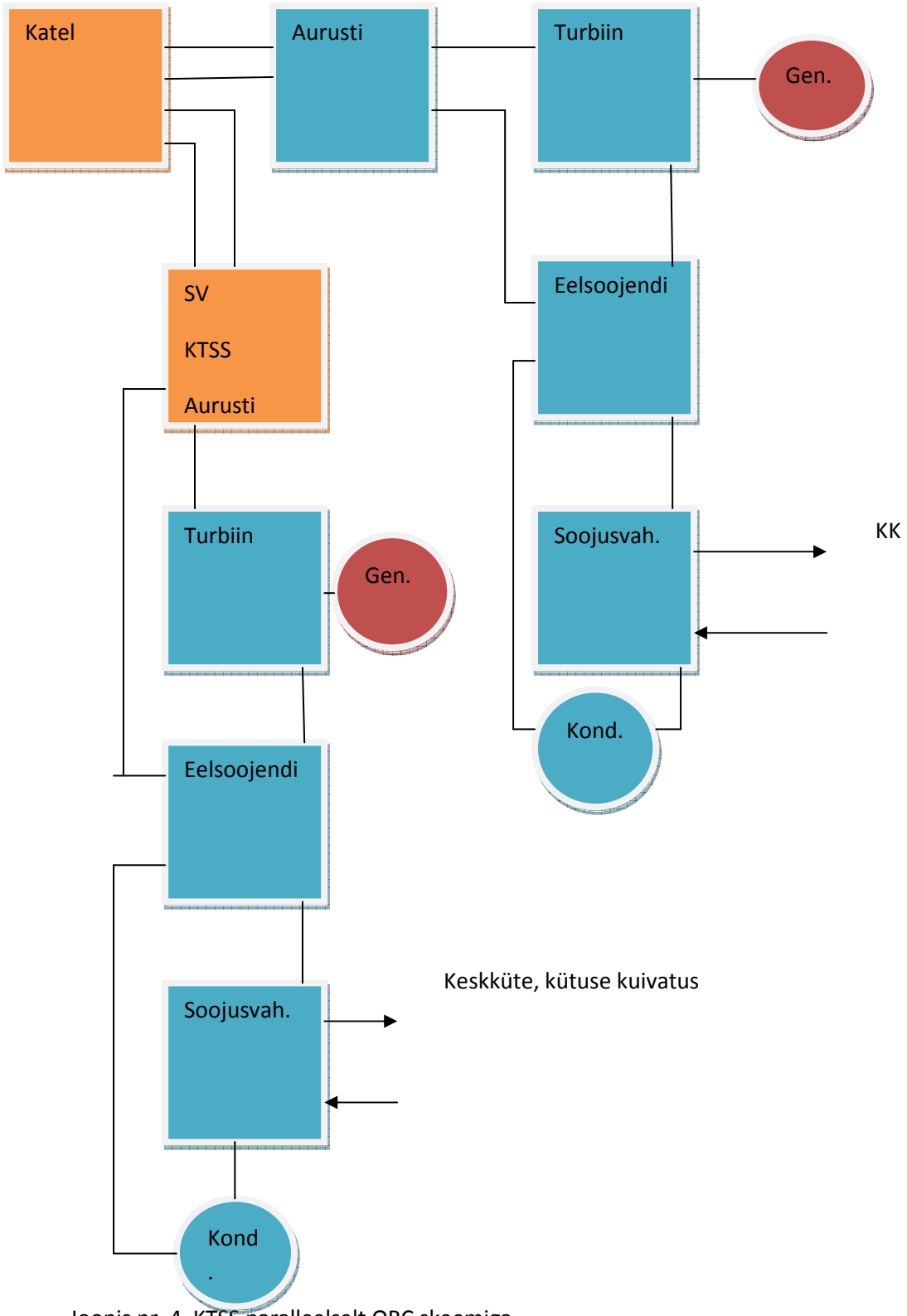
4.2.3. KTSS kasutamine ORC tehnoloogial põhinevas koostootmisjaamas.

ORC tehnoloogia kasutab soojuskandjana termoõli, mille puhul on lihtne samasse skeemi lülitada ka kõrgtemperatuurne soojussalvesti. Termoõlide andmed lisas 11.



Joonis nr. 3 Kõrgtemperatuurne soojussalvesti ORC skeemis

Soojussalvesti paigutamine paralleelselt katlaga võimaldab siluda ööpäeva ja nädalase soojuskoormuse kõikumisi. Soojuskoormuse kõikumised on põhjustatud temperatuuride erinevustest päeval ja öösel eriti kevadisel perioodil ning sooja vee tarbimise kõikumisest. Samuti mõjutab soojuse tarbimise iseloomu tööstuslike tarbijate olemasolu. Lisas nr.3 on toodud tüüpkoormusgraafik, kust on näha koormuste kõikumised. Sisuliselt on võimalik optimeerida põletusrežiime ja asendada sooja vee akumulatsioonipaak KTSS-ga. Samuti tuleb hinnata KTSS paigaldamisel katla võimsuse ja aurusti ning turbiini ja generaatori nimivõimsuste optimeerimise võimalust elektri tootmise maksimeerimiseks. Kahekontuurse katla ehitamisel on võimalik, analoogselt auruturbiiniga CHP-le, saavutada kõrgema temperatuuriga soojuse salvestamise kaudu erinevad võimalused elektrijaama töö optimeerimiseks(joonis.nr.4). Üheks võimalikuks skeemiks on KTSS panna tööle eraldi turbiini ja generaatoriga. Samast ahelast on võimalik võtta ka auru aurutarbijate toiteks ja läbitöötatud auruga kuivatada biokütust põlemisprotsesside parandamiseks.



Joonis nr. 4 KTSS paralleelselt ORC skeemiga

Lisas.nr. 12 on toodud majanduslikud arvutused 5MWs+1,25 MWe ORC tehnoloogial töötava koostootmisjaama ja KTSS kohta.

4.3 Katlamaja.

Olemasolevates katlamajades KTSS kasutamine ei ole põhjendatud, kuna katlavee temperatuurid on efektiivseks salvestamiseks liiga madalad. Võimalus on konstrueerida uus katel, kus paralleelselt vee kuumutamisega kasutatakse KTSS salvestuse jaoks eraldi termoõli tsirkulatsioonisüsteemi (joonis.nr.5). Sellise skeemi korral on võimalik optimeerida soojusvajaduse katmist suuremas osas ja optimeerida ka põletusrežiime. Katel saab töötada optimaalses režiimis ja ööpäevaste ning nädalaste kõikumiste silumiseks kasutame soojussalvestit. Samuti on võimalik katta suvisel ajal sooja vee andmist läbi KTSS-i, kusjuures katel töötab ainult periooditi salvesti laadimiseks.

Ameerikas on konstrueeritud biomassil töötavad katlad, milles on võimalik toota koldes oleva veesärgi vahendusel kaugkütteka vajalikku sooja vett ning torude süsteemid kus on ka ülekuumendi kõrgema väljundtemperatuuri saavutamiseks auru tootmisel. Selle baasil on lihtne, kasutades termoõli, saavutada vajalik õli temperatuur soojussalvestite laadimiseks. Hurst Biomass-TER katla skeem on lisas nr. 8.

Aluseks võttes 800 kW soojuskoormusega väikealevi modelleeritud soojuskoormuse graafikut on arvutatud võimalikud tootmisrežiimid koormusmaksimumi ajal, kevadisel üleminekuperioodil ja suvise minimaalse koormuse ajal.

Katla nimivõimsus 1000 KW.

Kasutegur 86%-90%

Kõrgtemperatuurne soojussalvesti mahtuvus 2000 kWh.

Katla töörežiim suvise minimaalse koormuse 80 KW juures:

Tööaeg 2,5 h, toodang 860x2,5=2150 KWh, samal ajal tarbimine 80x2,5=200 kWh,

Salvestamine 2150-200=1950 kWh, salvestuse kasutegur min. 90%, kadu seismisel päevas 0,1%,

Salvestist väljastatud soojus (1950x0.9)-2=1753 kWh,

Kaugküttevõrgu töö läbi KTSS 1753:80=21,9 tundi. Seega katlamaja töötab ööpäevas ligikaudu 2,5 tundi ja soojussalvesti tühjeneb 21,5 tundi.

Kevadsuvisel üleminekuperioodil keskmine koormus 400 kW.

Katla tööaeg 5 tundi, toodang 860x5=4300 kWh, samal ajal tarbimine 400x5=2000kWh,

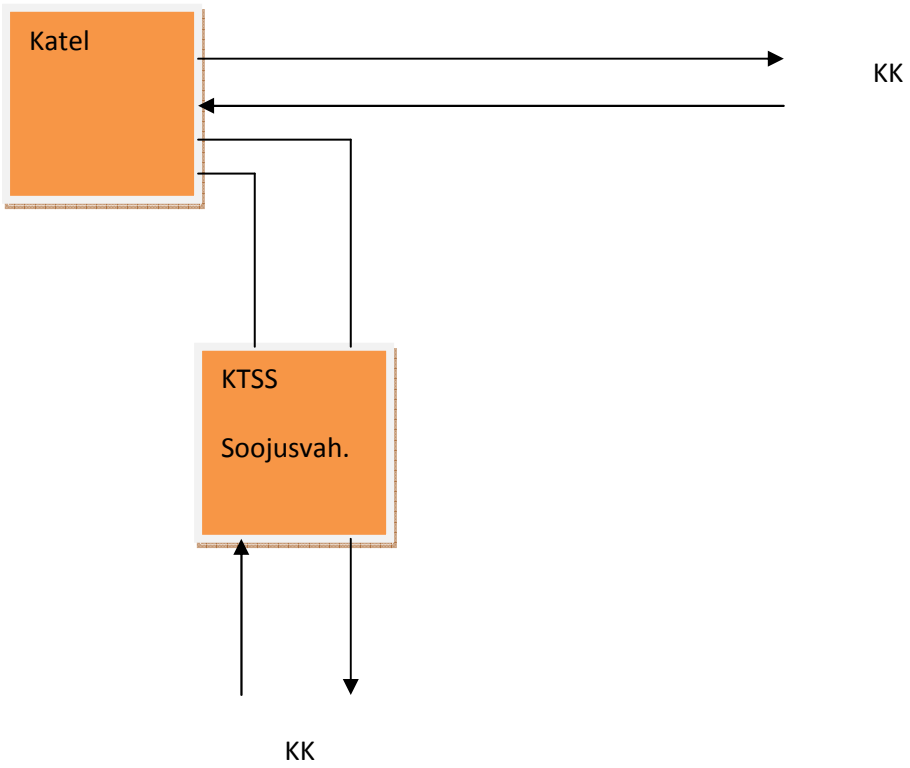
Salvestamine 4300-2000=2300, salvestuse kasutegur 90%, kadu seismisel päevas 0,1%,

(2300x0,9)-2=2068 KWh.

Salvestist väljastatud soojus 2068-400X5=70kWh, KTSS tööaeg 2000:400= 5 tundi,

Seega katlamaja töötab järjest viis tundi viietunnise seisu järel. Samas tööaeg varieerub sõltuvalt välisõhu temperatuuridest ja koormusest.

Koormusmaksimumi ajal töötab katel praktiliselt nimivõimsusel ja KTSS kasutusaeg on oluliselt lühem.



Joonis.nr.5 Katel koos KTSS-ga

Katlamaja töö optimeerimine annab tänu katla töötamisele kõige optimaalsemas režiimis e. nimivõimsusel mingil määral kütuse kokkuhoidu. Majanduslik sääst saavutatakse lisaks heitmete vähenemisele. Lisas nr. 4 on toodud majandusliku efekti arvutus KTSS paigaldamisel katlamaja skeemi. Kõrgtemperatuurse soojussalvesti maksumus on arvutatud Energy-Nest andmete alusel. 2 MWh soojussalvesti hind on hinnanguliselt 50 000 EUR. Katla ümberehituse maksumus on hinnanguliselt 50 000 EUR(Katla tootjad ei nõustunud hinda ütlema). Uue katla maksumus on sõltuvalt tootjast kuni 384 000 EUR.

Puidukatla ümberehitusel majanduslik efekt ei ole piisav investeeringu tegemiseks. Põlevkiviõlil töötava katla asendamine oleks mõistlik juba ORC tehnoloogial töötava koostootmisjaamaga + KTSS.

Täiendav võimalus KTSS kasutamiseks on soojuse transport salvestatud kujul soojuse tootja juurest tarbija juurde. Selleks konstrueeritakse soojusvaheti ja salvestus ühtsesse konteinerisse, mida on võimalik transportida. Näiteks kondesnsatsioonelektrijaamas vaheltvõtu olemasolul on võimalik salvestada suuri võimsusi ja transportida tarbija juurde.

Idee tasandil võiks projekteerida väikeste soojustarbijate soojuse vajaduste rahuldamiseks regionaalse mobiilse kohalikke kütuseid kasutava katla, mille soojuskandjaks on termoõli ja millega laetakse tarbijate juures olevaid KTSS-d. Langeb ära vajadus kohalike katelde ehitamiseks. Katel koos kütuse etteande süsteemiga paigaldatakse trilerile. Katla suurus valitakse vastavalt katla teeninduspiirkonnas olevatele soojuskoormustele ja teenindavate kõrgtemperatuursete soojussalvestite arvule. KTSS suurus valitakse vastavalt soojuskoormusele ja salvestamise sagedusele, mida arvutatakse kompleksel kogu mobiilse katla toitepiirkonna jaoks. Skeem lisa 10.

Lisas nr.4 on toodud majandusliku efekti arvutus nelja 0,4 MW õlikatla asendamise kohta 2,5 MW mobiilse katlamaja ja nelja 5 MWh kõrgtemperatuurse soojussalvestiga. Arvutus on indikatiivne ja ei oska ette näha kõiki muutujaid. Samas ei oska ette näha idee rakendamist raskendavaid asjaolusid: ohutus, tehnilised nüansid kütuse etteandmisel jne.

5. Soojuskoormused Eestis.

Eestis toodetav soojus katlamajades on toodud tarbijaliigiti ja diferentseeritult katelde võimsusega. Vaatluse all on katlad kuni 1 MWs ja 1-5 MWs. Andmed on võetud Statistikaameti tabelist KE044.

	Sektorid									
			Elamud, ettevõtted ja teenused							
Katelde võimsus, MW_s	Tööstus		Kaugküte		Muu kui kaugküte (äri ja avalik sektor)		Muu kui kaugküte (elamud)		Muu	
	Toodang	Katelde keskmine nimi-võimsus	Toodang	Katelde keskmine nimi-võimsus	Toodang	Katelde keskmine nimi-võimsus	Toodang	Katelde keskmine nimi-võimsus	Toodang	Katelde keskmine nimi-võimsus
	MWh_s	MW_s	MWh_s	MW_s	MWh_s	MW_s	MWh_s	MW_s	MWh_s	MW_s
kuni 1	335000	0,303	389000	0,457	334000	0,217	2 200 000	0,01	46 000	0,244
1 – 5	604000	2,345	723000	2,264	263000	2,301	-	-	63 000	1,851

Tabel.nr.1 Andmed soojuse tootmise kohta 2011.a.

Vaatleme kaugküttevõrkude andmeid, kuna suurim koostootmise potentsiaal on just seal ja nende andmete analüüsist selgub ka KTSS kasutamise efektiivsus.

Kaugkütte katlamajad kasutasid 2011.a. järgmisi kütuseid:

Kütuse liik	Katelde arv tk.	Toodetud soojus MWh
Turvas	21	97000
Puit	114	1022000
Põlevkiviõli	332	360000
Gaas	462	1544000

Kahjuks ei saa saadud andmeid otseselt aluseks võtta, kuna Statistikaamet ei too välja kasutatud kütuseid ja soojuse toodangut katelde nimisuuruste kohta kohta.

Soojuskoormuste määramiseks kaugkütte piirkondade kaupa tuleb teha otseküsitlusi.

AF Consult AS töös „Eesti riigi soojuse ja elektrienergia koostootmise potentsiaali hindamine“ töö nr.ENE 1120 2011.a. on toodud hinnangud võimalike CHP-de tehnoloogiate ja asukohtade osas.

Hinnang on toodud lisas.1.

Hinnangu aluseks on tüüpilised soojuskoormuskõverad ja kohalike omavalitsuste prognoosid soojuse tarbimise osas.

Eestile on iseloomulik väga väikese soojustarbimisega väikeasulad ja väikelinnad, kus veel ei ole koostootmist. Seega on koostootmise potentsiaal, lisaks lisas nr.1 toodule, just nende väikeasulate soojuskoormuse baasil.

Vaatleme kolme erinevat soojusgraagikut: väikelinn suvise tarbimiseta, väikelinn suvise tarbimisega ja väikealev suvise tarbimisega.

Jõgeva soojusgraafik (vt. Lisa2.) on tüüpiline linnale, kus ei toodeta suvel sooja vett ja väikeasulatele kus tarbitakse soojust ka suvisel perioodil. Hinnangute aluseks on ka Jõgeva katlamaja tunnimõõtmised.

Alavere asula soojusgraafik(vt.lisa 2) on tüüpiline Eesti väikeasulatele, kus soojuse maksimaalne tarbimine jääb vahemikku 300 kW kuni 1 MW ja kus toodetakse ka suvel sooja vett. Selle graafiku baasil on võimalik modelleerida 800 kW maksimaalse soojuskoormusega graafikut.

AF Cosult AS on modelleerinud tüüpilised soojusgraafikud Eesti väikelinna soojustarbimise kohta ja tsüklilise iseloomuga tööstusliku soojatarbija kohta. Lisas nr.3 on toodud nimetatud tüüpilised soojusgraafikud, kust on näha tarbimise kõikumised ööpäevas ja nädalases lõikes.

Haapsalu on huvipakkuv soojusvõrk oma tarbimisega, kuna seal ei kasutata veel koostootmist ja soojust toodetakse puidukatla ja õlikateldega. Lisas nr.5 on toodud Haapsalu linna soojusgraafik. Hinnangute andmise aluseks on veel Haapsalu katlamaja tunnimõõtmised.

Suvisel ajal soojuskoormuse hindamiseks on vajalik teada sooja vee tarbimise tsüklilisust. TTÜ Soojustehnika Instituudi töös „Merirahu elamurajooni koostootmisjaama ja soojuspumba kasutusvõimaluste optimeerimine“ on toodud 2009 a. mõõdetud soojavee tarbimiskgraafikud, millest on näha, et sooja vee tarbimine suvisel ajal on küllalt ühtlane ja ei sõltu nädalapäevadest. Erinevus kõigub vahemikus +/- 9%.

Nende tunnimõõtmiste ja soojusgraafikute alusel saame hinnata millises vahemikus on vaja reguleerida soojuse tootmist ja arvutada KTSS kasutamise majanduslikku efektiivsust soojuse tootmise optimeerimisel ja koostootmisel elektritootmise maksimeerimisel tarbimistipu ajal.

Hinnanguliselt on võimalik paigaldada kuni 1000 kW soojuskoormusega keskkütte katlamajades puitkatelde ümberehitusega koos 40 kõrgtemperatuurset soojussalvestit. Koos õlikatla asendusega kahekontuurse puidupõletuskatlaga 160 KTSS.

ORC tehnoloogial põhinevaid koostootmisjaamu ja KTSS, mille soojuskoormus ületab 5 MW, on võimalik ehitada Eesti väikelinnadesse ja tööstustele 17 tk.(lisa nr.1). Sealjuures Werol, Helme, Paide ja Kuressaare on juba ehitatud või ehitamisel.

ORC tehnoloogial põhinevaid kuni 5MW võimsusega koostootmisjaamu koos KTSS on võimalik Eestisse ehitada hinnanguliselt 25 tk.

Kasutades kaugkütte soojuse potentsiaali koostootmiseks eeltoodud ulatuses oleks uute ORC tehnoloogiat kasutavate koostootmisjaamade elektriline toodang 300 GWh aastas.

6. KTSS paigaldamise majanduslik efekt.

Hindame KTSS paigaldamisel saadavat majanduslikku efekti kuni 1MW soojuskoormuse korral katlamajja ja koostootmisjaama (ORC) . Samuti hindame kondensatsioonrežiimil töötavas elektrijaama KTSS kasutamisest tulenevat efekti. Sealjuures tuleb täiendavalt arvestada eelduseks olnud kohaliku kütuse kasutamisest tulenevat sotsiaalmajanduslikku mõju.

Lisas nr. 4 on toodud arvutused majandusliku efekti kohta 800 kW soojuskoormusega katlamaja asendamisel elektri koostootmisjaama(ORC) ja KTSS –ga ning arvutused majandusliku efekti kohta KTSS lülitamisel katlamaja skeemi koos katla ümberehitusega kõrgtemperatuurse õlikontuuri lisamiseks. Samuti on toodud indikatiivne majandusliku efekti arvutus mobiilse katlamaja ja KTSS kohta väikeste katlamajade asendamisel.

Põlevkiviõlil töötava 800 kW tipukoormusega katlamaja asendamine ORC tehnoloogial töötava koostootmisjaamaga on majanduslikult tasuv. Investeeringu suurus on 2,05 milj.eurot. Aastane kokkuhoid põlevkiviõli mitteostmisest on 157 934 Eurot. Hakkepuidu tootmisel kohapeal saab omavalitsus täiendava sissetuleku.

Puidukatlale KTSS lisamine ei anna piisavat efekti. Investeering katla ümberehituseks ja KTSS paigaldamiseks on 100 000 EUR.

5 MWs ja 1,25 MWe ORC tehnoloogial töötava koostootmisjaama paigaldatav 10 MWh mahtuvusega KTSS ei anna kütuse kokkuhoidu.Arvutused on toodud lisas nr.12. KTSS investeering on orienteeruvalt 244 000 eurot.

Eraldi on lisas nr. 12 toodud arvutused majandusliku efekti kohta KTSS paigaldamisel kondensatsioonelektrijaama. Arvutused on tehtud Eesti SEJ andmete alusel. KTSS paigaldamisel koos täiendava turbiini ja generaatoriga on majanduslik efekt saavutatav tarbimise tiputundidel müüdava suurema elektri hinna kaudu. Modelleeritud koormuskõvera korral oli NPV positiivne ja IRR 8%.

Ereldi on antud ligikaudne hinnang katlamajade asendamise kohta mobiilse katlamaja ja KTSS-ga. Hinnang on lisas nr.4. Majanduslikult on mõistlik näites toodud nelja 400 KW katlamaja asendamine mobiilse 2,5 MW katlamaja ja nelja 5 MWh mahtuvusega kõrgtemperatuurse soojussalvestiga eeldusel, et soojusvõrgud on küllalt lähedal üksteisele.

7. KTSS paigaldamise keskkonnamõju.

KTSS paigaldamine elektrijaama annab kokkuhoidu kütuste põletamise optimeerimise läbi. Öistel minimaalsetel koormustel kondensatsioon elektrijaamas salvestatakse katlast väljastatav soojus KTSS-s ja soojus kasutatakse elektri tootmiseks tiputarbimise ajal. Kütuse säästu saame võrrelda KTSS vahendusel toodetud elektri kütusekulu ja öise miinimumi ajal kulutatud kütusekulu erinevusega. Olulist kütuse säästu ei ole, aga toodetud elekter on realiseeritud kallima hinnaga.

KTSS paigaldamine koos ORC tehnoloogial koostootmisrežiimil töötava elektrijaamaga võimaldab optimeerida soojuse tootmist.

KTSS paigaldamine katlamajja võimaldab vähendada kütusekulu ja heitmeid. 800 kW katla kütuse ja heitmete vähenemise suurused on järgmised:

Puidu vajaduse vähenemine aastas on ainult 8,4 tonni. Heitmete vähenemine aastas on minimaalne.

NOx-0,0009 t,

CO-0,1 t,

SO2-0,007 t,

tahked osad-0,021 t,

lenduv orgaanika-0,004 t,

Põlevkiviõli 800 kW koormusega katla asendamisel puitu põletava ORC koostootmisjaamaga ja KTSS.ga vähendame SO2 heitmeid 6 tonni aastas ja CO2 heitmeid 1083 tonni aastas.

Arvestades Eesti soojuskoormusi ja prognoosi koormuste muutumise kohta on võimalik hinnata renoveeritavate katlamajade(KM) arvu, ehitatavate koostootmis elektrijaamade(ORC) arvu ja kondensatsioonelektrijaamades(SEJ) paigaldatavate KTSS arvu ning selle kaudu hinnata kogu keskkonnamõju vähenemist.

Tulemused on koondatud tabelisse:

Tootja liik.	Kütuse kokkuhoid t	CO t	NOx t	SO2 t	Lend.os. t	CO2 t	katelde arv tk
ORC+KTSS	põlevkiviõli 62 240			960*		173 338**	160
KM+KTSS	puit 336	4,0	0.04	0,3	0,84	-	40

***Põlevkiviõli SO2 eriheide 400 g/GJ**

****CO2 sisaldus tonnis põlevkiviõlis 2,785 t**

Kõrgtemperatuursete soojussalvestite paigaldamine katelde töö optimeerimiseks omab positiivset mõju keskkonnale.

8. Kokkuvõte:

Tahkele soojuskandale kõrgtemperatuurse soojuse salvestamine on uus trend energia salvestamisel. Norra firma Nest AS on välja töötanud betoonist soojussalvesti, kus soojuskandjaks kasutatakse termoõli ja salvestatakse soojust 400^0C juures. Täna saame tugineda oma hinnangutes ainult Saksamaal ja Norras tehtud uuringutele ja kõrgtemperatuurse soojussalvesti maksumuse hinnang on tuletatud Nest AS poolt tehtud kalkulatsioonidest. Salvesti maksumus toodetuna Eestis võib olla odavam aga see eeldab eraldi uuringuid ja katsetusi kohalike materjalide kohta koostöös TTÜ ja Eesti betoonifirmadega.

Soojuse kõrgtemperatuurset salvestamist on võimalik kasutada katlamajades katelde töö optimeerimiseks. Sellisel juhul on vajalik olemasoleva katla ümberehitamine termõli kuumutamiseks vajalike küttepindade lisamisega. Olemasoleva puidukatla ümberehitamine ei anna piisavat majanduslikku efekti. Näiteks 1,0 MW puidukatla ümberehitamine termoõli kontuuri lisamisega ja KTSS paigaldamisega annab aastas säästu 0,5 tuhat eurot aga investeering on 100 tuhat eurot.

Elektritootmise suurendamiseks ja tootmise hajutamiseks on mõistlik asendada katlamaja koostootmisjaamaga, mis töötab ORC tehnoloogial. Soojussalvesti ORC skeemis võimaldab toota elektrit börsihinna suuremate väärtuste korral ja maksimeerida elektri tootmist. Näiteks 0,8 MWs põlevkiviõli küttel katlamaja asendamisel 0,8 MWs + 0,2 MWe ORC tehnoloogial töötava koostootmisjaamaga on aastane sääst ainuüksi põlevkiviõli mitteostmisest 158 000 eurot. Arvutused näitavad, et katlamaja asendamisel ORC CHP-ga koos KTSS paigaldamisega on võimalik alandada tarbijatele müüdava soojuse hinda ja seega säilitada suhteliselt väikesed kaugküttevõrgud.

Olemasolevatesse elektrijaamadesse kõrgtemperatuurse soojussalvesti paigaldamine ei anna majanduslikku efekti, kuna need elektrijaamad on ehitatud kõige sobivamad olemasoleva koormuse suhtes.

Kondensatsioonrežiimil töötavasse elektrijaama on soojussalvesti paigaldamine mõistlik ainult siis, kui jaama režiimid kõiguvad suurtes piirides ja on võimalik saavutada kütuse kokkuhoidu katla töö optimeerimisel. Majanduslikult on mõistlik paigaldada olemasoleva katla toitele KTSS koos lisaturbiini ja generaatoriga. Öise minimaalse koormuse juures on võimalik katelt mitta alla koormata, vaid töötades optimaalses režiimis salvestada soojus ning toota sellest elektrit kõrgete hindadega tiputarbimise ajal.

Väikeste kaugküttevõrkude säilitamiseks ja soojuse hinna alandamiseks on mõistlik töötada välja mobiilse katlamaja kontseptsioon koos lokaalsete soojustarbijate juures asuvate kõrgtemperatuursete soojussalvestitega. Sellise kontseptsiooni juures on võimalik väikeste üksteisele piisavalt lähestikku asuvad õlikatlamajad asendada soojussalvestitega, mis annab märgatavat majanduslikku efekti. Samas on võimalik planeerida ka uute tarbijate soojusega varustamine välja ehitada mobiilse katlamaja toitele.

KTSS paigaldamine ja fossiilsetel kütustel töötavate katlamajade asendamine puitkütusel ORC tehnoloogial töötavate koostootmisjaamadega vähendab märgatavalt kohalike katlamajade keskkonnamõju.

9. Kasutatud kirjandus:

„Midterm Storage Concepts-Futher Development of Solid Media Storage Systems“

TNO report 060-DTM-2012-00672/A NEST Thermal storage-Proof-of-principle report.

ELSEVIER Energy Thermal energy storage:“How previous findings determine current reseach priorities“ www.elsevier.com/locate/energy

ELSEVIER Renewable and Sustainable Energy Reviews. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization. www.elsevier.com/locate/rser

Elsevier Journal of Power Sources Cost-minimized combinations of wind power, solar power and electrochemical storage, powering the grid up to 99,9% of the time. www.elvesier.com/locate/jpowsour

AF Consult AS töö „Eesti riigi soojuse ja elektrienergia koostootmise potentsiaali hindamine“ töö nr.ENE 1120 2011.a.

TTÜ Soojustehnika Instituudi töö „Merirahu elamurajooni koostootmisjaama ja soojuspumba kasutusvõimaluste optimeerimine“

Hurst Biomass Boilers www.hurstbiler.com

Biomass-CHP Plant with ORC technology. www.weiss-kessel.de

CHP Plants www.directindustry.com/cat/energy-production

State of the art of ORC technology for biomass plants www.ieabcc.nl

AS Eraküte Haapsalu osakonna aruanded 2009.a. ja 2012.a.

AS Ereküte Jõgeva osakonna aruanded 2011.a. ja 2012.a.

Organic Rankine Cycle(ORC) in Biomass-Fuled CHP www.canbia.ca

Electricity from Biomass www.bios-bioenergy.at/biomass/orc-process.html

Puiduenergia EMÜ dets. 2012a. www.energiaklass.emu.ee

Puitkütus 2010.a. SA Erametsakeskus

Biokütused ja nende kasutamine väikekütteseadmetes TTÜ STI Ülo Kask 10.10.2012.a. www.teaduspark.ee

Põlevkiviõli-Eesti strateegiline kütus. TTÜ Mäeinstituut 2004.a. www.ene.ttu.ee

MKM määrus nr.63 8.10.2012. Hoonete energiatõhususe arvutamise metoodika. Lisa 4 Kütuste tarbimisaine alumised kütteväärtused.

Põlevkiviõli tootmise konkurentsivõimelisus 2013-2020 kasvuhoonegaaside kauplemise süsteemis. TTÜ A.Siirde. www.vk.edu.ee

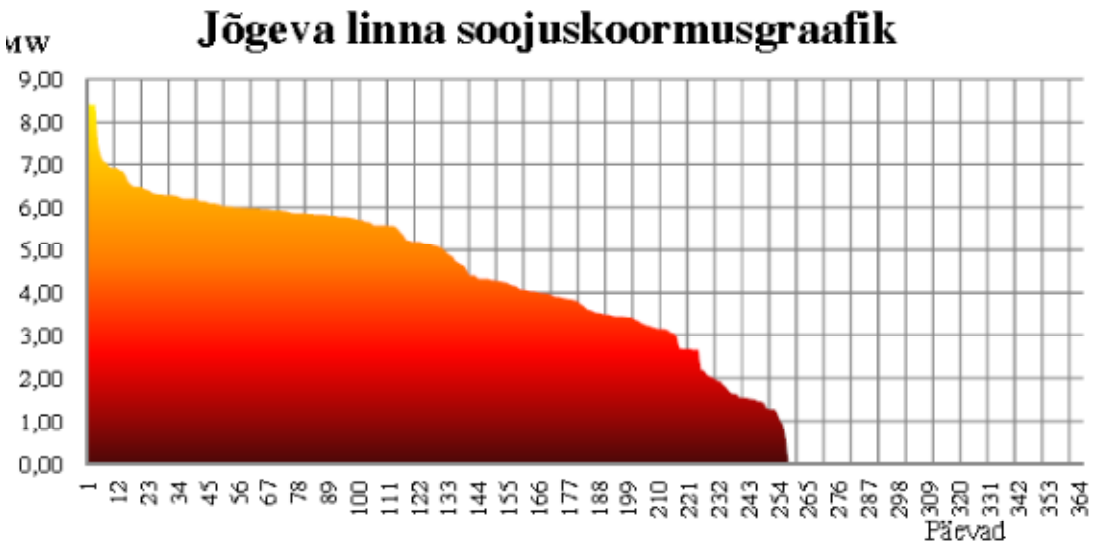
Lisa nr.1. AF Consult hinnang potentsiaalsete CHP-de asukohtade kohta Eestis.

Asukoht	Kütus	Tehnoloogia	Koos-tootmise tõhusus	Sektor	Ehitusaasta	Töötunnid[1]	Võimsus				
						h	MW_e	MW_s	$MW_{külm}$	MW_k	
Iru	Olmejäätmed	Auruturbiin	Tõhus	Kaugküte	enne 2015	7 500	17	50	-	78,8	
Kuressaare	Puiduhake	ORC	Tõhus	Kaugküte	enne 2015	6 000	2,5	10,8	-	15,6	
Maardu	Puiduhake	ORC	Tõhus	Kaugküte	enne 2015	6 000	2,5	10,8	-	15,6	
Viljandi	Puiduhake	ORC	Tõhus	Kaugküte	enne 2015	6 000	2,5	10,8	-	15,6	
Rakvere	Puiduhake	ORC	Tõhus	Kaugküte	enne 2015	6 000	2	8,6	-	12,5	
Valga	Puiduhake	ORC	Tõhus	Kaugküte	enne 2015	6 000	1,5	6,5	-	9,4	
Võru	Puiduhake	ORC	Tõhus	Kaugküte	enne 2015	6 000	2	8,6	-	12,5	
Haapsalu	Puiduhake	ORC	Tõhus	Kaugküte	enne 2015	6 000	2	8,6	-	12,5	
Paide	Puiduhake	ORC	Tõhus	Kaugküte	enne 2015	6 000	2	8,6	-	12,5	
Keila	Puiduhake	ORC	Tõhus	Kaugküte	2015-2020	6 000	1	4,3	-	6,3	
Jõgeva	Puiduhake	ORC	Tõhus	Kaugküte	2015-2020	6 000	1	4,3	-	6,3	
Paldiski	Puiduhake	ORC	Tõhus	Kaugküte	2015-2020	6 000	1	4,3	-	6,3	
Haabneeme	Puiduhake	ORC	Tõhus	Kaugküte	2015-2020	6 000	1	4,3	-	6,3	
Tapa	Puiduhake	ORC	Tõhus	Kaugküte	2015-2020	6 000	1	4,3	-	6,3	
Rapla	Puiduhake	ORC	Tõhus	Kaugküte	2015-2020	6 000	1	4,3	-	6,3	
Kehra	Puiduhake	ORC	Tõhus	Kaugküte	2015-2020	6 000	1	4,3	-	6,3	
Helme vald	Puiduhake	Auruturbiin	Tõhus	Tööstus	enne 2015	8 000	6,4	25,2	-	37,2	

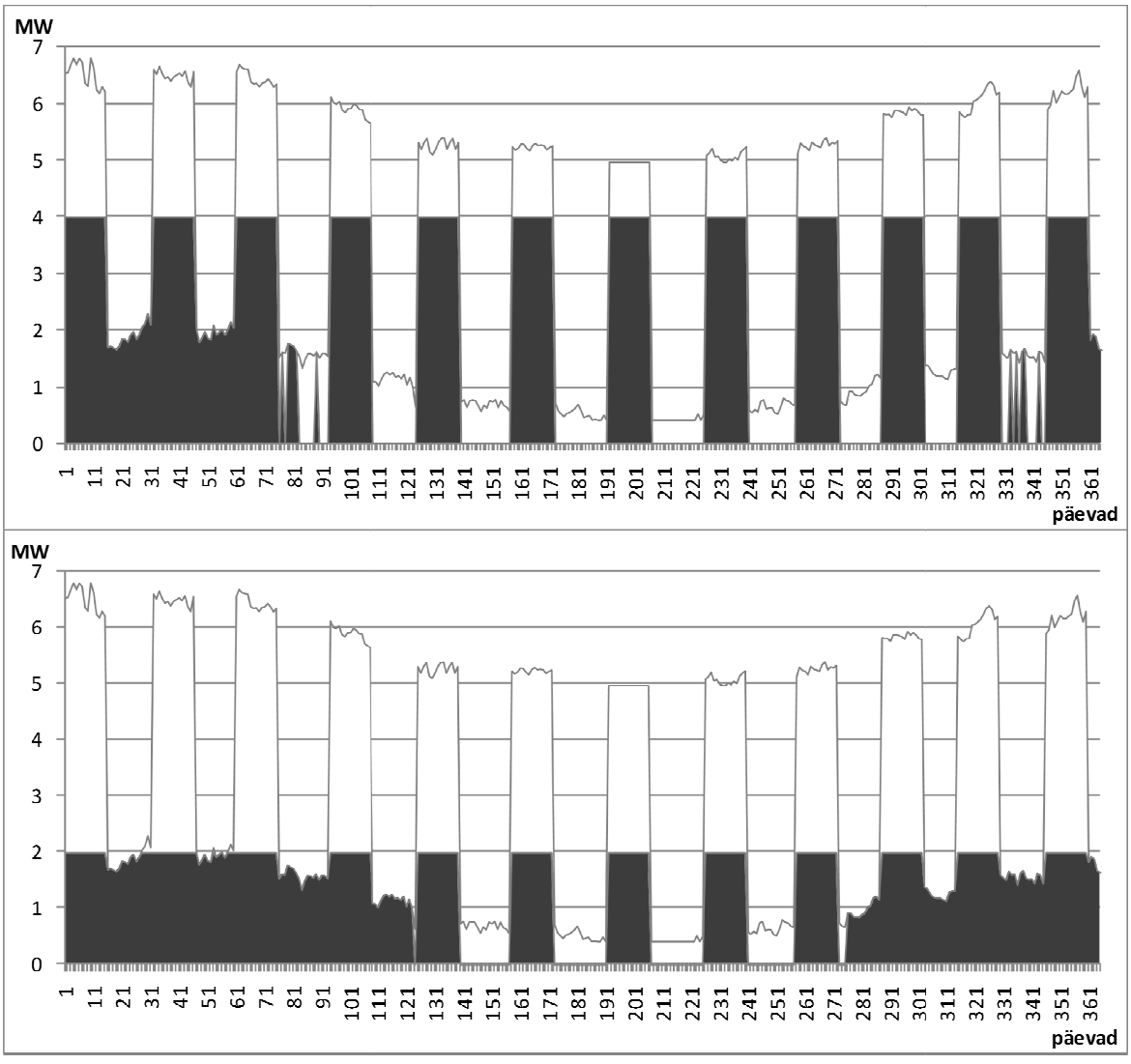
Werol tehased	Maagaas	Gaasimootor	Tõhus	Tööstus	enne 2015	8 000	4,3	1,7	2,5	9,6
Tabasalu	Maagaas	Gaasimootor	Tõhus	Tööstus	enne 2015	8 000	2	2	-	4,4

[1] - nimikoormusele taandatud aastane töötundide arv

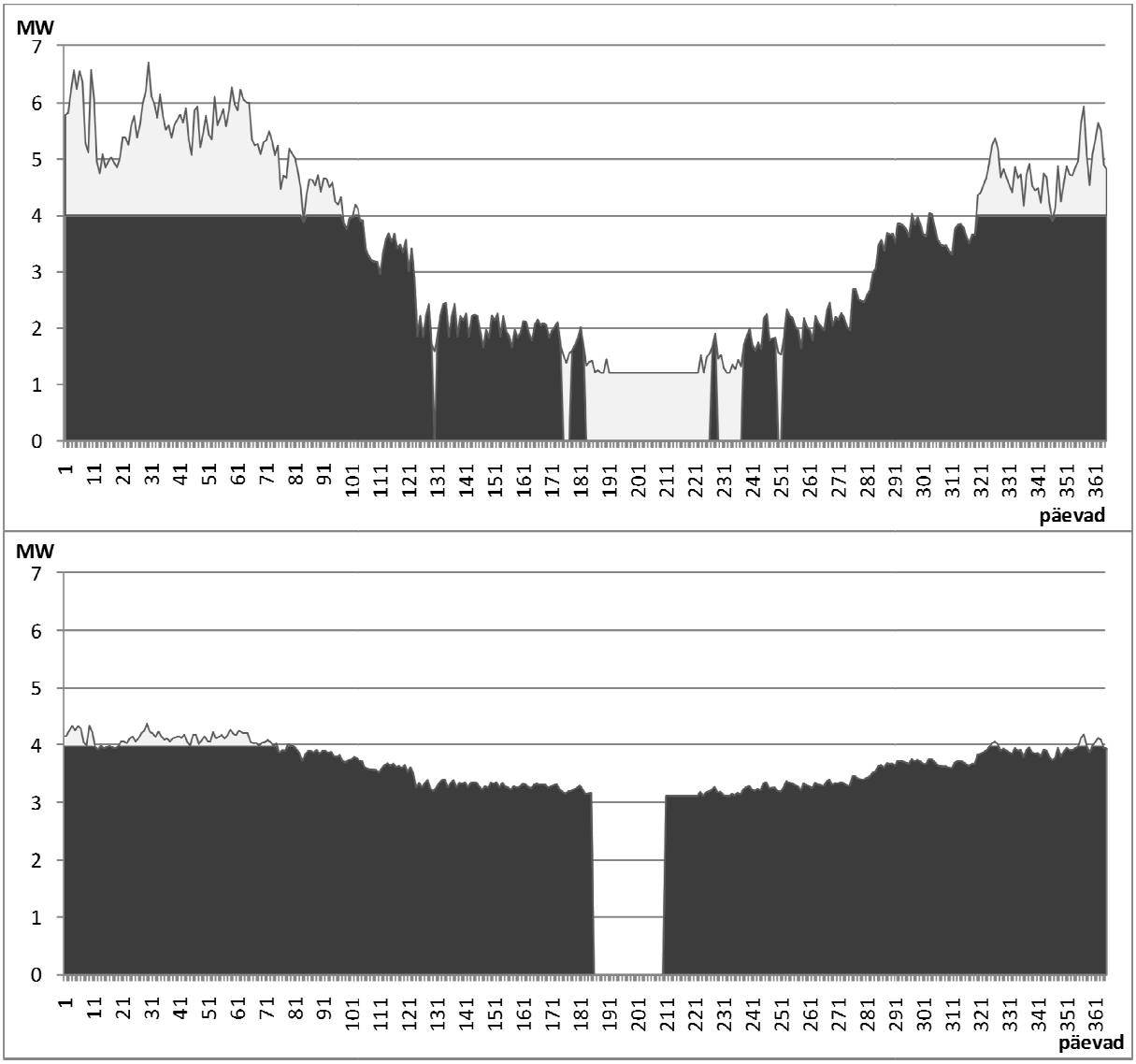
Lisa nr.2 Koormusgraafikud



Lisa nr.3 Tüüpkoormusgraafik.



Tööstuslik tarbija.



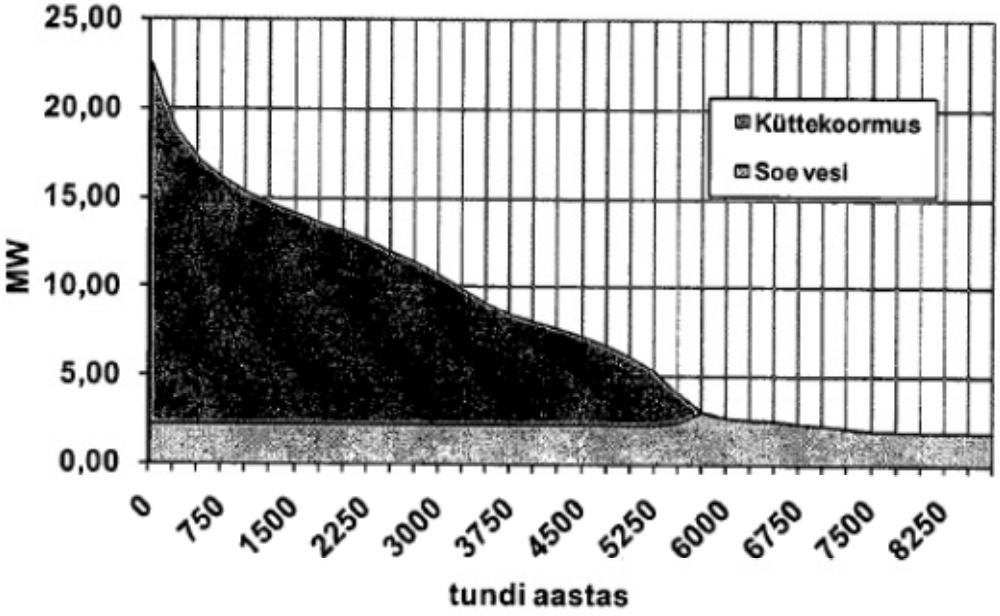
Tüüpiline kaugküttevõrk.

Lisa nr.5. Haapsalu soojusgraafik.

1.2.2 Soojuskoormuskestuse graafikud

Soojuskoormuskestuse graafikut ei kujundata ühe aasta soojustootmise põhjal, vaid graafiku näitajad peavad rahuldama kõigi erineva välisõhu temperatuuriga (maksimaalsete) aastate soojuse vajadusi. Graafiku tipp näitab katlamaja vajalikku tootmisvõimsust kõige külmema talvepäeva puhul. Seda vaatamata sellele, et nii külmi talvepäevi pole võib-olla enam mitu aasta olnud.

Haapsalus on arvestuslikuks välistemperatuuriks -21°C. Seda ning viimaste aastate külmemate talvekuude tootmist ja kraadpäevi arvestades on leitud, et katlamaja maksimaalne võimsus peaks olema 22,6 MW, rahuldamaks tarbijate vajadusi ka kõige külmematel talvepäevadel.

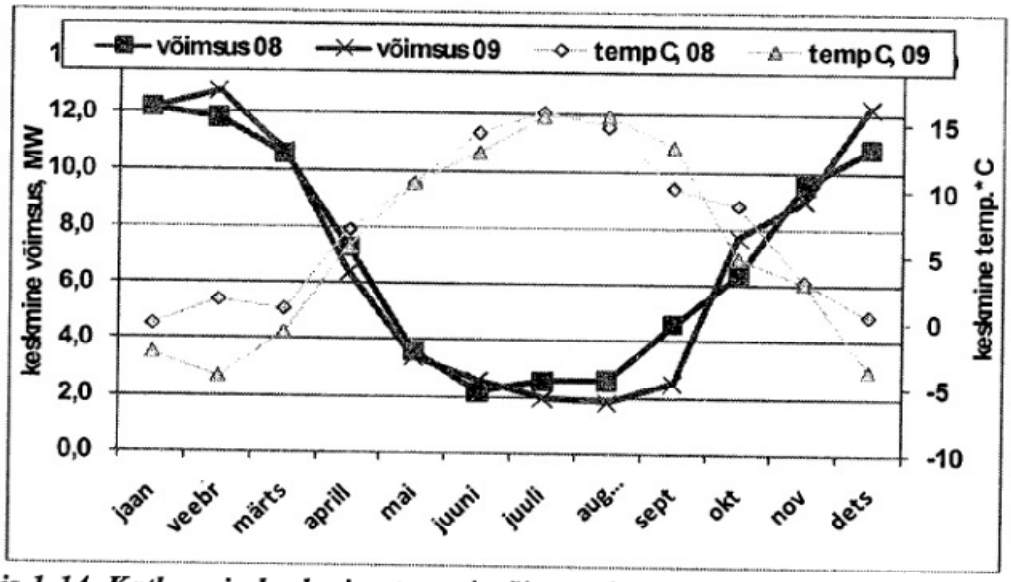


Joonis 1-15 Katlamaja soojuskoormusekestuse kõver aasta jooksul

Katlamaja soojuskoormus sisaldab tarbijate soojuskoormust kütteks ning sooja vee varustuseks, samuti soojakadusid ülekandevõrkudes. Graafikust selgub, et praegune katlamaja tootmisvõimsus 37 MW on enam kui piisav Haapsalu tarbimiskoormuse katmiseks, juhuks kui saabuvad isegi ebatavaliselt külmad talveilmad (- 30°C).

Katlamaja, eriti aga võimaliku koostootmisjaama katelde ja koormuste valikul on äärmiselt oluline suvine soojavee koormus, eeldades jaama töötamist ka suvel. Graafiku andmetest selgub, et maksimaalne suvine koormus on 3 MW ning minimaalne 1,85 MW. Seejuures moodustavad suveperioodi koormusest kuni 50% võrgukaod.

Alltoodud joonisel 1-14 on toodud katlamaja kuude keskmised koormusvõimsused, samuti iga kuu keskmised välisõhu temperatuurid 2008. ja 2009.a.



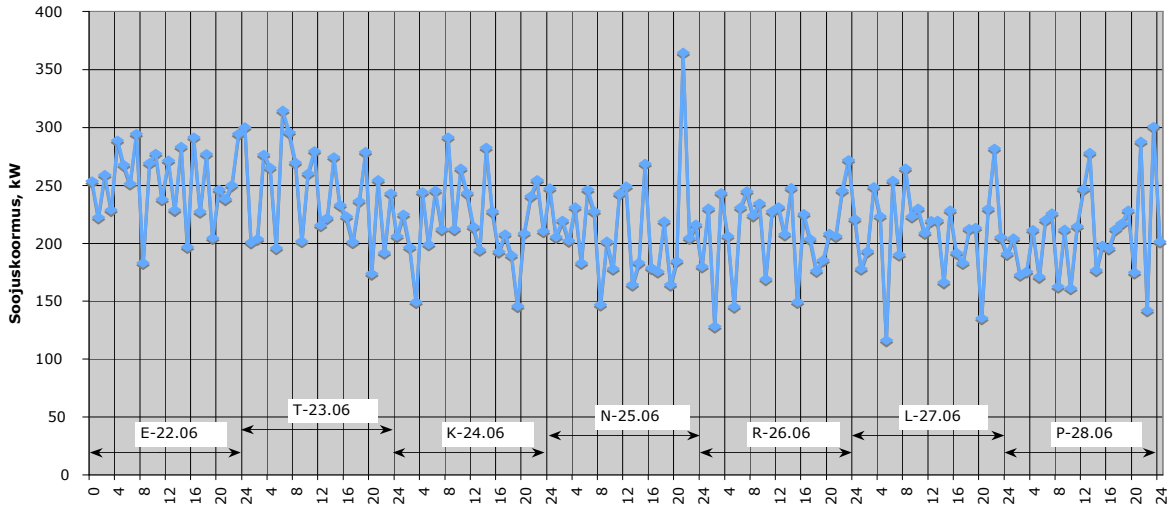
Joonis 1-14 Katlamaja keskmine tootmisvõimsus ja välistemperatuurid kuude lõikes

Graafikult näeme, et keskmised talvised tootmisvõimsused ei ületa 12-13 MW, seda keskmiste välistemperatuuride -4 ja +2 vahemikus. Keskmised koormusvõimsused ei iseloomusta aga maksimaalselt vajatavat võimsust välistemperatuuridel -21°C ja alla selle. Katlamaja andmeil on piirkoormused järgmised:

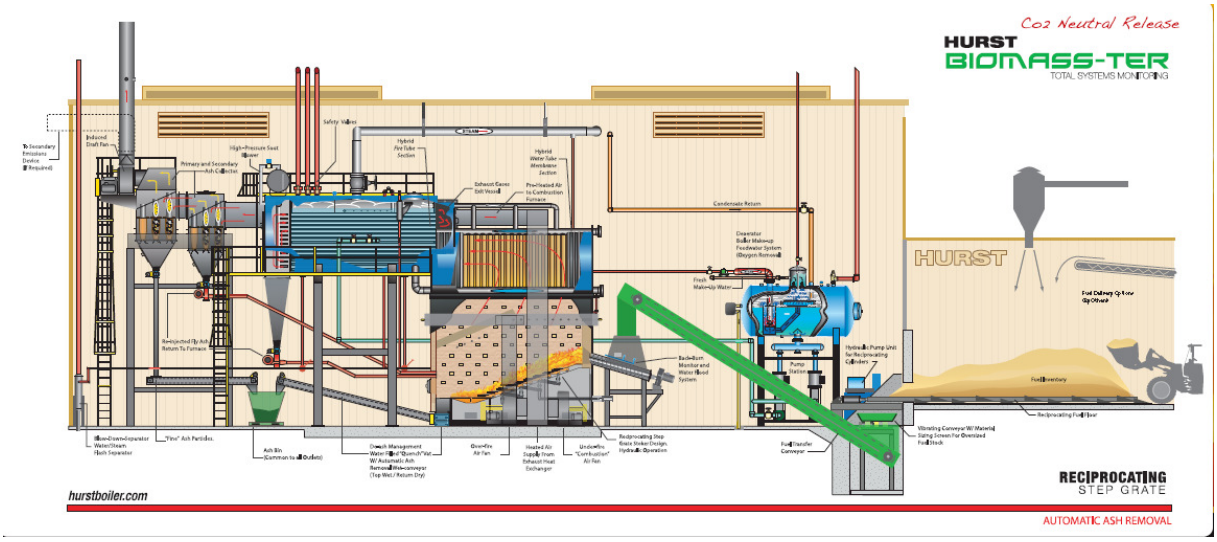
Tabel 1-9 Koormusvõimsuste piirid katlamaja andmetel, MW

Talvel		**Suvel**	
Maksimaalne	Minimaalne	Maksimaalne	Minimaalne
21 (-18°C)	11 (0°C)	2,4	1,9

Lisa.nr.6 Merirahu elamurajooni soojavee tarbimise graafik



Lisa nr. 7 Biomassi katel Hurst Biomass-TER



Lisa nr. 8 Heitmed puidu põletamisel ja keskkonnatasud.

Tabel 1.2. Saasteainete eriheited kütuste põletamisel

Saasteaine	Ühik	Saasteainete eriheitmed		
		Puitkütus		Turvas
		Multitsüklon	Suitsugaaside kondensaator*	
Süsinikdioksiid, CO_2	tC/TJ[1]			28,9
Vääveldioksiid, SO_2	g/GJ	10	8	200
Lämmastikoksiidid,	g/GJ	100	100	300
Süsinikoksiid, CO	g/GJ	1200	1200	1200
Tahked osakesed	g/GJ	240	38	220
Lenduvad orgaanilised ühendid, LOÜ	g/GJ	48	48	100
Raskemetallid	mg/G	112,8	22,56	249

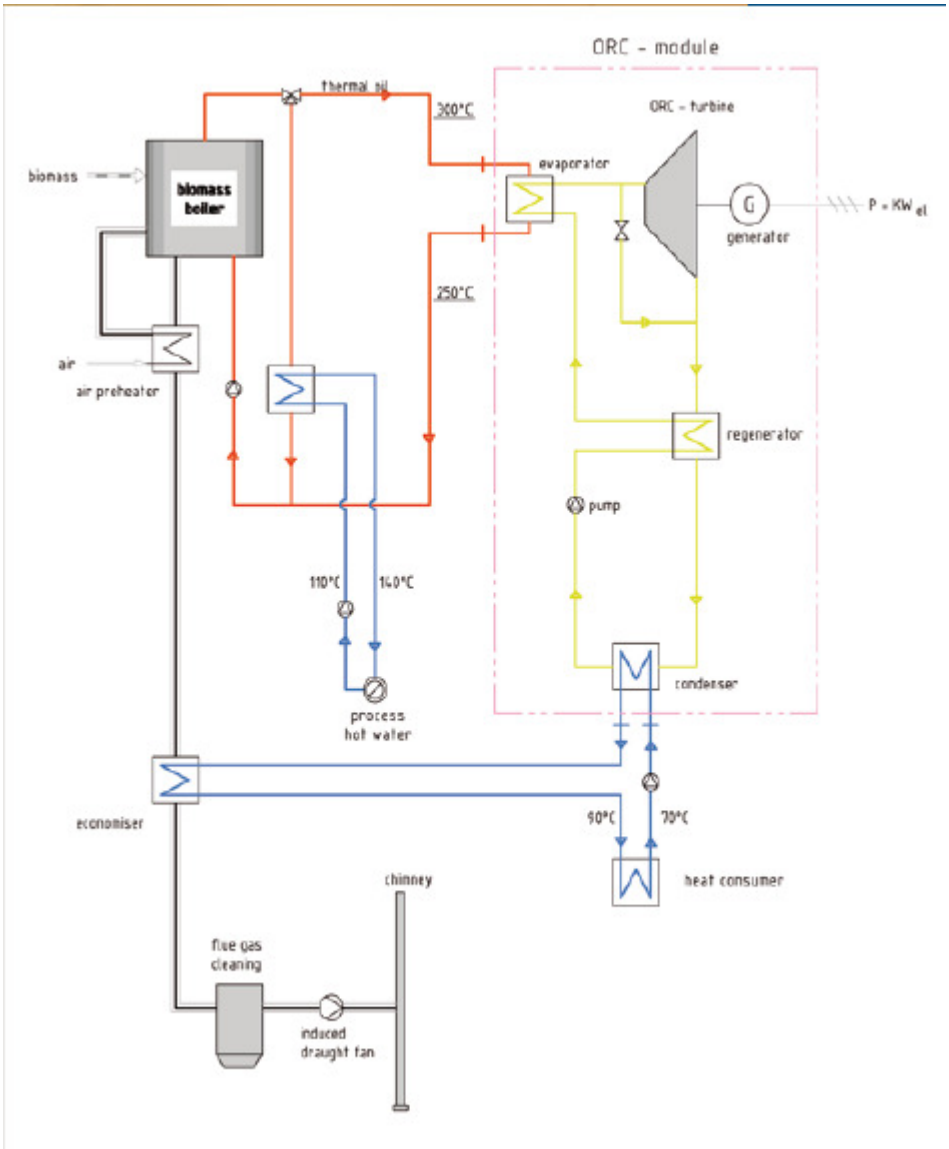
Tabel 1.1. Keskkonnatasud saasteainete välisõhku viimisel aastatel 2009…2015

Saasteaine	Keskkonnatasud EEK/t						
	2009	2010	2011	2012	2013	2015	2015
Süsinikdioksiid, CO_2	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3
Vääveldioksiid, SO_2	474	616	798	1036	1347	1751	2276
Lämmastikoksiidid, NO_x	1087	1195	1307	1438	1582	1740	1914
Süsinikoksiid, CO	68	74,8	82,3	90,5	99,5	109,5	120,5
Tahked osakesed	474	616	801	1041	1353	1759	2287
Lenduvad orgaanilised ühendid, LOÜ	1087	1195	1307	1438	1582	1740	1914
Raskemetallid	17297	19027	19217	19409	19603	19799	19997

Tuha kätlustasu toodud tingimustel on:

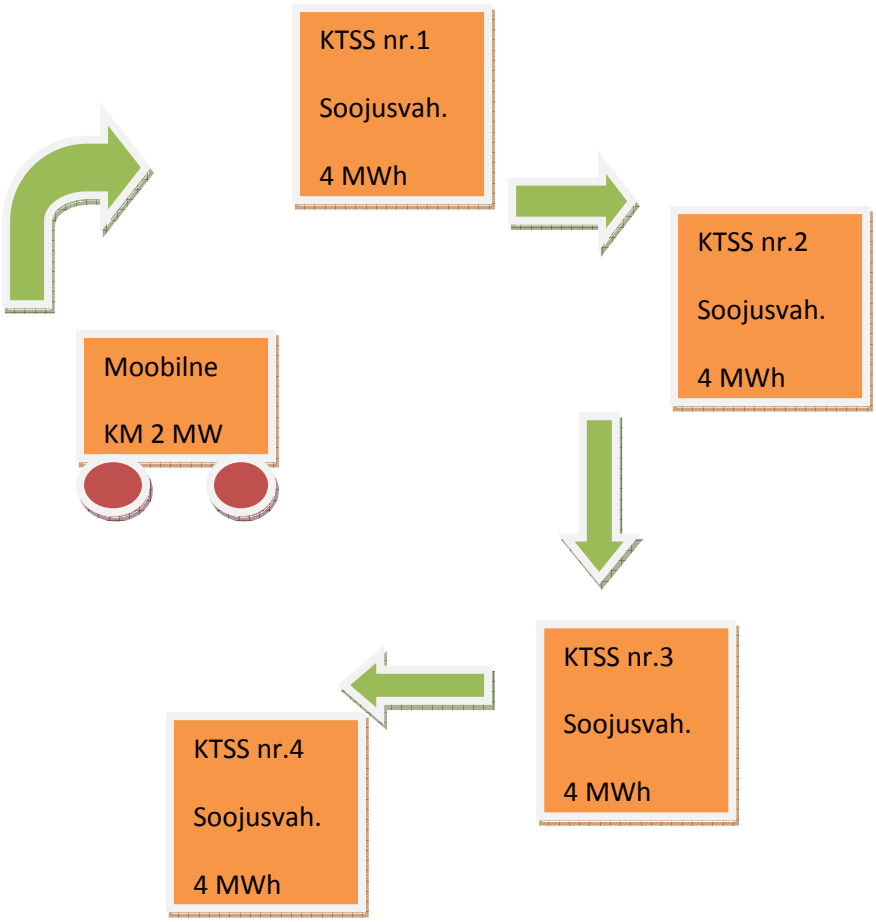
- ***1 MWh soojuse tootmisel puitkütusega 1,6-3,1 EEK/MWh;***

Lisa nr. 9 Skeem**. Weiss GmbH Biomass CHP with ORC-Technology**.



Kasutegur ORC tsüklis 98%, sellest elekter 20%, soojus 78%. Katlas termoõli temperatuur 300 ^{0}C. Puidu kütteväärtusest saame elektri na 16%.

Lisa nr. 10 Mobiilne katlamaja.



Katla suurus ja KTSS suurused valitakse arvestusega, et katlamaja suudaks KTSS soojussalvestid oma teenenduspiirkonnas varustada soojusega aastaringselt.

Näiteks: KTSS nr.1 soojusmahtuvus 4 MWh , tipukoormus 0,4 MW, KTSS nr.2 soojusmahtuvus 4 MWh, tipukoormus 0,4 MW, KTSS nr.3 soojusmahtuvus 4 MWh, tipukoormus 0,4 MW, KTSS nr.4 soojusmahtuvus 4MWh, tipukoormus 0,4 MW. Sõiduaeg ühest soojussalvestist teise 0,5 tundi, laadimisaeg 2 tundi. Kogu teenenduspiirkonna ühe laadimistsükli aeg 10 tundi. Soojussalvesti tühjenemise aeg maksimaalsel koormusel 10 tundi.

Lisa.nr. 11

Tabel 1.

Soojusülekande õlid (ettenähtud suletud süsteemidele)

Nimetus	ISO VG klass	Temp. °C	Viskoossus 40 °C mm^2/s	Viskoossus 100 °C mm^2/s	VI	Hang-temp. °C	Leek-punkti temp. °C
Teboil Termo õli	15	<+200	15	3.3	80	-42	180
	32	<+320	32	5.4	100	-12	200
	100	<+320	100	11.0	95	-12	220