



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Energiatehnoloogia instituut

**KAHEFAASILISES KESKKONNAS ISEENESLIKULT
TEKKIVATE OSTSILLATSIOONIDE ABIL MADALA
POTENTIAALIGA JÄÄKSOOJUSEST ELEKTRI
TOOTMISE KATSELINE UURIMINE**

**EXPERIMENTAL STUDY OF GENERATING ELECTRICITY
FROM LOW POTENTIAL WASTE HEAT USING SELF-
EXCITING OSCILLATIONS IN A TWO-PHASE
ENVIRONMENT**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Marion Mets

Üliõpilaskood 206202EACB

Juhendaja: Dmitri Nešumajev, vanemteadur

Tallinn 2023

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.

30. mai 2023

Autor: Marion Mets

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetööle esitatud nõuetele

30. mai 2023

Juhendaja: Dmitri Nešumajev

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Marion Mets:

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "Kahefaasilises keskkonnas iseeneslikult tekkivate ostsillatsioonide abil madala potentsiaaliga jääsoojusest elektri tootmise katseline uurimine",

mille juhendaja on Dmitri Nešumajev,

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.

30.05.2023 (kuupäev)

¹ 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 loomingulise 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: Marion Mets, 206202EACB
Õppekava, peeriala: EACB17/20, energiatehnoloogia
Juhendaja: Dmitri Nešumajev, vanemteadur

Lõputöö teema:

Kahefaasilises keskkonnas iseeneslikult tekkivate ostsillatsioonide abil madala potentsiaaliga jääksoojusest elektri tootmise katseline uurimine
Experimental Study Of Generating Electricity From Low Potential Waste Heat Using Self-Exciting Oscillations In A Two-Phase Environment

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Selgitada välja seisulainega kahefaasilise temperatuurivahest elektri genereerimiseks loodud seadme tööpõhimõtte.
2. Uurida, kas seade saab töötada ka ummistunud kanalitega või mitte.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kooskõlastada lõputöö teema ja uurimiseesmärk juhendajaga	31.03.23
2.	Esitada lõputöö esimene versiooni juhendajale	30.04.23
3.	Kooskõlastada jooksvalt täiendused juhendajaga	jooksvalt
4.	Esitada lõputöö viimane versioon juhendajale	27.05.23

Töö keel: eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: 30. mai 2023. a

Üliõpilane: Marion Mets
/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: Dmitri Nešumajev
/allkirjastatud digitaalselt/

Programmijuht: Oliver Järvik
/allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

1. SISSEJUHATUS.....	6
2. SEADME TÖÖPÕHIMÕTTE SELGITUS.....	9
2.1. Mis on termoakustika?.....	9
2.2. Laine tekkimine termoakustilises masinas	11
2.3. Ühe- ja kahefaasilise töövedelikuga termoakustika	13
2.4. Kahefaasilise keskkonnaga termoakustika ning ostsilleerivad soojustorud	14
2.5. Kas helilaine saab tekkida, kui tegemist on ostsilleeriva soojustoruga?	17
3. ÜLEVAADE OLEMASOLEVATEST TEHNOLOOGIATEST	19
3.1. Millise disainiga lineaargeneraatoriga termoakustilisi masinaid on võimalik ehitada?.....	19
3.2. Lineaargeneraatoriga masinate töötingimused	22
3.2.1. Temperatuurigradient.....	22
3.2.2. Vahekihi kanali suurus.....	23
3.2.3. Muud tingimused	24
3.3. Lineaargeneraatoritega masinate tööparameetrid	25
4. KAS SEADE SAAB TÖÖTADA KA SULETUD KANALITEGA?	28
4.1. Autori tehtud katsete kirjeldus.....	28
4.2. Katsete tulemused	30
4.3. Järeldused	33
KOKKUVÕTE	36
SUMMARY	38
KASUTATUD ALLIKAD.....	40

1. SISSEJUHATUS

Nagu ka oma eelmistes raportides, kinnitas IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) [1] taaskord paar kuud tagasi, 2023. aasta märtsis, et on ilmne, et Maa kliima soojeneb ning seda on põhjustanud inimtegevus, peaaesjalikult kasvuhoonegaaside emiteerimine. IPCC ja teiste selliste organisatsioonide pideva ja tulemusliku töö tõttu on enamus riike ja organisatsioone hakanud üha aktiivsemalt tegutsema, koostanud plaane ja sõlminud kokkuleppeid, et kasvuhoonegaaside emiteerimist vähendada ning kliimamuutuste toimumist pidurdada. Nii on ka Eesti kehtestanud kliimapoliitika põhialused [2], kus seatakse eesmärgiks viia kasvuhoonegaaside netoheide 2050. aastaks nullini. Suur osa selle eesmärgi saavutamiseks ette nähtud meetmetest on seotud energeetika ja tööstusega ning need hõlmavad palju erinevaid aspekte nagu efektiivsuse tõstmine, ettevõtete asukohtade planeerimine energia tootmisüksuste lähedale, hoonete energiatõhusamaks muutmine, süsiniku sidumine, taastuv- ja biokütuste kasutuselevõtmine, jne. Suur osa meetmetest hõlmab ka roheline ehk taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamist, kusjuures Euroopa Komisjon on teinud ettepaneku [3], et Euroopa Liidu eesmärgiks võiks olla 40% ulatuses taastuvate energiaallikate kasutamine aastaks 2030.

Nendest eesmärkidest kantuna tegeletakse üha enam madalakvaliteedilistest energiaallikatest elektri tootmise arendamisega. Madalakvaliteedilised energiaallikad on näiteks heitsoojus tööstusest, reoveest või ka näiteks andmekeskustest, aga ka päikse- ja maasoojus [4], [5]. Mida kallimaks läheb fossiilsetest kütustest elektri tootmine süsinikuheite maksustamise tõttu, seda enam tegeletakse teiste, muu hulgas madalakvaliteedilist soojusallikat kasutavate tehnoloogiate arendamisega. Tööstuses on juba kasutusel mitmed heitsoojust kasutavad tehnoloogiad nagu ökonomaiserid, rekuperaatorid jm. Lisaks on võimalik heitsoojust kasutada otse elektri tootmiseks (mitte ainult protsessi efektiivsemaks muutmiseks või auru eelsoojendamiseks), näiteks termoelektriliste või termoiooniliste generaatorite abil. Esimeste puhul toodetakse Seebecki efekti abil, teiste puhul kasutatakse eri temperatuuridel olevaid elektroode, kus elektronid liiguvad elektrootide vahel vaakumis kuumemalt külmemale elektrootile. [6]

Üks võimalus madalakvaliteedilise soojusallika kasutamiseks on kasutada ostsilleerimist, mis tekib teatud tingimustel gaasis või kahefaasilises vedelikus temperatuurigradiendi mõjul. Sellistel masinatel on mitmeid eeliseid: nendes on vähe liikuvaid osi ning kasutatavad materjalid on odavad ja lihtsasti kättesaadavad, nad on vastupidavad ning nad ei vaja erilist hooldust [7]. Samuti saab nendes kasutada keskkonnasõbralikke töövedelikke ning nende üldine keskkonnamõju on väike [8].

Selliseid tehnoloogiaid uurib Eestis CAFA Tech OÜ, kelle arendatava seadmega tehtud katsete põhjal on käesolev lõputöö kirjutatud. Kokku tehti 2022. aasta juulist kuni 2023. aasta märtsini seadmega 224 katset. Katsete eesmärgid olid erinevad: testida seadme tööd laboritingimustes, pikendada töötamise aega, tõsta väljundvõimsust, parendada seadme konfiguratsiooni, alandada kriitilist temperatuuri, jne. Peamine eesmärk oli aga kõikidel katsetel (ja kogu arendustegevusel) sama: arendada seade, mille abil oleks võimalik keskkonnas olemasolevat temperatuurivahet kasutades toota elektrit.

Käesoleval lõputööl on kaks eesmärki:

- 1) selgitada, miks seade nii töötab, ning
- 2) sellest tulenevalt uurida, kas seadme tööks on vajalik, et seadme vahekihi kanalid oleksid avatud või võib seade töötada ka suletud kanalitega.

Käesoleva töö autoril on hüpotees, et seade võib töötada ka suletud kanalitega ning see ei mõjuta seadme väljundvõimsust negatiivselt.

Eesmärkidest ja hüpoteesist tulenevalt on lõputöö üles ehitatud järgmiselt. Esimeses osas (teises peatükis) selgitatakse, mis nähtuste abil CAFA Tech'i seade töötab. See on oluline, sest ilma seda mõistmata ei ole võimalik vastata teisele küsimusele. Samuti oli see üks põhjus, miks ettevõtte ülikooli poole pöördus – saada selgust, mis seadmes toimub. Seejärel antakse kolmandas peatükis ülevaade teaduskirjanduses välja pakutud sarnastest tehnoloogiatest, et kirjeldada seadme osade tähtsust. Neljandas peatükis kirjeldatakse tehtud katseid (pidades seejuures silmas ettevõtte ärisaladust) ning vastatakse küsimusele, kas ostsilleerimine algab ka siis, kui kanalite ristlõige on täidetud töövedeliku vedelfaasiga.

Lõputöö esimese eesmärgi saavutamiseks kasutatakse analüütilist meetodit: analüüsitakse teaduskirjandust ning otsitakse püstitatud küsimusele vastust. Kõige esimene CAFA Tech'i seadmele sarnast masinat kasutati Jaapanis 16. sajandil heli tekitamiseks usulistes rituaalides [9]. Kasuliku töö tegemiseks on sarnaseid seadmeid arendatud ja uuritud alates 1970ndatest [10]. Seadmeid on käsitletud ennekõike Stirlingu masinate nime all, kus töövedelik läbis Stirlingu termodünaamilist tsüklit, kuid erinevalt klassikalisest käsitlusest toimub tsüklis töövedeliku faasivahetus. 1980ndatel õnnestus arendada masin, mis töötas 85 K temperatuurivahe abil, kuid 90ndatel kahefaasiliste seadmete arendamine peatus, sest masinate kasutegurit ei suudetud enam tõsta. [11]

Sel ajal aga kui Stirlingu nime all tuntud masinate uurimine pidurdus, hakati sellised seadmeid uurima termoakustikas. Klassikalised termoakustilised masinad kasutavad

ühefaasilist töövedelikku, kuid 2002. aastal pakkus Raspert *et al.* välja, et termoakustilises masinas võiks kasutada kahefaasilist töövedelikku. [12] Kuna avastati, et kahefaasilise töövedeliku kasutamine võib alandada kriitilist temperatuuri (kui ostsillatsioonid algavad) ning suurendada ka võnkumise amplituudi, on kahefaasiliste termoakustiliste seadmetega tänaseni edasi tegeletud [11]. Tulemuslikumad uurimisrühmad on olnud Jaapanis, Tokyo Põllumajandus- ja Tehnikaülikoolis tegutsev Yuki Ueda uurimisrühm ja Tohoku ülikoolis Tetsushi Biwa uurimisrühm (kelle töö tulemusel on 2021. aastal ilmunud ka õpik termoakustiliste masinate kohta [13]). Lisaks tegutseb Iisraeli Tehnikaülikoolis Guy Ramoni uurimisrühm, kes on arendanud edasi masinate disaini ning välja töötanud MatLabis kasutatava arvutusprogrammi PC-TAS kahefaasiliste termoakustiliste seadmete arvutuste tegemiseks [14]. Käesoleva töö kirjutamisel on tuginetud ennekõike eelnimetatud allikatele ning lisaks 2023. aastal ilmunud Rui Yangi *et al* artiklile, kus analüüsitakse kahefaasilisi Stirlingu masinaid termoakustika põhimõtteid kasutades [11].

Teise eesmärgi saavutamiseks kasutatakse katselist meetodit, kus käesoleva töö autor viib läbi katsed oma hüpoteesi kontrollimiseks. Katsete metoodikat on kirjeldatud peatükis 4.

Võtmesõnad: termoakustika, kahefaasiline keskkond, madala potentsiaaliga jääksoojus, elektri tootmine, bakalaureusetöö

2. SEADME TÖÖPÕHIMÕTTE SELGITUS

Kuidas CAFA Tech'i seade töötab? See oli esimene küsimus, mille tõttu ettevõtte ülikooli poole pöördus, sest seda teadmata ei saanud seadet edasi arendada. Kuna seadmes tekkis kiire ostsilleerimine, oli esimene hüpotees, et seade töötab termoakustika abil.

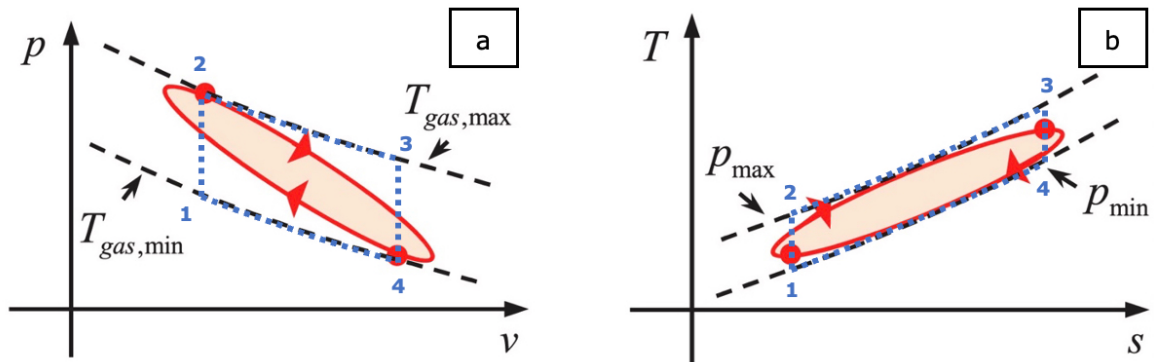
2.1. Mis on termoakustika?

Olukorras, kus piisavalt kõrge ja piisavalt madala temperatuuriga soojusvahetite vahel tekib temperatuurierinevus, võib töövedelik hakata selle tõttu kiiresti võnkuma ehk ostsilleerima [15]. Teisisõnu, temperatuurigradiendi tõttu tekib laine, mis võib olla inimkõrvale kuuldav (inimene kuuleb helisid sagedusega umbes 20–20 000 Hz) [16]. Seda nähtust nimetatakse termoakustikaks, mida võiks eestipäraselt nimetada ka soojuskuuldavuseks. Siiski on oluline meeles pidada, et laine on olemas olenemata sellest, kas inimene seda kuuleb või mitte, st et ka inimese kuuldavusest väljas oleva sagedusega lainet võib pidada helilaineks [16].

Esimene oluline tingimus ostsillatsioonide tekkeks on temperatuurigradient. Temperatuurigradient ehk temperatuuri erinevus erinevate ruumipunktide vahel põhjustab selle, et töövedelik hakkab termodünaamilist tsüklit läbima. Aga millist tsüklit töövedelik läbib? Kirjanduses on viidatud ka Braytoni tsüklile [17], kuid enam leiab viiteid Stirlingu tsüklile [11], [18], [19]. Stirlingu tsükli puhul toimub: [20], [21]

- 1) isohooriline soojendamine,
- 2) isothermiline paisumine;
- 3) isohooriline jahtumine ja
- 4) isothermiline kokkusurumine,

mis iseloomustab ka seda, mis toimub ka termoakustilistes masinates. Kuigi nagu ka klassikaliste Stirlingu masinate puhul, ei järgi reaalsed termoakustilised masinad ideaalset termodünaamilist tsüklit [11]. P-v- ja T-s-diagrammidel võib termoakustilises seadmes toimuvat protsessi selgitada järgmiselt.



Joonis 2.1. P - v ja T - s -diagrammid termoakustilises seadmes toimuva protsessi selgitamiseks [22]. (Käesoleva lõputöö autori muudetud joonis). Vasakul (a) on kujutatud P - v -diagramm, mis näitab, kuidas toimub töövedeliku rõhu (P) ja ruumala (v) muutumine kahe isotermi ($T_{\text{gas,min}}$ ehk vähim töövedeliku temperatuur ning $T_{\text{gas,max}}$ ehk suurim töövedeliku temperatuur) vahel. Paremal (b) on kujutatud T - s -diagramm, mis iseloomustab temperatuuri (T) ja entroopia (s) muutumist kahe isobaari (p_{max} ehk töövedeliku maksimaalne rõhk ning p_{min} ehk töövedeliku minimaalne rõhk) vahel. Punasega on joonistatud reaalne tsükkel, sinise katkendliku joonega ideaalne Stirlingu tsükkel (mis on käesoleva töö autori lisandus originaaldiagrammidele). Numbrid tähistavad käesoleva punkti temperatuurigradiendi alapunktis esitatud Stirlingu tsükli kirjelduses esitatud etappe.

Kui töövedelik hakkab soojenema (diagrammidel 1–2), hakkab tema rõhk tõusma, samas kui tema ruumala veel väheneb. Kui ta saavutab maksimaalse temperatuuri, on rõhk maksimaalne ning tema ruumala hakkab suurenema (diagrammidel 2–3). See suureneb seni kuni saavutab taskaaluoleku, misjärel hakkab töövedelik taas jahtuma (vahekihis oleva temperatuurigradiendi tõttu, diagrammidel 3–4). Tema rõhk on minimaalne ning tema ruumala hakkab vähenema (diagrammidel 4–1). Seega toimub soojuslik paisumine siis, kui rõhk on kõrge, ning komprimeerimine siis, kui rõhk on madal. P - v -diagrammil esitatud ellipsi pindala on kasulik töö, mida masin võib teha. Seejuures tuleb tähele panna, et diagrammid kujutavad tööd, mida teeb töövedelik igas vahekihi kanalis. Kogutöö leidmiseks peaks võimaliku maksimaalse töö korrutama kanalite arvuga. Seda tööd tehakse masina sagedusega ning nimetatakse akustiliseks võimsuseks.

Stirlingu tsükli ja termoakustiliste masinate vahel on kaks erisust. Esiteks määrab tsükli toimumise aja süsteemi n -ö loomulik sagedus ning teiseks mõjutab toimuvat protsessi akustiline väli, mis tekib [22]. Termoakustiline süsteem hakkab tööle, kui tingimused on sellised, mis lubavad tal töötada enda põhilise sagedusega [23]. Akustiline väli on vektorväli, kus eksisteerib (heli)laine. See tähendab, et tsükli mõjutab see, milline laine tekib. Võib öelda, et nii sagedus kui akustiline väli on omavahel seotud ning selleks, et ostsillatsioonid tekiksid, peavad mõlemad tingimused olema täidetud – süsteem peab saama töötada enda loomulikul sagedusel, aga selleks peab olema tekkinud õige (sobiva)

kujuga laine. Järgmises alapeatükis selgitatakse, milline laine võib termoakustilises masinas tekkida.

2.2. Laine tekkimine termoakustilises masinas

Ostsilleerimist hoiab alal energia muundumine soojusest akustiliseks võimsuseks ning selleks vajalik termiline kontakt töövedeliku ning kanalite seinte vahel [24]. Sellest tekkinud laine võib olla seis- või liikuv laine. Liikuv laine on n-õ tavaline laine, mida võib ette kujutada sinusoidina, kus lainehari liigub x-telje suunas üht- või teistpidi, olenevalt laine suunast. Seisulaine on selline laine, mille lainekuju ei liigu üheski suunas, vaid seisab paigal, sest kaks ühesuguse lainepikkusega ja amplituudiga lained levivad samal ajal vastassuunas ning nende sõlmed ja paisud kattuvad ning nad interfereeruvad. [25] Ilmselgelt ei pea tagasiliiikuv laine pärinema teisest allikast, vaid võib olla sama laine peegeldus.

Seda on lihtne mõista siis, kui teada, et tegelik laine ei ole peaaegu kunagi ideaalne üksik sinusoid, millel on üks kindel sagedus. Tegelik laine koosneb erineva sagedusega sinusoididest, mida nimetatakse harmoonikuteks, kusjuures harmoonikad on üksteise suhtes täisarvu kordsed. Kõige madalama sagedusega laine on esimene harmoonik, teise harmooniku saame, kui korrutame esimese kahega jne. Erinevate harmoonikate kombineerimisel saame resultantlaine, mis ei ole puhas sinusoid, vaid komplekslaine, kus on nii reaali- kui imaginaarosa. Seda võib matemaatiliselt väljendada:

$$p(t) = A_1 \sin(\omega t + \phi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots + A_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (2.1)$$

kus p on rõhk, mis sõltub ajast, A laine amplituud ehk maksimaalne väärtus, ω ringsagedus (ehk n-õ tavaline sagedus f väljendatuna ringliikumise kaudu, $\omega = 2\pi f$) ning ϕ faasinihe eri lainete vahel. Tihti kirjutatakse see ümber:

$$p(t) = \sum_1^n A_n \sin(\omega t + \phi_n) = \sum_1^n C_n e^{i\omega t} \quad (2.2)$$

kus C_n on n-nda harmooniku kompleksosa. Selles valemis väljendatakse Euleri seaduse järgi siinusfunktsiooni eksponentfunktsiooni kaudu. Eesmärk on vaid see, et eksponentfunktsiooni on mugavam arvutustes kasutada. [26]

Termoakustiliste masinate puhul määrab töövedeliku termilise ja viskoosse piirikihi paksus, milline on rõhu ja kiiruse faaside vahe [20]. Termilise ja viskoosse piirikihipaksuste

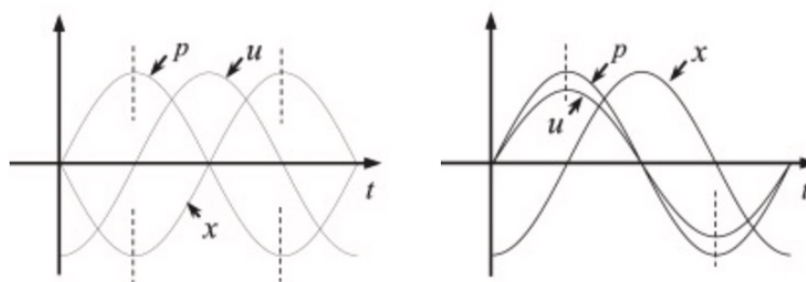
suhet väljendab Prandtl'i arv, mis gaaside puhul on umbes üks [27]. Termilist ja viskoosset piirikihti väljendavad vastavalt järgmised valemid:

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2k}{\rho c_p \omega}} \quad (2.3)$$

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\mu}{\rho \omega}} \quad (2.4)$$

kus k on soojusjuhtivus, ρ tihedus, c_p erisoojus (konstantsel rõhul), ω ringsagedus ning μ dünaamiline viskoossus [28]. Ringsagedus avaldub tavalise sageduse järgi kujul $\omega = 2\pi f$.

Piirikiht paneb paika, kui suur osa töövedelikust töös osaleb. Kui töövedeliku osake liigub kanalis väljaspool termilist piirikihti, ei avalda *stack* tema temperatuurile mingit mõju. Piirikihis asub see töövedeliku osa, mis soojeneb ja jahtub ning mille ruumala ka selle tõttu muutub. Ülejäänud töövedelik osaleb protsessis muutumatul kujul. St et rõhulaine väljaspool piirikihti on adiabaatiline, aga isothermiline kanali seina vastas. [29] Vahekihis (*stackis* või regeneraatoris) tekib helilaine soojuslevi tõttu, mistõttu peab vahekihi valimisel arvestama, kui suur on kanali ning piirikihi suhe. [30] Liikuva lainega masinates on regeneraatori kihtide vahe tavaliselt väga väike ning piirikiht ulatub kogu kanalini, seisva lainega masinates võib olla suurem. Kui piirikiht ei ulatu kogu kanalini, tekib kiiruse ja rõhu vahel 90-kraadine faasinihe. Liikuva lainega masinas on kiirus (inerts) ja rõhk üldiselt samas faasis. [31] Kiiruse ja rõhu faaside vahe on oluline seetõttu, et see määrab, kuidas kiiruse vektor mõjutab rõhulaine liikumist. Olenevalt sellest, kuidas gaasi inertsus on suunatud ehk mis suunas ja kui kiiresti gaasi osakesed liiguvad, mõjub gaasi inerts rõhulainele kas seda suurendavalt või vähendavalt. [20] Seisu- ja liikuva lainega masinate kiiruse ning rõhu faasierinevust on kirjeldatud järgmisel joonisel.

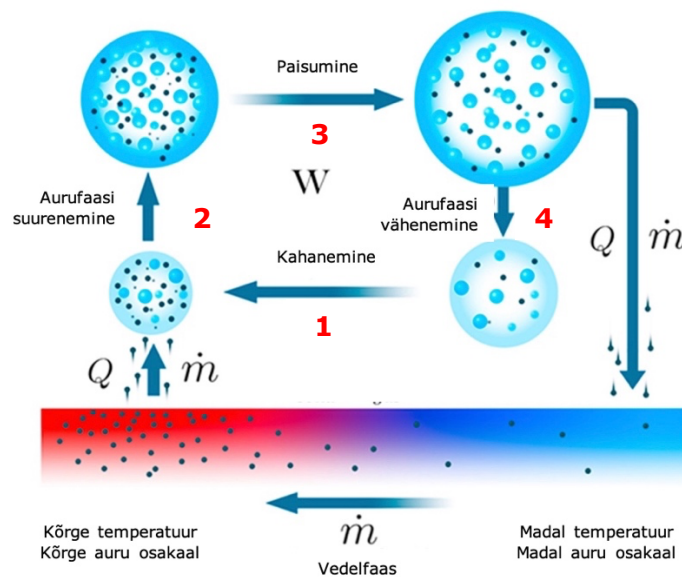


Joonis 2.2. Rõhu ning kiiruse muutumine seisu- ja liikuva laine puhul [22]. (Käesoleva töö autori muudetud). Vasakul on kujutatud seisulainet, paremal liikuvat lainet. Vertikaalteljel on amplituud (suvalise ühikuga), horisontaalteljel aeg t . Ruumipunkt x näitab resultatiivset lainekuju, p rõhku ning u kiirust.

2.3. Ühe- ja kahefaasilise töövedelikuga termoakustika

Termoakustikas kasutatav töövedelik on üldlevinud käsitluses ühefaasiline [20]. Samas tekivad termoakustilised nähtused ka kahefaasilise töövedeliku puhul, st siis kui ostsilleeriv töövedelik ei ole ainult gaasifaasis, vaid ka vedelfaasis. Seda kinnitatakse kirjanduses [32]–[36] ning seda on näidanud ka käesoleva töö autori tehtud katsed (mida kirjeldatakse 4. peatükis).

Kahefaasilise töövedeliku soojus- ja massilevi on kujutatud järgmisel joonisel.



Joonis 2.3. Kahefaasilise töövedeliku termodünaamiline tsükkel termoakustilises masinas [35]. (Käesoleva töö autori muudetud). Joonisel on kujutatud soojus- ja massilevi kahefaasilises termoakustilises masinas. Q tähistab soojust, m aurufaasi massi (mis on inertgaasis), W töövedeliku tehtavat tööd. [37]

Kui ühefaasilise vedeliku puhul ei vaheta töövedelik faasi ning tema ruumala muutused toimuvad vaid soojuslevi tõttu, siis kahefaasilise töövedeliku puhul toimub ka massilevi – töövedeliku levik ühest faasist teise. Sel juhul on masinas tegelikult töövedelikuks inertse gaasi, nt õhu, ja aurustuva ja kondenseeruva vedeliku, nt vee segu. Edaspidi aga käsitatakse töövedelikuna segu reaktiivset osa ehk seda osa, mis aurustub ja kondenseerub, ja mitte inertgaasi. Joonise 2.3 järgi on protsess järgmine [11], [22].

- 1 – töövedeliku vedelfaas liigub mööda kanali seina külmemast osast soojemasse. põhjustab kapillaarjõud, mis eksisteerib vahekihi ebatasasuse tõttu, ning mõnel juhul ka gravitatsioonijõud (kui seade on üles ehitatud nii, et küte on all ja jahutus ülal). Samal ajal toimub seina kaudu soojuslevi ning töövedeliku temperatuur

tõuseb. Temperatuuri tõusu tõttu muutub aur-vedelik tasakaal ning osa töövedelikust läheb gaasifaasi ja difundeerub segu gaasifaasi tuuma.

- 2 – töövedeliku ja inertgaasi segu ruumala suureneb (konstantsel temperatuuril), mis põhjustab rõhu vähenemist. Rõhu vähenemise tõttu läheb veel osa töövedelikust gaasifaasi.
- 3 – Aurufaasis olev töövedeliku (koos inertgaasiga) ruumala suureneb ning see liigub tagasi kanali külmemasse osasse. Temperatuuri languse tõttu hakkab auruvedeliku tasakaal muutuma ning osa töövedelikku hakkab kondenseeruma.
- 4 – osa töövedelikust kondenseerub temperatuurilanguse tõttu ning töövedeliku aurufaasi osa inertgaasis väheneb. Töövedeliku vedelfaas kanali seina pinnal suureneb ning tsükkel algab uuesti.

Siin on ka oluline tähele panna, et kui ühefaasilise termoakustika puhul tekitab ostsilleerimise soojuslevi konduktsiooni teel töövedeliku (gaasi) ja kanali seina vahel, siis kahefaasilise töövedeliku puhul toimub massilevi kahe faasi vahel. Temperatuurimuutust põhjustab ka ennekõike faasivahetus (aurustumissoojuse tõttu). Selle tõttu võib ka ostsilleerimine alata madalamatel temperatuuridel kui ühefaasilise termoakustika puhul.[35] Seda, kuidas teise faasi lisamine mõjutab seadme tööd, on selgitatud peatükis 3.

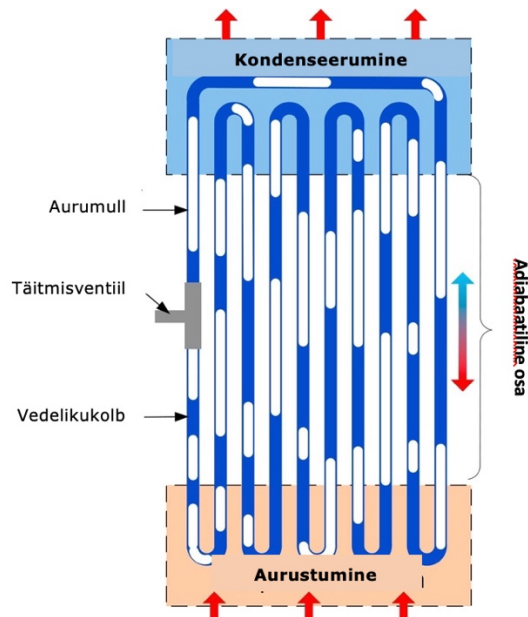
Samuti on oluline märkida, et kahefaasilise töövedeliku täpne termodünaamiline mehhanism termoakustilises masinas on tänaseni teadmata [11] ning täpne mehhanism võib sõltuda ka masina disainist. Näiteks kui termoakustiline masin on üles ehitatud nii, et ühes otsas on painduv meedium, nt membraan, võib membraan elastsusjõud mõjutada töövedeliku liikumist kanalis palju enam kui kapillaarjõud või rõhu muutumine. Samas see, et vedelik on kahes faasis, ei ütle midagi selle kohta, kuidas on faasid vahekihi kanalites jaotunud. Kas vedelfaas on vaid kanali seintel ning kanali ristlõige on avatud või võib vedelfaas täita kogu kanali ristlõike? Enne sellele küsimusele vastamist peab peatuma ostsilleerivate soojustorude mõistel.

2.4. Kahefaasilise keskkonnaga termoakustika ning ostsilleerivad soojustorud

Kahefaasilises töövedelikuga töötavale seadmele sarnane tehnoloogia on ostsilleeriv soojustoru. Seetõttu on oluline välja selgitada, kas CAFA Techi seadmes toimuvad

protsessid on käsitatavad ennekõike kahefaasilises keskkonnas toimuva termoakustika või ostsilleerivate soojustorudena.

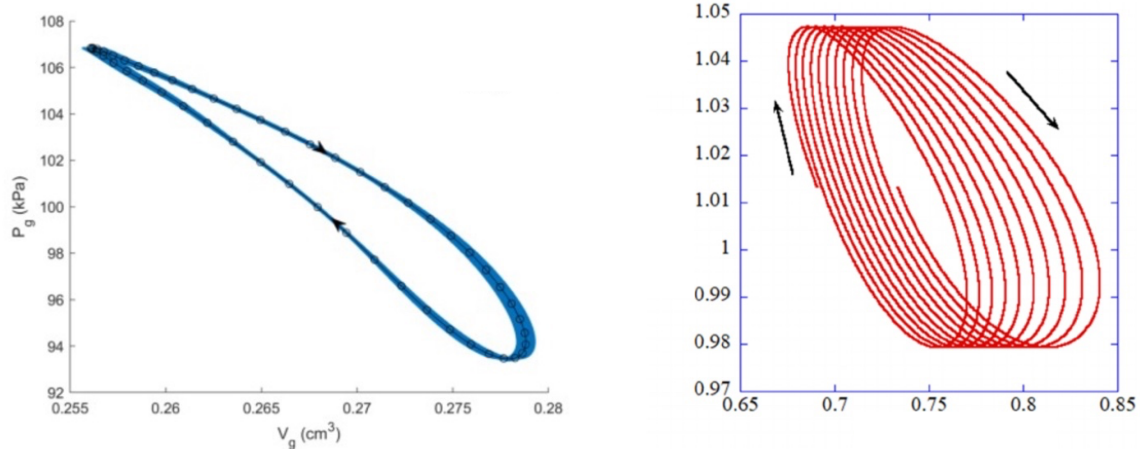
Ostsilleerivaid soojustorusid on kirjanduses palju uuritud ning need on ka juba kasutusel jahutusseadmetes ning elektri genereerimiseks [38]. Ostsilleerivad soojustorud võivad olla soojusjuhtivusega kuni $70 \text{ kW}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Töövedelikena kasutatakse vett, alkohole, erinevaid süsivesinikke, jahutusaineid, nanovedelikke jm. [39] Ostsilleeriva soojustoru skeem on esitatud järgmisel joonisel.



Joonis 2.4. Ostsilleeriva soojustoru tööpõhimõte [40]. (Käesoleva töö autori muudetud)
Ostsilleerivad soojustorud töötavad nii, et kapillaarses torus on vaheldumisi gaasi- ja vedelfaasis töövedelik. Vedelfaasis olevat osa võib nimetada vedelikukolviks. Kui vedelikukolb liigub soojemasse piirkonda, antakse töövedelikule soojust ning osa vedelikust aurustub ning tema ruumala suureneb. Selle tõttu lükatakse teine aurumull külmemasse osasse, kus ta annab energiat soojusena ära ning kondenseerub. Tema ruumala väheneb ning ta liigub esialgsesse positsiooni tagasi.

Ostsilleerivad soojustorud on tavaliselt konstrueeritud mitme käänuga toruna, kus on palju vedelikukolbe ning aurumulle, mis hakkavad adiabaatilise osa kaudu külma ja sooja osa vahel ostsilleerima. Ostsilleeriv soojustoru võib olla aga üles ehitatud ka ainult kahe pöördega. [40], [41] Sel juhul nimetatakse tehnoloogiat tavaliselt *fluidyne* masinaks. Ostsilleerivates soojustorudes kasutatakse suuremat arvu kanaleid (pöördeid) selle pärast, et siis töötab tehnoloogia stabiilsemalt: hoitakse ära vedelikukolbide ühtesulamine ning soodustatakse aurumullide teket [42].

Järgmisel joonisel on näidatud kahefaasilise termoakustilise masina ja ostsilleeriva soojustoru P-v-di:



Joonis 2.5. Ostsilleeriva soojustoru (vasakul) ning kahefaasilise termoakustilise masina (paremal) P-v-diagrammid. [43], [44] (Käesoleva töö autori muudetud kujul) Vasak- ja parempoolsel joonisel on teljed samad: vertikaalteljel on rõhk, horisontaalteljel ruumala. Ühikud on horisontaalteljel samad, vertikaalteljel on vasakpoolsel joonisel rõhk näidatud kilopaskalited (kPa), parempoolsel baarides (bar). Ostsilleeriva soojustoru diagramm on koostatud katseliste andmete põhjal, kahefaasilise termoakustika oma numbrilise modelleerimise teel (käesoleva töö kirjutamise ajal ei leitud katseliselt koostatud P-v-diagrammi kahefaasilise töövedeliku kohta termoakustilises masinas). P_g tähistab keskmist rõhku ning V_g ruumala. Mõlemal juhul on töövedelikuks vesi, termoakustilise masina puhul segus õhu kui inertgaasiga.

Joonisel 2.5 esitatud P-v-diagramme võrreldes on näha, et need on oma kujult sarnased. Mõlemad järgivad klassikalise Stirlingu tsükli eeskujul (vt joonis 2.1), kus töövedeliku rõhk ja maht muutuvad tsükliliselt ellipsi-kujuliselt. On näha, et ostsilleeriva soojustoru töövedeliku suurima rõhuga punkti liikumine toimub järsemalt, st et töövedeliku mahu muutus on intensiivsem kui kahefaasilise termoakustika puhul. Sel võib olla kaks põhjust. Esiteks peab arvestama, et paremal esitatud diagramm on saadud numbrilise modelleerimise teel ning mitte tegelike katsetulemuste põhjal. Sellest võib olla tingitud tema sümmeetrilisem kuju. Teiseks on ostsilleeriva soojustoru diagramm esitatud ilma tarbijata (*load*). Kui soojustorule lisada tarbija, muutub P-v-diagramm ka katseliselt ümaramaks ning sarnasemaks parempoolse diagrammi kujule. Selle põhjus on kiiruse ja rõhu faasinihe: ilma tarbijata on faasinihe maksimaalne ning seetõttu tema mõju tegelikule liikumisele minimaalne. Kui lisada tarbija, muudab see rõhu ja kiiruse vahelise faasinihke väiksemaks – see tähendab, et kiirus on rõhuga täpsemini faasis ning mõjutab seega ka tugevamalt ruumala muutust. [43]

Ka kirjandus toetab järeldust, et ostsilleeriv soojustoru ning kahefaasiline termoakustika kirjeldavad sisuliselt sama nähtust. Biwa õpikus [13] klassifitseeritakse termoakustikal põhinevaid tehnoloogiaid nii, et need jaotuvad:

- 1) akustilisteks jahutiteks, mis pumpavad soojust ühest kohast teise helilaine abil,
- 2) akustilisteks masinateks, kus tekib helilaine soojuse tõttu,
- 3) nn *dream pipe* ehk ostsilleeriv soojustoru, kus töövedelik eksisteerib kahes faasis ning mis liigutab soojust ostsilleeriva ainelevi kaudu.

Kusjuures esimese kahe kombineerimisel saab termoakustilise jahuti ning teise ja kolmanda kombineerimisel ostsilleeriva soojustoru.

Seega võib üsna kindlalt öelda, et tegemist on sisuliselt sama nähtusega ning kahefaasilist termoakustilist masinat ning ostsilleerivat soojustoru võib käsitleda sama termodünaamilise protsessi kaudu.

2.5. Kas helilaine saab tekkida, kui tegemist on ostsilleeriva soojustoruga?

Termoakustikat käsitlevas teaduskirjanduses leitakse, et termoakustilise masina jaoks peab vahekiht (*stack*) vastama järgmistele tingimustele [36]:

- 1) olema suure kapillaarjõuga – seda selleks, et vedelik liiguks mööda kanali seina piirkonda, kus vedelik aurustub;
- 2) suure imamisvõimega – et tagada töövedeliku olemasolu vahekihis,
- 3) piisavalt väikeste kanalitega ning
- 4) suure hüdrofiilsusega, et vältida kanalites vedelikukolbide tekkimist.

Just seda viimast silmas pidades toob uurimisrühm välja, et seadme tööks on vajalik, et kanalid ei blokeeruks töövedeliku vedelfaasiga. Ramoni uurimisrühma viidatud katsetes kasutati vahekihina tselluloosikihte, mis olid omavahel eraldatud vasest torudega. Esimese katsete prototüübi arendas uurimisrühm 2018. aastal [35], kus vahekihina kasutati keraamilist autokatalüsaatorit, mis on kärjelaadse struktuuriga. Sarnane vahekiht on esitatud ka alapeatükis 4.1, joonisel 4.2a. Selle seadme puhul ei maininud uurimisrühm, kas kanalite ummistumine vedelikuga on oluline või mitte, seda ei mainitud ka järgnevates sama uurimisrühma samal teemal ilmunud teadusartiklites [33], [34], [45]. Vastav väide esitatakse 2021. aastal ilmunud artiklis [46], kus märgitakse, et ideaalses vahekihis tuleb vältida kanalite blokeerimist kondenseerunud vedelikuga. 2022. aastal ilmunud artiklis

[30] põhjendatakse arvutuslike ning katseliste tulemuste erinevust kanalite ummistumisega. Kummaski artiklis seda täpsemalt ei selgitata. Lisaks nimetatud uurimisrühmale nimetab sama järeldust ka Tokai ülikooli uurimisrühm [47], kes puhub katses eelnevalt niisutatud vahekihi kanalid õhuga läbi, et olla kindlad, et vahekihi kanalid on avatud. Ka seal ei ole põhjendust toodud.

Samas on autori katsed näidanud, et seade töötab teatud tingimustel ka siis, kui vedelfaas täidab kogu kanali ristlõike, kuigi teadmata pikkuses. Seda selgitatakse neljandas peatükis. Kui see nii on, siis see näitab, et ostsillatsioonid võivad esineda ka siis, kui kanalis on tekkinud vedelikukolb. See aga omakorda näitab, et kahefaasiline termoakustika töötab põhimõtteliselt samamoodi nagu ostsilleerivad soojustorud ning laine tekkimine on võimalik ka siis, kui ristlõige on vedelikuga ummistunud. Enne, kui kirjeldatakse autori tehtud katsete tulemusi, antakse ülevaade, milline võib termoakustiliste masinate disain olla.

3. ÜLEVAADE OLEMASOLEVATEST TEHNOLOOGIATEST

Käesolevas peatükis antakse ülevaade, milliseid tehnoloogiaid on võimalik kasutada, et temperatuurivahe abil termoakustikat kasutades elektrit toota, ning mis on nende tehnoloogiate tööks vajalikud tingimused. Selleks, et muuta temperatuurierinevuse tõttu tekkinud laine energia elektrienergiaks, on erinevaid võimalusi [8], kuid käesolevas lõputöös keskendutakse ennekõike CAFA Tech OÜ seadmele sarnastele tehnoloogiatele. Selliseid tehnoloogiaid võib nimetada lineaargeneraatoriga tehnoloogiateks. Lineaargeneraatorite puhul kasutatakse lineaarmootoreid (ehk siis kõige lihtsamaid elektrimootoreid), kuid neid kasutatakse vastupidi. See tähendab, et kui lineaarmootoris kasutatakse tavaliselt elektrienergiat, et panna mootor liikuma (näiteks võll pöörlema), siis lineaargeneraatoris pannakse mootor kõigepealt liikuma ning selle mehaaniline energia muundatakse elektrienergiaks. Kõikides sellistes elektrigeneraatorites on kaks osa: induktiivpool, kus tekib elektrivool, ning magnet, mis tekitab enda ümber magnetvälja. Kui pool asub muutavas magnetväljas, tekib temas elektrivool (vastavalt Faraday induktsiooniseadusele). See tähendab, et üks kahest osast – kas pool või magnet – peab liikuma, samas kui teine paigal seisab. [48]

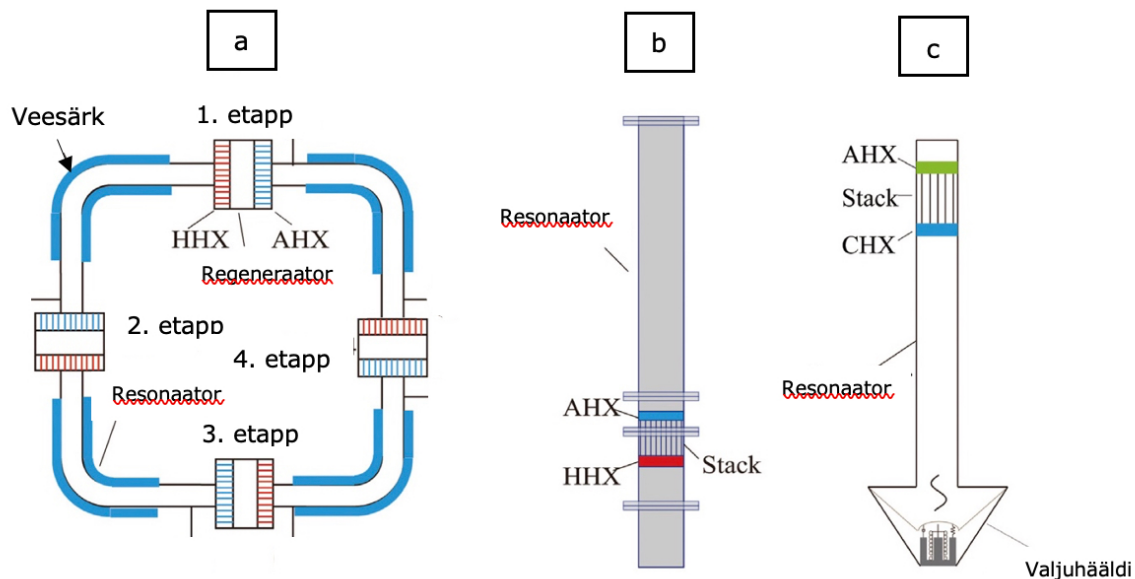
Käesolevas peatükis selgitatakse kõigepealt, mis peab masinas olema, et tekiks termoakustiline laine, ning seejärel esitatakse mõned lineaargeneraatoritega masinate tööparameetrid.

3.1. Millise disainiga lineaargeneraatoriga termoakustilisi masinaid on võimalik ehitada?

Termoakustilised masinad võivad olla eri disainiga, kuid selleks, et temperatuurierinevuse abil tekitada akustiline laine, peavad igas masinas olema kindlad elemendid, et saaks tekkida termoakustiline laine:

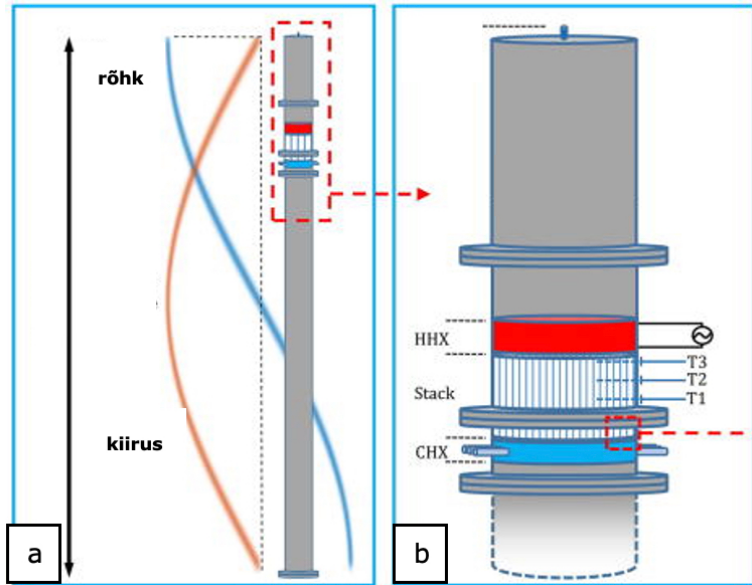
- 1) toru või mahuti, kus saab tekkida laine resoneerimine;
- 2) soe ja külm soojusvaheti, mis tekitavad temperatuurigradiendi;
- 3) poorne vahekiht, mille abil tekib töövedeliku ostsilleerimine.

Lineaargeneraatoriga masinate mõned võimalikud disainid on esitatud järgmisel joonisel.



Joonis 3.1. Mõnede võimalike tehnoloogiate disainid elektri tootmiseks termoakustika abil [14] (Käesoleva töö autori muudetud). Vasakul (a) on liikuva lainega ühefaasiline neljaetapiline tehnoloogia. HHX on soe soojusvaheti, AHX külm (ümbritseva keskkonna temperatuuril) soojusvaheti. Keskel (b) on kahefaasiline seisulainega seade ning paremal seisulainega ja valjuhääldiga külmutusseade. Seadmete konfiguratsioonid on erinevad, kuid igal joonisel on näha termoakustiliste masinate vajalikud osad, et tekiks laine: vahekiht (regeneraator või stack), soojusvahetid ning resonaator.

Joonisel 3.1 punktis a on kujutatud liikuva lainega masin, teisel kahel seisulainega masin. Ühes masinas võib samaaegselt olla ka liikuv ning seisulaine [49], [50], aga sellel pikemalt ei peatuta, sest põhjalikum analüüs ei mahu käesoleva töö mahtu. Selle, kas masinas tekib seisu- või liikuv laine, määrab üldreeglina toru või mahuti disain. Kui tegemist on silmusega masinaga, st sellise disainiga, kus on kinnise kontuuriga toru, tekib liikuv laine; kui on tegemist sirge toruga, mille üks ots on suletud, tekib torus seisulaine. [24] Oluline on tähele panna, et viimati nimetatud juhul võib teine ots olla samuti suletud, kuid paindlikku meediumiga, näiteks membraaniga. Järgmisel joonisel kirjeldatakse laine tekkimist kahefaasilises masinas.



Joonis 3.2. Laine tekkimine kahefaasilises termoakustilises masinas [34] (Käesoleva töö autori muudetud kujul). Vasakul (a) on kujutatud rõhu (sinisega) ja kiiruse (oranžiga) laine kuju. Nagu näha, peab selle disaini puhul toru olema nii pikk (või disain muudmoodi õigesti lahendatud, näiteks membraani abil), et seadmes saaks tekkida pool lainepikkust. Paremal (b) kujutatud täpsemalt seda osa, kus laine tekib. Seal on näidatud soe soojusvaheti (HHX) ja külm soojusvaheti (CHX), samuti stack. T1, T2 ja T3 tähistavad kohti, kus artikli autorid temperatuure jälgisid, aga need iseloomustavad ka, et stackis on vajalik temperatuurigradient. Rõhu ja kiiruse laine puhul võib märgata faasinihet: kui rõhk on maksimaalne, on kiirus minimaalne, st et ühe laine sõlmes asub teise laine pais ning vastupidi. Selline faasinihe ei ole termoakustilises masinas soovitud, sest see vähendab rõhu mõju kiirusele. Võimalikult efektiivse töö jaoks oleks hea, kui lainete sõlmed ja paisud kattuksid. Joonise puhul tuleb tähele panna, et tegemist on teoreetilise käsitlusega, mitte katseliselt leitud andmetega laine koostamiseks.

Kõige lihtsam seisulainega masin (nagu on kujutatud joonisel 3.1 punktis b) koosneb torust (resonaatorist), poorsest vahekiht (mida seisulainega masinas nimetatakse stackiks) ning soojusvahetitest. Resonaatori ülesanne on tekitada sobiv akustiline väli, et seadmes saaks alata ostsilleerimine. Poorne vahekiht täidab veidi erinevat rolli olenevalt sellest, milline seade ehitatakse. Ta on ühest küljest soojussalvesti ning muudab soojusvahetust intensiivsemaks, kuid ta on ka keskkond, kus on sobivad kanalid, kus saab ostsilleerimine tekkida. Toru on ühest või mõlemast otsast avatud. Avatud otsa asemel võib olla ka membraan või muu paindlik meedium, mis peegeldaks laine samas suunas ja sama trajektoori pidi tagasi. Toru (resonaator) on tüüpiliselt pool või veerand lainepikkust pikk [51]. Toru pikkust mõjutavad aga ka teised tegurid, mistõttu ei saa seadme mõõtmete

planeerimisel alati vaid ülal nimetatud suurustest lähtuda. Lainepikkuse saab arvutada järgmise valemi abil [15]:

$$\lambda = \frac{a}{f} \quad (3.1)$$

kus λ on lainepikkus, a heli levimise kiirus vaadeldavas keskkonnas ning f sagedus.

Liikuva lainega masinas on samad elemendid nagu seisulainega masinas, kuid rõhulaine on teistsugune ning sellest tulenevalt on ka resonaatori asemel ringikujuline toru, kus laine liigub. Liikuva lainega seadmes võib torusse kinnitada samamoodi membraani või muu paindliku meediumi või ka näiteks magnetkolvi. Sel juhul asetseb pool toru väliskontuuril. Joonisel 3.1 punktis a on kujutatud üht võimalikku liikuva lainega tehnoloogia disaini. Seal on kasutatud nelja etappi, st et tehnoloogias on neli lainet tekitavat elementi, kuid tehnoloogia võib olla ka üheetapiline, st ühe lainet tekitava elemendiga [31], või ka kahe- või kolmeetapiline [52], [53].

3.2. Lineaargeneraatoriga masinate töötingimused

Käesolevas alapeatükis selgitatakse, mis tingimused peavad olema täidetud, et lineaargeneraatoriga termoakustiline masin töötaks. Seejuures vaadeldakse nii ühe- kui kahefaasilisi masinaid.

3.2.1. Temperatuurigradient

Temperatuurigradient on oluline kõigi soojusmasinate ehk masinate, mis teevad kasulikku tööd soojuslevi tõttu, jaoks. Nii peab ka termoakustiliste masinate tööks eksisteerima temperatuurigradient ehk temperatuurivahe. Kui kriitilist temperatuurigradienti ei saavutata, ei alga ka ostsillatsioonid. Seda selletõttu, et tekkiv akustiline võimsus peab olema piisav, et ületada hõõrde- ja soojuskadusid, mis igal juhul esinevad, kui töövedelik hakkab vahekihi kanalites liikuma [54]. Üheks termoakustika eeliseks peetakse seda, et töötemperatuurid on teiste elektrienergia tootmise viisidega võrreldes üsna madalad. Ühefaasiliste masinate puhul on vajalik temperatuurivahe umbes 390–675 K (töövedelikuks on õhk) [8], kuigi ühes 2023. aasta artiklis [54] leitakse, et ühefaasiline masin, milles on töövedelikuks õhk, võib õigete tööparameetrite valikul töötada ka umbes 80–90 K temperatuurivahe juures. Kahefaasilise seadme puhul võib temperatuurivahe olla isegi nii madal nagu 7 K [55]. Kuna termoakustilisi masinaid arendatakse enamjaolt just

sel eesmärgil, et kasutada madalakvaliteedilist soojusallikat, ei ole artiklites esitatud maksimaalset temperatuurivahet, millega seade saab töötada. Ostsilleerivate soojustorude puhul võib maksimaalseks temperatuuriks olla umbes 800–900 kraadi [56], kuid see sõltub soojustorus kasutatavast töövedelikust. Lisaks temperatuurivahetele on oluline ka sooja soojusvaheti ehk kütteelemendi temperatuur. See sõltub kasutatavast töövedelikust ning sellest, kas tegemist on ühe- või kahefaasilise seadmega. Küttekeha temperatuuri alati esitata (esitatakse ostsilleeriva gaasi või vahekihi kõrgeim temperatuur), aga kahefaasilise seadme puhul, kui töövedelikuks on vesi (segus õhuga), võib küttesoojuse temperatuur olla 220°C [36] või ka palju madalam, isegi kuni 47°C [47].

3.2.2. Vahekihi kanali suurus

Poorne vahekiht määrab, kas ostsilleerimine on võimalik. Käesoleva töö autori tehtud katsed näitavad, et ka ilma vahekihita võib töövedelik hakata sarnast termodünaamilist protsessi läbima, kuid see toimub palju aeglasemalt ning seda ei saa pidada ostsilleerimiseks ehk kiireks võnkumiseks. Autori tehtud katsete järgi võib sel juhul tekkida töö sagedusega umbes 1 Hz (väiksema amplituudiga võis sagedus ka kõrgem olla, aga see ei leidnud katseliselt lõplikku kinnitust, sest seda ei uuritud ettevõtte eesmärke silmas pidades enam edasi). Sarnasele tulemusele on jõutud ka kirjanduses [57]. Seega on ostsilleerimiseks vajalik vahekiht, kus on töövedelikule vastavalt õige suurusega kanalid. Kanal peaks olema sellise suurusega, et töövedelikul oleks hea kontakt kanali seinaga, et soojus saaks talle üle kanduda (või jahtumisel vastupidi). See viitab, et kanali suurus võiks olla väiksem soojusliku piirikihi paksusest. Samas aga kaasnevad väiksema kanali suurusega suuremad hõõrdekaod vedelikus (viskoosse piirikihi tõttu). Kanali suuruse valimisel peab neid aspekte arvesse võtma. [31] Kirjanduses on esitatud erinevaid seisukohti, kui suur peaks kanal olema. Mõned on esitatud järgmises tabelis.

Tabel 3.1. Kirjanduses esitatud soovitusel kanali suuruse kohta

Ühe- või kahefaasiline	Töövedelik	Kanali soovituslik suurus (hüdrauliline raadius)	Viide
Ühefaasiline	Heelium	1/4–1/7 * soojuslik piirikiht	[58]
Ühefaasiline	Õhk	3 * soojuslik piirikiht	[28]
Ühefaasiline	Õhk	1,54–1,62*soojuslik piirikiht	[54]
Kahefaasiline	Vesi (+ õhk)	≈ soojuslik piirikiht	[36]

Tabelis 3.1 viidatud hüdrauliline raadius on voolu pindala ja perimeetri suhe: $R_s = \frac{A}{\Pi}$.

Ruudukujulise ristlõikega kanali puhul on hüdrauliline raadius: $R_s = \frac{A}{\Pi} = \frac{a^2}{4a} = \frac{a}{4}$, kus a on

ruudu külg. Ringikujulise ristlõikega kanali puhul on hüdrauliline raadius: $R_s = \frac{A}{\pi} = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{r}{2}$, kus r on ringi raadius.

Nagu tabelist 3.1 näha, sõltub kanali õige suurus töövedelikust ning sellest, kas tegemist on kahe- või ühefaasilise seadmega. Kuna kahefaasilise seadme puhul on ka vajalik piisava kapillaarjõu olemasolu kanalis (vt alapeatükk 2.3), sõltub kanali õige suurus ka materjalist, millest vahekiht on tehtud. Tegelikud kanali suurused, mida on eksperimentides kasutatud, on esitatud järgmises tabelis.

Tabel 3.2. Eksperimentides kasutatud vahekihtide kanalite suurus

Ühe- või kahefaasiline	Töövedelik	Vahekihi materjal	Kanali läbimõõt, [mm]	Viide
Ühefaasiline	Heelium	Metallvõrk	0,09	[59]
Ühefaasiline	Õhk	Keraamiline	0,25	[50]
Ühefaasiline	Õhk	Metallvõrk	0,22	[60]
Ühefaasiline	Õhk	Metallvõrk	0,13	[31]
Ühefaasiline	Õhk	Metallvõrk	0,20 ja 0,12	[61]
Ühefaasiline	Õhk (8 bar)	Metallvõrk	0,13	[62]
Kahefaasiline	Vesi (+ õhk)	Keraamiline	0,95	[47]
Kahefaasiline	Vesi (+ õhk)	Keraamiline	1,00	[35]
Kahefaasiline	Vesi (+ õhk)	Keraamiline	0,55	[63]
Kahefaasiline	Vesi (+ õhk)	Keraamiline	0,20	[36]
Kahefaasiline	Vesi ja etanool (+õhk)	Keraamiline	0,96	[9]
Kahefaasiline	R134A	Metallvõrk	0,13	[55]

3.2.3. Muud tingimused

Masina mõõtmed ja disain on samuti olulised selleks, et oleks võimalik laine resonanceerimine ning laine ei sumbuks. Eelmises alapeatükis on selgitatud, kuidas sõltub masina disainist tekkiva laine kuju. Lisaks mängib rolli seadme soojusvaheti disain, mis määrab, kui efektiivne on soojusvahetus soojusvaheti ja vahekihi (ning seeläbi ka töövedeliku) vahel [31].

Masinas kasutatav töövedelik mõjutab ilmselt kriitilist temperatuurivahet ning seda, kas masinas ostsillatsioonid algavad või mitte. Näiteks süsihappegaasi töövedelikuna kasutades on võimalik temperatuurivahe viia ka alla 20 K [64], kusjuures ülekriitilistes tingimustel isegi 14,8 K [65]. Kriitilist temperatuurivahet saab vähendada ka teise faasi lisamisega. See tähendab, et kui töövedelik vahetab seadmes ka faasi ehk ostsillatsioonides kasutatakse faasimuutusest tulenevat ruumalamuutust, ei ole vaja nii

suurt temperatuurivahet, et ostsillatsioonid tekiksid [9], [34]–[36]. Nendes seadmetes kasutatakse töövedelikuna vett, atsetooni, eetrit, butaani või muid süsivesinikke või ka külmutusaineid nagu R134a ja sarnased. Sel juhul on vajalik temperatuurivahe umbes 20–40 K, aga võib olla isegi nii madal nagu 7 K [55]. Töövedelikuna võib kasutada ka segu inertgaasiga, näiteks õhu või süsihappegaasi ja vee segu, eetri ja õhu segu, jne.

Süsteemi antav soojus mõjutab samuti selgelt mõistetavalt seda, kui palju on võimalik masina abil elektrienergiat toota. Teisisõnu, masina akustiline energia (mille saab muundada elektrienergiaks) süsteemi soojusena antavast energiast. [31] On intuiitselt mõistetav, et mida rohkem anname süsteemi energiat, seda suurem on ka väljundvõimsus.

3.3. Lineargeneraatoritega masinate tööparameetrid

Käesolevas alapeatükis antakse ülevaade olulisematest lineargeneraatoriga masinate tööparameetritest. Termoakustiliste masinate puhul oluline kriitiline temperatuur, temperatuurivahe vahekihi sooja ja külma osa vahel ning masina kasutegur. Need andmed on esitatud järgmises tabelis.

Tabel 3.3. Lineargeneraatoritega masinate tööparameetrid

Masina disain	Töövedelik	dT, [K]	Töörõhk, [bar]	Kasutegur	Sagedus, [Hz]	Viide
Ühefaasiline seisulainega						
Piesoelektrikuga	Õhk	100	10	-	1370	[66]
Tavaline	Ar + He	150	3	5,4%	44–137	[67]
Tavaline	Õhk	<500	1	2%	75	[50]
Ühefaasiline liikuva lainega						
Üheetapiline	Õhk	>170	<1,2	-	111	[61]
Üheetapiline	Õhk	400	9	12%	44	[62]
Üheetapiline	Õhk	360	1	7,8%	54	[31]
Üheetapiline	Õhk	-	1	12,6%	65	[60]
Kolmeetapiline	He	620	5	16,8%	86	[59]
Neljaetapiline	He + CO ₂	17	0,5	<1%	-	[64]
Kahefaasiline seisulainega						
Membraani ja hoorattaga	Dietüüleeter (+ õhk)	45–95	<1,2	<8,8%	1	[21]
Külili	EtOH (+ õhk)	21	-	-	166–185	[9]
Tavaline	Vesi (+ õhk)	20–25	1	5–10%	120	[35]

Tabel 3.3 jätk

Masina disain	Töövedelik	dT, [K]	Töörõhk, [bar]	Kasutegur	Sagedus, [Hz]	Viide
Tavaline	Vesi (+ õhk)	>120	10	<2,5%	-	[36]
Astmega	Vesi (+ õhk)	173	1	-	~100	[63]
Kahefaasiline liikuva lainega						
Nn <i>fluidyne</i> masin	Atsetoon (+ õhk)	<40	-	0,003%	2–3	[41]
SOFHE	Vesi (+ õhk)	90–120	1	<0,7%	15–17	[68]
<i>Fluidyne</i> masin	R134a (+ õhk)	7	6	-	~3	[55]
Hooratta ja kolviga masin	EtOH (+ õhk)	22–32	1	-	1–3	[57]
Liikuva ja seisulainega tehnoloogia						
Linearmootori ja lineaargeneraatoriga	He	425	40	20,5%	60	[69]

Mitmes viidatud allikas oli uuritud erinevaid töövedelikke ning katseid tehtud erinevatel temperatuuridel. Tabelis on näidatud artiklis esitatud parimad saadud tulemused.

Masina disaini juures on märgitud, millise masinaga oli tegu, sest see võib kasutegurit suuresti mõjutada. Masina disain „tavaline“ viitab, et masina disain on sisuliselt samasugune nagu on kujutatud joonisel 3.1. Piesoelektrikuga seisulainega masina puhul toodetakse elektrienergiat piesoelektrilise materjali abil. Ühefaasilise liikuva lainega masina puhul tähistavad „etapid“ seda, mitut lainet tekitavat vahekihti (regeneraatorit) on seadme disainis kasutatud – üheetapilises üht, kaheetapilises kaht, jne. „Külili“ seade tähendab, et tegemist on sisuliselt samasuguse seisulainega seadmega nagu on esitatud joonisel 3.1, kuid seade on keeratud külili. Astmega masina puhul on resonaatori läbimõõt muutub astmeliselt. *Fluidyne* ja SOFHE (*Self-Oscillating Fluidic Heat Engine*) seadmed meenutavad ostsilleerivaid soojustorusid. Hooratta ja kolviga seadme puhul on võimalik kolvi abil ise ostsilleerimist algatada (ning mitte oodata iseeneslike ostsillatsioonide algust). Tabelis viimasena on viidatud uudne tehnoloogia, kus kasutatakse paralleelselt linearmootorit ja lineaargeneraatorit ning masina võib üles ehitada nii seisu- kui liikuva lainega. Kogukasutegur on tabelis märgitud 20,5%, kuid soojuslikust akustilise võimsuse genereerimine isegi 34,2%.

Töövedeliku juures tähistab „Ar“ argooni, „He“ heeliumit, „CO₂“ süsihappegaasi ning „N₂“ lämmastikku. Kahefaasiliste masinate puhul on sulgudes esitatud inertgaas, millega on töövedelik segus. Töörõhk on keskmine rõhk seadmes. Seejuures ei esitata rõhukõikumisi ega töövedeliku rõhu muutumist. Sageduse puhul on oluline märkida, et tihti ehitati masin

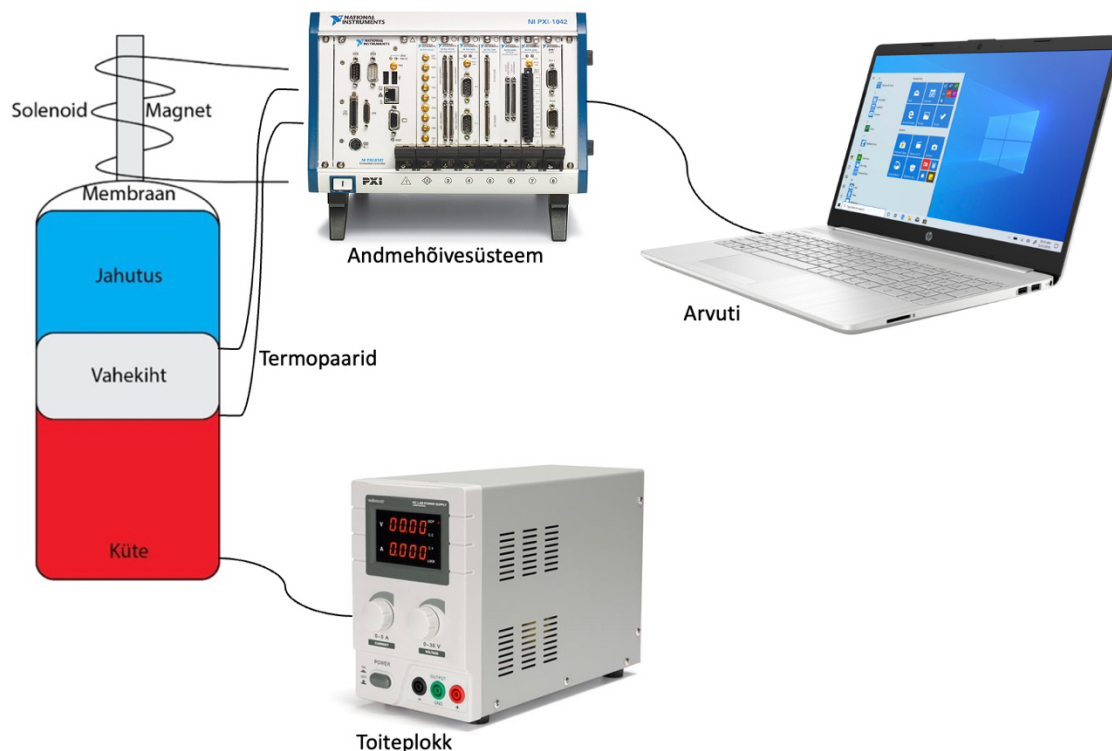
nii üles, et ta töötaks kindla sagedusega. See tähendab, et seade võib olla üles ehitatud kindlal sagedusel töötamiseks ning seejuures on olulised masina ja vahekihi mõõdud ning vahekihi konfiguratsioon ja asetus seadmes.

4. KAS SEADE SAAB TÖÖTADA KA SULETUD KANALITEGA?

Teaduskirjanduses on leitud, et sarnasel seadmel nagu on CAFA Tech'i seade, ei tohi vahekihis kanalid vedelikuga ummistuda, et seade töötaks (vt alapeatükk 2.5). Käesoleva töö autori katsed näitavad vastupidist. Seda selgitatakse käesolevas peatükis.

4.1. Autori tehtud katsete kirjeldus

Katseid tehti katseseadmel, mille esimese versiooni oli loonud CAFA Tech. Ülikoolis täiendati masinat nii, et lisati seadmele jahutus (soojustorude ja vesijahutusena), täiustati vahekihi ülesehitust ning muudeti seal kasutatud materjale. Tegemist on seisulainega lineaargeneraatoriga masinaga, kus liikuv osa on magnet, mis on kinnitatud membraanile. Katseseadme skeem on esitatud järgmisel joonisel.



Joonis 4.1. Katseseadme skeem. Vasakul on katseseade kütte, jahutuse ja vahekihiga. Membraanile on kinnitatud magnet, mis koos membraaniga liigub. Magneti ümber on statsionaarne pool (solenoid). Pool on ühendatud andmehõivesüsteemiga, kuhu on liidetud ka termopaarid, mille abil mõõdetakse seadmes temperatuuri. Andmehõivesüsteem on ühendatud arvutiga, kus on võimalik

andmete kogumist juhtida ja visualiseerida, samuti kogutud andmeid töödelda. Seadmesse antavat küttevõimsust reguleeritakse toiteplokkiga. Kasutatud fotod: [70]–[72].

Seadme tööpõhimõte on sama, nagu on kirjeldatud joonisel 2.3. Lisaks on joonisel 4.1 näidatud, kuidas on võimalik seadme abil elektrit toota. Mebraanile on kinnitatud magnet, mis koos membraaniga liigub. Magnetil ümber on statsionaarne pool (solenoid). Magnet liigub läbi pooli, tekib poolis vastavalt Faraday induksiooniseadusele ajas muutuva magnetvoo tõttu elektromotoorjõud [48].

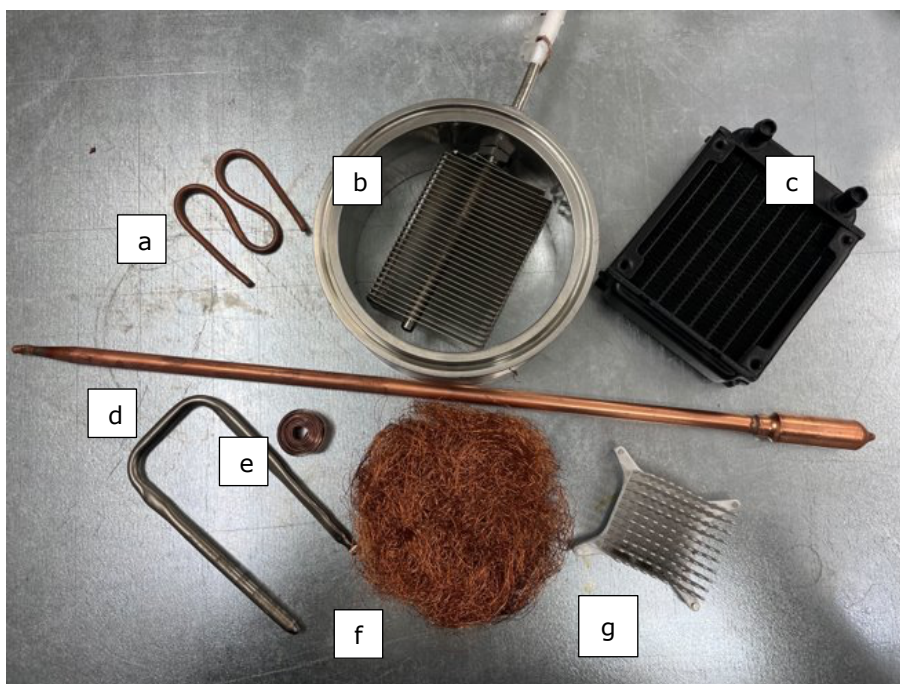
Ärisaladuse kaitsmise eesmärgil ei esitata vahekihi mõõtmeid ega konfiguratsiooni, samuti mitte seadme mõõtmeid ega ülesehitust ega töövedeliku kogust.

Vahekiht on tehtud mingist poorsest materjalist, nt keraamilisest katalüsaatorist, portselantorudest, kergkruusast, väikestest kuulikestest või muudest poorsetest materjalidest. Järgmisel joonisel on näidatud mõned materjalid, mida on võimalik vahekihis kasutada.



Joonis 4.2. Võimalikud vahekihi materjalid: a) keraamiline katalüsaator, b) suurema sisediameetriga portselantorud, c) väiksema sisediameetriga portselantorud, d) metallvõrk.

Soojendamiseks kasutati katsetes pliiti, silindrilist piklikku küttekeha (pulgakujuline), mille sai viia seadme sisse, kütteplaati, mille sai termopastaga seadme põhja kinnitada, ning soojustorusid, mille üht otsa soojendati küttejühtmetega, teine ots oli viidud seadmesse. Pliidil ei saanud seadmesse antavat võimsust mõõta, teiste kütteseadmete puhul ühendati kütteseadmed toiteplokkidega, et oleks võimalik kontrollida ja mõõta, kui palju seadmesse soojust anti. Veega tehtud katsete puhul oli tüüpiline küttesoojus 100 W, etanooli puhul 20–30 W. Jahutamiseks kasutati vesijahutust, kus külm kraanivesi jooksis vasktorus, mis oli seadmesse sisse viidud. Soojendamise ja jahutuse juures oli väga oluline, et soojusvahetus oleks võimalikult intensiivne. Seetõttu kasutati katsetes ka erinevaid ribidega radiaatoreid, vasklinti, vaskvahust kettaid jms. Mõned seadmes kasutatud soojusvahetuse elemendid on kujutatud järgmisel joonisel.



Joonis 4.3. Mõned soojusvahetuse elemendid: a) painutatav vasktoru, b) soojustoru külge kinnitatud radiaatoriribid, c) vesiradiaator, d) erineva võimsusega soojustorud, e) vasklint (rulli keeratud), f) vasest nuustik, g) ribidega radiaator.

Katsetel mõõdeti temperatuuri seadme eri punktides, kasutades K-tüüpi termopaare ning väljundpinget, mida seade tootis. Väljundpinge mõõtmisel kasutati ka väikest koormust, LED-lampe võimsusega 0,43 W. Temperatuuri ja pinge mõõtmiseks kasutati *National Instrumentsi* andmehõivesüsteemi koos *LabView* programmiga. Lisaks kasutati vaatlust. Töövedelikuna kasutati vee või etanooli ja õhu segu. Ostsillatsioonide põhiline sagedus oli 24–25 Hz.

4.2. Katsete tulemused

Autori tehtud katsed seda ei kinnita teaduskirjanduses esitatud järeldust, et kui vahekihi kanalid ummistuvad, ostsillatsioonid lakkavad. Kokku tehti seadmega kuni käesoleva aasta märtsi lõpuni 224 katset, kuid katsetel olid erinevad eesmärgid (seadme konfiguratsiooni arendamine stabiilse ostsilleerimise tagamiseks, jahutuse ja küttelehenduste arendamine, et soojusbilanss oleks tasakaalus, ettevõtte hüpoteeside kontrollimine laboritingimustes, jne). Otseselt kanalites toimuvate protsesside jälgimiseks tehti 19 katset. Katsete tulemused, kus jälgiti just kanalite olekut, on esitatud järgmises tabelis. Tabelis on esitatud vaid need tulemused, mis on olulised lõputöö eesmärki silmas pidades.

Tabel 4.1. Katsetulemused lõputöö eesmärgist lähtudes

Katse nr	Aeg	Vahekiht	d [mm]	Töövedelik	T_{kriit} [°C]	ΔT_r [°C]	Q_{inr} [W]	Kanalid avatud	Kas seade töötab	U_{out} [V]	f_r [Hz]	Kas tekkis kuuldav heli?
1	23.08.22	keraamiline	0,5	vesi	-	-	-	jah	ei	-	-	jah
2	29.08.22	keraamiline	0,5	vesi	-	-	-	jah	jah	-	-	jah
3	9.09.22	keraamiline	1,2	vesi	-	-	-	jah	ei	-	-	ei
4	16.09.22	keraamiline	0,5	vesi	-	-	100	80%	jah	1	-	ei
5	16.09.22	keraamiline	1,2	EtOH	-	-	-	jah	jah	-	-	ei
6	23.09.22	keraamiline	1,2	vesi	-	-	200	ei	jah	1,2	25	ei
7	27.09.22	keraamiline, mitmekihiline	1,2 + 0,5	vesi + EtOH	-	-	100	50%	jah	1,2	25	ei
8	07.10.22	keraamiline, mitmekihiline	1,2 + 0,5	vesi	-	-	100–183	jah	ei	-	-	ei
9	14.10.22	keraamiline, mitmekihiline	0,5	vesi	64	27	105	üksikud	jah	0,7	25	ei
10	14.10.22	keraamiline	0,5	vesi	-	111	104	jah	ei	-	-	ei
11	17.10.22	keraamiline, keraamilised torud	0,5, teadmata	vesi	91	40	100	jah	jah	1,1	24	jah
12	03.11.22	keraamiline, mitmekihiline	1,2 + 0,5	vesi	-	20	100	90%	ei	-	-	ei
13	18.11.22	keraamiline, mitmekihiline, metallvõrk	1,2 + 0,5	vesi	76	20	95	ei	jah	1,1	25	jah
14	20.01.23	keraamiline	0,5	EtOH	-	-	15	jah	ei	-	-	ei
15	20.01.23	keraamiline	0,5	EtOH	-	-	15–17	ei	ei	-	-	ei
16	23.01.23	keraamiline	0,5	EtOH	-	-	13	jah	ei	-	-	ei
17	26.01.23	keraamiline	0,5	EtOH	-	-	13–16	jah	ei	-	-	ei
18	10.02.23	keraamiline	0,5	EtOH	-	-	18	jah	ei	-	-	ei
19	15.03.23	keraamiline	0,5	EtOH	-	-	15–20	50%	jah	0,1–0,6	24	ei

Tabelis 4.1 on esitatud järgmised andmed.

- Tulbas d on märgitud kanali läbimõõt (diameeter) millimeetrites.
- Töövedeliku nime all on märgitud vaid segu reaktiivkomponent (tegelikult on töövedelikuks segu reaktiivkomponendi ja õhuga).
- T_{krit} tähistab kriitilist temperatuuri vahekihis, kui ostsillatsioonid algasid. Märgitud on vahekihi kõrgeim temperatuur.
- ΔT on temperatuurivahe vahekihis (külmema ja soojema osa vahel). Kui temperatuuridel on märgitud „-“, tähendab see, et temperatuuri ei õnnestunud usutavalt mõõta.
- Q_{in} tähistab küttevõimsust, mida seadmesse anti. Enamuses katsetest kasutati küttekehana küttepulka või küttejühtmeid ning kontrolliti neile antavat voolu ja pinget, mis võimaldas hinnata ka võimsust. Kui tabelis on märgitud „-“, tähendab see, et küttekehana kasutati pliiti, mille pidevat võimsust ei saanud piisavalt täpselt määrata.
- Väljundpinge U_{out} näitab, kui suure pinget tekitab magneti liikumine läbi pooli. Kuna katsete tegemise ajal ei olnud pooli ja magneti omavaheline konfiguratsioon täpselt paika pandud, ei ole tegemist maksimaalsete võimalike suurustega, mida on võimalik sellise seadme abil toota. Katsete 2 ja 4 puhul ei ole märgitud väljundpinget, sest algul tehti katseid vaid selleks, et kontrollida, kas seadmes on võimalik ostsillatsioone tekitada. Väljundpinge suuruse hindamisel peab ka arvestama, et seadmes kasutati väikest tarbijat – LED-lampe –, mis tekitasid pingelangu umbes 0,5 V.
- Sagedus f näitab pinget kõikumise sagedust. Sageduse puhul on oluline, et sellise sagedusega töötas seade, mis oli kaetud membraaniga. Membraan oli igal katsel sama. Teistel katsetel, kus seade ehitati üles ilma membraanita, avatud pikema resonatoriga, registreeriti ka laine sagedusega umbes 200 Hz. Seega sõltub sagedus suuresti seadme ülesehitusest.
- Viimases tulbas näidatakse, kas seadme avamisel tekkis katse tegijale kuuldav heli.

Katsete tegemisel esines ka takistusi.

- Temperatuuri mõõtmisel oli raske kontrollida, kas termopaar näitas kanali seina või gaasi temperatuuri. Kuigi mõnel pool teaduskirjanduses eeldatakse, et need on samad, ei pruugi see nii olla.
- Katsete tegemisel ei õnnestunud usutavalt mõõta rõhku.
- See, et kanali ristlõige oli töövedeliku vedelfaasiga ummistunud, ei näita, kuidas on töövedeliku faasid kanalis jaotunud. Seda üritati visualiseerida klaasist kapillaartorude kasutamise, kuid see ei õnnestunud. Faaside jaotumist ühes kanalis peaks modelleerima, kasutades näiteks Ansysi tarkvara.

Katsete tulemuste kokkuvõte on esitatud järgmises tabelis.

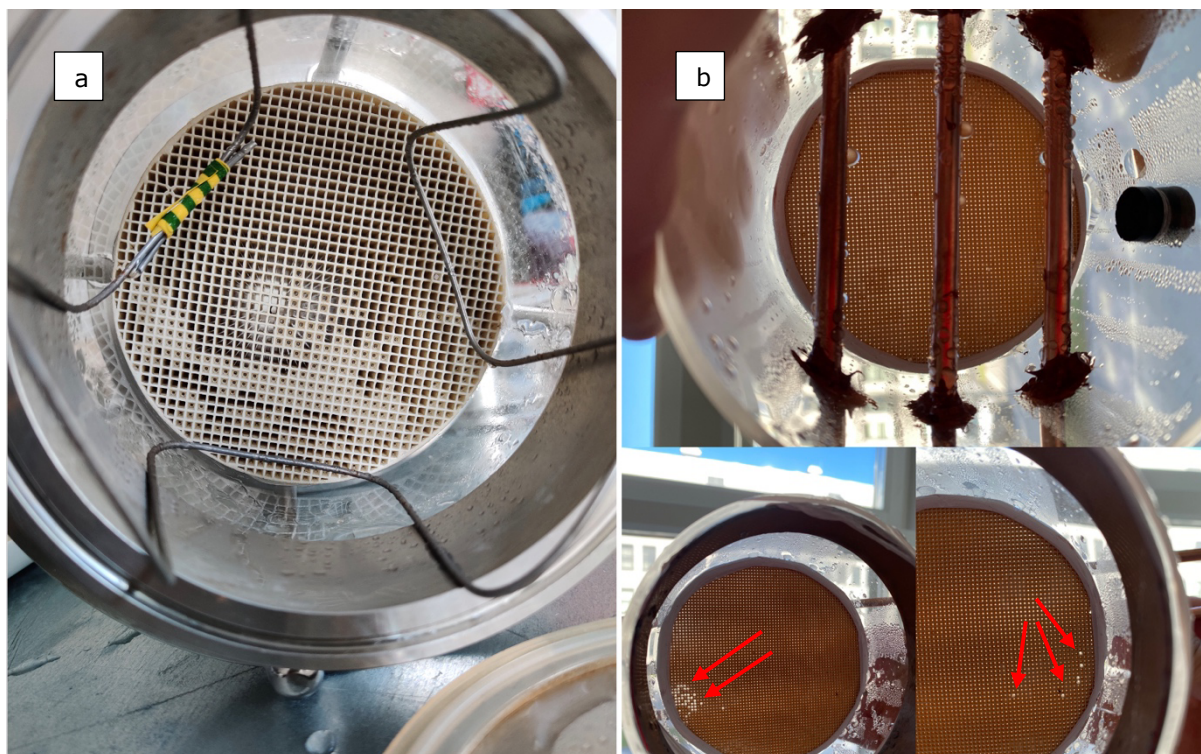
Tabel 4.2. Katsete tulemuste kokkuvõte

Kanalite olek	Kordade arv	Ostsilleerimine (% kordadest)	Keskmine väljundpinge	Heli (% kordadest)
Avatud	13	31%	1,05	23%
Suletud	4	75%	1	25%
Pooleks	2	100%	0,9	0%

4.3. Järeldused

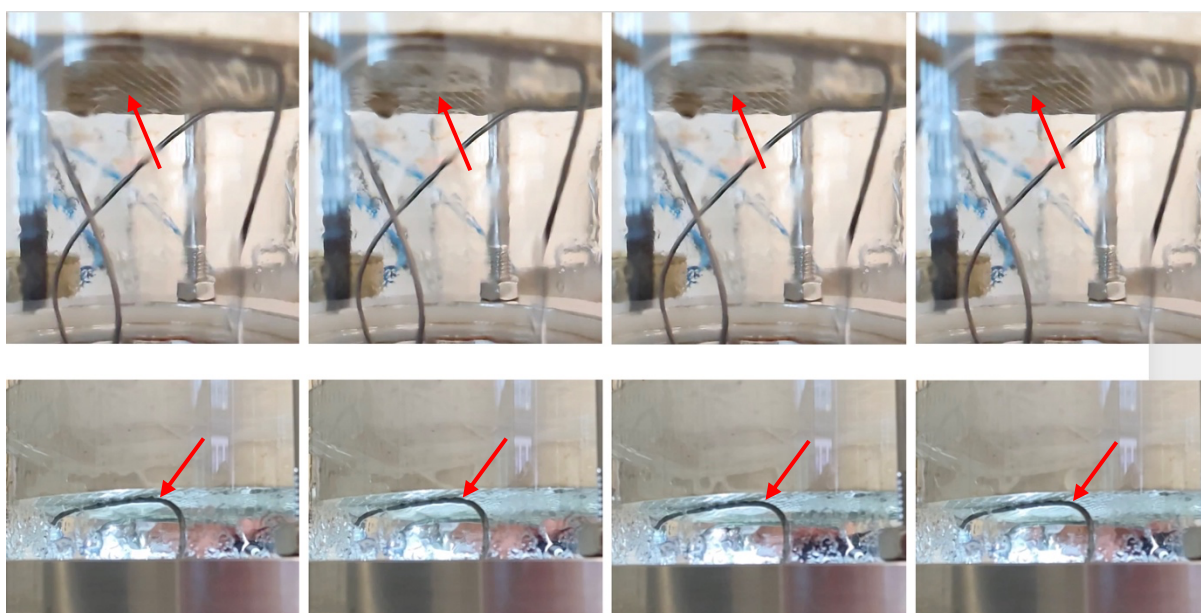
Katsete tulemusel võib öelda, et ei ole selget seost selle vahel, kas ja kui kaua seade töötab ning kas vahekihi kanalid on ummistunud või mitte. 19st katses neljal korral olid kanalid täielikult või peaaegu täielikult suletud, kahel katsel suletud osaliselt (50%). Kui kanalid olid kahel vähesel määral suletud (80–90% avatud), siis loetakse see avatud kanalite olukorraks. Kui kanalid olid avatud, läks seade tööle keskmiselt 31% kordadest, suletud kanalitega 75% kordadest. Kui kanalid olid pooleldi avatud ja pooleldi suletud (50%), siis läks seade tööle mõlemal korral. Seega võib nendele andmetele tuginedes öelda, et kui kanalid olid suletud, läks seade suurema tõenäosusega tööle.

Järgmised joonised näitavad pooleldi avatud ning pooleldi suletud kanalitega vahekihti ning täiesti suletud kanalitega vahekihti, kusjuures mõlemal juhul ostsillatsioonid algasid.



Joonis 4.4. Vahekihi kanalite ummistumine vedelikuga: a) pooled kanalid on avatud, pooled suletud, b) mõned üksikud kanalid avatud (näidatud noolega).

Kahel korral oli võimalik ka filmida, kuidas töötavas seadmes on vahekihi all näha vedeliku üles-alla liikumist. Järgmisel joonisel on näidatud kaadrid videotest, mis näitavad, et seade töötab ka ummistunud kanalitega.



Joonis 4.5. Kaadrid videotest, mis näitavad, et seade töötab ka ummistunud kanalitega. Nooltega on näidatud kohad, kus on vedeliku liikumine paremini näha. Vedeliku liikumisest annavad parema ettekujutuse videod.

Huvitava tulemusena ei mänginud kanali suurus rolli selles, kas kanalid olid avatud või suletud. Kui kanalite ristlõige oli vedelfaasiga täidetud, oli kanali läbimõõt neljast kahel korral 0,5 mm, ühel korral 1,2 mm ning ühel korral eri suurusega kanalite kombinatsioon. 8-l korral 13-st, kui kanalid oli avatud, oli kasutatud 0,5 mm läbimõõduga kanalitega vahekihti, kahel korral 1,2 mm läbimõõduga kanaleid ning kolmel eri suuruste kombinatsiooni.

Tabelis 3.1 viidatud soovitusel järgi võiks kanali hüdrauliline raadius olla umbes võrdne soojusliku piirikihiga. 1,2 mm läbimõõduga ruudukujulise kanali hüdrauliline raadius on $R_s = \frac{a}{4} = \frac{1,2}{4} = 0,3$ mm. 0,5 mm läbimõõduga ringikujulise kanali hüdrauliline raadius on $R_s = \frac{r}{2} = \frac{d}{4} = \frac{0,5}{4} = 0,13$ mm. Soojuslikku piirikihti saab arvutada valemi 2.3 abil. Ringsagedus on 25 Hz tavasageduse puhul $\omega = 2\pi f = 2\pi * 25 = 157 \frac{1}{s}$. Tihedus ρ ja erisoojus c_p ning soojusjuhtivus k võetakse keskmisel katsete läbiviimisel kasutatud temperatuuridel, milleks on 77°C, ning seejuures ei arvestata rõhust tingitud erinevusi ega seda, et töövedelik asub segus õhuga ning jaguneb eri faaside vahel. See ei anna küll lõplikult täpselt tulemust, kuid on piisavalt täpne, et hinnata teoreetilise kanali suurusjärku. Andmed ja valemi 2.3 abil arvutatud soojusliku piirikihi paksus on esitatud järgmises tabelis.

Tabel 4.3. Soojusliku piirikihi paksus erinevate töövedelike korral

Töövedelik	Tihedus, [kg/m³]	Erisoojus, [kJ/(kg*K)]	Soojusjuhtivus, [W/(m*K)]	Soojusliku piirikihi paksus, [mm]
Vesi	975 [73]	4,19 [74]	0,66 [75]	0,045
Etanool	737 [76]	3,17 [77]	0,17 [78]	0,030

Nagu tabelist näha, on soojusliku piirikihi paksus mõlema töövedeliku puhul palju väiksem katsetes kasutatud kanalite hüdraulilisest raadiusest, mis olid vastavalt 0,3 ja 0,13 mm. Aga et seade katsetes töötas, ei saa öelda, et teaduskirjanduses esitatud teoreetilise kanali suurus on vajalik tingimus, et ostsillatsioonid algaksid. Siiski tasub seadme edaspidisel arendamisel katsetada, kas ja kuidas mõjutab kanali suuruse vähendamine väljundvõimsust (teaduskirjanduse järgi võiks võimsus kanali suuruse vähenemisel suurenedada).

Suletud kanalitega olukorras oli keskmine väljundpinge 1 V, avatud kanalitega 1,05 V. Seega ei saa öelda, et kanalitega avatus või suletus oleks tehtud katsete puhul mõjutanud seadme väljundpinget. Kindla järelduse tegemiseks, kuidas kanalite olek väljundpinget mõjutab, oleks vaja veel katseid teha, sest antud juhul on mõõdetud väljundpingega tehtud katsete arv liiga väike, et lõplikku järeldust teha.

KOKKUVÕTE

Käesoleval lõputööl oli kaks eesmärki:

- 1) selgitada, kuidas CAFA Tech OÜ arendatav seade töötab, ning
- 2) sellest tulenevalt uurida, kas seadme tööks on vajalik, et seadme vahekihi kanalid oleksid avatud (vedelfaas ei täida kogu kanali ristlõiget) või võib seade töötada ka suletud kanalitega (vedelfaas täidab kogu kanali ristlõike).

Käesoleva töö autoril oli hüpotees, et seade võib töötada ka suletud kanalitega ning see ei mõjuta seadme väljundvõimsust negatiivselt. Lõputöö esimese eesmärgi saavutamiseks kasutati analüütilist meetodit: analüüsi teaduskirjandust ning vastati selle abil püstitatud küsimusele. Teise eesmärgi saavutamiseks kasutati katselist meetodit, kus käesoleva töö autor viis läbi katsed oma hüpoteesi kontrollimiseks.

Eesmärkidest ja hüpoteesist tulenevalt selgitati esimeses osas (teises ja kolmandas peatükis), mis nähtuste abil CAFA Tech'i seade töötab. Esialgne hinnang oli, et CAFA Tech OÜ seadmes toimuvat võib kirjeldada termoakustika kui nähtuse kaudu. Selle järelduseni jõuti teaduskirjandusele tuginedes. Termoakustika on olukord, kus erineva temperatuuriga soojusvahetite vahel tekib temperatuurigradiendi tõttu töövedeliku kiire võnkumine ehk ostsilleerimine. Termoakustikaks nimetatakse seda selle tõttu, et tekkiv laine võib olla inimkõrvale kuuldav (inimene kuuleb helisid sagedusega umbes 20–20 000 Hz). Ka CAFA Tech OÜ seadmes tekib kõigepealt temperatuurigradiend ning selle tõttu hakkab seadmele kinnitatud membraan koos magnetiga võnkuma (tootes seeläbi ja solenoidi abil elektrit).

Siiski ei olnud esialgu kindlust, kas tegemist on just termoakustikaga, sest klassikalises käsitluses on termoakustilised seadmed kasutanud ühefaasilist töövedelikku, CAFA Tech OÜ seadmes kasutati aga töövedelikku gaasi- ja vedelfaasis. Seetõttu selgitatakse teises peatükis, et termoakustika võib olla ka kahefaasiline ehk ostsillatsioonid võivad tekkida ka siis, kui tegemist on kahefaasilise keskkonnaga. Seda näitavad mitmed teaduskirjanduses avaldatud katsete tulemused, millele on teises peatükis ka viidatud. Enamjaolt on töövedelik sel juhul reaktiivkomponendi ja inertgaasi segu, kus inertgaas (näiteks õhk või lämmastik) on pidevalt gaasifaasis, kuid reaktiivkomponent (nt vesi või etanool) kahes faasis. See, et termoakustilises seadmes võib kasutada ka kahefaasilist töövedelikku, ei ütle midagi faaside jagunemise kohta. Teisisõnu, kui termoakustikas on lainete tekkimist käsitletud ennekõike gaasifaasis toimuvate muutuste kaudu, siis kas termoakustiline laine võib tekkida ka vedelikukolvi liikumisest vahekihi kanalisis?

Vahekiht on poorsest materjalist tehtud väikeste kanalitega meedium, mis asetseb termoakustilises seadmes ning mille kanalites saab tekkida töövedeliku võnkumine. Kui ühes kanalis täidab töövedeliku vedelfaas kogu kanali ristlõike, võib seda nimetada vedelikukolviks. Sellist tehnoloogiat ei ole teaduskirjanduses üldiselt käsitletud termoakustikana, vaid ostsilleerivate soojustorude nime all, kus sarnaselt termoakustikale tekib töövedeliku ostsilleerimine. Käesoleva töö autori hinnangul võib neid nähtusi – ostsilleerivaid soojustorusid ning kahefaasilist termoakustikat – käsitleda koos, sest mõlemal juhul on töövedeliku termodünaamiline protsess selgitatav Stirlingu tsükli abil ning need protsessid on sarnased. Kui see on nii, siis peaks ka CAFA Tech OÜ seadmetega tehtud katsed näitama, et seade võib töötada ka siis, kui vahekihi kanalite ristlõige on üleni töövedeliku vedelfaasiga ummistunud.

Neljandas peatükis kirjeldati tehtud katseid (pidades seejuures silmas ettevõtte ärisaladust) ning vastati eelnimetatud küsimusele. Autori tehtud katsed näitavad, et seade võib töötada ka siis, kui kanalite ristlõige on täidetud töövedeliku vedelfaasiga. See järeldus on erinev teaduskirjanduses avaldatud seisukohtadest, mille jaoks on oluline termoakustilistes masinates tagada, et vahekihi kanalid ei täituks täies ristlõike ulatuses vedelikuga.

Kuna termoakustilised seadmed võivad olla üheks potentsiaalseks lahenduseks, et kasutada madalakvaliteediga soojust elektrienergia tootmiseks, nad on keskkonnasõbralikumad ega vaja palju hooldust, tegeletakse nende uurimise ja arendamisega üha enam. Teise faasi lisamine aitab alandada kriitilist temperatuuri, kui ostsillatsioonid algavad, ning muuta võnkumiste amplituudi suuremaks. Kuna tänaseni pole kahefaasilistes termoakustilistes seadmetes toimuvad termodünaamilised protsessid täpselt teada, tasub edasi uurida, mis vahekihi kanalites toimub. Seejuures ei ole teada, kuidas faasid kanalis jaotuvad, sest see, et ristlõige on täidetud vedelfaasiga, ei ütle midagi selle kohta, kui pikas osas ja kas see on vaheldumisi aurumullidega (nagu ostsilleerivas soojustorus). Seda võiks proovida katseliselt visualiseerida, kasutades näiteks läbipaistvaid kapillaartorusid ja kõrge sagedusega kaamerat, või numbriliselt modelleerida. Lisaks peaks uurima erinevate materjalide ja töövedelike mõju vedelikukolvi moodustumisele: kuidas need mõjutavad vedelikukolvi moodustumist. Kõige olulisemalt oleks aga vaja uurida seadme väljundvõimsuse sõltuvust sellest, kas vahekihi kanalis moodustub vedelikukolb või mitte. Käesoleva töö autori tehtud katsed kindlat seost ei näidanud, kuid selle uurimine on seadme arendamiseks oluline ning vastavaid katseid oleks oluline korrata.

SUMMARY

This thesis had two objectives:

1. to explain how the device developed by CAFA Tech OÜ works, and
2. consequently, to investigate whether it is necessary for the pores in the stack to be open (i.e not filled with liquid) for the device to work.

The author of this thesis had a hypothesis that the device can work when the pores are filled with liquid and that this does not negatively affect the device's output power. To achieve the first objective of the thesis, an analytical method was used: scientific literature was analyzed and questions were answered using it. To achieve the second objective, an experimental method was used, where the author of this thesis conducted experiments to test her hypothesis.

Based on the objectives and hypothesis, in the first part (chapters two and three), it was explained what is the phenomena that can be used to explain how CAFA Tech's device works. The initial estimate was that it can be described using the theory of thermoacoustics. This conclusion was reached based on scientific literature. Thermoacoustics is a situation where rapid oscillation of the working fluid occurs due to a temperature gradient between different temperature heat exchangers. It is called thermoacoustics because the resulting wave can be audible to humans (humans hear sounds with a frequency of about 20-20,000 Hz). In CAFA Tech OÜ's device, a temperature gradient occurs and as a result, the membrane with a magnet attached to the device begins to vibrate (through a solenoid, thus producing electricity).

However, it was initially uncertain whether it could be explained as thermoacoustics, because classical thermoacoustic devices have used single-phase working fluids, while CAFA Tech OÜ's device uses a working fluid in gas and liquid phases. Therefore, in chapter two, it is explained that oscillations can also occur if it is a two-phase environment. This is indicated by several test results published in scientific literature referred to in chapter two. In most cases, the working fluid is a mixture of an inert gas (such as air or nitrogen) and a reactive component (such as water or ethanol), whereas inert gas is constantly in gas phase but reactive component changes phases in the process. The fact that a two-phase working fluid can be used in thermoacoustic devices does not say anything about phase distribution. In other words, can a thermoacoustic wave also occur due to movement of liquid column (i.e. liquid piston) in the stack pore?

The stack (also called a regenerator, mostly so in moving-wave thermoacoustic devices) is a medium made of porous material with small pores (or channels) where working fluid

oscillation can occur. If one channel is filled with liquid phase working fluid across its cross-section, it can be called a liquid piston. Such technology has generally not been considered as thermoacoustics in scientific literature but under the name of oscillating heat pipes where working fluid oscillation occurs similarly to thermoacoustics. In the author's opinion, these phenomena - oscillating heat pipes and two-phase thermoacoustics - can be explained together because in both cases thermodynamic process of working fluid can be explained using Stirling cycle and these processes are similar. If so, then experiments conducted with CAFA Tech OÜ's devices should show that the device can also work when cross-sections of stack channels are completely clogged with liquid phase working fluid.

In chapter four, experiments conducted are described and the aforementioned question is answered. The experiments conducted by the author show that the device can also work when cross-sections of pores are filled with liquid phase working fluid. This conclusion differs from published views in scientific literature according to which it is important for thermoacoustic machines to ensure that stack pores are not completely filled with liquid.

As thermoacoustic devices allow low-quality heat to be used for electricity production, they are environmentally friendly and do not require much maintenance; research and development of these devices are increasingly being carried out. Second-phase addition helps reduce critical temperature when oscillations begin and increases amplitude of oscillations. Since thermodynamic processes occurring in two-phase thermoacoustic devices are not exactly known until today, it is worth continuing research on what happens in intermediate layer channels. It is not known how phases are distributed in channels because filling cross-sections with liquid phase does not say anything about how the phases are distributed along the pore and if liquid columns are in various parts alternately with vapor bubbles (as in oscillating heat pipes). This could be verified experimentally by visualizing it using, for example, transparent capillary tubes and a high-frequency camera or by studying it through computational fluid dynamic analysis. In addition, the effect of different materials and working fluids on liquid column formation should be studied. However, it would be most important to study the dependence of the device's output power on whether a liquid column is formed in the stack channel or not. The experiments conducted by the author of this work did not show a clear correlation, but it would be an essential topic for future research.

KASUTATUD ALLIKAD

- [1] International Panel on Climate Change, "SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6)," Mar. 2023. [Online]. Available: https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf
- [2] Riigikogu, "Kliimapoliitika põhialused aastani 2050." May 2017. [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/310022023003>
- [3] European Commission, "COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality." Jul. 2021. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0550>
- [4] K. Lygnerud, E. Wheatcroft, and H. Wynn, "Contracts, Business Models and Barriers to Investing in Low Temperature District Heating Projects," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 15, p. 3142, Feb. 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/app9153142>.
- [5] P. Lauenburg, "Temperature optimization in district heating systems," in *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems*, Woodhead Publishing Series in Energy, 2016, pp. 223–240. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-374-4.00011-2>
- [6] H. Jouhara, N. Khordehgah, S. Almahmoud, B. Delpech, A. Chauhan, and S. A. Tassou, "Waste heat recovery technologies and applications," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 6, no. June, pp. 268–289, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017>.
- [7] A. J. Jaworski and X. Mao, "Development of thermoacoustic devices for power generation and refrigeration," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 227, no. 7, Aug. 2013.
- [8] M. A. G. Timmer and T. H. van der Meer, "Review on the conversion of thermoacoustic power into electricity," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 143, pp. 841–857, 2018, doi: <https://doi.org/10.1121/1.5023395>.
- [9] D. Noda and Y. Ueda, "A thermoacoustic oscillator powered by vaporized water and ethanol," *Am J Phys*, vol. 81, no. 2, pp. 124–126, 2013, doi: <https://doi.org/10.1119/1.4766940>.
- [10] G. Walker and B. Agbi, "Thermodynamic Aspects of Stirling Engines with Two-Phase, Two-Component Working Fluids," *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, Mar. 1973, doi: 10.1139/tcsme-1973-0001.

- [11] R. Yang, J. Wang, and E. Luo, "Revisiting the evaporative Stirling engine: The mechanism and a case study via thermoacoustic theory," *Energy*, vol. 273, Jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127282>.
- [12] R. Raspet, W. V. Slaton, C. J. Hickey, and R. A. Hiller, "Theory of inert gas-condensing vapor thermoacoustics: Propagation equation," *J Acoust Soc Am*, vol. 112, no. 4, pp. 1414–1422, Oct. 2002, doi: 10.1121/1.1508113.
- [13] T. Biwa, *Introduction to Thermoacoustic Devices*. WORLD SCIENTIFIC (US), 2021. doi: 10.1142/y0023.
- [14] R. Yang, N. Blanc, A. Vardi-Chouchana, N. Ouzana, and G. Z. Ramon, "PC-TAS: A design environment for phase-change and classical thermoacoustic systems," *SoftwareX*, vol. 9, no. July, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101142>.
- [15] G. S. Swift, *Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators*, Second Edition. Springer, 2017.
- [16] D. R. Raichel, "Fundamentals of Acoustics," in *The Science and Application of Acoustics*, Second edition. New York: Springer, 2006, pp. 13–30.
- [17] R. S. Wakeland and R. M. Keolian, "Thermoacoustics with idealized heat exchangers and no stack," *J Acoust Soc Am*, vol. 111, no. 6, pp. 2654–2664, Jul. 2002, doi: <http://dx.doi.org/10.1121/1.1479145>.
- [18] C. D. West, "Two-Phase, Two-Component Stirling Engine with Controlled Evaporation," Dec. 1982. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/servlets/purl/6866302>
- [19] S. Backhaus and G. S. Swift, "A thermoacoustic Stirling heat engine," *Nature*, vol. 399, pp. 335–338, May 1999, doi: <https://doi.org/10.1038/20624>.
- [20] A. W. Avent and C. R. Bowen, "Principles of thermoacoustic energy harvesting," *Eur Phys J Spec Top*, vol. 224, pp. 2967–2992, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1140/epjst/e2015-02601-x>.
- [21] K. A. Al-attab and Z. A. Zainal, "Low grade waste heat recovery using diethyl ether thermo-fluid diaphragm engine," *Appl Therm Eng*, vol. 127, pp. 944–949, Aug. 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.114>.
- [22] G. Chen, L. Tang, B. Mace, and Z. Yu, "Multi-physics coupling in thermoacoustic devices: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 146, no. August, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111170>.
- [23] A. A. Boroujerdi and M. Ziabasharhagh, "Analytical determination of oscillating frequencies and onset temperatures of standing wave thermoacoustic heat engines," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 98, pp. 401–414, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.028.

- [24] Y. Ueda and C. Kato, "Stability analysis of thermally induced spontaneous gas oscillations in straight and looped tubes," *J Acoust Soc Am*, vol. 124, no. 2, pp. 851–858, Aug. 2008, doi: <https://doi.org/10.1121/1.2939134>.
- [25] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker, "Seisulained," in *Füüsika põhikursus: 1. köide*, Eesti Füüsika Selts, 2008.
- [26] D. R. Raichel, "3. Sound Wave Propagation and Characteristics," in *The Science and Applications of Acoustics*, Second Edition. New York: Springer, 2006.
- [27] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. Dewitt, "6.6 Physical Interpretation of the Dimensionless Parameters," in *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. John Wiley & Sons, 2011, pp. 407–409.
- [28] Y. Al Masalmeh, U. Ali, M. Islam, and I. Janajreh, "Effect of Stack Position and Stack Length on the Performance of Thermoacoustic Engine," in *Proceedings of the 9th International Conference on Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*, Niagara Falls, 2022, pp. 1–6.
- [29] P. Novotný, T. Vít, M. Vestfálová, and J. Lopes, "Standing-wave thermoacoustic engines," *EPJ Web Conf*, vol. 25, pp. 1–10, 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20122501061>.
- [30] R. Yang, N. Blanc, and G. Z. Ramon, "Theoretical performance characteristics of a travelling-wave phase-change thermoacoustic heat pump," *Energy Convers Manag*, vol. 254, p. 115202, Feb. 2022, doi: [10.1016/j.enconman.2021.115202](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115202).
- [31] M. McGaughy, C. Wang, E. Boessneck, T. Salem, and J. Wagner, "A Traveling Wave Thermoacoustic Engine—Design and Test," *ASME Letters in Dynamic Systems and Control*, vol. 1, pp. 1–9, Jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4049528>.
- [32] G. W. Swift, "Thermoacoustic Engines and Refrigerators," *Phys Today*, vol. 48, no. 7, pp. 22–28, 1995, doi: <https://doi.org/10.1063/1.881466>.
- [33] Y. Blayer, N. Elkayam, and G. Z. Ramon, "Phase-dependence of sorption-induced mass streaming in an acoustic field," *Appl Phys Lett*, vol. 115, no. 3, p. 033703, Jul. 2019, doi: [10.1063/1.5110601](https://doi.org/10.1063/1.5110601).
- [34] T. Brustin, A. Offner, and G. Z. Ramon, "Effect of gas mixture on temperature and mass streaming in a phase-change thermoacoustic engine," *Appl Phys Lett*, vol. 116, no. 24, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0009599>.
- [35] A. Meir, A. Offner, and G. Z. Ramon, "Low-temperature energy conversion using a phase-change acoustic heat engine," *Appl Energy*, vol. 231, pp. 372–379, Dec. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.124>.
- [36] R. Yang, A. Meir, and G. Z. Ramon, "A standing-wave, phase-change thermoacoustic engine: Experiments and model projections," *Energy*, vol. 258, 2022.

- [37] O. Weltsch, A. Offner, D. Liberzon, and R. Z. Guy, "Adsorption-Mediated Mass Streaming in a Standing Acoustic Wave," *Physical Letters Review*, vol. 118, Jun. 2017.
- [38] Q. Shen *et al.*, "Waste heat recovery in an oscillating heat pipe using interfacial electrical double layers," *Appl Phys Lett*, vol. 112, no. 24, p. 243903, Jun. 2018, doi: 10.1063/1.5033347.
- [39] X. Zhao, L. Su, J. Jiang, W. Deng, and D. Zhao, "A Review of Working Fluids and Flow State Effects on Thermal Performance of Micro-Channel Oscillating Heat Pipe for Aerospace Heat Dissipation," *Aerospace*, vol. 10, no. 2, 2023, Accessed: May 22, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/aerospace10020179>
- [40] X. Sun, S. Li, B. Jiao, Z. Gan, and J. Pfothner, "Experimental study on a hydrogen closed-loop pulsating heat pipe with two turns," *Cryogenics (Guildf)*, vol. 97, no. January, pp. 63–69, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2018.10.010>.
- [41] H. M. Goudarzi, M. Yarahmadi, and M. B. Shafii, "Design and construction of a two-phase fluid piston engine based on the structure of fluidyne," *Energy*, vol. 127, no. 15 May 2017, pp. 660–670, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.035>.
- [42] M. Winkler *et al.*, "Small-Sized Pulsating Heat Pipes/Oscillating Heat Pipes with Low Thermal Resistance and High Heat Transport Capability," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 7, p. 1376, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/en13071736>.
- [43] N. Karami *et al.*, "Experimental characterization of the thermodynamic cycle of a self-oscillating fluidic heat engine (SOFHE) for thermal energy harvesting," *Energy Convers Manag*, vol. 258, Apr. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115548>.
- [44] K. Yasui, "Relationship of Lagrangian microscopic energy efficiency of a gas parcel in a thermoacoustic engine to macroscopic one," *AIP Adv*, vol. 11, no. 4, p. 045106, Apr. 2021, doi: 10.1063/5.0047545.
- [45] A. Offner, R. Yang, D. Felman, N. Elkayam, Y. Agnon, and G. Z. Ramon, "Acoustic oscillations driven by boundary mass exchange," *J Fluid Mech*, vol. 866, pp. 316–349, May 2019, doi: 10.1017/jfm.2019.87.
- [46] R. Yang, N. Blanc, and G. Z. Ramon, "Environmentally-sound: An acoustic-driven heat pump based on phase change," *Energy Convers Manag*, vol. 232, p. 113848, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.113848.
- [47] M. Senga and S. Hasegawa, "Energy conversion of thermoacoustic engines with evaporation and condensation," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 165, p. 120385, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120385.

- [48] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, "The Laws of Induction," in *The Feynman Lectures on Physics: New Millennium Edition*, New York: Basic Books, 2013.
- [49] T. Biwa, Y. Ueda, T. Yazaki, and U. Mizutani, "Thermodynamical mode selection rule observed in thermoacoustic oscillations," *Europhysics Letters (EPL)*, vol. 60, no. 3, pp. 363–368, Nov. 2002, doi: 10.1209/epl/i2002-00273-1.
- [50] A. Piccolo, "Study of Standing-Wave Thermoacoustic Electricity Generators for Low-Power Applications," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 2, Feb. 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/app8020287>.
- [51] M. Q. Kamil, S. Gh. Yahya, and I. D. J. Azzawi, "Design methodology of standing-wave thermoacoustic refrigerator: theoretical analysis," *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, vol. 31, no. 1, p. 7, Mar. 2023, doi: 10.1007/s44189-023-00023-x.
- [52] K. Luo, D. M. Sun, J. Zhang, Q. Shen, and N. Zhang, "A multi-stage traveling-wave thermoacoustically-driven refrigeration system operating at liquefied natural gas temperature," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 278, p. 012139, Dec. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/278/1/012139.
- [53] B. Chen, S. Tian, J. Liu, K. Ho, and M. Yang, "The Development of a Two-stage Traveling Wave Thermoacoustic Engine," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 1551–1556, May 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.478.
- [54] B. R. Chen *et al.*, "Optimal cross-sectional area ratio between porous material and resonance tube for the onset of self-excited oscillations in standing-wave thermoacoustic engines," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 41, Jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101856>.
- [55] J. Tan, J. Luo, J. Wei, and T. Jin, "Numerical and experimental study of a two-phase thermofluidic oscillator with regenerator achieving low temperature-differential oscillation," *Appl Therm Eng*, vol. 180, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115790>.
- [56] D. Tokuda and T. Inoue, "Heat transport characteristics of a sodium oscillating heat pipe: thermal performance," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 196, p. 123281, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123281.
- [57] M. Miura, T. Nagasaki, and Y. Ito, "Experimental investigation of heat transport with oscillating liquid column in pulsating heat pipe using forced oscillation system," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 106, no. March, pp. 997–1004, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.069>.
- [58] Z. B. Yu, Q. Li, X. Chen, F. Z. Guo, and X. J. Xie, "Experimental investigation on a thermoacoustic engine having a looped tube and resonator," *Cryogenics (Guildf)*, vol. 45, no. 8, pp. 566–571, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.cryogenics.2005.06.007.

- [59] Z. Wu, G. Yu, L. Zhang, W. Dai, and E. Luo, "Development of a 3 kW double-acting thermoacoustic Stirling electric generator," *Appl Energy*, vol. 136, pp. 866–872, Dec. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.105>.
- [60] P. Saechan and I. Dhuchakallaya, "Design and experimental evaluation of a travelling wave thermoacoustic engine," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1456–1461, Dec. 2020, doi: [10.1016/j.egyr.2020.11.002](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.002).
- [61] A. S. Abduljalil, Z. Yu, and A. J. Jaworski, "Selection and experimental evaluation of low-cost porous materials for regenerator applications in thermoacoustic engines," *Mater Des*, vol. 32, no. 1, pp. 217–228, Jan. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.012>.
- [62] I. Dhuchakallaya, T. Jearsiripongkul, and P. Saechan, "Acoustic field improvement through adjustable resonator to enhance the performance of thermoacoustic-Stirling engine," *Energy Reports*, vol. 8, no. 1, pp. 979–985, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.094>.
- [63] S. Kawaminami, S. Sakamoto, S. Fukuda, and Y. Watanabe, "Step-type thermoacoustic system saturated with water vapor: Study for stabilization of low-temperature driving," *Jpn J Appl Phys*, vol. 56, no. 7S1, pp. 1–4, Jun. 2017, doi: <https://doi.org/10.7567/JJAP.56.07JE12>.
- [64] T. Jin, R. Yang, Y. Wang, Y. Feng, and K. Tang, "Low temperature difference thermoacoustic prime mover with asymmetric multi-stage loop configuration," *Sci Rep*, vol. 7, p. 7665, Aug. 2017, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08124-5>.
- [65] K. Wang and Z.-C. Hu, "Experimental Investigation of a Novel Standing-Wave Thermoacoustic Engine Based on Pche and Supercritical Co₂," *Energy - preprint*, Accessed: May 25, 2023. [Online]. Available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4376348
- [66] C. Jensen and R. Raspet, "Thermoacoustic power conversion using a piezoelectric transducer," *J Acoust Soc Am*, vol. 128, no. 1, pp. 98–103, Jul. 2010, doi: <https://doi.org/10.1121/1.3409370>.
- [67] J.-A. Mumith, C. Makatsoris, and T. G. Karayiannis, "Design of a thermoacoustic heat engine for low temperature waste heat recovery in food manufacturing: A thermoacoustic device for heat recovery," *Appl Therm Eng*, vol. 65, no. 1–2, pp. 588–596, Apr. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.042>.
- [68] N. Karami *et al.*, "Experimental characterization of the thermodynamic cycle of a self-oscillating fluidic heat engine (SOFHE) for thermal energy harvesting," *Energy Convers Manag*, vol. 258, no. 15 April 2022, pp. 1–11, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115548>.

- [69] A. Hamood and A. J. Jaworski, "Thermoacoustic cascade engine free from resonance length," *Energy*, vol. 271, p. 126881, May 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.126881.
- [70] C. Delvizis, "5 Key Questions For Choosing a Measurement Bus," *Design World*, 2012. <https://www.designworldonline.com/5-key-questions-for-choosing-a-measurement-bus/> (accessed May 29, 2023).
- [71] HP Development Company, "HP Laptop 15-dw3029ni (538G5EA)," 2023. https://www.hp.com/emea_africa-en/products/laptops/product-details/2100979688 (accessed May 29, 2023).
- [72] Eleshop.eu, "Accurate 0-30V 0-5A lab power supply," 2023. <https://eleshop.eu/accurate-0-30v-0-5a-lab-power-supply.html> (accessed May 29, 2023).
- [73] Engineering Toolbox, "Water - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficients," 2003. https://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d_595.html (accessed May 26, 2023).
- [74] Engineering ToolBox, "Water - Specific Heat vs. Temperature," 2004. https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-water-d_660.html (accessed May 26, 2023).
- [75] Engineering Toolbox, "Water - Thermal Conductivity vs. Temperature.," 2018. https://www.engineeringtoolbox.com/water-liquid-gas-thermal-conductivity-temperature-pressure-d_2012.html (accessed May 26, 2023).
- [76] Engineering Toolbox, "Ethanol - Density and Specific Weight vs. Temperature and Pressure.," 2013. https://www.engineeringtoolbox.com/ethanol-ethyl-alcohol-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2028.html (accessed May 26, 2023).
- [77] Engineering Toolbox, "Ethanol - Specific Heat vs. Temperature and Pressure," 2018. https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-ethanol-Cp-Cv-isobaric-isochoric-ethyl-alcohol-d_2030.html#:~:text=At%20ambient%20pressure%20and%20temperature,%5Bcal%2Fg%20K%5D. (accessed May 26, 2023).
- [78] Thermal-Fluids Central, "Thermophysical Properties: Ethanol," 2010. https://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Thermophysical_Properties:_Ethanol (accessed May 26, 2023).