

Energiatehnoloogia instituut

**AUTOKLAAVIDE JÄÄKSOOJUSE KASUTUTAMISE
VÕIMALUSED THERMOARENA OÜ NÄITEL**

**POSSIBILITIES OF UTILIZING RESIDUAL HEAT OF AUTOCLAVES IN THE
EXAMPLE OF THERMOARENA OÜ**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Markus Tamm

Üliõpilaskood: 183199

Juhendaja: Andrei Dedov, dotsent

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.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Markus tamm, (sünnikuupäev: 15.02.1996).

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Autoklaavide jääksoojuse kasutatamise võimalused Thermoarena OÜ näitel,

mille juhendaja on

Andrei Dedov,

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

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

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

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

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

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

Energiatehnoloogia instituut
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Markus Tamm, 183199
Õppekava, peeriala: MASM, Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika
Juhendaja(d): Andrei Dedov, dotsent, tel: 620 3913

Lõputöö teema:

Autoklaavide jääsoojuse kasutamise võimalused Thermoarena OÜ näitel
Possibilities of Utilizing Residual Heat of Autoclaves in the Example of Thermoarena OÜ

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Arvutada autoklaavi soojusbilanss
2. Arvutada atmosfääri paisatava jääkauru kogus ning kondensaadi teke
3. Leida jääsoojuse kasutamiseks lahendused
4. Arvutada lahenduste majanduslik tasuvus ning analüüsida lahenduste otstarbekust

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lähteandmete kogumine	10.2019
2.	Arvutuste teostamine	11.2019
3.	Lõputöö kirjutamine	01.2020

Töö keel: Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....20....a

Üliõpilane: Markus Tamm ".....".....20....a

/allkiri/

Juhendaja: Andrei Dedov ".....".....20....a

/allkiri/

Konsultant: Ants Kruuse ".....".....20....a

/allkiri/

Autor palub lõputöö sisu jätta avalikustamata, kuna töös on kasutatud analüüsitud ettevõtte konfidentsiaalsel informatsiooni.

SISUKORD

EESSÕNA	7
SISSEJUHATUS	8
1. TERMOTÖÖTLUS JA AUTOKLAAVID.....	10
1.1 Puidu termotöötlus.....	10
1.2 Autoklaavide jääsoojuse kasutamine	11
1.3 Autoklaavid ja autoklaavide ajalugu	12
2. ETTEVÕTTE TUTVUSTUS JA AUTOKLAAVID.....	14
3. KUIVATUSTSÜKLI ANALÜÜS	18
4. SOOJUSBILANSS	20
4.1 Autoklaavi ja kandevekonstruktsiooni terase soojenemine	21
4.2 Õhu soojenemine.....	22
4.3 Puidu kuivaine soojenemine	25
4.4 Puidu niiskuse soojenemine	26
4.5 Niiskuse aurustumine puidust.....	26
4.6 Autoklaavi soojuskadude ületamine.....	27
4.6.1 Konvektiivne soojusülekanne	27
4.6.2 Konvektiivse soojusülekanne kontroll	29
4.6.3 Kiirgussoojusülekanne	30
4.6.4 Soojuskaod kuumutusperioodil.....	31
4.7 Autoklaavi soojusbilansi kokkuvõte ja kontroll	31
4.7.1 Soojusbilansi kokkuvõte	31
4.7.2 Autoklaavi soojusbilansi kontroll primaarenergia kaudu	32

4.7.3 Autoklaavi soojusbilansi järeldused.....	34
5. JÄÄKSOOJUSE KASUTAMISE VÕIMALUSED.....	39
5.1 Jääsoojuse kasutamine uues kamberkuivatis	39
5.1.1 Jääkauru arvutus kuivatite energiavajaduse vähendamiseks.....	42
5.2 Kondensaadi jääsoojus	45
5.2.1 Kondensaadi jääsoojuse arvutus.....	46
5.3 Tootmisruumide küte	47
5.4 Jääsoojuse kasutamise kokkuvõte ja soovitused	49
KOKKUVÕTE	51
SUMMARY.....	53
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	55

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema algatas Enar Kraav (Energex Energy Experts OÜ), tuginedes ettevõtte Thermoarena OÜ andmetele ja varasemale ekspertiisile. Lõputöö jaoks vajalikud andmed saadi Thermoarena OÜ ettevõtte külastustest, infopäringutest ning kasutatud kirjandusest. Tehase aadress ja lõputöös kirjeldatud objektide asukoht on Farmi tee 5, Kolgi küla, Järva maakond.

Lõputöö autor soovib tänada abi eest oma lõputöö juhendajat Andrei Dedovi, lõputöö teema algatajat Enar Kraavi ning ettevõtte poolset kontaktisikut Ants Kruuset. Ettevõttes tekib autoklaavidest jääksoojust kondensaadi ja auru näol, mida ei ole kasutusele võetud. Kondensaad suunatakse kondensaadimahutisse ja jääkaur atmosfääri. Lõputöö eesmärk on leida võimalusi jääksoojuse tootmises kasutusele võtmiseks.

Jääksoojuse kasutusele võtmise analüüsiks koostati autoklaavi soojusbilanss. Autoklaavide logiandmed puudusid ning seega tarbimisandmetel põhinevat analüüsi ei olnud võimalik läbi viia. Arvutused tehti eesmärgil, et oleks võimalik täpsemalt hinnata, kas jääksoojust tekib piisavas koguses, et seda oleks mõistlik kasutusele võtta.

Võtmesõnad: autoklaav, termotöötlus, jääksoojus, jääkaur, magistritöö

SISSEJUHATUS

Lõputöö eesmärgiks on leida lahendusi autoklaavide jääksoojuse kasutamiseks ettevõttes Thermoarena OÜ. Lõputöö üldisemaks väärtuseks on autoklaavide jääksoojuse erinevate kasutusvõimaluste analüüs ja soojusbilansi välja arvutamine. Analüüsitud lahenduste põhjal saab teha järeldusi ka teiste ettevõtete autoklaavide jääksoojuse kasutuse võimaluste osas. Peamine lõputöö eesmärk on anda autorile arusaam tööstuslike protsesside heitsoojuse rakendamise võimalustest majanduslikust ja energeetilisest aspektist. Ettevõttes on hetkel 5 autoklaavi, mille jääkaur paisatakse tsükli lõppedes atmosfääri ning jahutusprotsessis tekkiv kondensaad suunatakse ilma soojuse tagastuseta kondensaadimahutisse. Ettevõtte autoklaavidega toodetakse termotöödeldud puitu, tooraineks on enamasti mänd.

Puidu termotöötlemine toimub kemikaalidevabalt - puitu kuumutatakse rõhu all aurukeskkonnas, autoklaavi täistsükkel on üks ööpäev. Protsessi lisatakse jahutusprotsessi käigus ainult vett. Autoklaavis termotöötlemise tulemusena saavutab puit parema vastupanu väliskeskkonnale. Paraneb vastupanu niiskumisele, seenkahjustustele, tulekindlus ning eluiga. Viie autoklaavi kütteks on ettevõttel kaks 600 kW põlevkiviõlil töötavat katelt, soojuskandjaks on termaalõli. Hetkel protsessis tekkivat jääksoojust ei kasutata, lõputöös uuriti jääksoojuse kasutusele võtmist majanduslikust ja energeetilisest aspektist.

Eesti riik on üritanud parandada ettevõtete energia- ja ressursikasutust läbi erinevate seminaride, koolituste ja toetusprogrammide. Jääksoojuse kasutus on üks võimalusi vähendada ettevõtete energiantensiivsust. Analüüsitakse, kas ja kuidas oleks autoklaavidest vabanevat soojusenergiat kõige mõistlikum ettevõttes kasutada ning kas jääksoojuse efektiivsem kasutus võiks elimineerida vajaduse installeerida täiendavasse soojusvõimsusesse ja vähendada ettevõtte kulutusi kütusele.

Ettevõttel on plaan rajada tootmisesse kamberkuivatid, kuna lõpptoodangu niiskusprotsent on tihti suurem, kui soovitud. Lisaks on plaanis rajada täiendav autoklaav ehk lähiaastatel on prognoosida ulatuslikku soojustarbe kasvu. Katlad on rajatud soojusvõimsuse varuga ehk väiksem soojustarbe kasv ei oleks ettevõtte probleemiks, kuid eelkõige uute rajatavate kamberkuivatitega võib eeldada suurt soojuskoormuse kasvu. Kasuliku soojusvõimsuse suurendamiseks on plaanis rajada autoklaavide kateldele ökonomaisem ning analüüsitakse tänast soojustarvet. Autoklaavidest tekkiv jääkaur suunatakse hetkel atmosfääri, lõputöös analüüsitakse, kas oleks võimalik ja otstarbekas seda rakendada ettevõtte soojustarbimise vähendamiseks või soojusvõimsusesse tehtavate investeeringute vältimiseks.

Jääsoojust tekitavad autoklaavid tsükli lõppfaasis (jääkaur, kondensaad). Rõhu alandamiseks ja hoidmiseks väljutatakse autoklaavidest üleliigne jääkaur atmosfääri, jahutusprotsessis tekkiv kondensaad juhitakse maa-alusesse kondensaadimahutisse ning suunatakse edasi teenusepakkujale ümbertöötlemiseks. Analüüsitakse jääsoojuse kasutamist läbi kahe tegevuse, jääkauru- ja kondensaadi soojuse kasutusele võtmise. Kondensaadi ja jääkauru kasutust analüüsitakse tootmisruumide kütteks ja planeeritavate kuivatite küttevajaduse vähendamiseks.

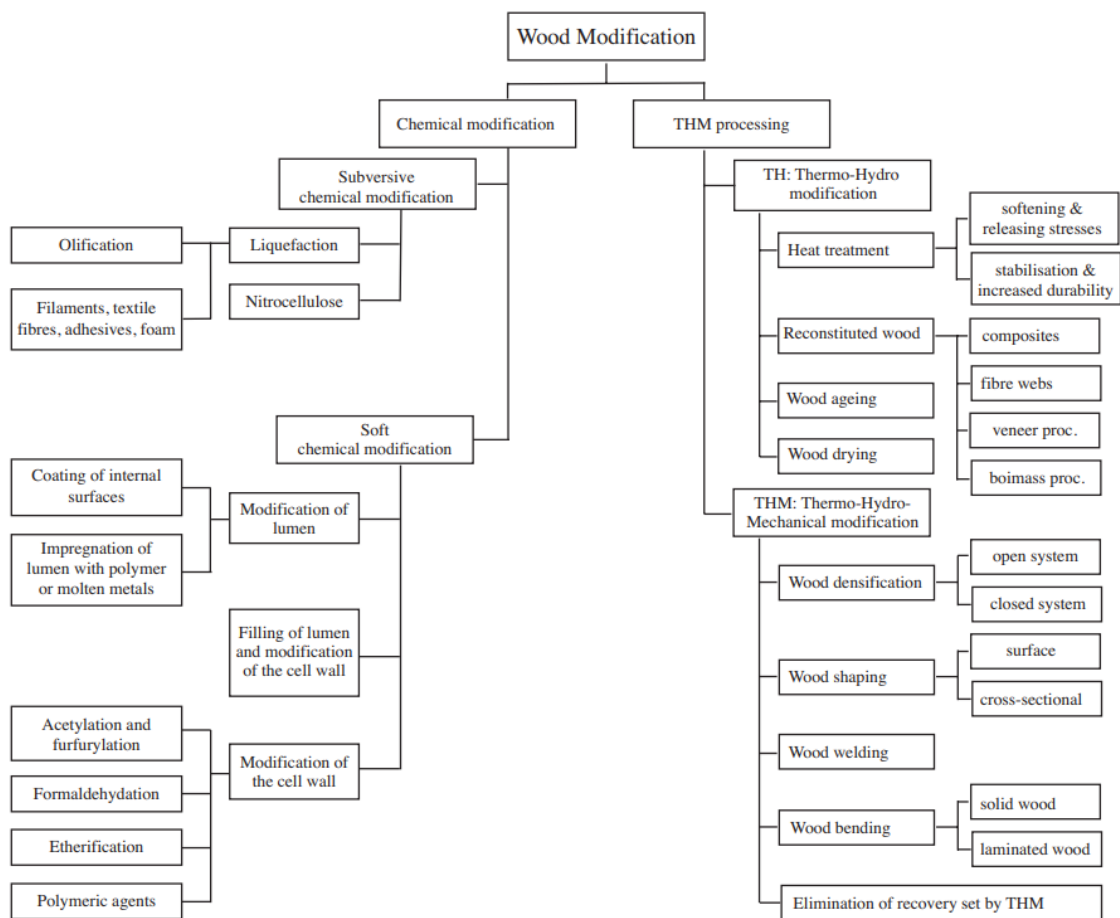
Lõputöö raames koostatakse autoklaavidele soojusbilanss ja leitakse puidust välja aurunud niiskuse kogus ning aurumiseks kulunud energia, mida oleks võimalik protsessist tagastada. Kõige perspektiivsemaks hinnati jääkauru kasutusele võttu, sest vaja oleks pigem kõrgemate parameetritega soojust. Jääkauru ja kondensaati tekib protsessis tsükliliselt umbes nelja kuni kuue tunni jooksul ehk väljutatav soojushulk ei ole ööpäevas pidev.

1. TERMOTÖÖTLUS JA AUTOKLAAVID

1.1 Puidu termotöötlus

Puidu termotöötlust viiakse läbi puidu vastupanu tõstmiseks väliskeskkonna mõjudele. Puidu omadusi on võimalik parandada näiteks veel läbi puidu immutamise, mehaanilise- või pinnatöötluse. Termotöötlemise eeliseks on kemikaalidevaba protsess – puit omab konkurentsieelist olles ökoloogilisem ja keskkonnasõbralikum, kui immutatud puit. Termotöödeldud puidu füüsilised omadused säilivad välitingimustes sõltuvalt oludest üldjuhul ligikaudu 20 aastat, töötlemata puidul umbes viis aastat (juhul kui pole otsest kokkupuudet maapinnaga), paraneb puidu vastupidavus seenkahjustustele, soojusjuhtivus, tulekindlus ning heliisolatsioon. Puidu eluiga paraneb eelkõige väiksema niiskumise ja bioloogilise lagunemise tulemusena. Samas väheneb puidu tugevus, seda eriti kõrgemate temperatuuridega töötlemise korral ning töödeldud puit muutub protsessi käigus oluliselt tumedamaks. [1] [2]

Puidu erinevad töötlemisvõimalused on välja toodud joonisel (Joonis 1.1). Puidu kuumutamise teel töötlemine on iidne, aastatuhandeid vana, protsess. Puidu kuumutamisega kaasnevad positiivsed mõjud olid küll teada juba erinevates iidsetes tsivilisatsioonides, kuid alles 1980-ndatel aastatel hakkasid Jaapani ja Prantsusmaa tööstused katsetama puidu töötlemist tööstuslikult suletud süsteemides rõhu all. Tööstuslikult on termotöötlust autoklaavidega läbi viidud kõigest mõnikümme aastat. Sellest ajast alates on puidu termotöötlus saanud hoo sisse ning on tänaseks levinud üle maailma. [2]



Joonis 1.1. Puidu töötlemise võimalused [2]

Peamiseks puidu termotöötlemise eeliseks töötlemata puidu ees on parem vastupanu niiskumisele ja eluea pikenemine. Termotöödeldud puit kaotab küll mõnevõrra tugevuses, kuid ulatuslikumalt alles kõrgematel temperatuuridel. 230 °C juures võib puidu tugevuse vähenemine mõnel puuliigil olla juba 30–40%, väiksematel temperatuuridel on tugevuskadu väiksem. Sõltuvalt toodangu kasutusvaldkonnast on vaja leida optimaalsed parameetrid puidu töötlemiseks, madalamatel temperatuuridel on küll puidu tugevuskadu väiksem, kuid samas on puidu vastupanu väliskeskkonna mõjudele halvem. [3]

1.2 Autoklaavide jääksoojuse kasutamine

Autoklaavide jääksoojuse kasutamise võimalusi on uuritud küllaltki vähe. Eestis on Andres Grigor oma lõputöös analüüsinud autoklaavide jääksoojuse (jahutusvee) kasutust soojuspumba abil. Lõputööst järeldub, et aastane sääst autoklaavide jääksoojuse püüdmise arvelt võib ulatuda kümnetesse tuhandetesse eurodesse ehk jääksoojuse kasutusele võtmisega on võimalik saavutada ettevõtetes arvestuslik kulude

kokkuhoid. Andres Grigori analüüsitud ettevõttes oli 7 autoklaavi, käesolevas töös analüüsitud ettevõttes oli 5 suuremat ja kõrgematel parameetritel töötavat autoklaavi ehk mastaabid on võrreldavad. Andres Grigori töö analüüsis eelkõige jahutusvee jääksoojuse kasutust, käesolev töö on keskendunud protsessis tekkiva jääkauru kasutamisele ilma soojuspumbata. [4]

Jääksoojuse kasutusele võtmine on üks paljudest võimalustest vähendada Eesti tööstuste energiaefektiivsust. Eesti tööstus on küllaltki energia- ja ressursimahukas, Eesti Keskkonnainvesteeringute Keskus toetab põhinedes eelnevatele uuringutele (Civitta, Ernst & Young Baltic AS) Eesti tööstusettevõtete ressursitõhususe parandamist, sest toetuse antav kasu tööstusettevõtetes on kõige suurem. Jääksoojuse kasutamisel on laiem perspektiiv ning erinevad tegevused, mis on seotud ressursside efektiivsema kasutusega, on prioriteetsed nii lokaalsel, kui EL-i tasandil, eriti arvestades EL-i kliimaeesmärke. [5]

1.3 Autoklaavid ja autoklaavide ajalugu

Autoklaavid töötati välja steriliseerimise eesmärgil 19. sajandil, kuid seadmete eelkäijaks on võimalik lugeda juba 1681. aastal Denis Papini poolt avaldatud tööd, kus ta kirjeldab seadet, mis võimaldas rõhu all tõsta vee keemistemperatuuri ning seeläbi töödelda objekte kuumemas vees, kui oli võimalik atmosfäärse rõhuga töötavates seadmetes. Seadme tollane eesmärk oli hoopis luude pehmendamine, mitte steriliseerimine. [6]

1830. aastal leidis William Henry, vähetuntud füüsik Manchesterist, kes oli ühtlasi ka tuntud seoses rahvatervise edendamisega, et sarnastel seadmetel võiks olla hoopis teistsugune eesmärk. Ta avastas oma 1831. ja 1832. aastal avaldatud töödes, et töödeldes nakkusega saastunud riideid kuuma õhuga kambris, kus soojuskandjaks kasutati auru, et nakkused hävisid. Tema nägemus oli, et auruga töötlemine saaks asendada varasemalt kasutatud karantiini. 1876. aastal uuris Louis Pasteur ja 1881. aastal R. Koch ning G. Wolffhugel steriliseerimist kuumutamise teel juba teaduslikult. Katsetati kuiva õhuga, kui ka aurukeskkonnas steriliseerimist. Katsed näitasid, et 110–120 °C juures kuumutamine auruga 30 minuti jooksul oli sama efektiivne kui 130–150 °C juures kuumutamine õhuga 60 minuti jooksul. Kuna aurukeskkonnas saavutati tulemus kiiremini ja efektiivsemalt, siis võeti kasutusele seadmed, mis töötasid aurukeskkonnas. Esimesena võtsid autoklaavid kasutusele 20. sajandi alguses haiglaid, et erinevaid tarvikuid operatsioonide tarbeks steriliseerida. [2] [6]

1884. aastal valmis esimene autoklaav (Chamberland), sajandi lõpuks olid arendatud esimesed seadmed, mis võimaldasid sujuvat rõhu väljutamist protsessi lõpus. Kuni 1980. aastateni olid autoklaavid kasutusel pea ainult steriliseerimise eesmärgil. Järgmine suur arendus oli juhitud tööstuste poolt – arendati välja suuremate mastaapidega autoklaavid, mis on tänaseks laialdaselt kasutusel erinevates tööstustes. Steriliseerimise eesmärgil on autoklaavid valdavalt kasutusel siiani meditsiinis, kuid samal eesmärgil kasutatakse neid palju ka laborites. [6]

Autoklaave kasutatakse laialdaselt erinevates valdkondades, näiteks: [7]

- Steriliseerimine;
- Kummi vulkaniseerimine;
- Komposiitmaterjalide kõvendamine;
- Lamineeritud klaasi tootmine;
- Materjali termotöötlemine.

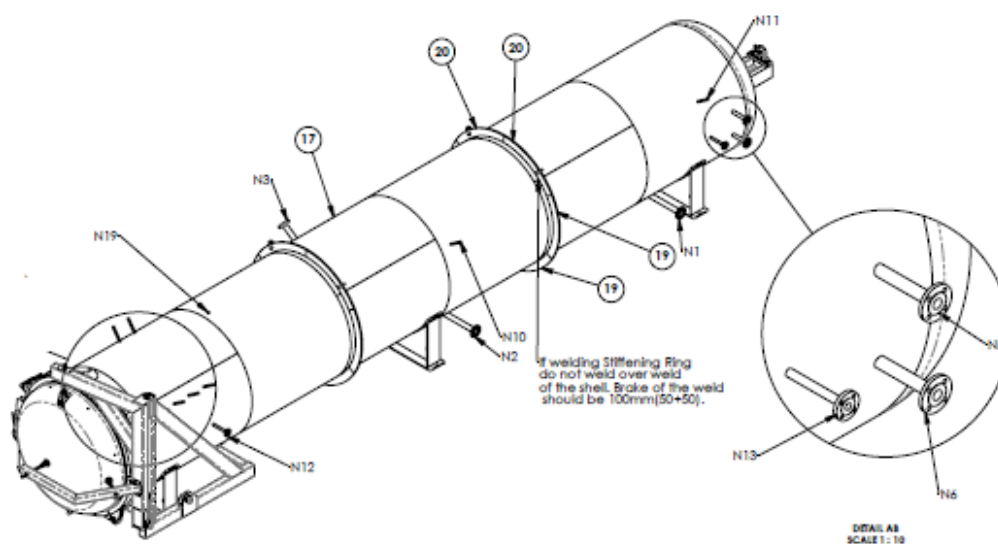
Kuigi tööstusi, mis autoklaave kasutavad on erinevaid ja autoklaavidega töödeldav materjal ja soovitud tulemus sõltub kasutusvaldkonnast, siis üldine otstarve on enamasti lihtsasti jaotatav. Autoklaave kasutatakse peamiselt kas steriliseerimise eesmärgil (haiglad, laborid) või tööstustes tootmisprotsessi osana.

2.ETTEVÖTTE TUTVUSTUS JA AUTOKLAAVID

Lõputöö raames analüüsiti ettevõtte Thermoarena OÜ autoklaave. Firma tegeleb peamiselt okaspuu termotöötusega, väiksemas mahus töödeldakse ka lehtpuud. Ettevõttes on hetkel viis ja plaanitakse rajada ka kuues autoklaav. Olemasolevate autoklaavide mahtuvused on välja toodud tabelis (Tabel 2.1). Joonis 2.1 toob välja seadmete metallkonstruktsiooni. Autoklaavid on tootmisprotsessi peamine osa, edasi liigub materjal veel hooeldamiseks ja seejärel juba pakendamiseks. Ühtlasi nõuab viie autoklaavi käitamine küllaltki suurt soojusvõimsust (paigaldatud 1,2 MW). Analüüsiti võimalusi, kuidas protsessis tekkiv jääksoojus efektiivsemalt kasutusele võtta. Tsükli lõppedes piserdatakse protsessi jahutusvett, mis suunatakse kondensaadimahutisse, protsessi käigus väljutatakse ülerõhu hoidmiseks liigne aur atmosfääri.

Tabel 2.1. Autoklaavide tehnilised andmed

Seade	Kogumahtuvus, m ³	Puidu mahtuvus, m ³
Autoklaav 1-4	41,2	12
Autoklaav 5	40,9	9



Joonis 2.1 Autoklaavi mahtuvusega 41,2 m³ metallosa joonis [8]

Lõputöö eesmärk on leida kasuliku jääksoojuse hinnanguline kogus ning sõltuvalt tulemusest ettepanekud jääksoojuse kasutuseks. Autoklaavide kütteks on paigutatud kaks 600 kW põlevkiviõli katelt, soojuskandjaks on termaalõli pealevoolu

temperatuuriga ligikaudu 493 K (220 °C). Autoklaavidesse on termotöötuse ühtlustamiseks paigutatud ventilaatorid.



Joonis 2.2. 600 kW põlevkiviõli katel [9]

Autoklaavidega algab ettevõtte tootmisprotsess. Sisse ostetakse juba eelkuivatatud puitu, mis asetatakse vahelippidele ning seejärel suunatakse lippidel tooraine autoklaavi. Peale autoklaavi läbimist jahtub puit ühe päeva ja ühtlustub, seejärel selekteeritakse välja liigniiske puit ning nõuetele vastav puit suunatakse hõõveldamisesse, et anda lauale profiil. Eraldatakse valmistoodang ja defektidega toodang – defektidega toodang saadetakse järkamisse (soovitud pikusesse saagimine), kahjustunud osad lõigatakse lauast välja. Seejärel toodang pakitakse ja ladustatakse. Ettevõttel on kavas hakata toorainet täiendavalt kuivatama, et vähendada liigniiske puidu osakaalu peale autoklaavi. [9]

Ettevõtte on laiendamas oma tootmispinda ning seetõttu on olemasoleva jääksoojuse kasutus kas uute tootmisruumide kütteks või olemasolevate tootmisprotsesside efektiivsemaks muutmiseks väga aktuaalne. Ühtlasi annab jääksoojuse parem kasutus võimaluse ettevõttele kulutusi soojusenergiale vähendada. Tootmisruume köetakse tootmisjääkidest kahe 600 kW katlaga (toodetud 2006), kateltele on paigaldatud ökonomaiser (Joonis 2.3).



Joonis 2.3. 600 kW tootmisruumide puitbriketiga köetav katel [9]

4 autoklaavi (12 m³ mahtuvusega) on paigutatud paari kaupa kahte kõrvuti asetsevasse ruumi (Joonis 1.1). Autoklaav 9 m³ puidu mahtuvusega asetseb eraldiseisvalt.



Joonis 2.4. Ettevõtte autoklaavid [9]

Autoklaavides sisepind on protsessi tulemusena kaetud söestunud kihiga (Joonis 2.5).



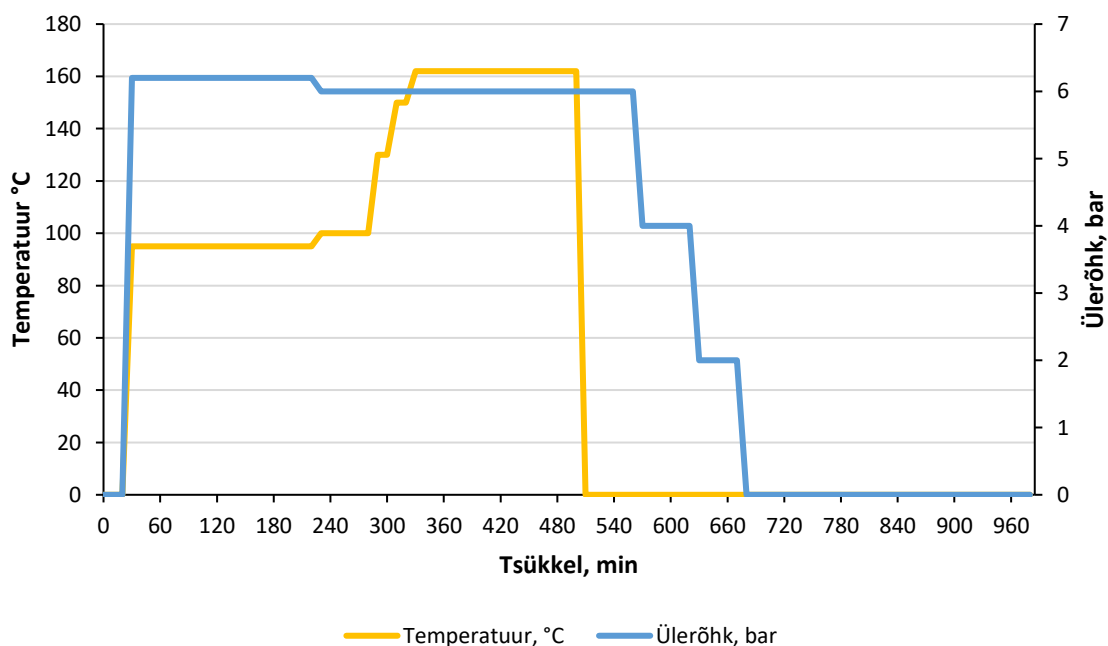
Joonis 2.5. Autoklaavi sisemus [9]

3. KUIVATUSTSÜKLI ANALÜÜS

Sõltuvalt toorainest valitakse sobiv programm. Enamasti on autoklaavis temperatuur kuumutusprotsessi lõppfaasis 160-180 °C ning ülerõhk 0,6-0,7 MPa. Ettevõtte töötleb puitu mitme erineva programmiga, analüüsitakse autoklaavi tööd tuginedes ühele ettevõtte kuivatustsükli tavapärasele programmile (Tabel 3.1). Soojusbilansi arvutus kehtib ettevõtte nelja autoklaavi kohta kogumahtuvusega 12 m³ puitu. Programmi parameetrid kuivatustsükli jooksul on visualiseeritult joonisel (Joonis 3.1).

Tabel 3.1. Autoklaavi programm

Operatsioon	Periood, min	Temperatuur, °C	Üleõhk, bar
Ühtlustus	30	0	0,0
Ühtlustus	200	95	6,2
Kuumutus	60	100	6,0
Kuumutus	20	130	6,0
Kuumutus	20	150	6,0
Kuumutus	180	162	6,0
Jahutus	60	0	4,0
Jahutus	60	0	2,0
Jahutus	50	0	0,0
Ühtlustus	300	0	0,0



Joonis 3.1. Analüüsitud autoklaavi kuivatustsükli programm

Kuigi ettevõttel autoklaavide pikaajalised logiandmed puuduvad, siis logib juhtsüsteem lühiajaliselt ka reaalseid rõhu- ja temperatuuri parameetreid (Joonis 3.2). Graafikul on punase värviga välja toodud temperatuur ja rohelise värviga rõhk. Kuivatustsükli programmi ja reaalsete logiandmete analüüsimisel võib täheldada suurt inertsit nii üles soojenemisel ja rõhu tõstmisel, kui ka protsessi lõpus jahutuse ja ühtlustuse ajal. Autoklaavi temperatuur tsükli alguses oli ettevõtte külastusel vaadeldud autoklaavide juhtpultide graafikute alusel vahemikus 80–130 °C, seega ei jahtu autoklaav järgmise tsükli alguseks maha. Parema analüüsi tegemiseks on soovitus autoklaavide logiandmete salvestamine, et oleks võimalik energiavooge terviklikumalt ja põhjalikumalt analüüsida. Autoklaavide soojusbilansi tulemused on arvutuslikud, kontroll teostatakse läbi põletatud põlevkiviõli aastase tarbe.



Joonis 3.2. Autoklaavi kuivatustsükli mõõdetud andmed

Ettevõttele on teada kütuse kulu autoklaavidele, sest tootmisruumide küte toimub eraldiseisvate kateldega. Üks võimalik lahendus on autoklaavide soojustarvet arvutada kaudselt läbi primaarenergia kulu ja katla kasuteguri. Samas ei ole sellise meetodika puhul teada soojustarve jagunemine erinevate protsesside lõikes (puidu kuumutamine, niiskuse aurustumine, autoklaavi soojuskaod).

4. SOOJUSBILANSS

Analüüsitava tsükli põhjal on lähteandmed välja toodud tabelis (Tabel 4.1).

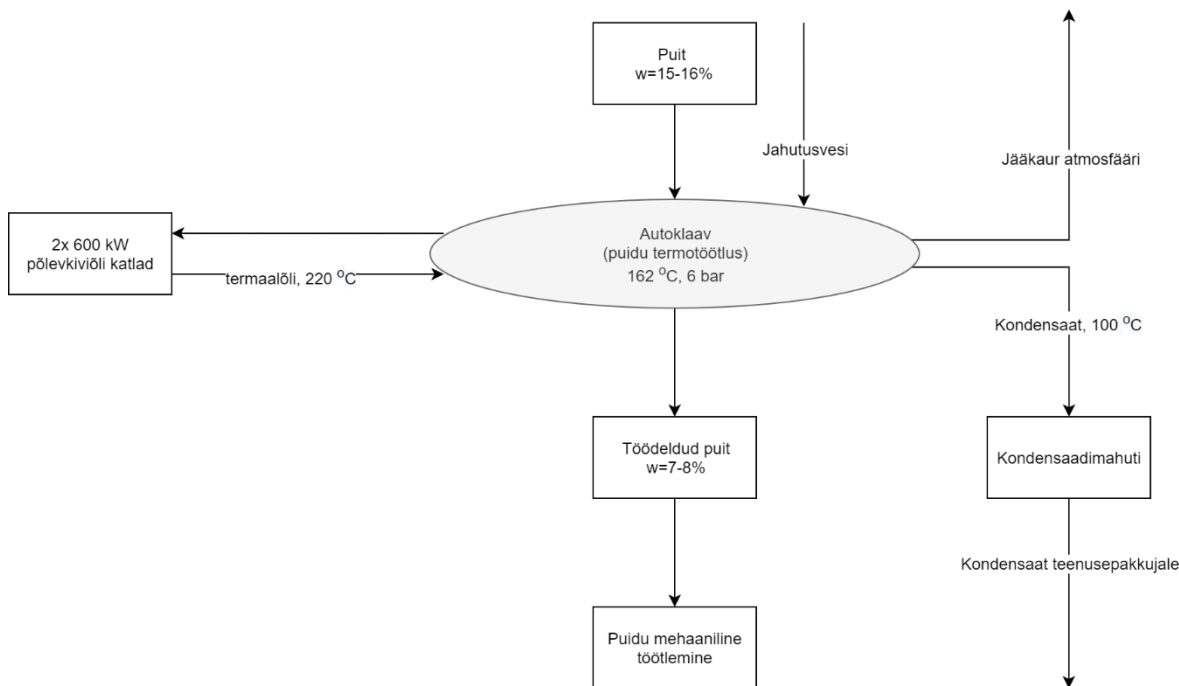
Tabel 4.1. Soojusbilansi lähteandmed

Näitaja	Tähis	Väärtus	Selgitus
Temperatuur tootmishoones	T_0	293K (20 °C)	Köetud tootmisruumi temperatuur.
Autoklaavi algtemperatuur	T_1	355K (82°C)	Programmi (Joonis 3.2) alusel.
Protsessi lõpptemperatuur	T_2	435K (162 °C)	Programmi (Tabel 3.1) alusel.
Autoklaavi ülerõhk enne jahutust	$P_{üle}$	600 000 Pa	Ülerõhk enne rõhu väljutamist autoklaavist, programmi (Tabel 3.1) alusel.
Autoklaavi kogumahtuvus	V	41,2 m ³	Vastavalt autoklaavi tehnilistele joonistele.
Puidu absoluutne algniiskus	W_1	15,5%	Keskmine väärtus.
Termotööteldud puidu absoluutne niiskus	W_2	8%	Keskmine väärtus.
Absoluutselt kuiva männi tihedus	ρ	470 kg/m ³	Männi kuivaine keskmine tihedus.
Kuivatustsükli periood	t_{abs}	58 800 s	Programmi (Tabel 3.1) alusel.
Kuivatustsükli kuumutusperiood	t_{kuum}	28 800 s	Programmi (Tabel 3.1) alusel.

Autoklaavi soojusbilansi arvutamisel võeti arvesse:

- Autoklaavi terase ja kandevkonstruktsiooni soojenemine;
- Puidu kuivaine soojenemine;
- Puidu niiskuse soojenemine;
- Niiskuse aurustumine puidust;
- Konvektiivne soojuskadu kuumutusperioodil;
- Kiirgussoojusülekanne kuumutusperioodil.

Lihtsustatud autoklaavi põhimõtteline protsessiskeem on toodud joonisel (Joonis 4.1). Protsessiskeem annab põhimõttelise arusaama ettevõtte puidu termotöötlemise energia- ja ressursivoogudest. Eelkuivatatud puit läbib autoklaavi (ülevalt alla) ning energiavood on toodud vasakult paremale ehk toimub autoklaavi kütmine ning paremal on toodud väljundvood kondensaadi ja jääkauru näol.



Joonis 4.1. Autoklaavi analüüsitud tsükli lihtsustatud protsessiskeem

Kasuliku soojusena vaadeldakse eelkõige protsessist eraldunud jääkauru ja kondensaadi soojust. Autoklaavi ja puitu salvestunud soojus eraldub tootmisruumidesse ning sellest täiendavaid soojuste tagastamise võimalusi ei analüüsitud.

4.1 Autoklaavi ja kandevkonstruktsiooni terase soojenemine

Autoklaavi tootja on Estanc AS ning on valmistatud roostevabast terasest AISI 316 (1.4404 EN10028-7). Autoklaavi mass on tootja joonistele põhinedes 12 037 kg, lisaks võeti arvutuses arvesse kandevkonstruktsioonide mass, mida ettevõtte esindaja hindas 500 kg-le. Kokku on seega kuumutatavat terast 12 537 kg. Autoklaavi lõpptemperatuur oli 162 °C, terase soojenemiseks kulunud energia tarbeks arvutati erisoojus valemiga 4.1. Roostevaba terase AISI 316 erisoojus on leitav empiiriliselt. [10]

$$c = 365,43 + 0,40649 \cdot T - 1,7321 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 = 365,43 + 0,40649 \cdot 355\text{K} - 1,7321 \cdot 10^{-4} \cdot 355\text{K}^2 = 487,91 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \quad (4.1)$$

kus c –terase erisoojus, J/(kg·K),

T – terase temperatuur, K.

Valemiga 4.2 arvatati terase erisoojus ka kuumutusprotsessi lõppfaasiks (162 °C), mis on 509,48 J/(kg·K), seega avaldub temperatuuri kasv olulist mõju erisoojusele. Keskmine erisoojus kuumutusprotsessi käigus on 498,69 J/(kg·K).

Autoklaavi terase temperatuur protsessi alguses varieerub. Analüüsitava programmi alusel on autoklaavi temperatuur tsükli alguses 82 °C ning protsessi käigus kuumutatakse autoklaavi 162 °C-ni. Terasse kuumutamiseks kulunud energia arvatati valemiga 4.2.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t = 12\,537 \cdot 498,69 \cdot (162\text{ °C} - 82\text{ °C}) = 500\,151\,492\text{ J} = 500\,151,5\text{ kJ}, \quad (4.2)$$

kus Q – kulunud energia, J,

m – autoklaavi metalloosa mass, kg,

c – terase keskmine erisoojus temperatuurivahemikus, J/(kg·K),

Δt – temperatuuri muut, °C.

Sõltuvalt programmist, autoklaavi tsüklite vahelisest perioodist ning ajast, mil autoklaavi luuk on avatud, võib terase kuumutamisele kuluv energia olulisel määral varieeruda. Ühe vaadeldud tsükli puhul oli autoklaavi tsükli algtemperatuur pea 130 °C ehk terase kuumutamisele kulunuks üle kahe korra vähem energiat analüüsitud tsüklist. Energeetilisest aspektist on mõistlik hoida autoklaavide luuke võimalikult lühikest aega avatud ning planeerida tsüklite vahelised perioodid võimalikult lühikeseks.

4.2 Õhu soojenemine

Õhu soojenemine moodustab väikese osa soojusbilansist, arvesse võetud lähteandmed on toodud tabelis (Tabel 4.2). Õhu kuumutamist arvatati veeaurust eraldiseisvalt ehk autoklaavis oleva õhu absoluutne niiskus on konstantne. Eelduseks on võetud õhu suhteline niiskus 50%, temperatuur 20 kraadi ning atmosfäärne rõhk.

Tabel 4.2. Õhu soojenemise lähteandmed

Näitaja	Tähis	Väärtus	Selgitus
Õhu temperatuur tootmisruumis	T_1	293 K (20 °C)	Hinnanguline tootmisruumi temperatuur
Kuumendatud õhu temperatuur	T_2	435 (162 °C)	Programmi (Tabel 3.1) alusel.
Õhu suhteline niiskus tootmisruumis	Φ	50%	Hinnanguline
Tootmisruumi õhurõhk	P_1	101 325 Pa	Atmosfääriline rõhk
Absoluutne rõhk autoklaavis kuumutusprotsessi lõpus	P_2	701 325 Pa	Programmi (Tabel 3.1) alusel.

Veeauru osarõhu leidmiseks tootmisruumis kasutati Arden Buck võrrandit (valem 4.3).

$$\begin{aligned}
 P_{H_2O}^o &= 0,61121 \exp\left(\left(18,678 - \frac{T}{234,5}\right)\left(\frac{T}{279,82 + T}\right)\right) = & (4.3) \\
 &= 0,61121 \exp\left(\left(18,678 - \frac{293}{234,5}\right)\left(\frac{293}{279,82 + 293}\right)\right) = 2338,4 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

kus $P_{H_2O}^o$ -veeauru küllastusrõhk atmosfäärirõhu juures, Pa,

T = tootmisruumi temperatuur, K.

Niiske õhu massi arvutamiseks leiti niiske õhu tihedus valemiga 4.4 (Clausius-Clapeyron).

$$\begin{aligned}
 \rho &= \frac{3,48 \cdot 10^{-3}}{T} \cdot (P - 0,378 \cdot \Phi \cdot P_{H_2O}^o) = \frac{3,48 \cdot 10^{-3}}{273} \cdot (101325 - 0,378 \cdot 0,5 \cdot 2338,4) = & (4.4) \\
 &= 1,2 \text{ kg/m}^3,
 \end{aligned}$$

kus ρ – õhu tihedus tootmisruumis, kg/m³,

T – temperatuur tootmisruumis, K,

P – õhurõhk tootmisruumis, Pa,

$P_{H_2O}^o$ – veeauru küllastusrõhk, Pa,

Φ – õhu suhteline niiskus, %.

Õhu mass autoklaavis arvutati läbi tiheduse ja mahu valemiga 4.5.

$$m = \rho \cdot V = 1,2 \cdot 29,2 = 35,1 \text{ kg}, \quad (4.5)$$

kus m – õhu mass, kg,

ρ – õhu tihedus, kg/m³,

V – õhu maht autoklaavis, m³.

Järgmisena sammuna leiti õhu tehniline niiskus läbi suhtelise niiskuse ja veeauru osarõhu. Autoklaavis on veeauru ning õhu segu, veeauru eraldumine puidust ning veeauru soojenemine on arvatud välja õhu kuumutamisest eraldiseisvalt. Samasugust meetodikat on kasutatud autoklaavi soojusbilansi matemaatilises mudelis. [11]

Tehnilise niiskuse leidmiseks kasutati valemit 4.6.

$$x = 0,622 \cdot \frac{\Phi \cdot P_{H_2O}^0}{P - \Phi \cdot P_{H_2O}^0} = 0,622 \cdot \frac{0,5 \cdot 2338,4}{101\,325 - 0,5 \cdot 2338,4} = 0,0073 \text{ kg/kg}, \quad (4.6)$$

kus x – õhu tehniline niiskus, kg/kg,

Φ – õhu suhteline niiskus tootmisruumis, %,

P – õhurõhk tootmisruumis, Pa,

$P_{H_2O}^0$ – veeauru küllastusrõhk, Pa.

Tootmisruumi õhu entalpia arvutati valemiga 4.7.

$$h_{ruum} = t + x \cdot (2493 + 1,97 \cdot t) = 20 + 0,0073 \cdot (2493 + 1,97 \cdot 20) = 38,4 \text{ kJ/kg}, \quad (4.7)$$

kus h_{ruum} – tootmisruumi õhu entalpia, kJ/kg,

t – tootmisruumi temperatuur, °C,

x – tootmisruumi õhu tehniline niiskus kg/kg.

Sama valemiga (valem 4.8), leiti ka kuumutatud õhu entalpia:

$$h_{autoklaav} = t + x \cdot (2493 + 1,97 \cdot t) = 162 + 0,0073 \cdot (2493 + 1,97 \cdot 162) = 182,4 \text{ kJ/kg}, \quad (4.8)$$

kus $h_{autoklaav}$ – tootmisruumi õhu entalpia, kJ/kg,

t – tootmisruumi temperatuur, °C,

x – kuumutatud õhu tehniline niiskus kg/kg.

Õhu soojendamiseks kulunud energia autoklaavis arvutati valemiga 4.9.

$$Q = m \cdot (h_{\text{autoklaav}} - h_{\text{ruum}}) = 35,1 \cdot (182,4 - 38,4) = 5050 \text{ kJ}, \quad (4.9)$$

kus Q = õhu soojendamiseks kulunud energia, kJ,

h_{ruum} – tootmisruumi õhu entalpia, kJ/kg,

$h_{\text{autoklaav}}$ – kuumutatud õhu entalpia, kJ/kg,

m – õhu mass, kg.

4.3 Puidu kuivaine soojenemine

Ettevõtte töötleb peamiselt okaspuitu, kõige levinum on mänd. Puidu keskmine absoluutne niiskus enne autoklaavi sisenemist on 15,5%, protsessi lõpus on puidu keskmine absoluutne niiskus 8%. Analüüsitava autoklaavi puidu mahtuvus on 12 m³. Puidu kuivaine mass on leitav läbi mahu ja tiheduse ning arvutati valemiga 4.10. [12]

$$M_k = \rho \cdot V = 470 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 12 \text{ m}^3 = 5640 \text{ kg}, \quad (4.10)$$

kus M_k – puidu kuivaine mass, kg,

ρ – puidu kuivaine tihedus, kg/m³,

V – puidu maht, m³.

Absoluutselt kuiva puidu erisoojus on 1,34 kJ/(kg·K). Puidu soojendamisel arvutati puidu kuivaine soojenemine ja puidu niiskuse soojenemine eraldiseisvalt. Puidu kuivaine kuumutamisele kulunud energia arvutati valemiga 4.11. [13]

$$Q = M_k \cdot c \cdot \Delta t = 5640 \text{ kg} \cdot 1340 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (162 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) = 1\,073\,179 \text{ kJ}, \quad (4.11)$$

kus Q – kulunud energia, kJ,

M_k – puidu kuivaine mass, kg,

c – absoluutselt kuiva puidu erisoojus, J/(kg·K), [13]

Δt – temperatuuri muut, °C.

4.4 Puidu niiskuse soojenemine

Puidus sisalduvat niiskust arvutati vastavalt valemile 4.12.

$$W = w_{k1} \cdot M_k = 0,155 \cdot 5640 = 874,2 \text{ kg}, \quad (4.12)$$

kus W – niiskuse kogus, kg,

w_{k1} – puidu absoluutne niiskus peale autoklaavi, %,

M_k – puidu kuivaine mass, kg.

Puidus sisalduva vee kuumutamiseks kulunud energia arvutati valemiga 4.13.

$$Q = W \cdot c_v \cdot \Delta t = 847,2 \cdot 4157 \cdot (162 - 20) = 519\,138 \text{ kJ}, \quad (4.13)$$

kus Q – kulunud energia, kJ,

W – niiskuse mass puidus, kg,

c_v – vee isohoorne erisoojus, J/(kg·K),

Δt – temperatuuri muut, °C.

4.5 Niiskuse aurustumine puidust

Puidust aurunud niiskust arvutati valemiga 4.14.

$$W = (w_{k1} - w_{k2}) \cdot M_k = (0,155 - 0,08) \cdot 5640 = 423 \text{ kg}, \quad (4.14)$$

kus W – niiskuse kogus, kg,

w_{k1} – puidu absoluutne niiskus enne autoklaavi, %,

w_{k2} – puidu absoluutne niiskus peale autoklaavi, %,

M_k – puidu kuivaine mass, kg.

Auru aurustumise entalpia 6 bar ülerõhul on 2065,5 kJ/kg. Puidu niiskuse aurustumise energiat on võimalik leida valemiga 4.15.

$$Q = m \cdot h_a = 423 \cdot 2065,5 = 873\,707 \text{ kJ}, \quad (4.15)$$

kus Q – kulunud energia, kJ,

m –aurunud niiskuse mass, kg,

h_a – aurumise entalpia 6 bar ülerõhul, kJ/kg. [14]

4.6 Autoklaavi soojuskadude ületamine

Autoklaavi sisemine kiht on roostevabast terasest, soojustus kivivillast. Autoklaavi soojuskadude arvutusel võeti terase ja soojustuse paksus vastavalt autoklaavi joonisele ning on toodud tabelis (Tabel 4.3). [11]

Tabel 4.3. Autoklaavi tehnilised andmed

Näitaja	Tähis	Väärtus
Isolatsiooni paksus	δ_i	200 mm
Terase paksus	δ_m	12 mm
Autoklaavi silindrilise osa pikkus	L	12 335 mm
Autoklaavi välispinna temperatuur	T_s	40 °C
Autoklaavi siseraadius	r_1	1000 mm
Autoklaavi raadius terase väliskihini	r_2	1012 mm
Autoklaavi raadius isolatsioonmaterjali väliskihini	r_3	1212 mm
Kuumutusperiood	t_{kuum}	28 800 s

4.6.1 Konvektiivne soojusülekanne

Autoklaavi silindrilise osa pindala arvutati valemiga 4.16.

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = 2 \cdot \pi \cdot 1,212 \cdot 12,335 = 93,9 \text{ m}^2 \quad (4.16)$$

kus A – autoklaavi silindrilise osa pindala, m^2 ,

π – Archimedese konstant pii,

h - silindrilise osa kõrgus.

r – autoklaavi raadius, m.

Autoklaavi otsaseinad olid kumera profiiliga. Otsaseinade pindala arvutati välja läbi autoklaavi diameetri ning kera pindala valemiga 4.17, mis on lihtsustus, sest autoklaavi otsaseinad ei moodusta kokku pannes ideaalset kera.

$$S = 4 \cdot \pi \cdot r^2 = 4 \cdot \pi \cdot 1,212^2 = 15,2 \text{ m}^2 \quad (4.17)$$

kus S – autoklaavi otsaseinte pindala, m^2 ,

π – Archimedese konstant pii,

r – autoklaavi raadius, m.

Autoklaavi summaarne pindala on silindrilise osa ja otsaseinte pindala summa ehk 109,16 m². Arvutatakse summaarsed soojusülekande tegurid α , et oleks võimalik leida autoklaavi hinnangulised konvektiivsed soojuskaod, mida tuleb kuumutusprotsessi käigus ületada.

Esmalt leiti Rayleigh number õhu ja autoklaavi välispinna vahel valemiga 4.18. [15]

$$Ra = \frac{g \cdot \beta}{\nu \cdot \alpha} \cdot (T_p - T_\infty) \cdot D^3 = \frac{9,81 \cdot \left(\frac{1}{273 + 20}\right)}{1,568 \cdot 10^{-5} \cdot 2,074 \cdot 10^{-5}} \cdot (40 - 20) \cdot 2,424^3 = \quad (4.18)$$
$$= 3,03 \cdot 10^{10}$$

kus Ra – Rayleigh number,

g – maa raskuskiirendus, m/s²,

β – mahtpaisumistegur, 1/K,

ν – õhu kinemaatiline viskoossus, m²/s,

α – õhu temperatuurijuhtivustegur, m²/s,

T_p – autoklaavi välispinna temperatuur, K,

T_∞ – tootmisruumi temperatuur, K,

D – autoklaavi välisdiameeter, m.

Nusselti number autoklaavi välispinna ja õhu vahel leiti valemiga 4.19. [15]

$$Nu = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}}\right\}^2 = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 \cdot (3,03 \cdot 10^{10})^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{0,73}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}}\right\}^2 = 345,3 \quad (4.19)$$

kus Nu – Nusselti arv,

Ra – Rayleigh arv,

Pr –Prandtl'i arv õhule toatemperatuuril [14].

Soojusülekangetegur tuletati Nusselti arvust valemiga (4.20). [15]

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} = \frac{345,3 \cdot 0,025}{2,424} = 3,6 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (4.20)$$

kus α – soojusülekangetegur, $W/(m^2 \cdot K)$,

Nu – Nusselti arv,

λ – seisva õhu soojusjuhtivustegur, $W/(m \cdot K)$,

D – autoklaavi välisdiameeter, m.

Konvektiivne soojusülekanne on leitav läbi temperatuuride vahe ja pindala (valem 4.21). [15]

$$P_{konv} = \alpha \cdot A \cdot \Delta t = 3,6 \cdot 108,6 \cdot (40 - 20) = 7819 \text{ W} \quad (4.21)$$

kus P_{konv} –konvektiivne soojuskadu, W,

α – soojusülekangetegur, $W/(m^2 \cdot K)$,

A – autoklaavi pindala, m^2 ,

Δt – temperatuuri muut autoklaavi ja väliskeskkonna vahel, K.

Konvektiivne soojuskadu kuumutusperioodil leitav läbi valemi 4.22.

$$Q_{konv} = P_{konv} \cdot \tau = 7819 \cdot 28\,800 = 225\,179\,132 \text{ J} = 225\,179 \text{ kJ} \quad (4.22)$$

kus Q_{konv} – konvektiivne soojuskadu, J,

P_{konv} – konvektiivne soojuskadu, W,

T – kuumutusperiood, s.

4.6.2 Konvektiivse soojusülekanne kontroll

Konvektiivsel soojusülekanandel õhule on leitud horisontaalsetele silindritele lihtsustatud seos (W.H McAdams), mis sõltub ainult temperatuuride vahest välispinna ja keskkonna vahel ning silindri diameetrist (valem 4.23; valem 4.24). [16]

$$\alpha = 1,25 \cdot \left(\frac{T_p - T_\infty}{D}\right)^{\frac{1}{3}}, \text{ kui } 10^{12} > Ra > 10^9, \quad (4.23)$$

$$\alpha = 1,32 \cdot \left(\frac{T_p - T_\infty}{D}\right)^{\frac{1}{4}}, \text{ kui } 10^9 > Ra > 10^4, \quad (4.24)$$

kus α – soojusülekande tegur, W/(m²·K),

T_p – autoklaavi välispinna temperatuur, K,

T_∞ – tootmisruumi õhu temperatuur, K,

D – autoklaavi välisdiameeter, m.

Kuna arvatud Rayleigh number on 10¹⁰, siis soojusülekande tegur õhule leiti valemiga (4.23):

$$\alpha = 1,25 \cdot \left(\frac{T_p - T_\infty}{D}\right)^{\frac{1}{3}} = 1,25 \cdot \left(\frac{313 - 293}{2,424}\right)^{\frac{1}{3}} = 2,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (4.23)$$

Läbi Rayleigh arvu leitud soojusülekande tegur oli 3,6 W/(m²·K) ehk 1,1 W/(m²·K) suurem. Soojusülekande tegurid valemite vahel korreleeruvad väiksemate diameetrite korral, suuremate diameetrite korral erinevus suureneb. Arvutustes kasutatakse soojusülekande tegurit 3,6 W/m²·K, mis leiti läbi Rayleigh numbri.

4.6.3 Kiirgussoojusülekanne

Soojuskiirguse leidmiseks kasutati Stefan-Boltzmani seadust. Arvutuse lähteandmed on toodud tabelis (Tabel 4.4).

Tabel 4.4. Lähteandmed kiirgussoojusülekande arvutuseks

Näitaja	Tähis	Väärtus
Tööstusliku alumiiniumlehe mustusaste	ε	0,09 [17]
Autoklaavi hinnanguline välispinna temperatuur	T_p	40 °C

Kiirgussoojusülekanne arvutati valemiga (4.26). [15]

$$P_{kiirg} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_\delta^4) = 0,09 \cdot 5,6705 \cdot 10^{-8} \cdot 108,6 \cdot (313^4 - 293^4) = 1241 \text{ W}, \quad (4.26)$$

kus P_{kiirg} – kiirgussoojuskadu, W,

ε – Alumiiniumi mustusaste,

σ - Stefani-Boltzmani konstant, $W/(m^2 \cdot K^4)$,

A - Autoklaavi kogupindala, m^2 ,

T_s - Autoklaavi välispinna temperatuur, K ,

T_0 - Õhu temperatuur tootmisruumis, K .

Kiirgussoojuskao soojushulk kuumutusperioodil on leitav läbi valemi 4.27.

$$Q_{kiirg} = P_{kiirg} \cdot \tau = 1241 \cdot 28\,800 = 35\,745\,979 \text{ J} = 35\,746 \text{ kJ}, \quad (4.27)$$

kus Q_{kiirg} - kiirgussoojuskadu, J ,

P_{kiirg} - kiirgussoojuskadu, W ,

T - kuumutusperiood, s .

4.6.4 Soojuskadod kuumutusperioodil

Autoklaavi summaarsed soojuskadod leiti valemiga (4.28).

$$Q = Q_{konv} + Q_{kiirg} = 225\,179 + 35\,746 = 260\,925 \text{ kJ}, \quad (4.28)$$

kus Q - Autoklaavi soojuskadod, kJ ,

Q_{konv} - konvektiivse soojusülekanega kaasnevad kaadod, kJ ,

Q_{kiirg} - kiirgussoojusülekanega kaasnevad soojuskadod, kJ .

4.7 Autoklaavi soojusbilansi kokkuvõte ja kontroll

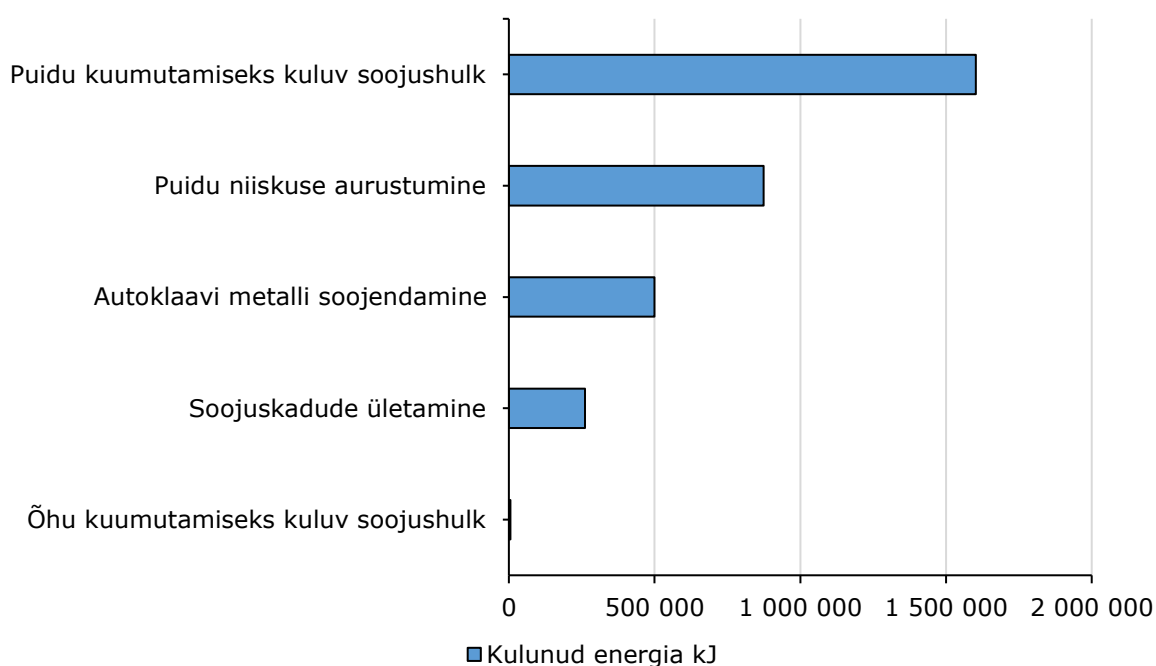
4.7.1 Soojusbilansi kokkuvõte

Kõige rohkem energiat kulub puidu soojendamisele. Arvutused tehti eeldusel, et puit on toatemperatuuril, kuid talvisel perioodil, kui puit tuleb külma ja isegi jäätununa tootmisesse, on puidu soojendamiseks kuluva energia osakaal isegi suurem. Soojustarbe jaotumine on välja toodud tabelis (Tabel 4.5) ja joonisel (Joonis 4.2).

Tabel 4.5. Autoklaavi soojusbilanss

Näitaja	Kulunud energia, kJ	Osakaal bilansist
Autoklaavi terase ja kandevekonstruktsiooni soojenemine	500 151	15,4%
Õhu soojenemine	5050	0,2%
Puidu kuivaine soojenemine	1 073 179	33,1%
Puidu niiskuse soojenemine	529 153	16,3%
Niiskuse aurustumine puidust	873 707	27,0%
Autoklaavi soojuskadude ületamine	260 925	8,0%
Kokku:	3 242 166	100%

9 m³ mahtuvusega autoklaavi arvutuslik kuivatustsükli soojustarve oli 2 623 156 kJ. Erinevus 12 m³ tooraine mahtuvusega autoklaavidest tuleneb peamiselt väiksemast tooraine mahtuvusest – puidu töötlemisele kulub vähem energiat. Arvutuslik 5 autoklaavi ööpäevane soojustarve on $4 \cdot 3\,242\,166 \text{ kJ} + 2\,623\,156 \text{ kJ} = 15\,591\,819 \text{ kJ}$.



Joonis 4.2. 12 m³ autoklaavi ühes tsükli kulunud energia

4.7.2 Autoklaavi soojusbilansi kontroll primaarenergia kaudu

Ettevõtte autoklaavides ühes ööpäevas kulunud energia oli arvutuslikult 15 591 819 kJ. Lisaks on teada autoklaavide kütteks kulunud primaarenergia kogus. 2018. aastal kasutas ettevõtte 149 674 l põlevkiviõli. Põlevkiviõlil töötavad katlad toidavad ainult ettevõtte autoklaave, seega saab leida läbi kulunud põlevkiviõli koguse ligikaudse

autoklaavi tsüklis kulunud energiahulga. Arvutuse lähteandmed on toodud tabelis (Tabel 4.6).

Tabel 4.6. Primaarenergia kontrolli lähteandmed

Näitaja	Väärtus
2018. aasta põlevkiviõli kulu	149 674 l [9]
Põlevkiviõli alumine kütteväärtus	10 kWh/l [18]
Katla eeldatav kasutegur	85%

Autoklaavides kulus primaarenergia 2018. aastal vastavalt kütuse kulule ja kütteväärtusele (valem 4.29):

$$Q = V \cdot K = 149\,674\text{ l} \cdot 10 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} = 1\,496\,740\text{ kWh} = 5\,388\,264\,000\text{ kJ.} \quad (4.29)$$

kus Q - primaarenergia kogus aastas, kWh,

V - põlevkiviõli maht, l,

K - kütteväärtus, l/kWh.

Arvestades aastas autoklaavidele kaks nädalat hoolduseks ja remondiks, kulus primaarenergia keskmiselt 351 päeva jooksul (valem 4.30):

$$Q_p = \frac{Q}{p} = \frac{5\,388\,264\,000\text{ kJ}}{351} = 15\,351\,179\text{ kJ,} \quad (4.30)$$

kus Q_p - primaarenergia soojustarbimine päevas, kJ,

Q - primaarenergia soojustarbimine aastas, kJ,

p - töötähtsused aastas.

Võttes arvesse katla kasuteguri, mis on arvutustes võetud 85%, kulub päevas autoklaavide kütmiseks energiat keskmiselt (valem 4.31).

$$Q_k = Q_p \cdot \rho = 15\,351\,179\text{ kJ} \cdot 0,85 = 13\,048\,502\text{ kJ.} \quad (4.31)$$

kus Q_k - kasulik soojushulk, kJ,

Q_p - primaarenergia soojustarbimine aastas, kJ,

ρ - kasutegur, %.

Arvestades, et autoklaavide arvutuslik ööpäevane soojustarbimine oli 15 591 819 kJ, siis jääb soojustarve samasse suurusjärku, kuid primaarenergia järgi arvatud soojustarbimine oli 2 543 317 kJ väiksem. Arvutused tehti ühe kuivatustsükli programmi põhjal, seega on eeldatav, et autoklaavide aastane soojustarve võib arvutuslikust tulemusest erineda. Primaarenergia kaudu arvatud autoklaavi soojustarve on realistlikum, kuivõrd tegu on mõõdetud ehk realselt kulunud primaarenergiaga, soojusbilansi arvutustes on kasutatud mitmeid eeldusi.

Ettevõttel on palju erinevaid kuivatustsükleid, mõni tsükkel on kõrgematel, mõni madalamatel parameetritel, autoklaavi temperatuur tsükli alguses võib üle 50 °C erineda. Läbi priimaarenergia kui ka kuivatusprogrammi põhjal tehtud arvutused vastavad seega eeldustele, kuna läbi kuivatusprogrammi tsükli arvatud soojustarve põhines ainult ühel tavapärasel kuivatustsükli programmil. Arvutus tehti eeldusel, et autoklaavi temperatuur tsükli alguses on 82 °C, samas oli juhtpaneelidelt näha, et mõne autoklaavi temperatuur oli tsükli alguses olnud ca 130 °C ehk autoklaavi terase kuumutamisele kulunud energia on sellisel juhul oluliselt väiksem.

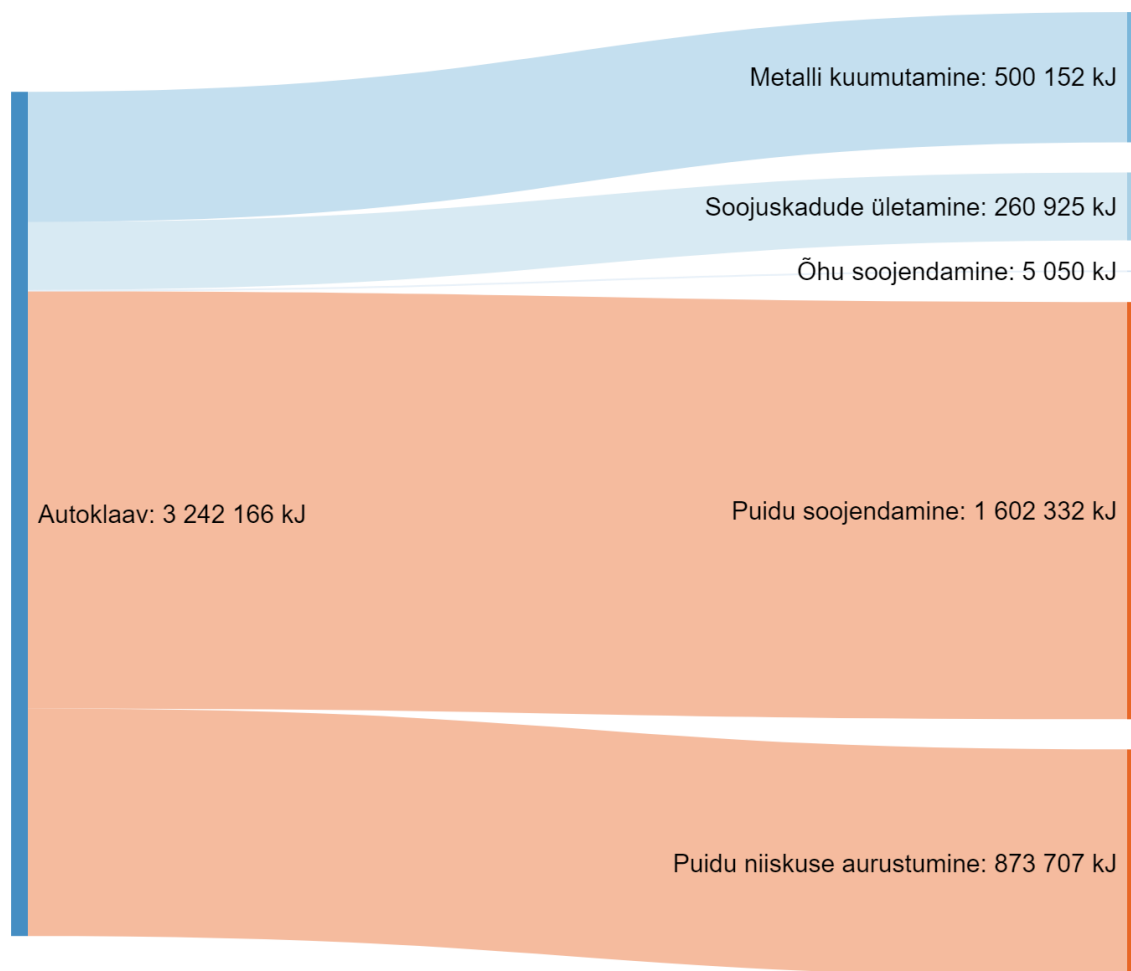
4.7.3 Autoklaavi soojusbilansi järeldused

Autoklaavi terase ja kandevkonstruktsiooni kuumutamisele ja soojuskadude ületamisele kuluv energia eraldub tootmisruumi. Kuna vabaneva soojuse abil on osaliselt lahendatud tootmishoone küte, siis vaadeldakse seda soojust, kui juba kasulikult tagastuvat soojust.

Õhu soojenemisel kulunud energia on väikese osakaaluga ning väljutatakse ülerõhu klapist atmosfääri. Puidust aurunud niiskust on võimalik tagastada, kuid hetkel paisatakse ka see energia atmosfääri. Kuivõrd soojus on auru kujul, siis on võimalik jääksoojust efektiivselt rakendada ka kuivatite soojustarve vähendamiseks. Kuivatid töötavad aastaringelt ehk jääksoojusele oleks olemas tarbija sõltumata aastaajast.

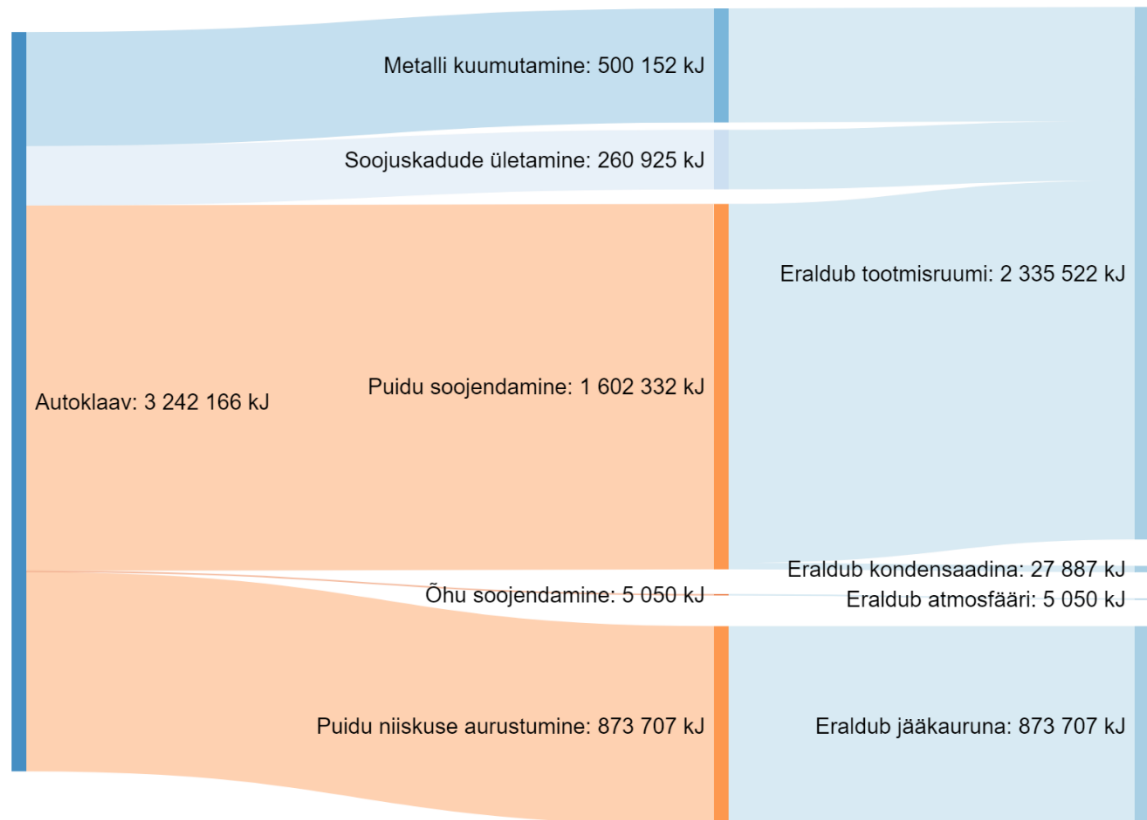
Kõige suurema osakaaluga energiabilansist on puidu soojendamiseks kulunud energia. Puidu kuumutamiseks kulunud soojus eraldub tagasi tootmisruumi peale autoklaavi läbimist. Jääksoojust oleks võimalik kasutusele võtta, kuid kuna hetkel eraldub jääksoojus tootmisruumi, siis sellega juba vähendatakse tootmisruumide küttevajadust.

Autoklaavi soojusbilansi Sankey diagrammina kajastab joonis (Joonis 4.3). Suurem osa energiast kulub puidu töötlemisele - puidu soojendamisele ja niiskuse aurustumisele, soojusbilansist kulus puidu töötlemisele 76,4% soojusenergiast, mida võib ühtlasi lugeda ka 12 m³ tooraine mahtuvusega autoklaavi kasuteguriks.



Joonis 4.3. Sankey diagramm autoklaavi soojusbilansist

Täiendavalt tagastatavana vaadeldakse eelkõige autoklaavi niiskuse aurustumisele kulunud energiat ning osa puidu soojendamiseks kulunud energiast kondensaadi näol. Joonis 4.4 toob välja kuhu soojus eraldub ning autoklaavi soojusbilansi. Jooniselt on näha, et valdav osa soojusest tagastub tootmisruumi.



Joonis 4.4. Sankey diagramm, tagastuv soojus

Arvestades asjaolu, et enamuse protsessis kulunud soojusest eraldub juba tootmisruumi ning tootmisruumide kütet see hetkeseisuga ei lahenda, siis ei asendaks ilmselt ka kogu jääksoojuse kasutusele võtmine ruumide küttevajadust. Kondensaadi jääksoojus on arvatud $\Delta t=80\text{ °C}$ juures tulenevalt sellest, et eralduv kondensaat on ligikaudu 100 °C ning toodangu ehk ka toodangus sisalduva niiskuse algtemperatuuriks võeti 20 °C .

Arvutuslikult jaguneb täna tagastuv soojus:

- 69,5% eraldub tootmisruumi;
- 27,1% eraldub jääkauruna;
- 3,4% eraldub kondensaadina.

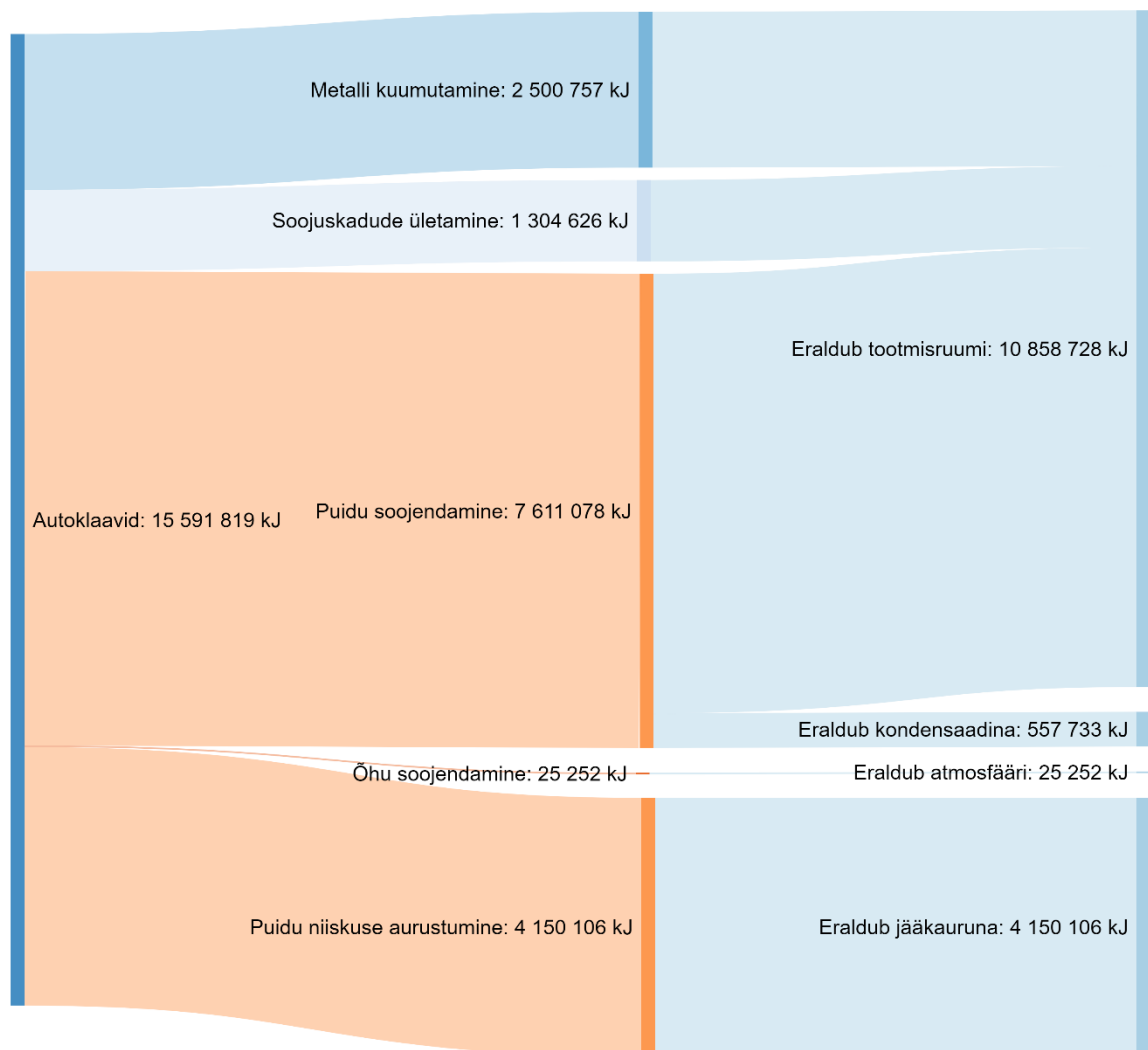
Autoklaavidest eraldub juba täna tootmisruumidesse üle $2/3$ sisendenergiast ehk on vähe tõenäoline, et tootmisruumide kütet oleks võimalik jääksoojuse abil olulisel määral lahendada. Soojust, mis eraldub tootmisruumi, saab lugeda osaliselt kasulikuks soojuseks, sest kütteperioodil on tootmisruumides väiksem küttevajadus ning kütteperiood on eralduva jääksoojuse tõttu kõigest 6 kuud. Samas ei ole jääkauru, mis moodustab üle neljandiku soojusbilansist, kuidagi kasutusele võetud ning see väljastatakse hetkel lihtsalt atmosfääri.

Kondensaadi jääsoojuse kasutamise potentsiaal on kordades väiksem jääkauru kasutusele võtmisest. Kondensaadi jääsoojust oleks võimalik samuti kasutada tootmisruumide kütteks, kuid tulenevalt jääsoojuse suhteliselt väiksest kogusest ning kondensaadi omadustest ei oleks investeeringu saavutatav mõju arvestades tootmisruumide mahtu suur.

Kindlasti on mistahes lahenduse välja töötamisel vaja arvestada jääkauru, kui ka kondensaadi omadustega, sest tegemist ei ole puhta veega. Jääkaur sisaldab olulisel määral ka tahkeid osi ehk soojusvaheti peab olema sobilik saastunud auru vastuvõtmiseks. Soojusvaheti peab olema hõlpsasti puhastatav ja hoolduseks ligipääsetav. Lisaks tuleb kindlasti arvestada asjaoluga, et jääkauru tekib ainult protsessi lõppfaasis ehk jääsoojuse kasutamisel tuleb arvestada tsüklilisusega.

Autoklaavide summaarne ööpäevane soojusbilanss on välja toodud joonisel (Joonis 4.5). Peamine erinevus seisneb 9 m³ autoklaavis, sest toodangu kuumutamiseks ja niiskuse aurustumiseks kulub vähem energiat ning sellest tulenevalt on ka jääkauru ja kondensaadi osakaal energiabilansist väiksem.

Summaarselt tarbivad autoklaavid päevas 15 591 819 kJ soojust, millest 10 858 728 kJ tagastub tootmisruumi. Ööpäevas tekib jääkauru arvutuslikult autoklaavide peale kokku 4 150 106 kJ ehk 1153 kWh. Kondensaadina eraldub ööpäevas 155 kWh ehk selle kasutamine on palju väiksema potentsiaaliga võrreldes jääkauruga.



Joonis 4.5. Viie autoklaavi arvutuslik summaarne ööpäevane soojusbilanss

5. JÄÄKSOOJUSE KASUTAMISE VÕIMALUSED

Jääksoojuse kasutamiseks analüüsitakse kolme erinevat võimalust:

- Jääkauru kasutus kuivatite kütteks;
- Kondensaadi kasutus ruumide kütteks;
- Ruumide küte kondensaadi ja jääkauruga.

Eelkõige on autoklaavi jääksoojuse kasutamisel probleemiks protsessi tsüklilisus. Autoklaavide täistsükkel võtab aega 24 tundi, sest autoklaave täidetakse korra päevas. Kuna kõik autoklaavid pannakse tööle päeval, siis esineb perioode, kus pikalt ei teki üldse jääkauru ning autoklaavide töö lõppfaasis on jääkauru väljastamine intensiivne. Jääkauru väljastatakse protsessi lõpus sõltuvalt programmist tavaliselt 2-2,5-tunnilise perioodi vältel, seega ei ole soojuse väljastamine pidev. Lisaks väljutatakse protsessist puidust eralduvat auru ka kuivatustsükli vältel ehk auru väljastamine toimub ligikaudu 4-tunnise perioodi vältel. Ülerõhk väljub protsessi käigus liigse ülerõhu väljutamiseks, rõhuväljastuskapp on avatud kuni autoklaavi rõhk on alanenud 20 kPa. Üheks võimalikuks lahenduseks on aurukollektori paigaldamine soojusväljastuse ühtlustamiseks.

Ettevõttes on autoklaavide kütteks paigaldatud kaks 600 kW põlevkiviõli katelt. Tootmisruumide soojusenergia saadakse hakkpuitkatla abil – põletatakse tootmises tekkivaid tootmisjääke ning täiendavat kütust sisse ei osteta. Sellest tulenevalt on autoklaavidele kuluv energia kõrgema ühikmaksumusega, kui ruumide kütteks kasutatav energia.

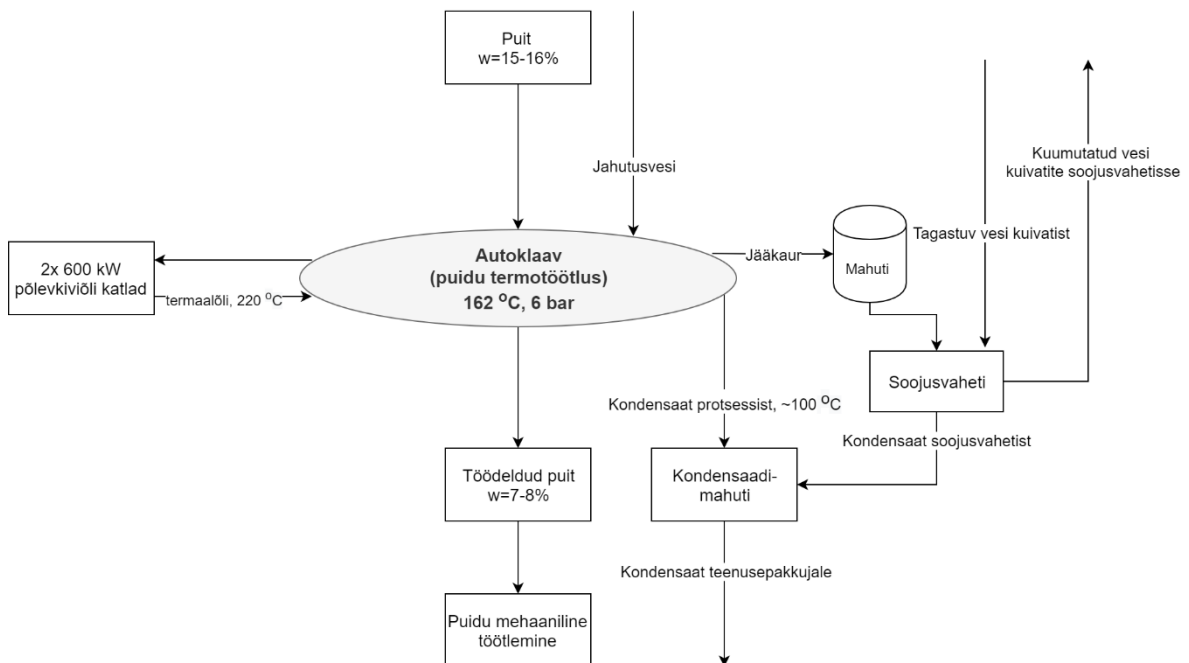
5.1 Jääksoojuse kasutamine uues kamberkuivatis

Esialgse hinnangu põhjal oleks ettevõttele kõige kasulikum jääksoojuse kasutus ühildada uute rajatavate kuivatitega. Kuivatite ehitusel oleks võimalik integreerida jääksoojuse kasutuse võimalus kuivati soojusvarustussüsteemiga. Puit tuleb talvisel perioodil tootmisesse sisse ka jäätunult ning ei jõua autoklaavi sisenedes alati isegi üles sulada. Peale autoklaavi läbimist on ettevõtte hinnangul aastas keskmiselt umbes 20% puitu liialt niiske ning seda osa on vaja täiendavalt töödelda. Niiske puidu separeerimine tehakse visuaalselt, osa niiskest puidust jõuab visuaalse separeerimise tõttu ka järgnevasse tootmisetappidesse. Ettevõttele tähendab see tootmisvõimsuse kadu ja täiendavat energeetilist kulu. Lisaks võimaldaks eelduse kohaselt eelkuivatatud puit kiirendada autoklaavi kuivatustsükli ning vähendada tekkivat praaki – autoklaavis võib

tekkida liialt suur niiskusgradient, mis võib põhjustada defekte. Kasutades autoklaavides madalama algniiskusega puitu väheneks nii märja puidu osakaal peale autoklaavi, kuid paraneb ka toodangu kvaliteet.

Kuivatitesse ei ole võimalik madalatemperatuurset soojust suunata kuivati küttevee peale- ja tagasivoolu temperatuuri tõttu, kuivatite ehitamist alles planeeritakse, seega täpset tehnilist lahendust veel ei ole teada. Leitud on potentsiaalne saavutatav kuivatite energiasääst läbi autoklaavide jääkauru tekke. Kuivatitele on võetud juba ka üks pakkumine ettevõttelt Termolegno S.r.l – maksimaalne kuivatusõhu temperatuuriks on projekteeritud 348K (75 °C) ja küttevee maksimaalne temperatuur 363K (90 °C). Kuivati maksimaalseks soojusvõimsuseks on 907 kW.

Võttes referentsiks ühe Eesti puidutööstuse sama pakkuja (Termolegno S.r.l.) kuivatite peale- ja tagasivoolu andmed (autori bakalaureusetöö lähteandmed), on tagastuva vee temperatuur olnud suviste miinimumide ajal 333 K (60 °C) juures ja talvistel maksimumidel kuni 353 K (80 °C). Pealevool on olnud 10-15 kraadi soojem ning oli talvel 363 K (90 °C) juures. Arvutus põhineb seega ainult jääkaurust vabaneval energial, sest madalama temperatuuriga soojust, nagu näiteks autoklaavi läbinud jahutusvesi, ei ole võimalik praktiliselt kuivatite küttevajaduse vähendamiseks kasutada. Lihtsustatud lahenduse skeem on toodud joonisel (Joonis 5.1) [19]. [20]



Joonis 5.1. Jääkauru kasutusele võtmise põhimõtteline skeem

Ettevõtte plaanib kuivatite küttevõimsuse tagada esialgu kahe olemasoleva põlevkiviõli katla abil, mis on mõlemad võimsusega 600 kW ehk kokku 1,2 MW. Kateldel on olemas mõningane soojusvaru ehk väiksemate soojustarbijate lisandumisel ei teki probleeme, küll aga võib probleeme tekitada ulatuslik soojusnõudluse kasv – lisaks kuivatitele plaanitakse rajada ka kuues autoklaav. Tekib oht, et katlad ei ole piisavalt võimsad, et tagada nii kuivatite kui autoklaavide töö tipukoormuse ajal. Selleks on ettevõttel plaanis paigaldada katlale ökonomaisem efektiivsuse tõstmiseks ning vajadusel investeeritakse täiendavasse soojusvõimsusesse. Lisaks saab vähendada soojuskoormust jääsoojuse efektiivne rakendamine. Peamine eesmärk on vältida investeeringut täiendava katla näol või vähendada lisanduvat soojusvõimsust ehk jääsoojuse kasutusele võtmisega üritatakse vältida suuremaid tulevasi investeeringuid.

Probleemiks jääkauru kasutamisel on eelkõige jääkauru puhtus. Joonis 5.2 kajastab kondensaadi paagi õhutusava, selle taga on näha torud, millest väljastatakse autoklaavi jääsoojus atmosfääri. Soojusvaheti valikul tuleb arvestada ummistuste riskiga – seade peab olema kergesti ligipääsetav ja puhastatav. Lisaks tuleks tähelepanu pöörata täiendavale kondensaadi eraldusele jääkaurust ehk ettevõttel on vaja kas kondensaadi mahutit tihedamini (igapäevaselt) tühjendada või investeerida suuremasse mahutisse.



Joonis 5.2. Kondensaadi paagi õhutusava, taga autoklaavi jääkauru torud

5.1.1 Jääkauru arvutus kuivatite energiavajaduse vähendamiseks

Aur on analüüsitavas autoklaavis kuumutusprotsessi lõpuks parameetritega 162 °C ning ülerõhul 6 bar. Ülerõhku ehk auru väljutatakse autoklaavist programmi ette antud rõhu saavutamisel sujuvalt 20 kPa võrra, et hoida rõhku ning tsükli lõppfaasis väljutatakse autoklaavidest ülerõhk (aur) täielikult.

Ettevõtte on võtnud 2017. aastal indikatiivse hinnapakumise jääksoojuse kasutamiseks kuivatites. Pakkumine ei olnud detailne, välja oli toodud ainult seadmete nimetused ja maksumused. Pakkumises sisaldus peamiste osadena roostevabast terasest 250 kW soojusvaheti, 6m³ roostevabast terasest akupaak, torustikud jääkaurule, kondensaadile ja termaalõlile ning automaatika. Lahenduse maksumus oli ligikaudu 100 000 €, mis võetakse arvutustes aluseks.

Jääkauru kasutamine kuivatites omab eelist teiste jääksoojuse kasutamise võimalustega, sest kuivatid töötavad aastaringselt ning tootmisruume köetakse kuus kuud aastas. Tootmisruumide kütteperiood on tavapärasest mõnevõrra väiksem ruumidesse eralduva heitsoojuse tõttu. Kuna nii kuivatid, kui autoklaavid töötavad aastaringselt, siis on jääksoojusele olemas tarbija ka suvisel perioodil.

Protsessis kulub puidu niiskuse aurustumisele energiat 12 m³ mahtuvusega autoklaavides 873 707 kJ ning 9m³ mahtuvusega autoklaavis 655 280 kJ. Summaarselt kulub ööpäevas puidu aurustumisele energiat 4 150 106 kJ (Tabel 5.1). [21]

Tabel 5.1. Autoklaavide puidu niiskuse aurustumiseks kuluv energia ööpäevas

Näitaja	Soojushulk ühes tsüklis, kJ	Autoklaavide arv, tk	Soojushulk kokku, kJ
12 m ³ mahtuvusega autoklaav	873 707	4	3 494 826
9 m ³ mahtuvusega autoklaav	655 280	1	655 280
KOKKU:	-	5	4 150 106

Jääksoojuse kasutamise üks peamistest eesmärkidest ongi lisanduva soojustarbe katmine olemasolevatest allikatest. Puidu niiskuse aurustumisel kulunud energiat, mida täna kasulikult ei rakendata saaks suunata lisanduvatele soojustarbijatele.

Tabel 5.2 toob välja ööpäevas tekkiva jääksoojuse, mida on võimalik kasutada kuivatite kütteks. Tabelist nähtub, et valitud parameetrite juures (väljuva kondensaadi temperatuur 95-80 °C ja soojuskadude osakaal 2-10%) on kasulik ööpäevane jääksoojuse hulk vahemikus 1140-1040 kWh ehk ööpäevane jääkauru keskmine

võimsus jääb vahemikku 43,3-47,5 kW. Kui võtta arvesse asjaolu, et jääkauru väljastatakse ööpäevas umbes 6-tunnise perioodi jooksul, siis jääb reaalselt kuumutusprotsessi lõppfaasis väljastatava jääkauru võimsus vahemikku 130-142 kW, kuid on periooditi ka suurem.

Tabel 5.2. Kasuliku jääksoojuse koguse (kWh) mõju soojuskadudest ja soojusvahetist väljuva kondensaadi temperatuurist

Jääkauru soojuskaod (paremale)					
Soojusvahetist väljuva kondensaadi temperatuur (alla)					
Kasulik jääksoojus, kWh	2%	4%	6%	8%	10%
95 °C	1 132 kWh	1 109 kWh	1 086 kWh	1 063 kWh	1 040 kWh
90 °C	1 135 kWh	1 112 kWh	1 088 kWh	1 065 kWh	1 042 kWh
85 °C	1 137 kWh	1 114 kWh	1 091 kWh	1 067 kWh	1 044 kWh
80 °C	1 140 kWh	1 116 kWh	1 093 kWh	1 070 kWh	1 047 kWh

Lihttasuvus arvutati läbi põlevkiviõli kokkuhoiu, põlevkiviõli maksumus oli ettevõttele 2018. aastal 0,57 €/l. Põlevkiviõli alumiseks kütteväärtuseks võeti Riigi Teatajast energiatõhususe arvutamise meetodikast 10,0 kWh/l ehk 36 000 kJ/l. Katla kasuteguriks hinnati 85%, sest katlad on üsna heas seisukorras (rajatud 2006. aastal), puudub õhuelsoojendus ning ökonomaisem, lisaks on soojuskandjaks termaalõli ning väljuvate suitsugaaside temperatuur on ligikaudu 300 °C. Autoklaavide aastaseks tsüklite arvuks hinnati 351, sest autoklaavid töötavad aastaringi ning kaks nädalat hinnati hooldus- ja parandustöödeks. [18] [9]

Tabel 5.3. Tasuvusarvutuste eeldused

Näitaja	Väärtus
Tsükleid aastas	351 tk
Põlevkiviõli maksumus	0,57 €/l
Põlevkiviõli kütteväärtus	10 kWh/l
Katelde kasutegur	85%
Soojuskaod	2-10%
Investeeringu maksumus	100 000 €

Saavutatav aastane rahaline sääst jääksoojuse kasutamisest on toodud tabelis (Tabel 5.4). Arvutuses võeti eelduseks, et soojusvahetist väljuva kondensaadi temperatuur on 90 °C.

Tabel 5.4. Aastane rahaline kütuse sääst sõltuvalt katla kasutegurist ja soojuskadudest

Jääkauru soojuskaod (paremale)					
Katla kasutegur (alla)					
Aastane rahaline sääst, €	2%	4%	6%	8%	10%
80%	28 499 €	27 918 €	27 336 €	26 754 €	26 173 €
85%	26 823 €	26 275 €	25 728 €	25 181 €	24 633 €
90%	25 333 €	24 816 €	24 299 €	23 782 €	23 265 €
95%	23 999 €	23 510 €	23 020 €	22 530 €	22 040 €

Investeeringu lihttasuvusaeg analüüsitud parameetrite vahemikus oli 3-7 aastat. Samas võib investeeringu positiivne mõju olla oluliselt suurem, kui suudetakse vältida täiendavaid investeeringuid lisanduva soojuskoormuse korral või on võimalik valida väiksema võimsusega katel kuivatite kütte tagamiseks. Investeeringu lihttasuvusajad valitud parameetrite vahemikus on toodud tabelis (Tabel 5.5).

Tabel 5.5. Lihttasuvusaeg (aasta) sõltuvalt katla kasutegurist ja investeeringu maksumusest

Investeeringu maksumus (paremale)					
Katla kasutegur (alla)					
Lihttasuvusaeg, aasta	75 000 €	100 000 €	125 000 €	150 000 €	175 000 €
80%	3	3	4	5	6
85%	3	4	5	5	6
90%	3	4	5	6	7
95%	3	4	5	6	7

Täiendava soojusvõimsuse näol võib olla võimalik vältida alternatiivseid investeeringuid soojusvõimsusesse või vähendada täiendavalt lisatavat soojusvõimsust ehk jääsoojuse kasutusele võtmine võib olla majanduslikult otstarbekas sõltumata lihttasuvusajast, mis põhineb ainult kütuse kokkuhoiul.

Lahenduse nüüdispuhasväärtuse (NPV) ja kapitalitootlikkuse (IRR) arvutamiseks kasutatud eeldused on toodud tabelis (Tabel 5.6). Saavutatavat säästu korrutati tulevate aastate väärtuste hindamiseks läbi rahandusministeeriumi pikaajalise finantsprognoosi põhjal tarbijahinnaindeksiga. [22]

Tabel 5.6. Tasuvusanalüüsi eeldused

Näitaja	Väärtus	Põhjendus
Investeeringu eluiga	25 aastat	Hinnanguline
Diskonteerimismäär	10,9%	Tööstuste keskmine [23]
Tarbijahinnaindeks perioodil	2,2-2,0%	Vastavalt rahandusministeeriumi prognoosile

Projekti elueaks hinnati 25 aastat. Kuigi soojusvarustussüsteemid võiksid töötada isegi kauem, siis ei ole tekkiv jääkaur puhas. Diskonteerimismäär võeti D. Jegorovi lõputöö alusel – töös analüüsiti Eesti tööstusettevõtete keskmist omakapitali tootlikkust. [23]

Investeeringu tasuvusnäitajad tabelis (Tabel 5.3) toodud eeldustel on toodud tabelis (Tabel 5.7).

Tabel 5.7. Investeeringu tasuvusnäitajad

Näitaja	Väärtus
Investeeringu lihttasuvusaeg, a	4
Kapitalitootlikkus (IRR), %	30%
Nüüdispuhasväärtus (NPV), €	156 112 €
Ööpäevas tagastatav jääksoojus, kWh	1163 kWh
Aastas säästetud põlevkiviõli, l	34 693 l
Aastas rahaline sääst, €	27 370 €

5.2 Kondensaadi jääksoojus

Protsessis tekkiv kondensaad suunatakse maa-alusesse 5m³ vahemahutisse. Kondensaadi temperatuur on pea 100 °C (373 K), kondensaad pumbatakse mahuti täitudes ümber vahemahutisse ning antakse üle jäätmekäitlejale, sest kondensaati on vaja täiendavalt ümber töödelda. Mahuti saab täis keskmiselt kolme ööpäeva ehk 72 tunni jooksul. Kuna ettevõttes on 5 autoklaavi, mis teevad ööpäevas ühe täistsükli, siis täitub kondensaadimahuti keskmiselt iga 15 autoklaavi tsükli tagant.

Hetkel kondensaadi jääksoojust ei kasutata ning jääksoojus eraldub atmosfääri, kondensaadi paagi õhutusava on joonisel (Joonis 5.2). Kui kuivatite kütteks kasutada ära jääkauru, siis on vaja varem atmosfääri suunatud kondensaad samuti kondensaadimahutisse suunata. Autoklaavide jääkauru kondensaad suunatakse meetme raames kondensaadimahutisse ning kui lisandub üks täiendav autoklaav, siis võib tekkida vajadus suurema kondensaadimahuti paigaldamiseks.

5.2.1 Kondensaadi jääsoojuse arvutus

Hinnanguliselt tekib 72 tunni jooksul 5000 kg kondensaati ehk ööpäevas 1667 kg. Kasulik soojuse hulk arvutati valemiga (4.13) ehk läbi erisoojuse, temperatuuride vahe ja massi. Tabel 5.8 kajastab erinevaid stsenaariumeid, kui madalale kondensaadi temperatuuri jahutada on võimalik.

Tabel 5.8. Tagastatav soojushulk sõltuvalt soojusvaheti läbinud kondensaadi temperatuurist, kJ

Soojusvahetist väljuva vee temperatuur	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C
Ööpäevas tagastuv soojus, kJ	348 583	278 867	209 15	139 433
Aastas tagastuv soojus, kJ	122 352 750	97 882 20	73 411 65	48 941 10
Kütteperioodil tagastuv soojus, kJ	61 176 375	48 941 100	36 705 825	24 470 550
Keskmine kasulik võimsus ööpäevas	3,9 kW	3,1 kW	2,3 kW	1,6 kW

Kuivatites võib olla ligikaudu 90 °C-ne vesiküte, seega on mõistlikum kasutada kondensaadi jääsoojust ruumide kütteks, sest kondensaat ise on ligikaudu 100 °C. Hetkel köetakse ruume käsitsi klotsidega, mida toodetakse ettevõtte tootmisjääkidest ning tootmisruumide temperatuur kõigub sõltuvalt töögraafikust. Samas on võrreldes ettevõtte tootmisruumide mahuga tegemist väga väikese võimsusega (1,6-3,9 kW) ehk kondensaadi jääsoojuse kasutusele võtmisega ei suudetaks tagada tootmisruumide kütet.

Küll aga on võimalik ühtlustada tootmisruumide temperatuuri nädala lõikes Tootmises on kütteperiood aastas 6 kuud kuid lisanduv soojusvõimsus kondensaadist oleks küllaltki väike (1,6-3,9 kW). Antud lahendusele pakkumist ei ole võetud (kondensaadi äravoolu või kondensaadimahutisse soojusvaheti, soojuse juhtimine tootmisruumidesse), siis ei ole investeringu lihttasuvusaeg teada. Samas ei lahendaks investering olemasolevaid puudujääke tootmisruumide kütte osas.

Kui võtta arvesse lisaks olemasolevale kondensaadile jääkauru kasutusele võtmisest tekkiv kondensaadi kogus, siis tekib kondensaati protsessi käigus oluliselt rohkem. Hetkel täitub 5 m³ mahuti 15 autoklaavi tsükli jooksul ehk kondensaati tekib tsükli jooksul ligikaudu 333,3 kg, siis ühe tsükli jooksul tekib jääkauru arvutuslikult 423,0 kg ehk tekkiva kondensaadi kogus muutuks enam kui kahekordseks. Kui tänases olukorras on vaja mahutit tühjendada korra kolme päeva jooksul, siis kui võtta arvesse, et ühe 12m³ autoklaavi tsükliga tekiks kondensaati 756,3 kg ning päevas tekiks kokku 3676

kg kondensaati, siis oleks vaja kondensaadi mahutit tühjendada iga päev. Seega tuleks jääkauru kasutusele võtmisega läbi mõelda laiemalt kondensaadi kogumise süsteem.

Arvutuses on eelduseks võetud, et jääkauru kasutusele võtmisest lisanduv kondensaat on temperatuuriga 90 °C, vastavalt eelnevale kuivatite jääkauru arvutusele. Lisanduv kondensaat on väiksema temperatuuriga, kui on tänane kondensaadi temperatuur (100 °C), sest osa soojusest antakse üle kuivatite soojusvahetitele. Tabel 5.9 toob välja summaarse kasuliku soojuse koguse ning ööpäevase võimsuse, kui arvestada jääkauru kasutusele võtmisega lisanduvat kondensaadi kogust.

Tabel 5.9. Summaarne jääksoojuse kasulik võimsus kondensaadist

Soojusvahetist väljuva kondensaadi temperatuur	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C
Ööpäevas tagastuv soojus kondensaadist täna	348 583 kJ	278 867 kJ	209 150 kJ	139 433 kJ
Ööpäevas tagastuv soojus jääkauru kondensaadist	353 882 kJ	265 411 kJ	176 941 kJ	88 470 kJ
Ööpäevas tagastuv soojus kondensaadist kokku	702 465 kJ	544 278 kJ	386 091 kJ	227 904 kJ
Ööpäevane keskmine soojusvõimsus	8,13 kW	6,30 kW	4,47 kW	2,64 kW

5.3 Tootmisruumide küte

Hetkel on tootmisruumide küte lahendatud manuaalselt, välja on ehitatud korralik vesiküttel kalorifeeridel põhinev küttesüsteem. Probleemiks on eelkõige varieeruv temperatuur tootmisruumides, seda eelkõige nädalavahetusel, kui töötavad ainult autoklaavid. Küttesüsteem on lahendatud kahe AS Komforts Grupp 600 kW tootmisjääkidega köetava katla abil, küttesüsteemi probleemiks on eelkõige inimfaktor, sest katlaid köetakse käsitsi. Käsitsi kütmise tõttu võib tootmisvälisel ajal ruumide temperatuur madalale langeda. Kasutades jääksoojust ruumide kütteks on võimalik tagada stabiilsem tootmisruumide temperatuur, kui ka säästa küttekuludelt. Briketti toodetakse ettevõtte enda tootmisjääkidest ning väiksem tootmisjääkide kasutus tootmisruumide kütteks võimaldaks suurendada briketitoodangut (Joonis 5.3).



Joonis 5.3. Briketti tootmine [9]

Kuivõrd enamik jääkaurust väljub protsessist ligikaudu kuuetunnise perioodi jooksul, siis on tootmisruumide kütteks jääksoojuse kasutamisel vajalik rajada soojuse väljastamise ühtlustamiseks ja salvestamiseks vahemahuti. Jääkauru teke on ööpäevas keskmiselt 43,3-47,5 kW, ajutiselt on saadaval jääksoojuse võimsus kordades suurem ning suurem osa päevast on saadaval soojusvõimsus 0 kW. Samuti tekib enamuse kondensaadist jahutusprotsessi ajal, kui protsessi piserdatakse vett ehk kondensaadi eraldus ei ole samuti ühtlane ning jääb ööpäevas keskmiselt vahemikku (koos jääkauru kondensaadiga) 2,6-8,1 kW. Selleks, et tootmisruumide kütet jääksoojuse arvelt ühtlustada, oleks vaja süsteemi integreerida soojuse akumulatsioonipaak, mis oleks võimeline ühtlustama jääksoojuse väljastust vähemalt ühe ööpäeva lõikes.

Keskmine ööpäevane võimsus nii tekkival kondensaadil, kui jääkaurul on toodud tabelis (Tabel 5.10).

Tabel 5.10. Kondensaadi ja jääkauru summaarne jääksoojuse teke

Näitaja	Väärtus
Jääkauru ööpäevane keskmine võimsus	43,3-47,5 kW
kondensaadi ööpäevane keskmine võimsus	2,6-8,1 kW
Jääksoojuse keskmine võimsus	45,9 – 55,6 kW

Autori hinnangul ei ole mõistlik jääkauru tootmisruumide kütteks kasutusele võtta, sest tootmisruume köetakse kuus kuud aastas kuid kuivatid oleks töös aastaringiselt.

Kondensaati ei ole praktiliselt võimalik kuivatite kütteks kasutada, sest kuivatite küttekontuur on talvisel perioodil eelduslikult umbes 90/80 °C ehk hakkab liginema kondensaadi enda temperatuurile.

5.4 Jääksoojuse kasutamise kokkuvõte ja soovitused

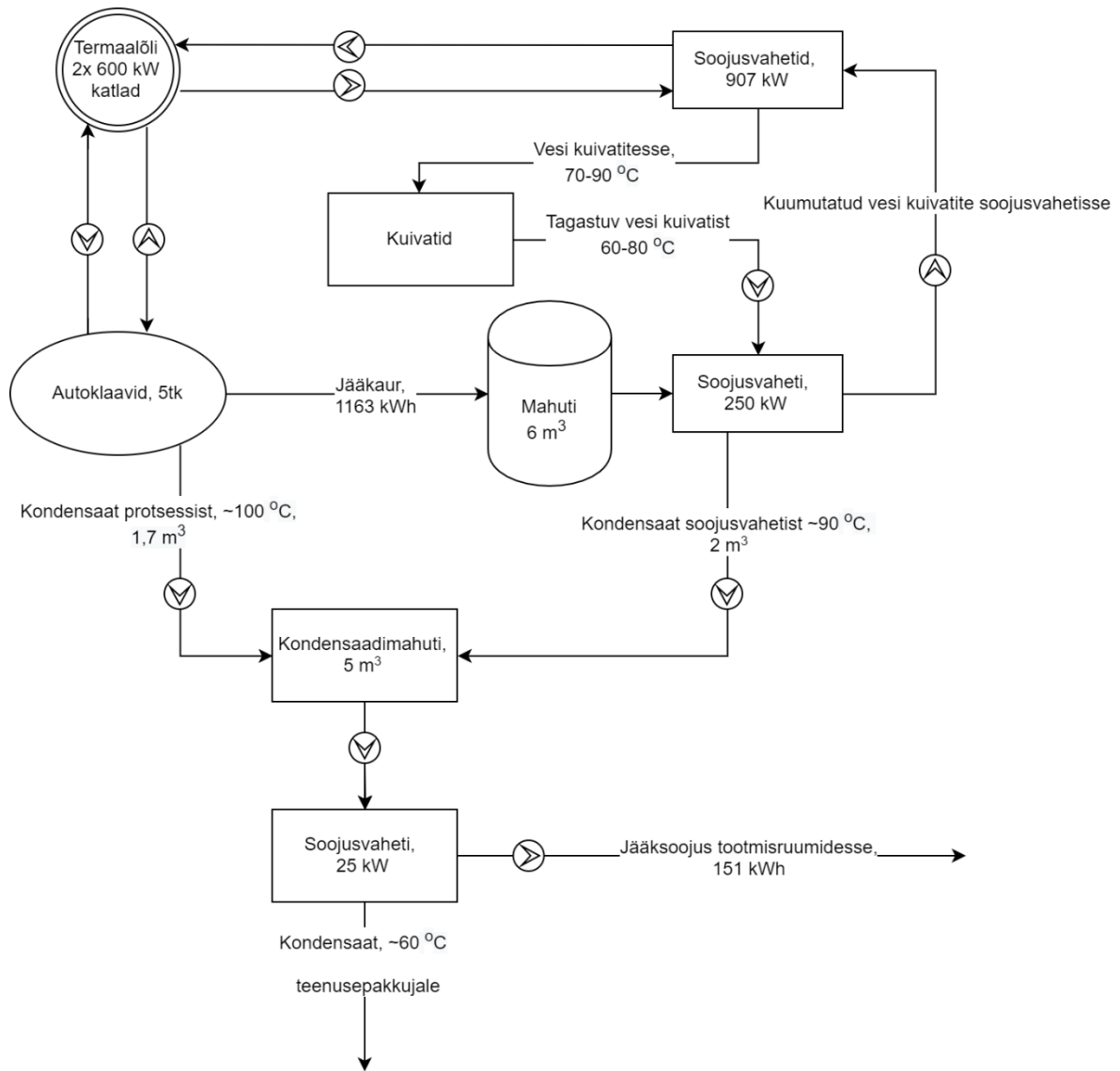
Jääksoojuse kasutusele võtmist analüüsiti kolmel erineval viisil:

- Jääkauru kasutus kuivatite energiavajaduse katteks;
- Kondensaadi jääksoojuse kasutus ruumide kütteks;
- Kondensaadi, jääkauru ning jääkaurust lisanduva kondensaadi kasutus ruumide kütteks.

Autori hinnangul on kõige mõistlikum võtta kasutusele jääkaur eelkõige kuivatite kütetarbe vähendamiseks. Jääkauru kasutamist kuivatites soosib eelkõige kuivatite aastaringne käitamine ehk soojusele on rakendust aastaringset. Probleemiks on jääkauru väljastamise tsüklilisus ehk jääkauru on saada vaid osa päevast. Päevas tekib arvutuslikult jääkauru 1163 kWh, juhul kui auru kondensaat väljub soojusvahetist temperatuuril 90 °C.

Vältimaks täiendavaid investeeringuid küttevõimsusesse, tasuks kaaluda ka autoklaavide tsüklilist käitamist. Täiendavasse soojusvõimsusesse investeerimist oleks võimalik vältida läbi autoklaavide töösüklite optimeerimise, et autoklaavide kuumutusperioodid võimalikult vähe kattuks. Installeeritud on 1,2 MW autoklaavide soojustarve katmiseks, kuid keskmine päevane autoklaavide soojustarve on kõigest 80 kW ehk suurt soojusvõimsust on vaja ainult kuumutusperioodi tarbimistippude katmiseks. Samas eeldaks autoklaavide tsükliline käitamine töögraafikute ja protsesside ümber vaatamist ning öiste vahetustega tööd.

Tootmisruumide kütteks oleks võimalik kasutada kondensaadi jääksoojust, mida tekib 60 °C-ni jahutades päevas 151 kWh. Kondensaadi jääksoojust tekib kordades vähem, kui jääkauru ning tootmisruume köetakse odavamaga (tootmisjäägid) ehk esmalt on autori hinnangul mõistlik tegeleda jääksoojuse kinni püüdmisega autoklaavidest väljutatavast aurust ning kasutada seda põlevkiviõli katelde koormuse vähendamiseks. Lihtsustatud põhimõttelise skeemi jääksoojuse kasutusele võtmisest toob välja Joonis 5.4. Joonisel kajastatud väärtused iseloomustavad ühte ööpäeva.



Joonis 5.4. Lihtsustatud jääsoojuse kasutusele võtmise skeem

KOKKUVÕTE

Analüüsitud ettevõttes tekib viiest autoklaavist jääsoojust auru ja kondensaadi näol, mida ei ole kasutusele võetud. Uuriti jääkauru suunamist kuivatite kütteks ning kondensaadi jääsoojuse kasutust tootmisruumide kütteks. Lõputöö eesmärk oli tuvastada, kas autoklaavide jääsoojust on mõistlik ja tasuv ettevõttes kasutusele võtta. Eelkõige uuriti jääkauru kasutusele võtmise otstarbekust lisanduvast kamberkuivatis.

Selleks, et oleks aru saada kuidas ja kas oleks jääsoojust mõistlik kasutada, koostati autoklaavidele energiabilanss. Enamus protsessis kulunud soojusest kulus toodangu töötlemisele. Viie autoklaavi summaarne ühe tsükli soojusarve on toodud tabelis 1.

Tabel 1. Autoklaavide ühe tsükli soojusbilanss

Näitaja	Kulunud soojus ööpäevas	Osakaal
Puidu kuumutamiseks kuluv soojushulk	7 611 079 kJ	48,8%
Puidu niiskuse aurustumine	4 150 106 kJ	26,6%
Autoklaavi terase soojendamine	2 500 757 kJ	16,0%
Soojuskadude ületamine	1 304 626 kJ	8,4%
Õhu kuumutamiseks kuluv soojushulk	25 252 kJ	0,2%
KOKKU	15 591 819 kJ	100%

Enamus soojust tagastub tootmisruumi. Protsessis tagastuva soojuse osakaalud on toodud tabelis 2.

Tabel 2. Autoklaavidest ühes tsüklis tagastuv soojus

Näitaja	Tagastuv soojus ööpäevas	Osakaal
Tootmisruumidesse	10 858 728 kJ	69,6%
Jääkauruna atmosfääri	4 175 358 kJ	26,8%
Kondensaadimahutisse	557 733 kJ	3,6%
KOKKU	15 591 819 kJ	100%

Eelkõige analüüsiti jääkauru kasutusele võtmist, sest jääkaur on kondensaadist suurema potentsiaaliga. Jääkauru tekib umbes 4-6 tunnise perioodi jooksul, päevane keskmine kasulik võimsus, mida on võimalik jääkaurust tagastada on 43-48 kW, jääkauru väljastamise perioodil keskmiselt 130-142 kW, periooditi isegi rohkem. Kondensaadi keskmise päevane võimsus on 1,6-3,9 kW, lisanduva kondensaadiga jääkaurust 2,6-8,1 kW.

Kõige mõistlikum on jääkauru kasutada lisanduvate kuivatite kütteks, sest kuivatid töötavad aastaringselt. Jääksoojusele oleks olemas tarbija sõltumata aastaajast, mis vähendab investeeringu tasuvusaega poole võrra. Tootmisruumide kütteks on jääksoojust võimalik kasutada vaid 6 kuulise kütteperioodi jooksul. 100 000 € investeeringu ja investeeringu 25 aastase eluea korral oleks jääkauru kasutusele võtmine kuivatite kütteks lihttasuvusajaga ainult kütusetarbe vähenemisest 4 aastat, IRR 30% ja NPV 156 112 €. Lisaks oleks võimalik vähendada tulevikus lisatavat soojusvõimsust.

SUMMARY

The analysed factory generates residual heat from the five autoclaves in the form of steam and condensate. Feasibility of transferring the residual vapour from the process to drying kilns and the possibility of using residual condensate for heating the factory was analysed. The purpose of this thesis was to determine whether it is reasonable and profitable to use the residual heat of the autoclaves in the company. In particular, the feasibility of using residual steam in the planned drying kilns was investigated.

Energy balance was calculated in order to understand how and if it would be reasonable to use residual heat. Most of the heat used in the process consumed heating up the wood and vaporization of the moisture in the wood. Most of the heat used in the process was returned as heated air to the factory. The total 24-hour (1 total cycle) heat consumption of the 5 autoclaves and the quantities of heat consumed are brought out in table 1.

Table 1 Heat balance of autoclaves

Process	Heat consumed	Percentage
Heating wood in the autoclave	7 611 079 kJ	48,8%
Vaporization of moisture from wood	4 150 106 kJ	26,6%
Heating the autoclave steel frame	2 500 757 kJ	16,0%
Heat losses from autoclave during heating	1 604 626 kJ	8,4%
Heating the air in the autoclave	25 252 kJ	0,2%
TOTAL	15 591 819 kJ	100%

Most of the heat is returned to the factory air (69,6%). The table 2 below shows where the heat from the process returns.

Table 2. Heat recovery

Location	Heat	Percentage
To factory air	10 858 728 kJ	69,6%
Steam to atmosphere	4 175 358 kJ	26,8%
Condensate to container	557 733 kJ	3,6%
TOTAL	15 591 819 kJ	100%

Use of residual steam was analysed the most as it was the biggest unused source of waste heat. Steam leaves the autoclave in 4-6 hour period, average daily heat power available from steam is 43-48 kW, during the end of the cycle 130-142 kW and

periodically even more. Average daily heat power available from the condensate is 1,6-3,9 kW, with additional condensate from the residual steam 2,6-8,1 kW.

The most useful use for residual heat is for the heating of the planned drying kilns, because there would be a consumer for the residual heat throughout the year which would decrease the return time of the investment by half. Factory floors are only heated for 6 months during the year. If the investment cost of using residual vapour is 100 000 €, lifetime of the infrastructure 25 years, then the simple return time would be 4 years, IRR 30% and NPV 156 112 €. Additionally, using the residual heat could reduce the heat capacity needed to install to the company in the future.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Ola Dagbro, „Studies on Industrial-Scale Thermal Modification of Wood,” 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1353923/FULLTEXT01.pdf>. [Kasutatud 2019].
- [2] P. Navi, D. Sandberg, „Introduction to Thermo-hydro-mechanical (THM) Wood Processing,” 2011. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:997954/FULLTEXT01.pdf>. [Kasutatud 2019].
- [3] P. H. G. De Cademartori, A. L. Missio, B. D. Mattos, D. A. Gatto, „Effect of thermal treatments on technological properties of wood from two Eucalyptus species,” 2015. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652015000100471. [Kasutatud 2019].
- [4] A. Grigor, „Autoklaavide jahutusprotsessi käigus vabaneva heitsoojuse kasutamise võimalused soojuspumbaga,” Eesti Maaülikool, Tartu, 2019.
- [5] Keskkonnaministeerium, „Ettevõtete ressursitõhusus,” 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ressurss.envir.ee/>. [Kasutatud 2019].
- [6] W. Hugo, „A brief history of heat and chemical preservation and disinfection,” 1991. [Võrgumaterjal]. Available: <https://sfamjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-2672.1991.tb04657.x>. [Kasutatud 2019].
- [7] C. Woodford, „Industrial and scientific autoclaves,” 2019.
- [8] Estanc AS, „Autoclave, Tehniline joonis,” 2017.
- [9] Energex Energy Experts OÜ, „Thermoarena OÜ detailne energia- ja ressursiaudit,” 2019.
- [10] International Atomic Energy Agency, „ITER Blanket, Shield and Material Data Base,” 1991. [Võrgumaterjal]. Available:

https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/23/003/23003898.pdf.

- [11] A. Preglej, R. Karba ja I. Škrjanc, „Mathematical Model of an Autoclave,” 2011. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.researchgate.net/publication/261177828_Mathematical_Model_of_an_Autoclave. [Kasutatud 2019].
- [12] J. Liepiņš, K. Liepiņš, „Mean Basic Density and its Axial Variation in Scots Pine, Norway Spruce and Birch Stems,” 2017. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.researchgate.net/publication/321937734_Mean_basic_density_and_its_axial_variation_in_Scots_pine_Norway_spruce_and_birch_stems.
- [13] T. Ahonen, R. Raiko, V. Hankalin, „On Thermal Properties of a Pyrolysing Wood Particle,” 2009. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.ffrc.fi/FlameDays_2009/3B/HankalinPaper.pdf. [Kasutatud 2019].
- [14] I. Mikk, „Soojustehnika Käsiraaamat,” Valgus, 1977.
- [15] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, D. P. Dewitt, „Fundamentals of Heat and Mass Transfer,” Don Fowley, 2011.
- [16] W. McAdams, „Heat Transmission, Third Edition,” New York, 1959.
- [17] E. ToolBox, „Emissivity Coefficients Materials,” 2003. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html. [Kasutatud 2019].
- [18] Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, „Kütuste tarbimisaine alumised kütteväärtused,” 2012. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.riigiteataja.ee/aktiivisa/1181/0201/2001/MKM_m63_lisa4.pdf. [Kasutatud 2019].
- [19] Markus Tamm, „Kamberkuivati kuivatustsükli analüüs ja efektiivsuse tõstmine,” Tallinn, 2018.
- [20] Termolegno S.r.l., „Economic technical offer,” 2019.

- [21] Napal AS, „Jääksoojuse kasutamise seadmete ja montaaži hinnapakkumine,” 2017.
- [22] Rahandusministeerium, „Pikaajaline majandusprognos kuni aastani 2070,” 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.rahandusministeerium.ee/et/riigieelarve-ja-majandus/majandusprognosid>.
- [23] D. Jegorov, „Börsil noteerimata ettevõtete omakapitali hinna leidmise metoodilised alused ja nende rakendamine valitud eesti majandusharudes,” Tartu, 2010.
- [24] L. S. Sterling, The Art of Agent-Oriented Modeling, London: The MIT Press, 2009.
- [25] N. J. Kluge, „Experiments and Numerical Modelling of the SMC and Autoclave Processes,” 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:999093/FULLTEXT01.pdf>. [Kasutatud 2019].