



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Energiatehnoloogia instituut

**AURUGA VARUSTAMISE VÕIMALUSED  
TÖÖSTUSTES LEIVATÖÖSTUSE NÄITEL  
POSSIBILITES OF SUPPLYING STEAM IN INDUSTRIES  
ON THE EXAMPLE OF BREAD INDUSTRY**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Aneta Kõiva

Üliõpilaskood: 213696EACB

Juhendaja: Kertu Lepiksaar,  
doktorant-nooremteadur

(Tiitellehe pöördel)

## **AUTORIDEKLARATSIOON**

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

31.05.2024

Autor: Aneta Kõiva (allkirjastatud digitaalselt)

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

31.05.2024

Juhendaja: Kertu Lepiksaar (allkirjastatud digitaalselt)

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....  
/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Aneta Kõiva

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose auruga varustamise võimalused tööstustes leivatööstuse näitel, mille juhendaja on Kertu Lepiksaar

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.

---

(allkirjastatud digitaalselt)

31.mai.2024

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

# Energiatehnoloogia instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Aneta Kõiva, 213696  
**Õppekava, peeriala:** EACB, keskkonna-, energia- ja keemiatehnoloogia  
**Juhendaja(d):** Kertu Lepiksaar, doktorant-nooremteadur, 581 62 989  
**Konsultant:** Cathy-Liis Põlluveer, Müügiinseneride tiimi juht  
Filter Solutions OÜ, 56 220 340, cathy.polluveer@filter.eu

### Lõputöö teema:

„Auruga varustamise võimalused tööstustes leivatööstuse näitel“  
„Possibilities of Supplying Steam in Industries on the example of a Bread Industry“

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Anda ülevaade ja võrrelda aurukatla ning aurugeneraatori tööpõhimõtteid
2. Leida planeeritava projekti lihttasuvus

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Planeeritava lahenduse pakkumise koostamine	15.12.23
2.	Teoreetiliste allikate leidmine ja töö kirjutamine	28.03.24
3.	Valemite leidmine ja arvutuste tegemine	30.04.24

**Töö keel:** eesti      **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 31.05.2024

**Üliõpilane:** Aneta Kõiva ..... 31.05.2024  
/allkiri/

**Juhendaja:** Kertu Lepiksaar ..... 31.05.2024  
/allkiri/

**Konsultant:** Cathy-Liis Põlluveer ..... 31.05.2024  
/allkiri/

**Programmijuht:** Oliver Järvik ..... 31.05.2024  
/allkiri/

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

# SISUKORD

EESSÕNA .....	7
SISSEJUHATUS .....	8
1. AURU TOOTMINE JA KASUTAMINE TÖÖSTUSES .....	10
1.1 Auru kasutamine toiduaine tööstuses .....	10
1.1.1 Toidutöötlusseadmed, mis kasutavad auru .....	10
1.2 Tööstusliku auru klassid.....	11
1.3 Veetöötlus .....	12
1.3.1 Naatriumioonvahetus ehk veepehmenus .....	13
1.3.2 Pöördosmoos.....	13
1.3.3 Deaereerimine ja hapnikupüüdjad .....	13
1.3.4 Läbipuhe.....	14
1.4 Auru tootmist ja selle tasuvust/hinda mõjutavad tegurid .....	14
1.4.1 Kütused .....	15
1.4.2 Tehnoloogiad ja seadmed.....	17
2. METOODIKA.....	20
2.1 Aurukatlad ja aurugeneraatorid .....	20
2.1.1 Aurukatlad .....	20
2.1.2 Aurugeneraatorid .....	20
2.2 Arvutuste lähteandmed .....	21
2.3 Energiakadude arvutused .....	21
2.3.1 Suitsugaaside heitsoojus.....	22
2.3.2 Soojuskaod katlast ja aurutorustikust.....	23
2.3.3 Ebaühtlane koormus ja soojas hoidmise kulu ooterežiimil.....	24
2.3.4 Läbipuhkekaod.....	26
3. TULEMUSED JA ANALÜÜS .....	27
3.1 Arvutuslikud tulemused .....	27
3.1.1 Suitsugaaside heitsoojus.....	27
3.1.2 Soojuskaod aurukatlast ja torustikust.....	28
3.1.3 Ebaühtlane koormus.....	28
3.1.4 Soojas hoidmise kulu ooterežiimil.....	29
3.1.5 Läbipuhke kaod.....	29
3.1.6 Tulemuste koondtabel.....	30
3.2 Maagaasi ja elektrienergia hindade mõju tasuvusele .....	31
3.2.1 Maagaasi hinna kujunemine .....	32
3.2.2 Maagaasi aktsiis.....	33
3.2.3 Elektrihinna kujunemine.....	33
4. JÄRELDUSED .....	35

KOKKUVÕTE .....	37
SUMMARY .....	38
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	40

## EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema pakuti välja autori tööandja ettevõtte Filter Solutions OÜ töötaja Cathy-Liis Põlluveere poolt. Töö laiemaks eesmärgiks oli leida, kas uuritavale ettevõttele sobib planeeritav auru tootmise lahendus ehk leida ettevõttele kõige mõistlikum auru tootmise viis.

Lõputöö koostamine ning algandmete kogumine toimus peamiselt ettevõtte Filter Solutions OÜ kontoriruumides, uuritava leivatööstuse tootmises ja Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogus.

Töö autor on tänulik oma juhendajatele Kertu Lepiksaarele ja Cathy-Liis Põlluveerele, kes andsid mitmekülgseid juhiseid ja näpunäiteid terve töö vältel. Autor soovib ka tänada uuritavat leivatööstust ja selle esindajat, kes andis nõusoleku nende firma andmete põhjal lõputöö kirjutamiseks. Lisaks on autor tänulik ettevõttele Clayton ja selle töötajale Gregory Van Dijck, kes aitas kaasa valemite leidmisel.

Võtmesõnad: aur, aurukatel, aurugeneraator, tasuvusarvutus, bakalaureusetöö

## SISSEJUHATUS

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli anda ülevaade ja võrrelda kahte peamist auru tootmise tehnoloogiat, milleks on aurukatlad- ja generaatorid, ning leida, millised on soojustehnilised kaod nende kasutamisel. Samuti leida, kas planeeritav lahendus on tasuvusaja aspektist lähtudes mõistlik uuritava leivatööstusel. Töö tulemusena on parem arusaam nende kahe tehnoloogia erinevustest ning nende eelistest ja puudustest erinevates tööstuslikes protsessides.

Töö ajendiks on tööstuste energiatõhususe probleem. Tööstus on üks kõige energiamahukamaid sektoreid, kuid kasutatavad tehnoloogiad on tihtipeale aegunud või ei olda teadlikud tootmise käigus tekkivatest suurtest soojuskadudest [1]. Auru kasutatakse laialdaselt energia tootmiseks, soojuse ülekandmiseks ja mitmesuguste tööstuslike protsesside käitamiseks. Kuid auru tootmise efektiivsus on sageli probleem, eriti kui auru tarbimine pole ühtlane. See lõputöö keskendub kahe peamise auru tootmiseseadme - aurukatla ja aurugeneraatori - võrdlusele.

Käesoleva lõputöö teema on välja kasvanud praktilisest vajadusest analüüsida autori tööandja ettevõtte (Filter Solutions OÜ) poolt tehnilist lahendust ja tasuvusaega, mis hõlmaks olemasoleva katlamaja lahendamist uute aurugeneraatoritega ja antud lahenduse lihttasuvuse leidmist. Töös kasutatud valemeid ja analüüse saab kasutada ka teiste sarnaste ettevõtete puhul, otsustamiseks, millist tehnoloogiat kasutada.

Teema on aktuaalne, sest aur on tööstuslikes protsessides oluline komponent ning seetõttu on oluline leida viise selle tootmiseks efektiivsemalt ja säästlikumalt, nii keskkonna kui majandusliku jätkusuutlikkuse seisukohalt. Efektiivsem aurutootmine vähendab mitte ainult kütusekulusid, vaid aitab ka vähendada keskkonnasaastet ja ressursside raiskamist. Tööstusettevõtetel on võimalik igakuiseid kulusi säästa, kui optimeerida oma tootmisprotsesse. Antud töö käigus uuritaksegi, kui pikk on energiasäästlikuma lahenduse tasuvusaeg võrreldes olemasoleva ebaefektiivse lahendusega.

Teema valikul oli autoril isiklik huvi energiasäästu vastu ning soov jagada teadmisi ja praktilisi lahendusi aurutootmise valdkonnas. Autor märkas oma igapäevatoos, et paljud ettevõtted ja tööstused ei ole teadlikud, kuhu nende ressursid kaovad ja millised on nende energiasäästu võimalused. See inspireeris teema valikut ja motiveeris teda süvenema aurukatelde ja -generaatorite uurimisse.

Antud töö on oluline panus energiaressursside säästliku kasutamise ning tööstusprotsesside efektiivsuse suurendamise ja populariseerimise kontekstis. Töö



tulemused aitavad paremini mõista auru tootmise seadmete tööd ning nende mõju energiasäästule, sh. kütuse energia kadu.

Lõputöö koosneb kolmest suuremast peatükist. Andmete analüüsimiseks ja töötlemiseks on töö koostamisel kasutatud programmi *Microsoft Excel*.

Lõputöö esimeses peatükis kirjeldatakse, kuidas toimub auru tootmine, milliste kütuste ja tehnoloogiatega seda teha on võimalik ning kuidas peab vett enne auru tootmist töötleva sõltuvalt soovitavast auru klassist. Teises peatükis kirjeldatakse valemite abil on võimalik leida auru tootmise protsessi juures tekkivaid energiakadusid nii aurukatla kui -generaatori puhul. Kolmandas peatükis on eelnevalt tutvustatud valemite abil leitud täpsed soojuskadod kateldest ja nende omavahelise võrdluse abil leitud planeeritava lahenduse lihttasuvuse pikkus.

# **1. AURU TOOTMINE JA KASUTAMINE TÖÖSTUSES**

Antud peatükis kirjeldatakse auru tootmist ja kasutamist tööstustes, peamiselt toiduainetööstuses, ning milliste parameetritega see olema peab. Samuti käsitletakse soovest auru saamise etappe ning auru tootmise hinna kujunemise komponente.

## **1.1 Auru kasutamine toiduaine tööstuses**

Aur on efektiivne alternatiiv energia edastamiseks. Vesi, millest auru toodetakse, on odav ja piisavalt kättesaadav, mis muudab auru tootmise jätkusuutlikuks ja soodsaks. Suur hulk energiat on koondunud kõrge rõhu all olevasse väikesse aurumassi, mis muudab auru transpordi aurutekitist lõppsihtkohta odavamaks, sest soojusülekanne seadmed saavad olla [2].

Auru, mida toiduainetööstuste protsessides toodetakse, kasutatakse näiteks soojendamiseks, vedelike kontsentreerimiseks ja destilleerimiseks või otseselt lähteainena. Kõik suuremad tööstuslikud energiatarbijad kasutavad märkimisväärse osa oma fossiilkütustest just auru tootmiseks. Enim teeb seda tselluloosi- ja paberitööstus, kus kogu energiatarbimisest kasutatakse 81% kütusest auru tootmiseks. Toiduainetööstuses, mis on antud töö sihtgrupiks, läheb üle poole, täpsemalt 57%, kasutatud kütustest auru tegemiseks. [3]

Pagaritööstuses kasutatakse auru mitmetel põhjustel. Üheks põhjuseks on see, et aur aitab küpsetamise ajal parandada kooriku tekstuuri ja värvi ning samuti tagab meeldiva läike. Tänu aurule on võimalik hoida toodete pinnal niiskust, mis aitab ära hoida toote ja selle kooriku liigse kuivamise, mis võib viia varajase kõvastumiseni. Samuti kasutatakse auru ka üleüldise soojuse varustamise võimalusena kasutades sissepritse meetodit, mille tulemusena jaotub kuumus ühtlasemalt pagaritootte sissepoole, millega aidatakse kaasa ühtlasemale küpsemisele. [4] Tänu sellele, et auru kogust ja temperatuuri on võimalik väga kergelt reguleerida saavutades tootmises kindel temperatuuri- ja niiskustase, kasutatakse seda ka temperatuuri ja niiskuse kontrolliks fermetatsiooniruumidest ning puhastusseadmetes steriliseerimiseks [5].

### **1.1.1 Toidutööstusseadmed, mis kasutavad auru**

Järgnevalt on välja toodud ja seletatud mõned erinevad toiduainetööstustes kasutatavad seadmed, mis vajavad töötamiseks auru.

## **Toru-torus kütteseade**

Toru-torus kütteseade on peamiselt kasutusel, et soojendada torus liikuvat vedeliku auru abil. Seadme tööpõhimõte sarnaneb toru-torus soojusvahetile, kus soojusülekanne toimub kahe keskkonna vahel, millest ühte soojendatakse ja teist selle arvelt jahutatakse. [2]

## **Auru sissepritsega kütteseade**

Seadet kasutatakse, et toiduainet kuuma auruga soojendada ehk aur annab osa oma sisemisest energiast toiduainele. Erinevalt eelmise seadmega, on selle seadme puhul aur ja toiduaine otseses kontaktis. Seetõttu on vaja, et aur oleks kulinaarne. [6]

## **Aurusärk**

Väike katel, mida kasutatakse auru laialdaseks jaotamiseks, et toiduainet soojendada. Tegu on justkui suure tünniga, kus on suures koguses toiduainet sees, mida ümbritseb aurukiht. Vastavalt termodünaamika teisele seadusele liigub soojus aurult kui soojemalt kehale külmemale ehk toiduainele. [7]

## **Niisutaja**

Teatud kuivatamisprotsessid vajavad toodet ümbritseva välisõhu niisutamist kuivamiskiiruse kontrollimiseks. Selle tagamiseks suunatakse kulinaarset auru otse kuivatuskambrisse või ventilatsiooniõhukanalisse. [6]

## **1.2 Tööstusliku auru klassid**

Tööstuslik aur jaguneb nelja klassi: filtreerimata aur, filtreeritud ehk kulinaarne aur, puhas aur ja ülipuhas aur. Filtreerimata auru puhul on tegu kõige ebakvaliteetsema auruga ning kasutatakse vaid juhul, kui aur ei oma otsest kokkupuudet tootega. Seega sobib see eelkõige soojuse transpordiks või töö tegemiseks. [8]

Filtreeritud ehk kulinaarset auru kasutatakse peamiselt toiduainetööstuses, kus seda on võimalik kasutada otseselt toote sees, näiteks sissepritseks, või kontaktpindade puhastamiseks ja steriliseerimiseks. Euroopas peab kulinaarne aur vastama Euroopa Toiduohutusameti (EFSA) nõuetele ja regulatsioonidele. [2]

Puhas aur on kasutusel peamiselt haiglates, kosmeetika- ning toiduainetööstuses steriliseerimiseks. Lisaks kasutatakse ka väga spetsiifiliste parameetritega protsesside,

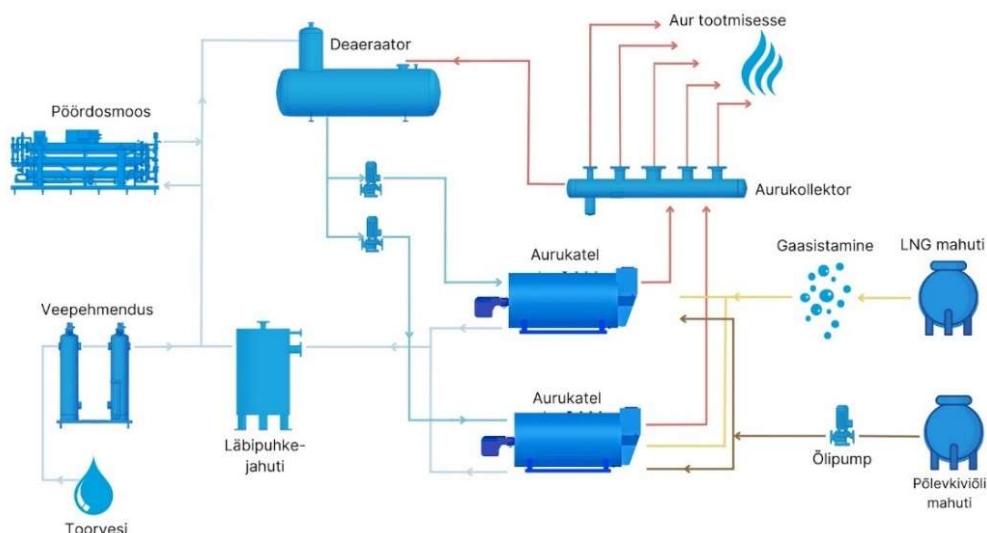
nagu kuivatamine, ülekuumendamine ja mittekondenseeruvate gaaside tootmine, õigeks töötamiseks. Puhas aur tagab, et antud protsesside töötamise tagajärjel kasutatavad seadmed ei kahjustuks filtreerimata aurus sisalduvate lisandite tõttu. [8]

Ülipuhast auru kasutakse biotehnoloogias ja farmaatsiatööstuses. Selle kategooria aur peab olema täielikult lisandite ja pürogeenide vaba. Samuti peab aur olema maksimaalselt kuiv ehk niiskust võib olla alla 5% [9]. Ülipuhast auru toodetakse ülipuhta vee aurustamisel toru-toru soojusvahetis, kus soojendavaks elemendiks on filtreerimata aur [10].

### 1.3 Veetöötlus

Veetöötlus on oluline osa aurustusüsteemist, mille abil on võimalik tagada ohutus ja süsteemi maksimaalne efektiivsus. Toorvees esinevad lisandid, mis ilma veetöötluseta tekitaksid kogu süsteemis korrosiooniohu, nende ainete sadestumist küttekehale ja ka aurusaaste teket. Toorvee töötlus enne selle jõudmist aurustusüsteemi hõlmab erinevat tüüpi lisandite täielikku või osalist eemaldamist.

Veetöötluse läbiviimiseks on mitmeid erinevaid viise ning nende valik sõltub kohast, kus töödeldud vett kasutatakse ja vajalikust vee kvaliteedist. Järgnevalt on kirjeldatud üldlevinud viisid, mille abil katlamajades toitevett ettevalmistatakse. Veetöötluse skeem, mis kujutab katlamajades kasutava veetöötluse viise ja nende järjekorda, on kujutatud joonisel 1.



Joonis 1. Klassikalise katlamaja skeem, kus on näidatud veetöötluse järjekorda (Autori joonis)

### **1.3.1 Naatriumioonvahetus ehk veepehmendus**

Naatriumioonvahetusprotsess on kõige lihtsam ja odavam viis, mille abil läbi viia ioonvahetusprotsessi. Kare vesi, mis sisaldab liigselt kaltsiumi- ja magneesiumioone, läbib soolaga rikastatud vee, kus esineb palju naatriumioone. Toimub ioonvahetusprotsess, kus kare vesi annab ära kaltsiumi- ja magneesiumioonid ning võtab vastu naatriumioonid. [11]

Selle protsessi abil välditakse katlakivi teket, sest naatriumioonid on vees paremini lahustuvad ja hiljem kergemini eemaldatavad kui kaltsium- ja magneesiumühendeid. Ilma selle etapita tekiks kuuma küttekeha peale kaltsiumist ja magneesiumist isolatsioonikiht, mille tulemusena oleksid suuremad soojuskaod ja väheneks katla efektiivsus. [12]

### **1.3.2 Pöördosmoos**

Pöördosmoos on demineraliseeriv tehnoloogia, mis eraldab toorvees lahustunud lahused veest poolläbilaskva membraani abil. Toorvesi pumbatakse rõhu abil läbi membraani, kus toimub lahusti (puhas vesi) liikumine lahusest (toorvesi ehk puhas vesi koos lahustunud ainetega) puhtasse lahusesse. Selle tulemusena eemaldatakse toorveest silikaadid, broom ja ühekordselt laetud ioonid, näiteks naatriumioonvahetusprotsessis tekkinud naatriumioonid. [13]

Pöördosmoosi tehnoloogias kasutatav membraan on väga hüdrofiilne ning tänu sellele suudab vesi membraani polümeeri struktuuri lihtsalt difundeeruda sisse ja välja. Samuti on pöördosmoos hetkel kasutusel olevatest tehnoloogiatest kõige täpsem, sest selle abil on võimalik monovalentseid ühendeid lahusest eraldada. [14]

### **1.3.3 Deaereerimine ja hapnikupüüdjad**

Vee temperatuuri suurenemisega väheneb hapniku lahustuvus vees, mistõttu tekib aurustusüsteemides vaba hapnikku. Kuumas vees olev vaba hapnik on aga väga korrodeeruv. Seetõttu kasutatakse deaereerimist, mille abil on võimalik suurem osa toitevees lahustunud hapnikust eemaldada. [15]

Deaeraatori kolm põhilist funktsiooni:

- lahustunud mittekondenseeruvate gaaside, nagu hapnik, lämmastik ja süsinikdioksiid, eemaldamine
- toitevee soojendamine
- toitevee hoiustamine. [13]

Toitevesi peale pöördosmoosi siseneb deaeraatorisse, kus see läheb kas läbi pihustusotsiku või voolab üle plaadirea, mille tulemusena vesi jaotub väikesteks tilkadeks. Aur aurukollektorist, mida surutakse seadmesse, tõstab toitevee temperatuuri gaasi temperatuuri lähedale, mille tulemusena eralduvad veest mitte kondenseeruvad gaasid. Järele jäänud kondenseeruvatest gaasidest koosnev aur liigub aurutekitisse. [13]

Deaereerimisega pole aga võimalik veest kogu üleliigset hapniku välja saada, mis tõttu kasutatakse peale deaeraatorit ka hapnikupüüdjaid, peamiselt naatriumsulfiiti (madalate ja keskmiste rõhkude korral) või hüdrasiini (kõrgetel rõhkudel). Need ained eemaldavad veest kogu vaba hapniku ning muudavad selle vastavalt naatriumsulfaadiks või lämmastikuks. [15]

### **1.3.4 Läbipuhe**

Läbipuhke abil on võimalik kontrollida katla toitevees sisalduvaid lahustunud elemente ja muda, mis on jäänud kõrvaldamata, ning nende poolt tekitavat vahtu, nende ülekannet auru ja muid kõrvalprotsesse. Keskmiselt on maksimaalselt lubatud 1000 ppm (*parts per million* ehk osakest miljoni osakese kohta) lahustunud osakesi katlavees. [12]

Läbipuhke abil on võimalik eemalda katlaveest kõrvalproduktid, mida eelnevalt ei saadud kätte või mida on nüüd kõrgemal temperatuuril kergem eemaldada. Peale vee eemaldamist katlast liigub see läbipuhke seadmesse, kus eraldatakse puhas vesi ja lahustunud elemendid ning seejärel liigub puhas vesi uuesti ringlusesse ja läbib kogu veetöötuse uuesti. [15]

Majanduslikel põhjustel on läbipuhke kogus kindlate ülempiiridega: a) 2-3% kogu auru tootlikkusest, kui katelt tootakse kondensaadi ja keemiliselt puhastatud lisavee seguga, b) 5%, kui kuni 40% kondensaadist ei ole tagastuv ning c) maksimaalselt 7%, kui suurem osa kondensaadist ei tagastu. Vajalik läbipuhete arv arvutatakse üldise soolsuse ja leelisuse järgi ning valitakse leitud väärtusest suurem. Läbipuhete arvu suurendamine tõstab ka kulusid ning seega tuleb läbipuhete arvu vähendada võimalike eeltoodud tehnoloogiatega. [16]

## **1.4 Auru tootmist ja selle hinda mõjutavad tegurid**

Auru tootmist ja selle hinda mõjutavad enim kasutatav kütus ja tehnoloogia. Kütuse puhul tuleb eelkõige arvestada kahe aspektiga: kütuse hind €/MWh ja kütteväärtus

kWh/kg või kWh/m<sup>3</sup>. Samuti on kütuse valikul määravateks faktoriteks ka kütuse kättesaadavus keskkonnas, kui keskkonnasõbralikku kütust soovitakse kasutada ning kütusetrasside olemasolu hoones.

Tehnoloogia valikul on eelkõige oluline aru saada, millise graafiku järgi on auru vaja ning kui ühtlane või ebaühtlane on nõudlus. Samuti mõjutab ka planeeritav asukoht ja selle suurus, millist tehnoloogiat ja seadmeid on üldse võimalik kasutada.

Mõningal määral mõjutavad auru hinda ka vee ja kemikaalide hind. Kui aga auru- ja kondensaadisüsteem on targalt lahendatud ning läbipuhe väike ehk vee kadu on minimaalne, ei ole need väga suured mõjutajad. Samuti ei saa nende hinda ise mõjutada ning seetõttu antud töös seda aspekti täpsemalt ei käsitletud.

### **1.4.1 Kütused**

Toidu-, joogi- ja tubakatööstus, mis on antud töö uuritavaks tööstussektoriks, kasutas 2021. aastal Euroopa Liidu tööstusharudest 11,6% kogu tööstustes kasutatavast kütustest. [17]

#### **Vedelkütused**

Vedelkütuste hulku kuuluvad vedelgaas, kerge ja raske kütteeõli, diislikütus ja bensiin. Nende kütuste puhul, võrreldes teistega, on vaja arvestada vedelikele iseloomulike omadustega, näiteks viskoossus, hangumistemperatuur, leekpunkti temperatuur ja süttimistemperatuur [18].

Vedelkütuseid kasutatakse tööstustes võrreldes teiste kütustega vähem ning seetõttu antud töös neid täpsemalt ei uuritud. [19]

#### **Tahkekütused**

Tahkete kütuste puhul on lisaks kütteväärtusele vaja veel arvesse võtta ka antud kütuse niiskust, mineraalosa ja tuha sisaldust ning kütuse lendosa ja koksi [18]. Tahked kütused on puit, turvas, kaevandatud söed ja põlevkivi.

Puitu tööstuses katlakütusena tavaliselt ei kasutata, sest puit on tähtis tehnoloogiline tooraine, mida on mõistlikum vääridada. Samuti on puidu kütteväärtus võrreldes teiste kütustega väike, alla 14,7 MJ/kg ning sõltub palju sellest, mis liigiga on tegu [20]. Puitu on mõistlik katlakütusena kasutada puiduhakke või pelletite kujul. Sellisel juhul kasutatakse toormaterjalina metsaraie jääke, puidutööstuse jääke ning võsa ja kände. See muudab puidu kasutamise keskkonnasõbralikuks. [21]

Turvas on maavara, mis tekib soodes taimejäänuste lagunemisel. Turvas nagu puitki ei ole väga populaarne tööstusettevõtete jaoks. Statistikaameti andmetel kaevandati 2010. aastal vähe- ja hästilagunenud turvast kokku 923 500 tonni, millest vaid 38,2% ehk 353 000 tonni kasutati kütusena [22], [23]. Turba kütteväärtus on keskmiselt 20 MJ/kg [24].

Tahkekütuseid üldiselt auru tootmiseks ei kasutata, vaid pigem kaudselt elektrienergia tootmiseks ja seetõttu antud töös tahkekütuseid täpsemalt ei uuritud.

## **Gaaskütused**

Gaaskütused on populaarsed tänu oma puhtale põlemisele ja kõrge efektiivuse tõttu. Maagaas, mis on kõige populaarsem gaaskütus, on süsivesinike rikas gaas, kergelt põlev ja annab põlemisel väga märkimisväärse koguse energiat. Lisaks on see ka teiste fossiilsete kütustega võrreldes üsna keskkonnasõbralik, sest eraldub vähem vääveldioksiidi, diilämmastikoksiidi ja süsinikdioksiidi emissioone. [25]

Maagaas on üks kõige laialdasemalt kasutatavaid kütuseid, mida tööstustes kasutatakse, Euroopas. Vaid 0,5% rohkem kasutatakse elektrit ehk saab väita, et Euroopa tööstused tuginevad võrdselt maagaasile ja elektrile. [17] Seetõttu on antud töös neid kahte kütust ka kõige rohkem uuritud ja võrreldud omavahel.

2019. aastalt ilmunud teadusartiklis on uuritud, mis on pea 20 aasta jooksul maagaasi hinda Ameerika Ühendriikides mõjutanud. Antud töös näidatud graafikutelt on näha tippu, mil gaasi hind on hüppeliselt kasvanud. Piigid on tingitud peamiselt keskkonnas toimuvatest muutusest, näiteks erakordselt külmal talvel 2001. ja 2003. aastal või 2005. aastal toimunud orkaan Katrina ja Rita toimumise tagajärel. Samuti oli suureks mõjutajaks 2008. aastal toimunud majanduslangus. [26] Viimase aja suurimaks maagaasi hinna tõusu ajendiks on Venemaa algatatud agressioonisõda Ukraina vastu, mille tulemusena tõusis maagaasi hind rohkem kui kaks korda [27]. Antud uuringud tõestavad, et maagaasi hind sõltub väga palju globaalsetest muutustest.

## **Elekterkütus**

Elektrienergia on võimalik toota nii taastumatutest kui ka taastuvatest energiaallikatest ning seda on võimalik ka Eestis teha. Seetõttu ei ole varustuskindlus nii suur probleem võrreldes maagaasiga. Samuti on võimalik elektrit toota ka lokaalselt, näiteks katusele paigaldatud päikesepaneelidega.

Elektri hinda mõjutavad, sarnaselt gaasilegi, mitmed erinevad aspektid, kuid lisaks ka kasvav hulk tuule- ja päikeseenergia. Elektrienergia hinda vähendab fossiilsete kütuste



omast mõningal määral taastuvad energiaallikad, näiteks päikese-, tuule- ja hüdroenergia, sest nende tootmine võib perioodiliselt olla kõrge võrreldes koormusega, nagu päikeseenergia tootmine kevadpäevadel. [28]

## 1.4.2 Tehnoloogiad ja seadmed

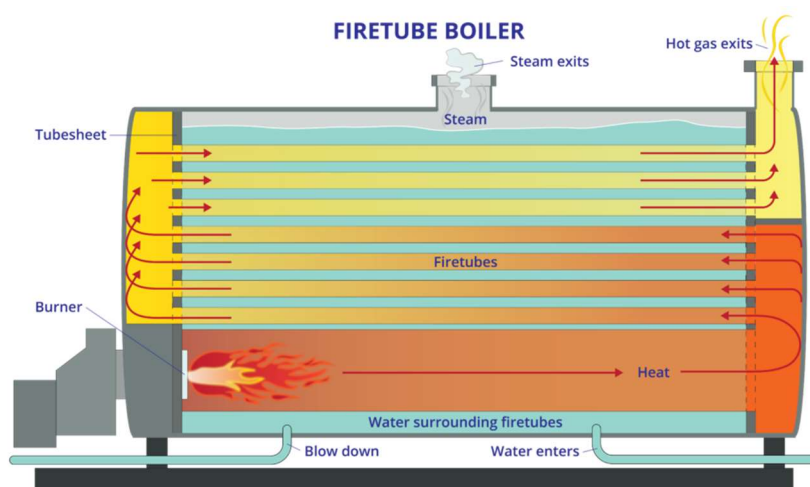
Pea iga tootmisettevõtte sõltub laialdaselt soojusenergiast, mis jõuab lõpptarbijateni peamiselt läbi kuuma vee, veeauru või elektrienergia vahendusel. Kuigi elektrienergiat on võimalik transportida sadade kilomeetrite kauguselt, nõuab kuuma vee või auruna kasutatav energia kohapealset tootmist. Seetõttu on kasutusele võetud aurukatlad ja -generaatorid.

Aurukatla ja -generaatori võrdlus on esitatud tabelis 1.

### Aurukatlad

Aurukatel, täpsemalt leek-suitsutorukatel, on seade, mis toodab auru tänu kütuse põlemisel tekkiva soojuse eraldumisele katlas olevale veele. Aurukatla eesmärgiks on soojusülekanne kütuse põlemisest tekkiva energia ja toitevee vahel, et toota auru [29]. Katlad sobivad ühtlase koormusega tarbijatele ning sellisel juhul on keskmine kasutegur 80-95%. Aurukatla tööpõhimõte: küttepind, mille sees kütus põleb, on terasest silindrilise mahuti sees torukimpude ja suitsukäikudena ning ümbritsetud toiteveest, mis tänu kütuse põlemisele soojeneb ja muutub auruks. Informatsioon aurukatelde kohta põhineb lisaks tootjate kodulehtedelt ka tootjalt endilt. [30]

All olevalt jooniselt 2 on võimalik näha aurukatla läbilõiget, mis illustreerib katla tööpõhimõtet.

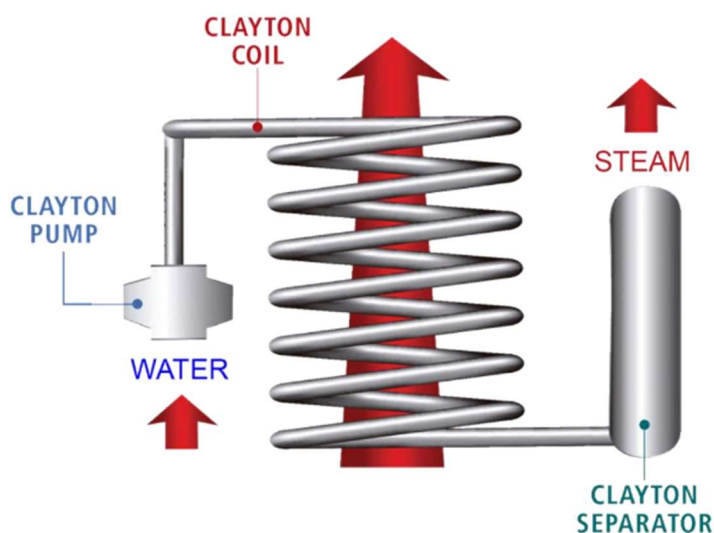


Joonis 2. Aurukatla tööpõhimõtte illustratsioon [31]

## Aurugeneraatorid

Aurugeneraatorite eesmärk on sama, mis aurukatlal, kuid need on erineva tööpõhimõttega. Kui aurukatel sobib tarbijale, mis soovib ühtlaselt samas koguses auru pidevalt, siis aurugeneraatorid on kiire reageerimisega ning sobivad seetõttu ebaühtlase koormusega tarbijatele. Tööpõhimõte on samuti vastupidine: spiraalne torusüsteemiga katel, mille sees varieeruvate mõõtudega torusiu sees voolab toitevesi, mille ümber olev põlev kütus muudab vee auruks. Aurugeneraatorid kasutavad oma töötamiseks kas gaas- või elekterkütuseid. Aurugeneraatorite kohta käiv info pärineb samuti tootjate kodulehtedelt ja tootjatelt endilt. [32], [33]

Järgnevalt on võimalik näha joonisel 3 lihtsustatud aurugeneraatori tööpõhimõtet.



Joonis 3. Aurugeneraatori tööpõhimõtet illustreeriv joonis [34]

Tabel 1. Aurukatla ja aurugeneraatori võrdlus

	Aurukatel	Aurugeneraator
Põleti töörežiim	Auru tarbimisel: astmeline või moduleeriv Ooterežiimil: sisse/välja	Auru tarbimisel: moduleeriv Ooterežiimil: ei tööta
Jooksvad kulud	Kõrged, ooterežiimi kaod	Minimaalsed
Möödud ja kaal	Umbes kolm korda suurem kui generaator ja seitse korda raskem	Umbes kolm korda väiksem kui katel ja seitse korda kergem

	Aurukatel	Aurugeneraator
Läbipuhke kaod	Suur läbipuhke kogus	Minimaalsed
Auru kvaliteet	Keskmine, kiirete tippude ajal lisandub katlavett	Väga hea, kogu tootlikkuse juures 99,5%
Käivitusae	Mõned tunnid	Mõned minutid
Reageerimiskiirus	Aeglane	Väga kiire
Ohutus	Plahvatusohtlik, vajab paiskpindasid	Ei ole plahvatusohtlik, ei vaja paiskpindasid
Katlakivi	Võib tekkida. Avastatakse hooldusel	Võib tekkida. Automaatika avastab tekkimisel

## **2. METOODIKA**

Käesolevas peatükis on kirjeldatud olemasoleva leek-suitsutoru aurukatla ja planeeritava aurugeneraatori parameetreid, tutvustatud arvutuste jaoks vajalikke lähteandmeid ning näidatud valemeid, mille abil on võimalik leida energiakadude erinevust kahe tehnoloogia vahel.

### **2.1 Aurukatlad ja aurugeneraatorid**

Järgnevalt on kirjeldatud uuritava leivatööstuse olemasolevat aurukatelt ja gaasikatlamaja ning planeeritavat elektrilist aurugeneraatorit ning nende parameetreid.

#### **2.1.1 Aurukatlad**

Antud töös uuritavas katlamajas on kasutusel üks gaaskütusel töötav aurukatel ning lisaks üks renditud konteinerkatlamaja, mille eesmärk on tagada reserv aurukatlele juhuks, kui katlaga peaks midagi juhtuma. Konteinerkatlamaja rent on 2 115,75 eurot igakuiselt. Lisaks rendile kaasnevad iga kuu ka hooldus- ning käidukulud, sest iga kuu pannakse konteinerkatlamaja paariks tunniks tööle. Samuti on oluline märkida, et olemasolev katel on ehitatud aastal 1995 ehk pea 30 aastat vana. Seega on katel ja sellega seotud abiseadmed, näiteks aurutorustik, amortiseerunud.

Olemasoleva lokaalse katla nimivõimsus on 1400 kW ning on võimeline tootma auru maksimaalse rõhuga 10 bar, temperatuuriga 185 °C ning 2200 kg/h.

#### **2.1.2 Aurugeneraatorid**

Töös on võrreldud olemasolevat gaasikatlamaja, spetsiifiliselt leek-suitsutoru katelt, aurugeneraatoriga sõltuvalt kahest tingimusest:

1. uuritav ettevõtte kasutas enne 2023. aastat hoone üldiseks kütmiseks sama olemasoleva katlamaja toodetud auru, kuid läksid seejärel üle kaugküttele, mille tulemusena ei ole tootmishoone auruvajadus enam nii suur. Seega on aurukatel väga üledimensioneeritud ning töötab umbes 13% koormuse juures. Nii väikese koormusega töötamisel ei ole katla töö efektiivne - katla põleti ei saa töötada stabiilselt, vaid lülitub pidevalt sisse-välja, et väikest auru tootlikkust teenindada. Selline töörežiim ei taga soojustehniliselt efektiivsust, sest katel ei tööta oma nimikasuteguri juures.

2. aurutarbimine on tootmises ebaühtlane ehk auru on erinevatel hetkedel erinevates kogustes tarvis. Sellises olukorras ei ole aurukatla kasutamine optimaalne, sest katel on aeglase käivitus- ja reageerimisajaga, mistõttu on vaja katelt pidevalt soojas hoida või sisse-välja lülitada. Seega oleks energiasäästu aspektist aurugeneraator mõistlikum valik.

Antud töös on katla võrdlemiseks kasutatud kolme aurugeneraatorit, mis toodavad kokku maksimaalselt 1280 kg auru tunnis ja nende maksimaalne töö rõhk on 10,34 bar(g).

## 2.2 Arvutuste lähteandmed

Käesolevas töös tehtud arvutused baseeruvad ühe Eesti leivatööstuse andmetel:

- igakuine keskmine maagaasi tarbimine: 24 255 m<sup>3</sup>/kuu
- tootmise töötundide arv päevas: 16 h/päev
- tootmise tööpäevade arv aastas: 251 päev/a
- tootmises hetkel kasutuses olevate aurutarbijate nimi-tarbimisandmed
- olemasolevad tingimused katlamajas erinevatel tööhetkedel: suitsugaaside temperatuur, ruumi õhu temperatuur ja niiskus, katla ja torustiku isolatsiooni pinnatemperatuur, maagaasi alumine kütteväärtus ja kasutegur
- maagaasi hind koos kõikide lisatasude ja aktsiisidega, 2023. aasta seisuga 63,08 €/MWh
- elektrienergia hind koos kõikide lisatasude ja aktsiisidega, 2023. aasta seisuga 157,76 €/MWh

Tootmishoones on aurutarbijateks kolm liini, millest kaks on omavahel ühenduses. Liinide 1 ja 2 aurutarbimine on kokku 640 kg/h, liini 3 auruvajadus on 800 kg/h. Mõlemal liinil on vajaminev rõhk 4 bar. Tootmishoones töötavad liinid ööpäevaringselt 5 päeva nädalas, kuid ei ole teada täpsemalt, kui palju auru tarbitakse ööpäevas ja millise intervalli tagant.

## 2.3 Energiakadude arvutused

Järgnevalt on selgitatud erinevaid põhjuseid, millest tekib aurukateldel ja -generaatoritel energiakaod. Välja on toodud ka valemid, mille põhjal energiakadude erinevust hinnati.

Aastas toodetud auru sisalduv energia on arvatud valemi 1 järgi.

$$Q_{kogu} = \frac{G_{keskmine} * H * t_p * t_a}{1\ 000\ 000} \quad (1)$$

kus  $Q_{kogu}$ - aastas toodetud koguenergia, GJ/a,

$G_{keskmine}$ - keskmine auru kulu, kg/h,

$H$ - auru entalpia antud temperatuuril ja rõhul, kJ/kg,

$t_p$ - töötundide arv päevas, h/p,

$t_a$ - tööpäevade arv aastas, p/a.

### 2.3.1 Suitsugaaside heitsoojus

Gaasil põhinevate katelde puhul tekib suitsugaaside tekkimise tõttu alati heitsoojust, mis korstna kaudu välja läheb. Selle vähendamiseks on võimalik kasutada suitsugaaside ökonomaiserit ja kondensaatorit, kuid soojuskadu jääb siiski alles. Elektrilise aurutekitiga suitsugaaside heitsoojust ei teki üldse, sest puudub kütuse põlemine.

Suitsugaaside heitsoojuse energiakadude arvutamisel on lähtutud kolmest aspektist ning arvatud valemitega 2 ja 3:

1. suitsugaaside temperatuur korstnasse jõudmisel
2. CO kogus suitsugaasis
3. O<sub>2</sub> kogus suitsugaasis

$$W_r = (T_{s.g.} - T_{\infty}) * \frac{A}{21 - O_2\%} + B \quad (2)$$

kus  $W_r$ - heitsoojuse osakaal soojushulgast,

$T_{s.g.}$ - suitsugaaside temperatuur katlast väljumisel, °C,

$T_{\infty}$ - ümbritseva keskkonna temperatuur, °C

21- hapniku sisaldus õhus, %(vol),

O<sub>2</sub>%- hapniku kogus heitgaasides, %(vol),

A- koefitsent, mis tuleneb *Siebert*'i empiirilisest valemist ja sõltub kasutatavast kütusest, [35]

$B$ - koefitsent, mis tuleneb *Siegert*'i empiirilisest valemist ja sõltub kasutatavast kütusest. [35]

$$Q_1 = Q_{kogus} * \left( \frac{100\%}{100\% - W_r} - 1 \right) \quad (3)$$

kus  $Q_1$ - heitgaaside soojuskadu aastas, GJ/a,

$Q_{kogus}$ - aastas toodetud auru sisalduv energia, GJ/a,

$W_r$ - heitsoojuse hulk protsentides soojushulgas.

### 2.3.2 Soojuskaod katlast ja aurutorustikust

Iga katla töötamisel tekivad soojuskaod radiatsiooni ja konvektsiooni kaudu. Uuel elektrilisel aurugeneraatoril on võrreldes olemasoleva olukorraga väiksemad soojuskaod peamiselt kahel põhjusel:

- väiksem võimsus, seega väiksem katel ja aurutorustik
- tehnoloogia seisukohalt on leek-suitsutorus suur vee maht, et tagada auru inertsus. Elektrilisel aurugeneraatoril suurt vee mahtu ei ole, mistõttu on tema gabariidid oluliselt väiksemad.

Soojuskaod katlast on arvatud valemite 4 ja 5 abil:

$$Q_{katel} = \frac{G * H}{1\ 000\ 000} \quad (4)$$

kus  $Q_{katel}$ - katla võimsus, GJ/h,

$G$ - nimi aurutootlikkus katla täisvõimsusel töötamisel, kg/h,

$H$ - auru entalpia, kJ/kg.

$$Q_2 = \frac{Q_{katel} * \%_2}{100 - r} * t_p * t_a \quad (5)$$

kus  $Q_2$ - soojuskaod radiatsiooni ja konvektsiooni teel katlast, GJ/a,

$Q_{katel}$ - katla võimsus, GJ/h,

$\%_2$ - hinnangulised katla sisemised ja välised kaod kiirgusest ja konvektsioonist,

$W_r$ - heitsoojuse hulk protsentides soojushulgas,

$t_p$ - töötundide arv päevas, h/p,

$t_a$ - tööpäevade arv aastas, p/a.

Soojuskaod aurugeneraatorist on arvatud kasutades *Paroc Calculus* [36] kalkulaatorit.

Lisaks sellele tekivad soojukaod ka aurutorustikest. Olemasoleva lahenduse puhul on torustik katlamajast aurukollektorini 131 m pikk. Olemasolev torustik on vana ja selle isolatsioon on suure tõenäosusega amortiseerunud. Uue lahenduse puhul on aurutorustik umbes 25 m pikk. Seega on uue lahenduse puhul soojuskaod aurutorustikust väiksemad, sest torudel on uus isolatsioon ja torustik ise on üle viie korra lühem.

Soojuskaod nii olemasolevast kui ka projekteeritavast aurutorustikust on arvatud *Paroc Calculus* kalkulaatorit kasutades.

### 2.3.3 Ebaühtlane koormus ja soojas hoidmise kulu ooterežiimil

Järgnevalt on selgitatud energiakadusid, mis tekivad auru ebaühtlasest koormusest ja katla soojas hoidmisest ning tutvustatud valemeid, mille abil on võimalik leida täpne energiakadu.

#### Soojuskaod ebaühtlasest koormusest

Leek-suitsutoru tehnoloogia aurukatlad töötavad kõige efektiivsemalt ühtlase koormusega, sest vajavad koormuse suurendamiseks palju aega ja energiat. Elektrilisel aurugeneraatoril läheb üles soojendamiseks aega vaja vaid mõni minut, kuni seade hakkab täiskoormusel auru tootma, sest seadmes olev vee mass on oluliselt väiksem.

Olemasoleva katla energiakaod ebaühtlusest koormusest on arvatud järgnevalt, kasutades valemeid 6-10:

$$Q_3 = \%_3 * Q_{kogu} \quad (6)$$

$$\%_3 = \left( \frac{\Delta T_{ln,generaator}}{\Delta T_{ln,katel}} \right) * 100 - 100 \quad (7)$$

$$\Delta T_{ln,generaator} = \frac{(T_{aur,generaator-T_{sisse}}) - (T_{aur,generaator-T_{välja}})}{\ln\left(\frac{T_{aur,generaator-T_{sisse}}}{T_{aur,generaator-T_{välja}}}\right)} \quad (8)$$

$$\Delta T_{ln,katel} = \frac{(T_{aur,katel-T_{in}}) - (T_{aur,katel-T_{out}})}{\ln\left(\frac{T_{aur,katel-T_{in}}}{T_{aur,katel-T_{out}}}\right)} \quad (9)$$

$$T_{aur,katel} = T_{aur,generaator} - T_{koefitsent} \quad (10)$$

kus  $Q_3$ - energiakaod ebaühtlasest koormusest, GJ/a,



$\%_3$ - ebaühtlasest koormusest tekkinud energiakadude osakaal kogu aastas toodetud energiast ,

$\Delta T_{In, \text{generaator}}$ - aurugeneraatoris soojusvahetusprotsessis olev logaritmkeskmine temperatuuri vahe, °C,

$\Delta T_{In, \text{katel}}$ - aurukatlas soojusvahetusprotsessis olev logaritmkeskmine temperatuuri vahe, °C,

$T_{aur, \text{generaator}}$ - aurugeneraatori poolt toodetud auru temperatuur kindlal rõhul,

$T_{aur, \text{katel}}$ - aurukatla poolt toodetud auru temperatuur kindlal rõhul,

$T_{sisse}$ - temperatuur, millel toitevesi siseneb soojusvahetisse, °C,

$T_{välja}$ - temperatuur, millel aur väljub soojusvahetist, °C,

$T_{koefitsent}$ - konstant, mis sõltub sellest, kui ebaühtlane on auru tootmine:

- 5 °C- väga ebaühtlane auru tootmine
- 2,5 °C- keskmine ebaühtlus auru tootmisel
- 1 °C- vähene ebaühtlus auru tootmisel
- 0 °C- konstante auru tootmine.

## Soojas hoidmise kulu ooterežiimil

Üks suurimaid energiakadusid leek-suitsutoru katelde puhul on kadu kütuse põletamisele olukorras, kus katel on ooterežiimil. See on olukord, kus tootmises auru ei ole vaja, aga katel peab põletama kütust, et end soojas hoida.

Energiakaod aurukatlast ooterežiimil olemisest on arvatud valemi 11 abil:

$$Q_4 = \frac{\%_4 * 0,01 * Q_{\text{katel}} * (t_{\text{ooterežiim, päev}} * t_a + t_{\text{ooterežiim, nädal}} * t_{\text{ooterežiim, aasta}})}{100 - W_r} \quad (11)$$

kus  $\%_4$ - eelduslik osakaal katla tööajast, mil katel on ooterežiimil, %,

$Q_{\text{katel}}$ - katla võimsus, GJ/h,

$t_{\text{ooterežiim, päev}}$ - tundide arv päevast, mil katel on ooterežiimil, h/p,

$t_a$ - tööpäevade arv aastas, p/a,

$t_{\text{ooterežiim, nädal}}$ - tundide arv nädalas, mil katel on ooterežiimil, h/n,

$t_{ooterežiim,aasta}$  - nädalate arv aastas, mil katel on katkematult ooterežiimil, n/a.

Antud leivatööstuses ei ole auru tarbimine stabiilne. Tarbimine on kõikuv sõltuvalt tootmise karakteristikast ja koormusest. Lisaks on päevas ka selliseid aegu, kus auru ei ole üldse vaja. Seetõttu sobikski antud tootmisesse aurugeneraatorid paremini kui leek-suitsutoru aurukatlad.

### 2.3.4 Läbipuhkekaod

Läbipuhkekaod tekivad aurutekitite puhul alati, olenemata sellest, mis tehnoloogia on kasutusel. Mida rohkem on süsteemis vett, seda rohkem seda ka tekib. Aurugeneraatorites on vee kogus märgatavalt väiksem kui aurukateldes, mistõttu on energiakaod ka väiksemad.

Läbipuhke kaod on arvutatud valemi 12 järgi:

$$Q_5 = (Q_1 + Q_2 + Q_{a.t.} + Q_3 + Q_4) * \%_5 \quad (12)$$

kus  $Q_5$ - energiakadu läbipuhkest, GJ/a,

$Q_1$ - heitgaasidest soojuskadu aastas, GJ/a,

$Q_2$ - soojuskaod radiatsiooni ja konvektsiooni teel katlast, GJ/a,

$Q_{a.t.}$ - soojuskaod aurutorustikust, GJ/a,

$Q_3$ - soojuskaod ebaühtlasest koormusest, GJ/a,

$Q_4$ - soojuskaod ooterežiimil olemisest, GJ/a,

$\%_5$ - suurusjärgk aurukatla ja -generaatori kogu koormusest, kus kasutatakse pehmendatud vett.

### 3. TULEMUSED JA ANALÜÜS

Käesolevas peatükis on välja toodud eelnevas meetoodika peatükis näidatud valemite abil arvatud olemasoleva aurukatla ja planeeritava aurugeneraatori ning nende juurde kuuluva aurutorustiku soojuskaod. Peatüki lõpus on toodud tulemusi koondav tabel ning näidatud projekti lihttasuvus. Lisaks on kirjeldatud põgusalt maagaasi ja elektrienergia hindade kujunemist.

#### 3.1 Arvutuslikud tulemused

Järgnevalt tuuakse välja eelnevas peatükis esitatud valemite tulemused.

Valemiga 1 on arvatud aurus sisalduva energia kogus:

$$Q_{kogu} = \frac{300 \text{ kg/h} * 2509,5 \text{ kJ/kg} * 16 \text{ h/p} * 351 \text{ p/a}}{1\ 000\ 000} = 4228 \text{ GJ/a} \quad (1)$$

Neto aurus sisalduva energia kogus aastas on 4228 GJ ehk 1174,5 MWh/a. See kogus on võrdne mõlema aurutootmise tehnoloogia puhul.

##### 3.1.1 Suitsugaaside heitsoojus

Antud valem 2 näitab, kui suure osa moodustab suitsugaasidest tingitud heitsoojus kogu soojushulgast:

$$W_r = (215^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}) * \frac{0,66}{21-2,5} + 0,009 = 8,3\% \quad (2)$$

Suitsugaaside heitsoojuse hulk soojushulgast on 8,3%

Energiakadu suitsugaaside heitsoojusest avaldub valemiga 3:

$$Q_1 = 4228 \text{ GJ/a} * \left( \frac{100\%}{100\% - 8,3\%} - 1 \right) = 381 \text{ GJ/a} \quad (3)$$

Olemasoleva aurukatla kasutamisel on energiakadu suitsugaasidest tekkiva heitsoojusega on 381 GJ aastas ehk 105,8 MWh/a. Planeeritavate elektriliste aurugeneraatoritega suitsugaasidest tingitud heitsoojust ei teki, sest puudub kütuse põlemine.

### 3.1.2 Soojuskaod aurukatlast ja torustikust

Järgneva valemiga 4 arutatakse katla võimsus GJ/h

$$Q_{katel} = \frac{2008 \text{ kg/h} \cdot 2509,5 \text{ kJ/kg}}{1\,000\,000 \text{ kJ/GJ}} = 5,04 \text{ GJ/h} \quad (4)$$

Katla võimsus on 5,04 GJ/h ehk 1,4 MW.

Soojuskaod katlast sise- ja väliskiirguse ning konvektsiooni teel on arvatavad valemiga 5:

$$Q_2 = \frac{5,04 \text{ GJ/h} \cdot 1}{100 - 8,3\%} \cdot 16 \frac{\text{h}}{\text{p}} \cdot 351 \frac{\text{p}}{\text{a}} = 309 \text{ GJ/a} \quad (5)$$

Soojuskaod katlast sise- ja väliskiirguse ning konvektsiooni teel on 309 GJ/a ehk 85,8 MWh/a. Aurugeneraatorist soojuskaod *Paroc Calculus* kalkulaatorit kasutades on 14 MWh/a.

Soojuskaod olemasoleva aurukatla aurutorustikust jagunevad kolmeks: torustik katlamajast maa alla 31 m, maa all olev torustik 39 m ja torustik, mis on tootmishoones maa alt kuni aurukollektorini 61 m. Aurutorustiku soojuskaod on leitud kasutades *Paroc Calculus* kalkulaatorit ning on vastavalt 211, 23 ja 34 MWh/a. Kokku 268 MWh/a. Sellises suuruses energiakaod on tingitud peamiselt kahest aspektist: isolatsiooni kulumine ja torustiku kogupikkus. Kogu torustik on ehitatud koos katlamaja ehitusega, mis toimus 1995. aastal. Pea kolmekülmne aastaga isolatsioon amortiseerub. Samuti on torustik 131 m pikk, mis on antud olukorras ebamõistlikult pikk.

Uued aurugeneraatorid asuksid juba tootmishoones ning aurutorustiku projekteeritud pikkus on 25 meetrit, mistõttu on energiakadu väiksem. Kasutades *Paroc Calculus* kalkulaatorit on projekteeritava aurutorustiku soojuskadu 4,9 MWh/a.

### 3.1.3 Ebaühtlane koormus

Järgnevate valemite abil on võimalik leida energiakadu, mis on tekitud auru ebaühtlasest tarbimisest, mis tingib selle, et katel ei saa ühtlaselt töötada.

Valemi 8 abil on leitav generaatori toodetava auru ja selle kondensatsiooni logaritmi keskmine temperatuuride vahe.

$$\Delta T_{\ln, \text{generaator}} = \frac{(175,36^\circ\text{C} - 80^\circ\text{C}) - (175,36^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C})}{\ln\left(\frac{175,36^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C}}{175,36^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}}\right)} = 84,97^\circ\text{C} \quad (8)$$

Järgnevalt valemite 10 kasutades on leitud aurukatla poolt toodetava auru temperatuur.

$$T_{\text{aur,katel}}=175,36-5^{\circ}\text{C}=170,36^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

Kasutades valemit 9 on leitav olemasoleva aurukatla toodetava auru ja selle kondensatsiooni logaritmi keskmine temperatuuride vahe.

$$\Delta T_{\ln,\text{katel}} = \frac{(170,36^{\circ}\text{C}-80^{\circ}\text{C})-(170,36^{\circ}\text{C}-100^{\circ}\text{C})}{\ln\left(\frac{170,36^{\circ}\text{C}-80^{\circ}\text{C}}{170,36^{\circ}\text{C}-100^{\circ}\text{C}}\right)} = 79,94^{\circ}\text{C} \quad (9)$$

Järgnev valem 7 näitab aurutekitite logaritmi keskmiste temperatuuride vahede protsendilist erinevust, mille abil on võimalik näha aurukatla ülemäärast aurutootlikkust, et hoida toitevees vajalikku temperatuuri katla soojas hoidmiseks, et oleks võimalik vajadusel kohe auru toota.

$$\%_3 = \left(\frac{84,97^{\circ}\text{C}}{79,94^{\circ}\text{C}}\right) * 100 - 100 = 6,3\% \quad (7)$$

Ülemäärane energiavajadus, mis on tingitud katlas toitevee soojashoidmisest, on näidatud järgnevalt, kasutades valemit 6.

$$Q_3=6,3\%*4228 \text{ GJ/a}=266 \text{ GJ/a} \quad (6)$$

Iga-aastane soojuskadu aurukatlast, mis on tingitud ebaühtlasest koormusest, on 266 GJ/a ehk 73,9 MWh/a. Soojuskadu ebaühtlasest koormusest lähtuvalt aurugeneraatorist puudub.

### 3.1.4 Soojas hoidmise kulu ooterežiimil

Järgnevalt valemi 11 abil on leitud soojuskadu, mis tekib aurukatlast hetkel, kui katel auru ei tooda, kuid katelt hoitakse soojana.

$$Q_4 = \frac{33\%*0,01*5,04 \text{ GJ/a}*(8h/p*351p/a+56h/n*0n/a)}{100-8,3\%} = 5090,98 \text{ GJ/a} \quad (11)$$

Katla töötamisest ooterežiimis on soojuskadu iga aasta 5090,98 GJ/a ehk 1414,2 MWh/a. Aurugeneraatori puhul soojuskadu ooterežiimil puudub.

### 3.1.5 Läbipuhke kaod

Aurukatla ja -generaatori soojuskaod, mis on tingitud läbipuhke kadudest, on arvutatud järgneva valemi 12 järgi:

$$\begin{aligned} Q_{5,\text{katel}} &= (1174,5+105,8+85,8+(210,6+23,0+33,9)+73,9+1414,2)*5\% = \\ &= 156,1 \text{ MWh/a} \end{aligned} \quad (12)$$

$$Q_{5,\text{generaator}}=(1174,5+14,4+4,9)*4\%=47,7 \text{ MWh/a} \quad (12)$$

Läbipuhke kaod aurukatla ja -generaatori poolt on vastavalt 156,1 ja 47,7 MWh/a

### 3.1.6 Tulemuste koondtabel

Tulemused on saadud uuritava ettevõtte poolt esitatud andmete, kohapealsete külastuste ja mõõtmiste ning eelnevalt kasutatud valemite tulemusena. Arvutustes on kasutatud ettevõtte poolt esitatud gaasi- ja elektri hindu, mis 2023. aastal olid keskmiselt gaasi puhul 63,08 €/MWh ja elektril 157,76 €/MWh.

Olemasoleva leek-suitsutoru aastane energiakadu on 2103 MWh/a, mis ümber arvutatuna on 132 678 €/a. Uue aurugeneraatori puhul on energiakaod aastas 67 MWh/a ehk 10 526 €/a. Seega oleks katlamaja vahetuse puhul aastane rahaline sääst, mis on tingitud energiakadude vähenemisest, 122 152 €/a. Antud tulemused on näidatud ka tabelis 2.

Tabel 2. Aurukatla ja -generaatori soojuskadude erinevus

	AURUKATEL		AURUGENERAATOR		ERINEVUS
	MWh/a	€/a	MWh/a	€/a	€/a
Suitsugaaside heitsoojus	106	6676	0	0	6676
Soojuskaod katlast	86	5415	14	2215	3200
Soojuskaod aurutorustikus	267	16 875	5	780	16 095
Ebaühtlane koormus	74	4660	0	0	4660
Ooterežiim	1 414	89 205	0	0	89 205
Läbipuhke kaod	156	9846	48	7532	2315
<b>Kokku</b>	<b>2103</b>	<b>132 678</b>	<b>67</b>	<b>10 526</b>	<b>122 152</b>

Järgnevas tabelis 3 on esitatud mõlema lahendusega kaasnevad kulud, milleks on investeering, auru tootmiseks aastas kuluv summa ning soojusenergeetilised kaod.

Nende andmete põhjal on leitud, et planeeritava lahenduse puhul oleks lihttasuvus 12,4 aastat.

Tabel 3. Arvutuse tulemused ja lihttasuvus praeguse hinnataseme juures

Auruvajadus	1175	MWh/a
Maagaasiga kütuse kulu	74 089	€/a
Elektriga kütuse kulu	185 295	€/a
<b>Sääst aastas</b>	<b>-111 204</b>	<b>€/a</b>
Soojusenergeetilised kaod aurukatlal	132 678	€/a
Soojusenergeetilised kaod aurugeneraatoril	10 526	€/a
<b>Sääst aastas</b>	<b>122 152</b>	<b>€/a</b>
<b>Sääst rendikonteineri arvelt</b>	<b>25 389</b>	<b>€/a</b>
<b>Sääst kokku aastas</b>	<b>36 337</b>	<b>€/a</b>
Investeeringu maksuvus	452 211	€
<b>Lihttasuvus</b>	<b>12,4</b>	<b>a</b>

### 3.2 Maagaasi ja elektrienergia hindade mõju tasuvusele

Järgnevalt on lühidalt seletatud, kuidas mõjutavad maagaasi ja elektrienergia hinnad tabelis 3 leitud lihttasuvust. Joonisel 4 on näidatud tasuvusaja muutust vastavalt elektri- maagaasi hinna hinna muutustele.

		Maagaasi hind €/MWh																
		12,36	20	35	50	65	80	95	110	125	140	155	170	185	200	215	230	245
Elektri hind €/MWh	50	4,02	3,47	3,06	2,73	2,47	2,25	2,07	1,92	1,78	1,67	1,57	1,48	1,40	1,32	1,26	1,20	
	70	5,08	4,24	3,64	3,19	2,83	2,55	2,32	2,13	1,97	1,83	1,70	1,60	1,50	1,42	1,35	1,28	
	90	6,90	5,44	4,49	3,82	3,32	2,94	2,64	2,39	2,19	2,02	1,87	1,74	1,63	1,53	1,45	1,37	
	110	10,74	7,57	5,85	4,76	4,02	3,47	3,06	2,73	2,47	2,25	2,07	1,92	1,78	1,67	1,57	1,48	
	130	24,31	12,48	8,40	6,33	5,08	4,24	3,64	3,19	2,83	2,55	2,32	2,13	1,97	1,83	1,70	1,60	
	150	-92,53	35,52	14,90	9,43	6,90	5,44	4,49	3,82	3,32	2,94	2,64	2,39	2,19	2,02	1,87	1,74	
	170	-15,94	-42,03	65,94	18,48	10,74	7,57	5,85	4,76	4,02	3,47	3,06	2,73	2,47	2,25	2,07	1,92	
	190	-8,72	-13,20	-27,19	458,98	24,31	12,48	8,40	6,33	5,08	4,24	3,64	3,19	2,83	2,55	2,32	2,13	
	210	-6,00	-7,83	-11,27	-20,09	-92,53	35,52	14,90	9,43	6,90	5,44	4,49	3,82	3,32	2,94	2,64	2,39	
	230	-4,57	-5,57	-7,11	-9,83	-15,94	-42,03	65,94	18,48	10,74	7,57	5,85	4,76	4,02	3,47	3,06	2,73	
	250	-3,70	-4,32	-5,19	-6,51	-8,72	-13,20	-27,19	458,98	24,31	12,48	8,40	6,33	5,08	4,24	3,64	3,19	
	270	-3,10	-3,53	-4,09	-4,86	-6,00	-7,83	-11,27	-20,09	-92,53	35,52	14,90	9,43	6,90	5,44	4,49	3,82	
	290	-2,67	-2,98	-3,37	-3,88	-4,57	-5,57	-7,11	-9,83	-15,94	-42,03	65,94	18,48	10,74	7,57	5,85	4,76	
	310	-2,35	-2,58	-2,87	-3,23	-3,70	-4,32	-5,19	-6,51	-8,72	-13,20	-27,19	458,98	24,31	12,48	8,40	6,33	
	330	-2,09	-2,28	-2,50	-2,77	-3,10	-3,53	-4,09	-4,86	-6,00	-7,83	-11,27	-20,09	-92,53	35,52	14,90	9,43	
	350	-1,89	-2,04	-2,21	-2,42	-2,67	-2,98	-3,37	-3,88	-4,57	-5,57	-7,11	-9,83	-15,94	-42,03	65,94	18,48	
	370	-1,72	-1,84	-1,98	-2,15	-2,35	-2,58	-2,87	-3,23	-3,70	-4,32	-5,19	-6,51	-8,72	-13,20	-27,19	458,98	
	390	-1,58	-1,68	-1,80	-1,93	-2,09	-2,28	-2,50	-2,77	-3,10	-3,53	-4,09	-4,86	-6,00	-7,83	-11,27	-20,09	
	410	-1,46	-1,55	-1,64	-1,76	-1,89	-2,04	-2,21	-2,42	-2,67	-2,98	-3,37	-3,88	-4,57	-5,57	-7,11	-9,83	
	430	-1,35	-1,43	-1,51	-1,61	-1,72	-1,84	-1,98	-2,15	-2,35	-2,58	-2,87	-3,23	-3,70	-4,32	-5,19	-6,51	

Joonis 4. Tasuvusaja muutus sõltuvalt elektri- ja maagaasi hinna muutustest

### 3.2.1 Maagaasi hinna kujunemine

Maagaas on taastumatu energiaallikas ja seda ei ole võimalik Eestis toota. See tähendab, et maagaasi puhul on oluliseks märksõnaks tarnekindlus. Arvestades hetkelist poliitilist ja sõjalist olukorda Euroopas, ei ole gaasi varustuskindlus väga kindel.

On võimalik eeldada, et kuna maagaas on taastumatu energiaallikas ehk seda juurde ei teki, tõstetakse selle kasutamise vähendamiseks veel maagaasi hinnaga seotud makse, mis võivad tõsta maagaasi hinda tulevikus veelgi.

Samuti peab arvestama sellega, et Eestis maagaasi toota pole võimalik. See tähendab, et kuna tegu on importkütusega, ollakse väga sõltuvad maailmaturu hinnast. All olevalt jooniselt 5 on võimalik näha, et gaasi hind võib olla väga kõikumine ning on väga keeruline täpselt ennustada, milline on gaasi hind viie või kümne aasta pärast.



Joonis 5. Gaasi GetBaltic börsihindade graafik 2023 aasta kohta [37]



### 3.2.2 Maagaasi aktsiis

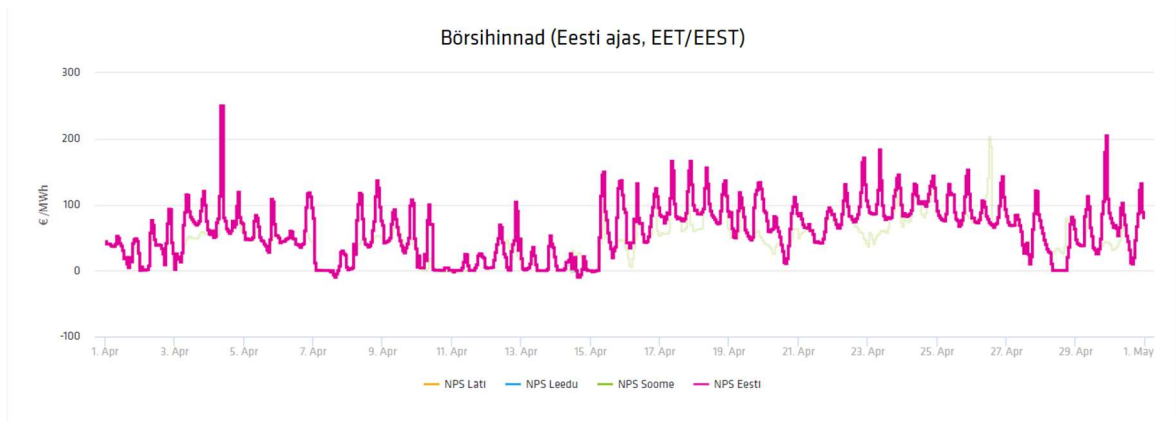
Maksu- ja Tolliameti andmetel on maagaasi aktsiis kuni 30.04.2024 (k.a) kehtiva määrusega 40 €/1000 m<sup>3</sup> [38]. 2024. aasta maist kehtima hakkav aktsiisimäärus kehtib Rahandusministeeriumi andmetel kuni 2027. aastani ja selle eesmärgiks on gaasiaktsiisi tõstmine koroonakriisi eelsele tasemele [39]. 2018. aastal oli maagaasi aktsiis 50,65 €/1000 m<sup>3</sup>, 2019. aastal 63,31 €/1000 m<sup>3</sup> ning 2020. aastal 79,14 €/1000 m<sup>3</sup> [38]. Seega saab eeldada, et 2027. aastaks on gaasiaktsiis ligikaudu 80 €/1000 m<sup>3</sup>, mis on kaks korda suurem kui hetkel.

Eelnevat arvestades saab oletada, et järgnevate aastate jooksul suureneb maagaasi hind aktsiisi tõttu, kuid keeruline on eeldada, kui palju see täpselt suureneda võib. Kui võtta arvesse alusandmeid, et uuritava ettevõtte gaasi tarbimine kuus on keskmiselt 25 000 m<sup>3</sup>, saab oletada, et hetkel on igakuine makstav gaasiaktsiis (igakuise gaasiarve sisse arvestatuna) ligikaudu 1000 €. Kõigi eelduste kohaselt on seega paari aasta pärast makstav igakuine gaasiaktsiis 2000 € (arvestades, et gaasiaktsiis suureneb kaks korda).

### 3.2.3 Elektri hinna kujunemine

Elektrihind koosneb peamiselt kolmest aspektist: elektri omahind ehk elektrienergia hind, taastuvenergia tasu, elektriaktsiis ning võrgutasu. Elektrienergia on aga väga kõikumine ning kujuneb börsihinna ja elektrimüüja kasumimarginaali koosmõjus. [40]

Elektri hinna liikumise suunda ja selle kiirust järgneva 10-20 aasta perspektiivis ei ole võimalik ennustada. Seda illustreerib ka all olev joonis 6, mis näitab, et elektrihinna kõikumist 2024 aasta aprilli kuus. Seega võime vaid teha oletusi, et tulevikus suureneb taastuvelektrienergia osakaal võrreldes taastumatutest energiaallikatest toodetud elektrienergiaga ning seetõttu võib teha oletuse, et keskmise elektrihinna tõus ei ole nii suur võrreldes maagaasiga või vähemalt ei ole see pidev. Teisest küljest, kui paljud tööstused muudavad oma primaarseid energiaallikaid fossiilsetest kütustest just elektri peale ning lisaks suureneb iga aasta elektriautode kasutus, siis suureneb ka üldine elektritarbimine ühiskonnas tervikuna. See, kas kõik tootmisüksused samamoodi järgi suureneda jõuavad, on väga raske ennustada. Lühiajaline elektrienergia tootmisüksuste defitsiit võib põhjustada hoopis elektrienergia hinna kallinemise.



Joonis 6. Elektrienergia börsihindade graafik 2024 aasta aprilli kuu kohta [41]

## 4. JÄRELDUSED

Käesolevas peatükis tuuakse välja järeldusi eelnevalt töös tutvustatud tehnoloogiate ja lahenduste potentsiaalsete kasutuste kohta tulevikus ning kuidas oleks autori hinnangul mõistlik uuritaval leivatööstusel edasi käituda.

Antud lõputöös ei käsitletud teiste kütustega töötavaid aurugeneraatoreid ehk keskenduti vaid elektrikütusel töötavate generaatorite tasuvusajale. Küll aga oleks võimalik olemasolevat aurukatelt võrrelda ka gaasil töötava generaatoriga. Saab eeldada, et investeringu maksumus jääks suurusjärgult samaks mõlema variandi puhul, kuid auru tootmise hind oleks gaasil töötava aurugeneraatori puhul väiksem. Tänu sellele oleks ka tasuvusaeg märgatavalt väiksem ning investering tasuks ennast kiiremini ära.

Olemasolev leek-suitsutoru katel oleks soovitatav välja vahetada peamiselt kahel põhjusel:

1. Katel on toodetud 1995. aastal ehk pea 30 aastat tagasi ning selle aja jooksul on katel amortiseerunud. Sellest tulenevalt tekib suurem võimalus, et katel lakkab ootamatult töötamast. Lisaks kaasneb suur soojuskadu radiatsiooni teel katlast. Samuti tekib suur soojuskadu aurutorustikust, sest isolatsioon on amortiseerunud aja jooksul.
2. Katel on hetkel vajaliku tootmise jaoks liiga suur, mille tulemusena peab katel tihti sisse-välja lülituma, mis koormab põletit liigselt. Seetõttu peaks ilmselt mõne aja pärast põletit välja vahetama, mis aga nii vana katla puhul ei ole mõistlik. Samuti ei taga see soojustehnilist efektiivust, mille tulemusena ei saa katel töödada oma nimikasuteguri juures.

Eelnevalt toodud põhjuste ja töös leitud olemasolevate soojuskadude tõttu tabelis 2, oleks ettevõttel mõistlik üle minna aurukatla tehnoloogialt aurugeneraatorile. Nagu antud tabelist näha, on aurukatla ja -generaatori soojuskadude erinevus märkimisväärne: katla kasutamisel on see 132 678 €, generaatori puhul 10 526 € aastas. Antud tulemustest on näha, et soojustehnilistest arvutustest vaadatuna on kindlasti mõistlik kaaluda aurugeneraatori kasutamist.

Hetkel planeeritava lahenduse puhul on tasuvusajaks 12,4 aastat, mis on liiga suur. Seetõttu ei ole lihttasuvuse aspektist lähtudes mõistlik antud elektriliste aurugeneraatorite lahendusega ettevõttel edasi minna. Soovituslik on edasi uurida täpsemalt, kui palju maksab gaaskütusel või kombineeritud ehk gaasi ja elektri peal

töötavate aurugeneraatorite lahendused. Seejärel on võimalik öelda täpsem tasuvusaeg. Saab vaid eeldada, et tasuvusaeg oleks väiksem ja seetõttu oleks lahendus majanduslikust aspektist mõistlikum.

## KOKKUVÕTE

Auru kasutatakse tööstussektoris laialdaselt energia tootmiseks, soojuse ülekandmiseks ja mitmesuguste tööstuslike protsesside käitamiseks. Antud töö eesmärgiks oli keskenduda kahele auru tootmise viisile- gaasil töötavad aurukatlad ja elektrilised aurugeneraatorid- ja neid võrrelda ning leida töös uuritava leivatööstuse näitel olemasoleva aurukatla soojuskaod.

Töö esimeses osas kirjeldati täpsemalt, mis on aurukatla ja -generaatori tööpõhimõtted ning kuidas need erinevad. Samuti uuriti, et mis otstarbel ja milliste vahenditega auru tööstustes kasutatakse ning kuidas peab eelnevalt toorvett töötleva, et sellest saaks auru toota ilma seadmeid kahjustamata. Teises osas keskenduti valemite leidmisele ja võrreldi spetsiifiliselt uuritava tööstuse aspektist auru tootmise tehnoloogiaid. Tulemuste peatükis näidati eelnevalt tutvustatud valemite põhjal arvutustulemusi ning leiti nii soojustehnilised- kui ka rahalised säästud aastas, kui rakendada planeeritav lahendus. Viimaks toodi järeldus, kuidas oleks mõistlik antud leivatööstusel edasi liikuda.

Töö käigus selgus, et uuritava ettevõtte tootmisesse sobiks auru tootmiseks paremini aurugeneraator kui olemasolev aurukatel. Seda eelkõige seetõttu, et auru tarbimine tootmises on äärmiselt ebaühtlane- soojuskadu sellest tingituna on 74 MWh ehk 4660 € aastas. Selle tõttu, et auru vajadus on kõikuv, hoitakse katelt pidevalt soojas, millest tekib kõige märkimisväärsem energiakadu- 1414 MWh ehk 89 205 € aastas.

Antud tulemuste puhul on leitud projekti lihtsuvus. Projekti investering on 452 211 € ja rahaline sääst 26 337 €/a (hõlmab endast auruvajaduse, soojusenergeetiliste kadude ja rendikonteineri sääste) ning lihtsuvus 12,4 aastat.

Töö tulemused on üsna sarnased sellega, mida autor eeldas - soojuskaod olemasolevast katlasüsteemist on väga suured. Samas on aga uus tehnoloogia kallid ning auru oma hind elektrist tootes suurem võrreldes gaasiga, mille tõttu on lahenduse tasuvusaeg pikk.

Tulemustest saab järeldada, et kindlasti oleks mõistlik uuritava ettevõttele kaaluda üleminekut aurugeneraatoritele, kuid kaaluda elektri asemel teisi kütuseid, näiteks gaasi. Kõige kindlam, nii tarne kui hinna aspektidest, oleks kasutada nii gaasi kui elektrit ehk kombinatsiooni.

Samuti on edasine mõtte uurida, kas ettevõttes tekib näiteks ahjude kütmisest heitsoojust ning kui jah, siis kui palju. Ideeks oleks ahjudest tekkivat heitsoojust kokku koguda ja ära kasutada näiteks auru tootmisel või muul viisil kütmiseks.

## SUMMARY

Steam is widely used in the industrial sector for energy production, heat transfer, and various industrial processes. The goal of this work was to focus on two methods of steam production—steam boilers and steam generators— and to compare them, and determine the heat losses of the existing steam boiler in the bread industry studied in this work.

In the first part of the work, the principles of operation of steam boilers and generators were described in detail and how they differ. It was also examined for what purposes and with what means steam is used in industries and how raw water must be treated beforehand to produce steam without damaging the equipment. The second part focused on finding formulas and specifically comparing steam production technologies from the perspective of the industry under study. In the results chapter, calculation results were presented based on the previously introduced formulas, and both thermal and financial savings per year were identified if the planned solution were implemented. Finally, conclusions were drawn on how the bread industry should proceed.

During the work, it was found that a steam generator would be more suitable for the production process of the studied company than the existing steam boiler. This is mainly because steam consumption in production is extremely uneven, resulting in a heat loss of 74 MWh, or €4660 per year. Because the steam demand is fluctuating, the boiler is kept warm continuously, leading to the most significant energy loss—1414 MWh or €89,205 per year.

Given these results, the project's simple payback period was calculated. The project's investment is €452,211 and the annual financial savings are €26,337 (including savings from steam needs, thermal energy losses, and container rental), with a simple payback period of 12.4 years.

The results of the work are quite similar to what the author expected—the heat losses from the existing boiler system are very large. However, the new technology is expensive, and the cost of producing steam with electricity is higher compared to gas, resulting in a long payback period for the solution.

From the results, it can be concluded that it would definitely be advisable for the studied company to consider switching to steam generators but also to consider other fuels instead of electricity, such as gas. The most reliable option, both in terms of supply and price, would be to use a combination of gas and electricity.

Additionally, there is an idea to investigate whether there is waste heat generated from the ovens in the company and if so, how much. The idea would be to collect and use the waste heat from the ovens, for example, for steam production or other heating purposes.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] International Energy Agency. ja Organisation for Economic Co-operation and Development., *Energy technology transitions for industry : strategies for the next industrial revolution*. OECD/IEA, 2009. Vaadatud: 19. mai 2024. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbe43f12-1bb4-4d54-bd59-d036258be297/industry2009.pdf>
- [2] T. J. Bowser, „Steam Basics for Food Processors“, Stillwater, Oklahoma, juuli 2017. Vaadatud: 29. mai 2024. <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/steam-basics-for-food-processors.html>
- [3] D. Einstein, E. Worrell, M. Khrushch, ja E. Org, „Title Steam systems in industry: Energy use and energy efficiency improvement potentials Publication Date Steam Systems in Industry: Energy Use and Energy Efficiency Improvement Potentials“, 2001.
- [4] R. Altamirano-Fortoul, A. Le-Bail, S. Chevallier, ja C. M. Rosell, „Effect of the amount of steam during baking on bread crust features and water diffusion“, *J Food Eng*, kd 108, nr 1, lk 128–134, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.07.015>.
- [5] A. Ladha-Sabur, S. Bakalis, P. J. Fryer, ja E. Lopez-Quiroga, „Mapping energy consumption in food manufacturing“, *Trends Food Sci Technol*, kd 86, lk 270–280, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.034>.
- [6] M. Hrycay, „Steam“, *Agri Food Processing*, Pressbooks, 2022. Vaadatud: 19. mai 2024. <https://pressbooks.pub/siitcarpentryrefresherprogrammanual/chapter/steam/>
- [7] C. Brooks, M. Swainson, I. Beauchamp, I. Campelos, R. Ishak, ja W. Martindale, „Transformational steam infusion processing for resilient and sustainable food manufacturing businesses“, *Foods*, kd 10, nr 8, aug 2021, doi: [10.3390/foods10081763](https://doi.org/10.3390/foods10081763).
- [8] F. Pedrosa, „Clean Steam in the Food & Drink Industry Which grade of steam is right for your application?“ Vaadatud: 19. mai 2024. <https://f.nordiskemedier.dk/28vktpqdw0p5xwa.pdf>



- [9] „Different types of steam for sterilization“, RSD Industrial Sterilization. Vaadatud: 19. mai 2024. <https://www.rsd-engineering.com/what-are-the-difference-between-plant-steam-process-steam-and-pure-steam>
- [10] „Pure Steam Generation“, Aqua-Chem. Vaadatud: 19. mai 2024. <https://aqua-chem.com/pure-steam-generation/>
- [11] C. G. J. Baker, *Handbook of Food Factory Design*. 2013. doi: 10.1007/978-1-4614-7450-0.
- [12] M. A. Malek, *Heating Boiler Operator's Manual: Maintenance, Operation, and Repair*. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2007.
- [13] T. B. Sauselein, *Boiler Operator's Exam Preparation Guide*. The McGraw-Hill Companies, Inc., 1997.
- [14] I. G. Wenten ja Khoiruddin, „Reverse osmosis applications: Prospect and challenges“, *Desalination*, kd 391, lk 112–125, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.12.011>.
- [15] A. Shokri ja M. Sanavi Fard, „Principles, operational challenges, and perspectives in boiler feedwater treatment process“, *Environmental Advances*, kd 13, lk 100389, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100389>.
- [16] I. Mikk *et al.*, *Soojustehnika käsiraamat*. Valgus, 1977.
- [17] „Industry relied mostly on natural gas & electricity“, mai 2023. Vaadatud: 19. mai 2024. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20230512-1>
- [18] A. Veski, *Katelseadmed*. Valgus, 1991.
- [19] „KE061: KÜTUSE TARBIMINE | Aasta, Majandusharu ning Kütuse liik“, 2016. Vaadatud: 19. mai 2024. [https://andmed.stat.ee/et/stat/Lepetatud\\_tabelid\\_\\_Majandus.%20Arhiiv\\_\\_Energeetika.%20Arhiiv/KE061/table/tableViewLayout2](https://andmed.stat.ee/et/stat/Lepetatud_tabelid__Majandus.%20Arhiiv__Energeetika.%20Arhiiv/KE061/table/tableViewLayout2)
- [20] D. R. Nhuchhen ja P. Abdul Salam, „Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach“, *Fuel*, kd 99, lk 55–63, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.015>.

- [21] S. Golebiowski, G. Wisniewski, ja M. Pisarek, „Processing and utilisation of wood chips for energy purposes.“, Lithuanian Institute of Agricultural Engineering, Raudondvaris, 2000. Vaadatud: 19. mai 2024.  
<https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20000605060>
- [22] „KK501: MAAVARADE KAEVANDAMINE | Maakond, Aasta, Maavara ning Näitaja“. Vaadatud: 19. mai 2024.  
[https://andmed.stat.ee/et/stat/Lepetatud\\_tabelid\\_\\_Keskkond.%20Arhiiv\\_\\_Loodusvarad%20ja%20nende%20kasutamine.%20Arhiiv/KK501/table/tableViewLayout2](https://andmed.stat.ee/et/stat/Lepetatud_tabelid__Keskkond.%20Arhiiv__Loodusvarad%20ja%20nende%20kasutamine.%20Arhiiv/KK501/table/tableViewLayout2)
- [23] „KE06: KÜTUSE TARBIMINE | Kütuse liik ning Aasta“. Vaadatud: 19. mai 2024.  
[https://andmed.stat.ee/et/stat/Lepetatud\\_tabelid\\_\\_Majandus.%20Arhiiv\\_\\_Energeetika.%20Arhiiv/KE06/table/tableViewLayout2](https://andmed.stat.ee/et/stat/Lepetatud_tabelid__Majandus.%20Arhiiv__Energeetika.%20Arhiiv/KE06/table/tableViewLayout2)
- [24] V. Leroy-Cancellieri, D. Cancellieri, E. Leoni, A. Simeoni, ja A. I. Filkov, „Energetic potential and kinetic behavior of peats“, *J Therm Anal Calorim*, kd 117, nr 3, lk 1497–1508, 2014, doi: 10.1007/s10973-014-3912-2.
- [25] S. Faramawy, T. Zaki, ja A. A.-E. Sakr, „Natural gas origin, composition, and processing: A review“, *J Nat Gas Sci Eng*, kd 34, lk 34–54, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.06.030>.
- [26] Q. Ji, H.-Y. Zhang, ja J.-B. Geng, „What drives natural gas prices in the United States? – A directed acyclic graph approach“, *Energy Econ*, kd 69, lk 79–88, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.11.002>.
- [27] C. Arndt, X. Diao, P. Dorosh, K. Pauw, ja J. Thurlow, „The Ukraine war and rising commodity prices: Implications for developing countries“, *Glob Food Sec*, kd 36, lk 100680, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100680>.
- [28] D. Millstein, E. O’shaughnessy, ja R. Wiser, „Lawrence Berkeley National Laboratory LBL Publications Title Exploring Wholesale Energy Price Trends: The Renewables and Wholesale Electricity Prices Permalink <https://escholarship.org/uc/item/92g763h3> Publication Date“, 2024.  
<https://escholarship.org/uc/item/92g763h3>
- [29] Sebastian. Teir ja Picaset), *Steam boiler technology*. Helsinki University of Technology, 2002.

- [30] „Oil and Gas Boilers Hot Water (low & high temperature) and Steam Boilers for Oil & Gaseous Fossil & Bio Fuels Shell & Tube, Panel-wall and Water-tube Boilers up to 50 MW, 68 ton/h and 43 bar-g“. [www.danstoker.com](http://www.danstoker.com)
- [31] „Steam Boilers 101“, Miura. Vaadatud: 19. mai 2024.  
<https://miuraboiler.com/steam-boilers-101/>
- [32] „High Efficiency Steam Boiling Units“, Clayton Industries. Vaadatud: 19. mai 2024. <https://www.claytonindustries.com/products-steam-generators-and-fluid-heaters/>
- [33] „Electrical Steam Generators“. Vaadatud: 19. mai 2024.  
<https://claytonsteam.com/en-EN/product/steam-generators/electrical-steam-generators>
- [34] „Industrial Steam“, Clayton . Vaadatud: 19. mai 2024.  
<https://claytonindustries.co.uk/about/industrial-steam/>
- [35] „PRINCIPLES OF CALCULATING RESULTS BY THE MADUR GAS ANALYSERS“, juuli 2007. Vaadatud: 19. mai 2024.  
[https://www.madur.com/data/download/00\\_common/manuals/Principles%20of%20calculating%20the%20results\\_EN.pdf](https://www.madur.com/data/download/00_common/manuals/Principles%20of%20calculating%20the%20results_EN.pdf)
- [36] Owens Corning, „PAROC Calculus“. Paroc Oy Ab, 2024. Vaadatud: 19. mai 2024.  
<https://calculus.paroc.com/paroc-calculus/#/>
- [37] „GetBaltic hinnad“. Vaadatud: 19. mai 2024.  
<https://dashboard.elering.ee/et/gas-trade/price?interval=hours&period=months&start=2024-04-30T21:00:00.000Z&end=2024-05-31T20:59:59.999Z>
- [38] „Kütus ja elektrienergia“, Maksu- ja Tolliamet. Vaadatud: 19. mai 2024.  
<https://www.emta.ee/ariklient/maksud-ja-tasumine/aktsiisid/kutus-ja-elektrienergia>
- [39] „2023. aastal jõustuvad seadusemuudatused“, Rahandusministeerium. Vaadatud: 19. mai 2024. <https://www.fin.ee/uudised/2023-aastal-joustuvad-seadusemuudatused>
- [40] „Elektri hind lõpptarbijale“, Energiatalgud. Vaadatud: 19. mai 2024.  
[https://energiatalgud.ee/Elektri\\_hind\\_l%C3%B5pptarbijale](https://energiatalgud.ee/Elektri_hind_l%C3%B5pptarbijale)

[41] „Börsihinnad (Eesti ajas, EET/EEST)“. Vaadatud: 19. mai 2024.

<https://dashboard.elering.ee/et/nps/price?interval=minute&period=years&start=2022-12-31T22:00:00.000Z&end=2023-12-31T21:59:59.999Z>