



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Pauli Korkolainen

Lämmön regeneroinnin hyödyntäminen hydraulipaineakussa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoo, 26.5.2014

Valvoja: Professori Matti Pietola
Ohjaajat: Diplomi-insinööri Jyri Juhala
Tekniikan tohtori Jyrki Kajaste

AALTO-YLIOPISTO INSINÖÖRITIEIDEIDEN KORKEAKOULU PL 11000, 00076 AALTO http://www.aalto.fi		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Pauli Korkolainen			
Työn nimi: Lämmön regeneroinnin hyödyntäminen hydraulipaineakussa			
Laitos: Koneenrakennustekniikanlaitos			
Pääaine: Koneensuunnittelu		Pääaineen koodi: K3001	
Vastuupettaja: Professori Matti Pietola Ohjaajat: Diplomi-insinööri Jyri Juhala, Tekniikan tohtori Jyrki Kajaste			
<p>Tekniikan kehittyessä toimilaitteiden ja järjestelmien suunnittelussa ja toteutuksessa laitteiden ja koneiden energia- ja kustannustehokkuus nousevat jatkuvasti tärkeämpään rooliin. Hydraulisilla toimilaitteilla saavutetaan korkea tehotiheys, mutta järjestelmien kokonaishyötysuhde on usein heikko. Hyötysuhdetta voidaan nostaa lisäämällä järjestelmiin energian talteenotto, jolloin työkiertoista voidaan normaalisti hukkaan menevää energiaa varastoida ja käyttää uudelleen seuraavassa työkierrossa.</p> <p>Hydraulisissa energian talteenottojärjestelmissä energiaa varastoidaan tyypillisesti hydraulipaineakkuihin. Paineakuissa energia varastoituu puristamalla paineakun kaasutilavuudessa olevaa kaasua. Puristusvaiheen aikana kaasun lämpötila nousee ja lämpö alkaa virrata paineakusta ympäristöön. Tämä energian virtaaminen ympäristöön muodostaa merkittävimmän yksittäisen paineakun hyötysuhdetta laskevan tekijän.</p> <p>Tämän työn tavoitteena oli nostaa mäntäpaineakun hyötysuhdetta hyödyntämällä lämmön regenerointia. Lämmön regeneroinnilla pyritään varastoimaan kaasussa puristusvaiheessa syntyvä lämpöenergia lämpöregeneraattoriin ja luovuttamaan energia takaisin kaasuun paineakun purkusuiklin aikana. Työssä suunniteltu lämpöregeneraattori perustui faasimuutosmateriaalien hyödyntämiseen energiavarastona. Faasimuutosmateriaalit soveltuvat erinomaisesti lämpövarastoiksi, sillä ne kykenevät sitomaan suuren määrän energiaa faasimuutoksen aikana, jolloin työssä suunniteltu lämpöregeneraattori saatiin mahdutettua mäntäpaineakun sisälle.</p> <p>Työssä saatujen mittaustuloksien perusteella pääteltiin, että lämpöregeneraattorin dynamiikan merkitys nousi merkittävämmäksi kuin lämpöregeneraattorin kyky varastoida lämpöenergiaa. Lämpöregeneraattorin hidas dynamiikka ei mahdollista tehokasta energian talteenottoa nopeista puristus- tai purkusuikleistä, ja tämän takia lämpöregeneraattorista saatava hyöty jäi pieneksi. Työssä toteutetulla lämpöregeneraattorilla saavutettiin parhaimmillaan 3 prosenttiyksikön hyötysuhteen nousu verrattaessa samaan mäntäpaineakkuun ilman lämmön regenerointia.</p>			
Päivämäärä: 26.5.2014		Kieli: Suomi	Sivumäärä: 68
Avainsanat: Hydraulipaineakku, lämmön regenerointi, faasimuutosmateriaali			

AALTO-YLIOPISTO SCHOOL OF ENGINEERING PL 11000, 00076 AALTO http://www.aalto.fi	ABSTRACT OF MASTER'S THESIS	
Author: Pauli Korkkolainen		
Title: Utilizing heat regeneration within hydraulic pressure accumulator		
Department: Department of Engineering Design and Production		
Major: Machine Design	Major code: K3001	
Supervisor: Professor Matti Pietola Advisors: Jyri Juhala M.Sc. (Tech.), Jyrki Kajaste D.Sc. (Tech.)		
<p>As new technological advances are made the importance of energy efficiency and cost effective solutions are even more important when designing and producing new machine systems. Hydraulic systems offer great performance in different actuators, but the general efficiency of the whole hydraulic systems is usually low. Energy efficiency can be improved by utilizing energy recovery systems. With energy recovery some of the normally wasted energy can be recovered and used in the next work cycle.</p> <p>Hydraulic energy recovery systems usually store energy in hydraulic pressure accumulators. Within the hydraulic pressure accumulator, energy is stored by compressing gas inside the accumulator's gas volume. When compressing gas, heat builds up within the gas and temperature difference between the gas and its surroundings causes heat energy to flow out of the gas. This energy flow is the single most significant factor lowering energy efficiency of the accumulator.</p> <p>The goal of this study was to increase the efficiency of piston type hydraulic pressure accumulator by utilizing heat regeneration. With heat regeneration, heat energy that is generated in the gas during compression cycle is stored in the heat regenerator to be released during the following decompression cycle. Heat regenerator designed in this study utilizes phase change materials to store heat energy. Phase change materials absorb a lot of energy during phase change and thus they are commonly used as heat storages.</p> <p>The results obtained in this study indicate that the dynamic properties of the heat regenerator are more important than the capability to store heat energy. Low dynamic properties prevent the heat regenerator from storing and releasing energy effectively during fast compression and decompression cycles. With the heat regenerator designed in this study the energy efficiency of the accumulator increased by maximum of 3 percentage units when compared to the same accumulator without heat regeneration.</p>		
Date: 26.5.2014	Language: Finnish	Pages: 68
Keywords: Hydraulic accumulator, heat regeneration, phase change material		

Alkusanat

Tämä työ on tehty Aalto yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulussa koneenrakennustekniikan laitoksen hydraulitekniiikan ryhmässä osana FIMECC Oy:n (Finnish Metals and Engineering Competence Cluster Ltd) EFFIMA projektin DiHy-hanketta.

Tahdon lämpimästi kiittää professori Matti Pietolaan sekä ohjaajiani DI Jyri Juhalaa sekä TkT Jyrki Kajastetta työhön saamastani tuesta sekä neuvoista.

Tahdon kiittää myös perhettäni, ystäviäni sekä koneenrakennustekniikan laitoksen sekä erityisesti hydraulitekniiikan ryhmän henkilökuntaa saamastani tuesta työn tekemisen aikana. Työn oikolukemista haluan erityisesti kiittää myös Henri Hännistä sekä isääni, Tom Korkolaista.

Espoon Otaniemessä 26.05.2014

Pauli Korkolainen

Sisällysluettelo

KÄYTETYT SYMBOLIT.....	II
KÄYTETYT LYHENTEET.....	IV
1 JOHDANTO	1
1.1 Tausta ja tutkimusongelma.....	1
1.2 Tavoitteet ja menetelmät	2
2 HYDRAULIPAINEMAKKU	3
2.1 Rakenne.....	3
2.1.1 Kalvoakut	4
2.1.2 Rakkoakut.....	4
2.1.3 Mäntäakut.....	5
2.2 Paineakun mallintaminen.....	6
2.3 Eri painemakujen soveltuvuus regeneraattorikäyttöön.....	8
2.3.1 Paineakujen eristäminen.....	8
2.3.2 Regeneraattoreiden käyttö hydraulipainemakuissa	10
3 FAASIMUUTOSMATERIAALIT	14
4 REGENERAATTORIN SUUNNITTELU.....	19
4.1 Vaatimuslista.....	19
4.2 Regeneraattorin materiaalin valinta.....	21
4.3 Toteutettu konstruktio.....	23
5 KOEJÄRJESTELYN KUVAUS.....	26
5.1 Mittauslaitteisto	26
5.1.1 Paineen mittaus.....	26
5.1.2 Paineakun kaasutilavuuden mittaus	28
5.1.3 Lämpötilan mittaus	29
5.1.4 Tiedonkeruu- ja ohjausjärjestelmä.....	33
5.2 Koejärjestely.....	35
6 TULOKSET	38
7 POHDINNAT.....	61
8 YHTEENVETO	64
LÄHDELUETTELO	66

Käytetyt symbolit

A	Kappaleen pinta-ala
Q	Lämpöenergia
Q_s	Sulamiseen tarvittava lämpöenergia
Q_r	Höyrystymiseen tarvittava lämpöenergia
T	Lämpötila
ΔT	Lämpötilan muutos
T_s	Lämpötila materiaalikerroksen pinnalla
T_u	Lämpötila materiaalikerroksen pinnalla
T_1	Lämpötila, jossa lämmitys alkaa
T_2	Lämpötila, kun materiaali alkaa sulaa
T_3	Lämpötila, kun materiaali alkaa höyrystyä
T_4	Lämpötila, kun lämmitys loppuu
V	Tilavuus
c	Ominaislämpökapasiteetti
c_{Al}	Alumiinin ominaislämpökapasiteetti
c_{Cu}	Kuparin ominaislämpökapasiteetti
c_{Fe}	Raudan ominaislämpökapasiteetti
$c_{messinki}$	Messingin ominaislämpökapasiteetti
l_1	Ensimmäisen kerroksen paksuus
l_2	Toisen kerroksen paksuus
l_3	Kolmannen kerroksen paksuus
m	Massa
m_{Al}	Alumiinisen kappaleen massa
m_{Cu}	Kuparisen kappaleen massa
m_{Fe}	Rautaisen kappaleen massa
$m_{messinki}$	Messinkisen kappaleen massa
m_{RT52}	RT52 parafiinikappaleen massa
p	Paine
r	Höyrystyslämpö tai höyrystymisentalpia
s	Sulamislämpö tai sulamisentalpia
s_{RT52}	RT52 parafiinin sulamislämpö
ε	Materiaalin pinnan emissiviteetti
γ	Adiabaattivakio

λ_1	Ensimmäisen kerroksen lämmönjohtavuus
λ_2	Toisen kerroksen lämmönjohtavuus
λ_3	Kolmannen kerroksen lämmönjohtavuus
\emptyset	Lämpöteho

Käytetyt lyhenteet

Al	Alumiini
Au-Pt	Lämpöanturi, jossa sähköparin muodostaa kulta sekä platina
A/D	Analogi-digitaali -muunnos
BWR	Benedict-Webb-Rubin -yhtälö
Cr	Kromi
D/A	Digitaali-analogi -muunnos
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	Natriumsulfaattidekahydraatti
Mn	Mangaani
Ni	Nikkeli
PCM (Phase Change Material)	Faasimuutosmateriaali
Pt-Pd	Lämpöanturi, jossa sähköparin muodostaa kulta sekä palladium
pV-diagrammi	Kuvaaja, jossa paine esitetään tilavuuden funktiona
PI (Proportional Integral control)	Säädin jossa on vahvistus sekä integroiva termi
RT52	Parafiini, sulamispiste 52 °C
Sn	Sinkki
Type K	K-tyypin termoelementti
Type E	E-tyypin termoelementti
Type J	J-tyypin termoelementti
Type M	M-tyypin termoelementti
Type P	P-tyypin termoelementti
Type N	N-tyypin termoelementti
Type T	T-tyypin termoelementti

1 Johdanto

Tämä työ on tehty Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulussa koneenrakennustekniikan laitoksen hydraulitekniiikan ryhmässä osana Fimecc Oy:n (Finnish Metals and Engineering Competence Cluster Ltd) EFFIMA projektin DiHy-hanketta. Projektiryhmässä on Aalto-yliopiston lisäksi ollut yhteistyössä muita oppilaitoksia sekä lukuisia yrityksiä.

1.1 Tausta ja tutkimusongelma

Tekniikan kehityksessä korostuvat jatkuvasti enemmän laitteiden ja koneiden energiatehokkuuden parantaminen ja muut ympäristöystävälliset sekä energiatehokkaat ratkaisut. Energiahintojen noustessa korkean hyötysuhteen järjestelmien tuomat säästöt korostuvat entisestään. Hydraulijärjestelmillä pystytään saavuttamaan erittäin hyvä tehoteho toimilaitteissa, mutta hydraulijärjestelmät kokonaisuutena vaativat paljon tilaa ja järjestelmät voivat toimia huonolla hyötysuhteella. Hydraulijärjestelmien hyötysuhdetta voidaan parantaa esimerkiksi käyttämällä kuormitukseen sopeutuvia pumppuyksiköitä, jolloin voidaan minimoida häviöt esimerkiksi paineenrajoitusventtiileissä. Hyötysuhdetta voidaan nostaa myös energian talteenotolla, sillä usein hydraulijärjestelmillä toteutetut järjestelmät ovat reversiibeilitä. Esimerkkinä tällaisesta järjestelmästä on lastaustrukki, jossa nostotyön jälkeen taakka lasketaan alas ja laskun aikana vapautuva energia voitaisiin ottaa talteen ja käyttää seuraavan nostoliikkeen aikana hyödyksi. Perinteisesti laskussa vapautuva energia kuitenkin muutetaan lämmöksi kuristuksen kautta eikä energiaa hyödynnetä mitenkään. Tämä johtuu yleensä energian talteenottamiseen liittyvien komponenttien tuomista lisäkustannuksista, lisääntyneestä tilantarpeesta sekä ohjausjärjestelmän monimutkaistumisesta. Näihin haittapuoliin suhteutettuna mahdollisesti toteutuvat energiansäästöt ja tätä kautta pienentyneet käyttökustannukset eivät ole kannustaneet energian talteenottojärjestelmien käyttämiseen.

Energian talteenottamiseksi on monta eri menetelmää, mutta energian muuttaminen muodosta toiseen laskee aina talteen saatavan energian määrää. Hydraulijärjestelmissä järkevintä on varastoida energia suoraan paineakkuihin, jolloin energiaa ei tarvitse muuntaa muodosta toiseen, esimerkiksi hydraulipaineesta sähköksi ja takaisin hydraulipaineeksi [1]. Kehitystä tapahtuu kuitenkin jatkuvasti sähkötoimilaitteiden sekä niiden tarvitseman ohjauselektronikan hyötysuhteen parantamiseksi. Tämä johtaa siihen että hydraulien energian muuttaminen sähköenergiaksi ja esimerkiksi sähköakkuun varastointi tapahtuu entistä paremmalla hyötysuhteella. Energian talteenoton ja varastoinnin hyötysuhteen lisäksi merkittävässä roolissa on järjestelmän kyky ottaa vastaan energiaa sekä energiavaraston kokonaiskapasiteetti. Toisissa järjestelmissä nopea pulssimainen energian talteenotto voi olla paljon tärkeämpi ominaisuus kuin järjestelmän kokonaiskapasiteetti. Tästä johtuen energian talteenottojärjestelmiä suunniteltaessa on tarkkaan tutkittava minkälaiseen laitteeseen tai työsykliin ollaan energian talteenotto lisäämässä, jotta kokonaisuudesta saadaan paras mahdollinen hyöty.

Hydraulipaineakussa energiaa varastoidaan paineakussa olevaan kaasuun. Kaasutilavuuden paine alkaa kasvaa paineakussa, kun öljytilavuuteen tuodaan tilavuusvirtaa. Tällöin kaasun ja öljytilavuutta erottava elin liikkuu kutistaen kaasutilavuutta kaasun kokoonpuristuvuuden takia. Häviöitä paineakussa muodostuu erotuselimen liikkeestä sekä puristuvan kaasun lämpenemisen takia. Erotuselimen liike synnyttää paineakun tyypistä riippuen esimerkiksi kitkaa tiivisteissä tai materiaalien muodonmuutoksessa syntyvää sisäistä kitkaa. Nämä hä-

viöt ovat kuitenkin verrattain pieniä kaasun lämpenemisen aiheuttamiin häviöihin perinteisissä paineakuissa. Paineakussa kaasun puristuminen on pienillä tilavuusvirroilla polytrooppinen prosessi, koska puristuksen aikana kaasun lämpöenergiaa virtaa esimerkiksi paineakun seinämän läpi ympäristöön [2]. Suurilla tilavuusvirroilla puristusprosessi muuttuu lähes adiabaattiseksi prosessiksi, jossa lämpöä ei siirry kaasun ja ympäristön välillä, ennen puristusvaiheen aikana [2]. Häviöt riippuvat muun muassa paineakun puristussuhteesta. Puristussuhde vaikuttaa paineakussa esiintyviin paineisiin ja täten kaasun lämpenemiseen sekä mahdollisiin tiivistekitkoihin. Yleisesti käytetyillä puristussuhteilla (1:2-3) häviöt voivat olla jopa kolmanneksen varastoidusta energiasta [3]. Lämpöenergian virtaamista kaasusta seinämän läpi ympäristöön voidaan pienentää eristämällä paineakku ympäristöstä tai lisäämällä akkuun regeneraattori. Lämpöregeneraattori sitoo itseensä ympäristöstään lämpöenergiaa ympäristön lämpötilan noustessa regeneraattorin lämpötilaa korkeammaksi ja vastaavasti luovuttaa lämpöenergiaa ympäristön jäähtyessä. Lämpöregeneraattorilla lisätään paineakussa kaasutilavuuden ominaislämpökapasiteettia ja hidastetaan kaasun virtausta kaasutilavuudessa näin pienentäen kaasun lämpötilan nousua sekä vähennetään lämpöenergian johtumista paineakun seinämään ja tätä kautta ympäristöön.

1.2 Tavoitteet ja menetelmät

Tämän työn tarkoituksena on selvittää soveltuvatko faasimuutosmateriaalit regeneraattoreiksi hydraulipaineakuissa. Työssä tutkitaan erityisesti faasimuutosmateriaaleihin perustuvan lämpöregeneraattorin toimivuutta mäntäpaineakussa. Faasimuutosmateriaaleilla (engl. Phase Change Material, PCM) energiaa varastoidaan materiaalin faasimuutokseen ja tärkeimpinä ominaisuuksina faasimuutosmateriaaleilla on näiden sulamislämpötila sekä sulamislämpö. Tyypillisiä faasimuutosmateriaaleja ovat esimerkiksi parafiinit, suolat ja eräät metalliseokset. Mäntäpaineakut ovat yleisesti käytettyjä hydraulisissa energian talteenottojärjestelmissä, koska niitä on saatavilla laajalla tilavuusskaalalla sekä niiden korkeimmat sallitut käyttöpaineet ovat yleisesti korkeampia kuin muilla hydraulipaineakku-tyypeillä. Regeneraattorin käytön kannalta mäntäpaineakku on rakenteeltaan sellainen, että regeneraattori on mahdollista sijoittaa kaasutilavuuteen ilman että akun toiminta häiriintyy tai rakennetta joudutaan muuttamaan oleellisesti.

Työssä suunnitellaan ja valmistetaan faasimuutosmateriaaleihin perustuva lämpöregeneraattori mäntäpaineakkuun ja sen toimintaa seurataan lämpötila- sekä painemittauksin. Tuloksia pystytään näin vertaamaan ilman regeneraattoria saatuihin tuloksiin sekä maailmalla kehitettyihin muihin regeneraattorityyppeihin. Lämpötilan mittaamisessa on kiinnitetty erityistä huomiota paineakun ulkopinnan lämpötilan mittaamiseen kaasun sekä öljyn lämpötilan mittaamisen ohella.

2 Hydraulipaineakku

Tässä luvussa käydään läpi hydraulipaineakkujen rakenteet, käyttökohteita sekä mallintamisen teoriaa. Luvussa tarkastellaan myös paineakkujen hyötysuhteen parantamiseen liittyvää teoriaa sekä tutkitaan lämmön regeneroinnin lisäämisen haasteita eri paineakku-konstruktiolla.

2.1 Rakenne

Hydraulijärjestelmien tasaisen ja jatkuvan toiminnan takaamiseksi hydraulijärjestelmän syöttöpaineen painetasot pitää saada pidettyä mahdollisimman tasaisina. Painetasojen vaihteluja syntyy tilavuusvirran muutosten takia esimerkiksi mäntätoimisessa hydraulipumpussa tai ohjausventtiilien sulkeutuessa äkillisesti. Edellä mainitussa tapauksessa tilavuusvirran vaihtelut syntyvät mäntäpumpun työsykliä takia. Jokainen mäntä vuorollaan tuottaa tilavuusvirtaa puristusvaiheen aikana, mutta tilavuusvirran tuotto laskee nolnaan männän tehdessä imuvaihetta puristusvaiheiden välillä. Pumpun sylintereiden lukumäärällä voidaan vaikuttaa pumpulta saatavan tuoton tasaisuuteen ja sylintereiden määrän lähestyessä ääretöntä tasaantuu myös tilavuusvirran tuotto vakioarvoon. Todellisuudessa sylintereitä on kuitenkin äärellinen määrä, jolloin tilavuusvirran vaihtelut tulee kompensoida tarvittaessa paineakulla. Äkillisempiä ja voimakkaampia tilavuusvirran muutoksia syntyy puolestaan esimerkiksi nopean ohjausventtiilin sulkiessa öljyn virtauskanavan. Tällöin öljyn virtaus pysähtyy äkillisesti ja synnyttää paineaallon, joka etenee äänen nopeudella hydraulines-teessä. Painetaso voi nousta hyvinkin korkealle tällaisen paineaallon aiheuttamana. Syntyvän paineaallon voimakkuutta voidaan laskea hidastamalla ohjausventtiilin sulkeutumista, mutta aina tämä ei ole mahdollista vaan hydraulijärjestelmä on suunnittelussa huomioitava paineiskut tai järjestelmään on lisättävä paineakku.

Hydraulipaineakkuja käytetään tyypillisesti tasaamaan hydraulijärjestelmän painevaihteluita, mutta niitä voidaan käyttää myös esimerkiksi energiavarastoina energian talteenottojärjestelmissä sekä järjestelmissä, joissa tilavuusvirran tarve on jaksottaista. Jaksottaisessa käytössä paineakku voidaan ajoittain ladata hydraulipumpulla ja tämän jälkeen käyttää paineakku tilavuusvirtalähteenä.

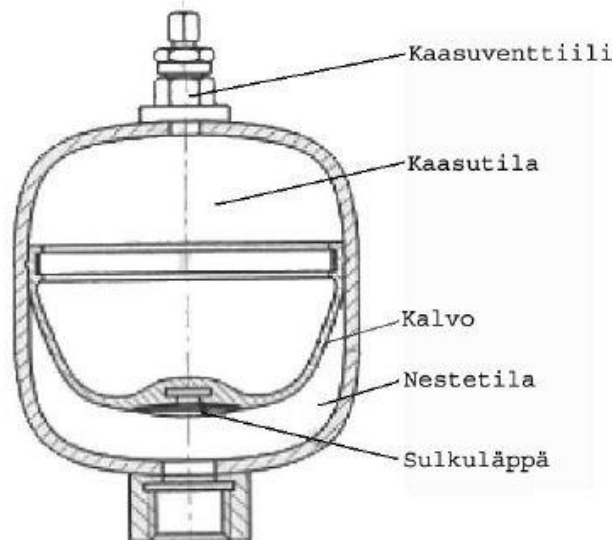
Tyypillisesti paineakussa on kaksi tilavuutta, joista toiseen pääsee hydraulineste ja toisessa on kaasua, jonka kokoonpuristuvuus mahdollistaa energian varastoinnin. Nestekammioita voi olla myös useampia, esimerkiksi kaksoismäntäakussa on kaksi erillistä nestekammiota kaasukammion molemmiin puolin. Paineakuissa erotetaan neste- sekä kaasutilavuus toisistaan erotuselimen avulla. Tyypillisesti erotuselimenä toimii joustava kalvo, rakko tai sylinteriputkessa liikkuva mäntä. Paineakuissa käytetään lähes poikkeuksetta tyypeä kaasuna, koska tyyppi on kemiallisesti passiivinen ja näin turvallinen kaasu. Tyyppi on myös molekyylikooltaan suuri, joten se ei vuoda erotuselimen tai paineakun rungon läpi kovin helposti. [4, s. 212]

Painevaihteluiden vaimentamisen lisäksi paineakku lisää hydraulijärjestelmään joustoa sen sisältämän kaasun kokoonpuristuvuuden takia. Tästä syystä paineakkuja ei voida käyttää hydraulijärjestelmien osissa, joissa vaaditaan hyvin suurta jäykkyyttä. Tyypillisesti paineakut asennetaankin hydraulipumpun ulostulon yhteyteen tai venttiileiden edelle syöttölinjaan. Esimerkiksi ohjausventtiilin ja sen ohjaaman sylinterin väliin ei paineakku yleensä asenneta, sillä paineakun joustavuus tekisi myös sylinteristä joustavan.

2.1.1 Kalvoakut

Kalvoakussa on joustava kalvo joka erottaa kaasu- ja nestetilavuudet. Kuvassa 1 on esitettyä kalvoakun poikkileikkaus. Kalvoakkujen nimellistilavuudet vaihtelevat tyypillisesti välillä 0,1-5 dm³ ja käyttöpaineet välillä 1-50 MPa. Kalvoakkujen käytetään tyypillisesti hydraulijärjestelmissä paineiskujen vaimentamiseen sekä monissa hydropneumaattisissa jousitusjärjestelmissä, koska kalvoakun kalvon pieni massa sekä tiivisteiden puuttuminen tekevät akun dynamiikasta hyvän ja tämän takia kalvoakku sopii painevärähtelyjen vaimennukseen. Energiavarastointiin kalvoakkuja ei käytetä yleisesti, sillä kalvoakkujen tilavuudet ovat pieniä verrattuna muihin akkutyyppeihin. Kalvoakun joustavaan kalvoon perustuvan toimintaperiaatteen takia akussa ei ole tiivisteitä liikkuvissa saumoissa. Kalvoakut ovat tämän takia käytännössä vuodottomia sekä kitkattomia. [4, s.215]

Tyypillisiä värähtelyn vaimennusta vaativia kohteita, joissa kalvoakkuja käytetään, ovat esimerkiksi työstökoneet, hydropneumaattiset jousitusjärjestelmät sekä lukkiutumisenesto-järjestelmät. Kalvoakkuja käytetään myös venttiileiden sekä hydraulipumppujen aiheuttamien paineiskujen vaimentamiseen. [4, s.215]

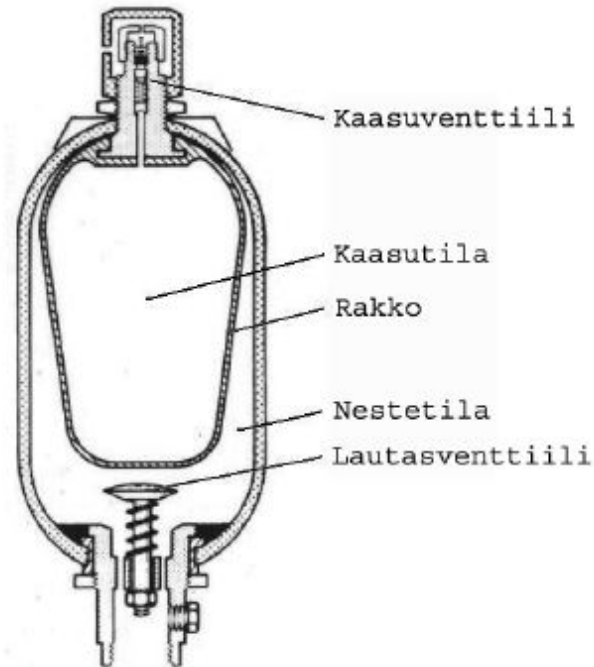


Kuva 1. Kalvoakun poikkileikkaus [5]

2.1.2 Rakkoakut

Rakkoakuissa neste- ja kaasutilavuuksien erottamiseen käytetään joustavaa kalvoa kuten kalvoakuissa, mutta kalvo on vulkanoitu suoraan kaasuventtiilin runkoon paineakun rungon sijaan (kuva 2). Rakkoakkuja valmistetaan huomattavasti suurempina kuin kalvoakkuja, nimellistilavuuksien vaihdella välillä 0,2-200 dm³. Käyttöpaineet vaihtelevat rakkoakuilla samalla alueella kuin kalvoakuilla eli 3,5-55 MPa välillä. Rakkoakkujen suurempien nimellistilavuuksien takia niitä voidaan käyttää painevärähtelyjen tasoittamisen lisäksi energiavarastoina. Dynamiikka rakkoakuissa on samaa luokkaa kuin kalvoakuissa ja tiivisteiden puuttumisen takia rakkoakut ovat käytännössä vuodottomia. Tiivisteiden puuttumisen takia rakkoakuissa ei myöskään synny kitkahäviöitä. [4, s.214]

Rakkoakuille tyypilliset käyttökohteet ovat samat kuin kalvoakuille, mutta suurempien nimellistilavuuksien takia niitä voidaan käyttää myös tilavuusvirta- sekä painelähteinä järjestelmissä joissa hydraulipumpulta ei ole aina saatavilla hydraulitehoa.



Kuva 2. Rakkoakun poikkileikkaus [5]

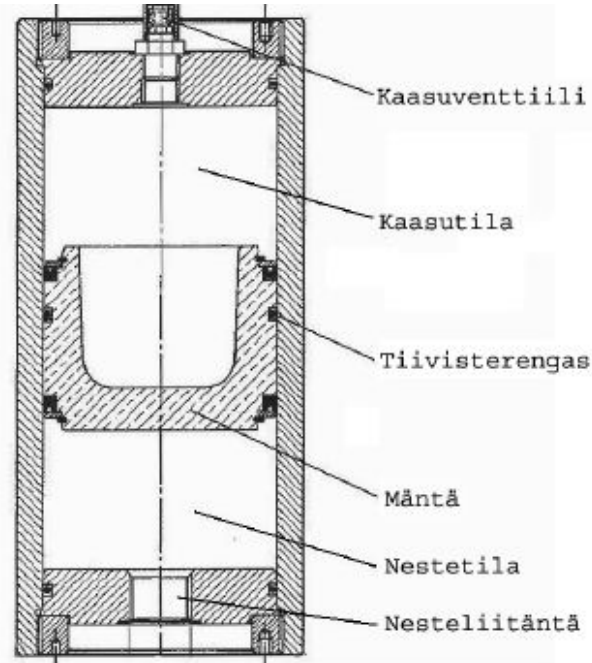
2.1.3 Mäntäakut

Toisin kuin kalvo- sekä rakkoakuissa mäntäakuissa neste- ja kaasutilavuuksien välissä on kelluva mäntä, joka pystyy liikkumaan painevaihteluiden myötä [kuva 3]. Männän tiivisteiden aiheuttama kitka heikentää mäntäakun toimivuutta pienillä painevaihteluilla, joten kitkattomat kalvo- ja rakkoakut toimivat paremmin painevärähtelyjen vaimentimina. Mäntäakun dynamiikka on siis heikompi kuin kalvo- sekä rakkoakuilla tiivisteiden kitkojen takia. Tiivisteiden jäykkyydellä voidaan vaikuttaa mäntäakun dynamiikkaan, mutta tiivisteiden jäykkyyden alentaminen laskee korkeinta mahdollista käyttöpainetta. Mäntäakku voidaan kuitenkin valmistaa nimellistilavuudeltaan suuremmaksi kuin rakko- tai kalvoakku. Mäntäakkujen nimellistilavuudet vaihtelevat 0,6-600 dm³ välillä ja käyttöpaineet 16-40 MPa välillä. [3, s.215]

Männän ja sylinterin välisten tiivistekitkojen takia mäntäakkuja ei käytetä tyypillisesti värähtelynvaimennukseen vaan pääasiallisesti energiavarastoina. Männän tiivistekitkojen takia mäntäpaineakun hyötysuhde on myös matalampi kuin kitkattomilla kalvo- sekä rakkoakuilla. Suuret tilavuudet mahdollistavat kuitenkin mäntäakkujen käytön energiavarastoina esimerkiksi työkoneissa sekä energian talteenottojärjestelmissä.

Energian talteenottojärjestelmissä otetaan energiaa talteen esimerkiksi jarrutuksen aikana seuraavaa työkiertoa varten. Eräs esimerkki tällaisesta sovelluksesta henkilöautossa on PSA:n kehittämä Hybrid Air -konsepti, jossa polttomoottorin rinnalla toimii hydraulinen energian talteenottojärjestelmä [6]. Konseptissa ajoneuvon jarrutuksen aikana ajoneuvon voimansiirtolinjaan kytketty hydraulipumpumoottori tuottaa hydraulitehoa, joka varastoi-

daan mäntäpaineakkuun, joka sijaitsee ajoneuvon keskitunnelissa. Ajoneuvoa seuraavan kerran kiihdytettäessä hyödynnetään paineakkuun varastoitua energiaa muuntamalla se samalla hydraulipumppumootorilla takaisin pyörimisliikkeeksi ajoneuvon voimansiirtolinjaan. Järjestelyllä luvataan laskea polttoaineenkulutusta kaupunkiajossa jopa 35 %.



Kuva 3. Mäntäakun poikkileikkaus [5]

2.2 Paineakun mallintaminen

Kaasulla täytetyissä paineakuissa kaasu käy läpi lataus- ja purkuvaiheissa vastaavat puristus- sekä laajenemisprosessit. Kaasun kokoonpuristuminen ja laajeneminen noudattaa likipitään adiabaattista prosessia (kaava 1.) [1, 7]. Verrattavuus adiabaattiseen prosessiin toimii sitä paremmin mitä nopeampia paineakun purku- tai latausvaiheet ovat.

$$p * V^\gamma = vakio \quad (1)$$

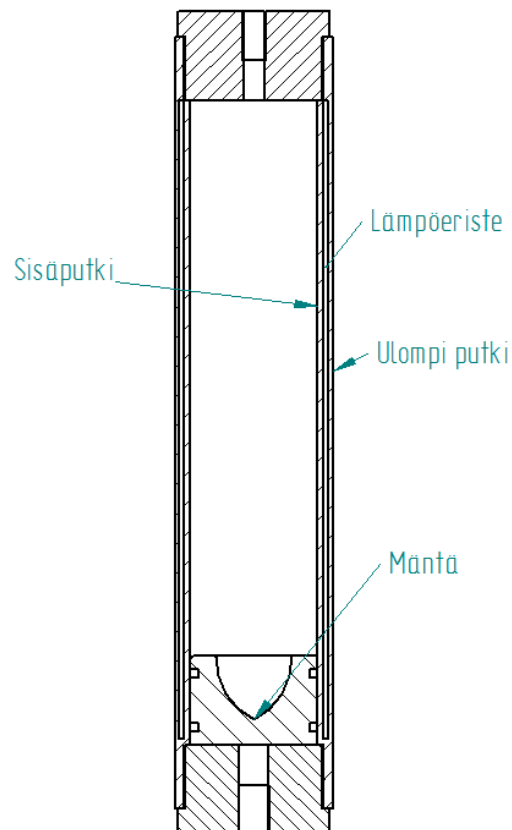
Kaasun maksimipaineen vaikutus laskennan tarkkuuteen kasvaa mitä korkeammalle paine nousee. Alle 10 MPa:n paineissa voidaan kaasua mallintaa ideaalikaasumalleilla ilman merkittävää virhettä laskennassa. Tästä suurempiin paineisiin siirryttäessä joudutaan siirtymään ideaalikaasumallista reaalikaasumalliin, jonka ratkaiseminen on huomattavasti hankalampaa. 20 MPa:n painetasolla virhe ideaalikaasumallin ja reaalikaasumallin välillä on jo 20 % luokkaa. Tämä virhe aiheuttaa esimerkiksi energian talteenottojärjestelmiä suunniteltaessa kapasiteetin virheellisen arvioimisen, jonka takia todellisessa järjestelmässä ei päästä yhtä hyviin tuloksiin kuin simuloinneissa. [7]

Reaalikaasumalleja on useita erilaisia ja niiden tarkkuus vaihtelee yleensä kaasun ominaisuuksien sekä työsyklin kuvaamiseen käytettävien muuttujien määrän suhteen. Yksinkertaisimmillaan kaavassa voi olla vain kaksi muuttujaa kuten Van der Wals ja Redlich-

Kwong:n tilayhtälöissä. Nämä yksinkertaisen kaavat eivät kuitenkaan pysty kovin tarkkaan tulokseen kun lämpötilat tai paineet vaihtelevat laajalla skaalalla kuten paineakuissa tapahtuu. Tämän takia henkilöiden Benedict, Webb sekä Rubin (BWR) kehittämä kaava on huomattavasti laajemmassa käytössä paremman tarkkuuden ansiosta [8].

Adiabaattisessa prosessissa ei tapahdu lämpöenergian vaihtoa ympäristön kanssa, minkä takia puristusvaiheessa kaikki systeemiin tehtävä työ muuttuu kaasun sisäenergiaksi. Hyvin nopeasti puristusvaiheen jälkeen kaasun sisäenergia alkaa virrata lämpöenergiana paineakun seinämiin ja seinämien kautta ulkoilmaan. Puristus- ja paisuntaprosesseissa kaasun sisäenergia muuttuu yhtä paljon, ainoastaan etumerkki vaihtuu. Tämän takia kaikki paineakun seinämiin virtaava energia on pois kaasun sisäenergiasta. Kaasun sisäenergian, ja täten lämpötilan, laskiessa kaasussa vallitseva paine laskee, kuten aikaisemmissa tutkimuksissa on todettu [1].

Vähentämällä kaasusta poistuvaa energiaa pystytään nostamaan paineakun hyötysuhdetta. Mäntäakussa on pelkällä eristämällä pystytty saavuttamaan jopa 20 % parannus hyötysuhteeseen [1]. Eristekerros on kyseissä tutkimuksissa asetettu paineakun teräksisen sisäkuoren ja ulkokuoren väliin (kuva 4) jolloin ympäristöön karkaavaa energiaa saatiin pienennettyä. Pitkällä aikavälillä paineakun kaasun ja ympäristön lämpötilat tasaantuvat, joten tutkimuksissa keskitytään muutamien minuuttien varastointiaikoihin. Tällaiset verrattain lyhyet varastointiajat ovat tyypillisiä monille hydraulijärjestelmille ja erityisesti energian talteenottojärjestelmille.



Kuva 4. Eristetyn mäntäakun poikkileikkaus

2.3 Eri paineakkujen soveltuvuus regeneraattorikäyttöön

Hydraulinesteen paineen ylittäessä paineakun kaasutilavuudessa olevan esilatauspaineen alkaa paineakussa oleva erotuselin liikkua sallien näin öljyn virtaamisen akkuun. Paineakun latautuessa kaasussa tapahtuva puristumisprosessi on hyvin lähellä adiabaattista prosessia varsinkin kun paineakun täyttyminen on nopeaa [9]. Puristuessaan kaasun lämpötilan nousu heikentää paineakun hyötysuhdetta, sillä kaasun ja sitä ympäröivien osien, kuten paineakun rungon, lämpötilaero aiheuttaa energian virtaamista kaasusta pois. Paineakun rungon lämmitessä alkaa energiaa siirtyä puolestaan paineakun ympäristöön. Energian virtaamista paineakun ympäristöön voidaan hidastaa esimerkiksi eristämällä paineakku ympäristöstä [1] tai käyttämällä regeneraattoria paineakussa [9]. Regeneraattorilla pyritään parantamaan kaasutilavuuden ominaislämpökapasiteettia, jolloin kaasun lämpötila nousee hitaammin. Paineakun rakenne vaikuttaa merkittävästi eristyksen tai regeneraattorin toteutukseen.

2.3.1 Paineakkujen eristäminen

Paineakun hyötysuhdetta voidaan parantaa vähentämällä paineakun kaasusta ympäristöön johtuvan energian määrää. Tyypillisesti paineakkujen runkorakenteita ei ole mitenkään eristetty, jolloin esimerkiksi kaasutilavuuden sekä ympäristön välissä on vain paineakun runkorakenne. Tällöin paineakun runkorakenteen materiaali muodostaa ainoan rajapinnan kaasun sekä öljyn ja ympäristön välille. Yleisesti käytetty materiaali paineakkujen rungossa on teräs, jonka lämmönjohtavuus on metalleille tyypillisesti hyvin korkea. Teräs on hyvästä lämmönjohtavuudestaan huolimatta yleinen rakennusmateriaali paineakuissa sen matalan hinnan sekä suuren lujuuden ansiosta. Suuren lujuuden ansiosta rungon seinämistä voidaan tehdä ohuet ja näin säästää materiaalikustannuksissa.

Lämpövirta materiaalikerroksen tai useamman eri materiaalista koostuvan kerroksen läpi voidaan laskea kaavan 2 perusteella.

$$\Phi = A * \frac{T_u - T_s}{\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3}} \quad (2)$$

Kaavan 2 avulla voidaan laskea lämmön johtuminen, Φ , kolmen materiaalikerroksen läpi. Kerroksilla on sama pinta-ala, joka kaavassa on muuttuja A . T_u on lämpötila ensimmäisen materiaalikerroksen pinnalla (sisälämpötila) ja T_s lämpötila viimeisen materiaalikerroksen pinnalla (ulkolämpötila). Kullakin eristekerroksella voi olla laskennassa eri paksuus (l_1 , l_2 , l_3) ja lämmönjohtavuus (λ_1 , λ_2 , λ_3).

Ympäristöön johtuvan energian määrää voidaan vähentää tietyn lämpötila-eron vallitessa, joko lisäämällä matalan lämmönjohtavuuden omaavaa eristemateriaalia runkomateriaalin rinnalle, laskemalla runkomateriaalin lämmönjohtavuutta tai kasvattamalla materiaalin kerrospaksuutta.

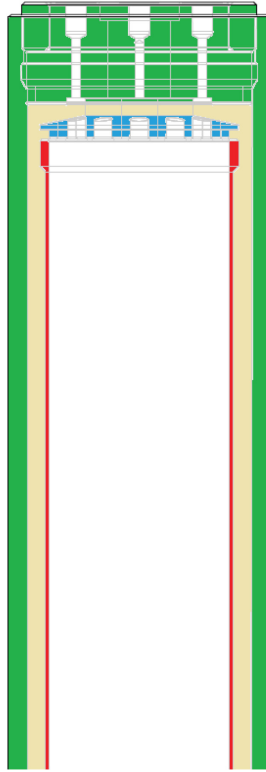
Runkomateriaalin lämmönjohtavuuden madaltaminen onnistuu esimerkiksi vaihtamalla hyvin lämpöä johtava teräs huonosti lämpöä johtavaan titaaniin. Materiaalin vaihtamisen myötä muuttuvat luonnollisesti myös materiaalin lujuusominaisuudet, jolloin turvalliset ainevahvuudet tulee laskea uudelleen. Materiaalin vaihtaminen teräksestä muuhun materiaaliin nostaa usein materiaalikustannuksia sekä muuttaa mahdollisia valmistusmenetelmiä.

Paineakun olemassa olevan runkorakenteen seinämävahvuuksien nostaminen puolestaan lisää kokonaiskonstruktion massaa sekä lisää materiaalikuluja. Paksumman seinämävahvuuden tuoma lisäeristys ja tätä kautta paineakun hyötysuhteen mahdollinen nousu kumoutuvat kuitenkin herkästi tarkasteltaessa koko järjestelmän hyötysuhdetta. Esimerkiksi työkonneissa paineakun lisääntynyt massa tarkoittaa sitä, että työkonetta liikuteltaessa joudutaan kiihdyttämään ja hidastamaan entistä suurempaa massaa. Tällöin joudutaan tinkimään työkoneen suoritusarvoista tai vaihtoehtoisesti koneen tehoa kasvatetaan, jolloin energiankulutus tyypillisesti nousee.

Rakkoakuissa kaasutilavuutta on lähes mahdoton lämpöeristää nestetilavuudesta, sillä rakon toiminnan kannalta sen on oltava joustava. Eristekerroksen lisääminen rakon seinämiin tekisi rakosta liian jäykän ja hauraan heikentäen paineakun toimintavarmuutta sekä dynamiikkaa. Rakkoakussa nestetilavuus itsessään toimii kuitenkin eräänlaisena eristeenä kaasutilavuuden ja ympäristön välissä.

Kalvoakussa on vastaava haaste neste- ja kaasutilavuuden eristämisen kanssa, mutta toisin kuin rakkopaineakussa kalvoakun kaasutilavuus on suorassa yhteydessä paineakun runkoon. Tällöin kalvoakun runko on mahdollista eristää ulkopinnastaan kohtuullisen yksinkertaisesti tai vaihtoehtoisesti kalvoakun kaasupuolen rungon voi vaihtaa erikseen tehtävään valmiiksi eristettyyn rakenteeseen. Eristetyssä rakenteessa runko voitaisiin tehdä kaksoisrakenteiseksi, jolloin eriste voitaisiin sijoittaa kerrosten väliin kuten termospulloissa. Tällaisen erikoisrungon valmistus on kuitenkin haastavaa kalvoakun muodon takia, joten valmistuskustannukset nousevat merkittävään rooliin mietittäessä eristyksen kannattavuutta.

Paineakun rungon eristämisen vaikutusta mäntäakussa on testannut muun muassa Juhala [11] tutkimuksissaan. Tutkimuksen koejärjestelyssä paineakun eristämiseen on käytetty Aspen Aerogel -yrityksen valmistamaa Aerogel-materiaalia, jonka lämmönjohtavuus on erittäin matala $14,5 - 21 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [10]. Mäntäakun rungon konstruktioita on muutettu siten, että eristemateriaali on saatu sijoitettua runkorakenteeseen sylinteriputken sekä paineakun ulkopinnan väliin (kuva 5). Eristetilavuus sylinteriputken sekä paineakun rungon välissä on konstruktiossa yhdistettynä paineakun kaasutilavuuteen. Tällöin paineen aiheuttamat voimat sylinteriputken eripuolilla kumoavat toisensa ja sylinteriputkesta voidaan tehdä kevytrakenteisempi. Kuvassa 5 on esitettyä periaatekuva kyseisen paineakun kaasupäädystä. Kuvassa paineakun rungon (vihreä) sekä sylinteriputken (punainen) väliin on asennettu eristemateriaalia (ruskea). Sylinteriputken päässä on kaasua läpäisevä päätylevy (sininen), joka mahdollistaa kaasun paineen tasaantumisen sylinteriputken ja eristetilavuuden välillä.



Kuva 5. Periaatekuva Juhalan tutkimasta eristetystä mäntäpaineakusta [11]

Aerogel-materiaalin erinomainen eristyskyky perustuu materiaalin suureen huokoisuuteen. Huokoisuus toteutetaan valmistusmenetelmällä jossa erittäin ohuista piilangoista muodostuu harva kuituverkko. Huokoisuuden avulla hyödynnetään kaasujen, kuten ilman tai tyypen, erittäin matalaa lämmönjohtavuutta. Langat itsessään ovat heikkoja lämmönjohteita ja yksittäisen langan poikkipinta-ala on hyvin pieni, jolloin lankoja pitkin johtuu hyvin vähän lämpöenergiaa. Huokoinen kuituverkko sallii kaasun virtaamisen kuitujen väliin, mutta hidastaa kaasun virtaamista kuituverkon sisällä. Kaasun virtauksien estäminen pienentää kaasussa konvektion avulla tapahtuvaa lämmönsiirtoa ja parantaa näin kerroksen lämmöneristävyyttä.

2.3.2 Regeneraattoreiden käyttö hydraulipaineakuissa

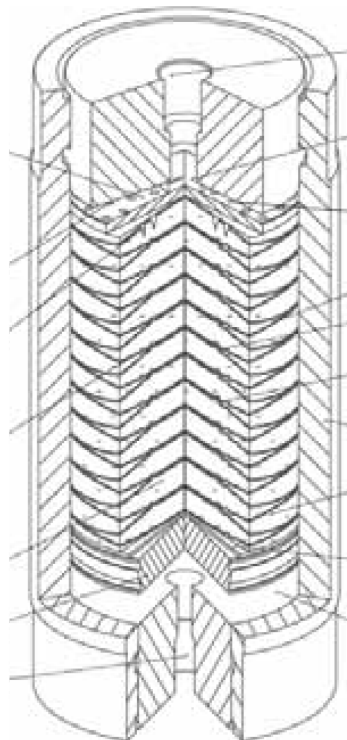
Hydraulipaineakun hyötysuhde laskee puristusvaiheen jälkeen kaasutilavuuden ja ympäristön välillä siirtyvän lämpöenergian takia. Lämpöeristyksellä pystytään hidastamaan tätä lämpöenergian siirtymistä, mutta ideaalinen eristys johtaa kaasun lämpötilan voimakkaaseen nousuun. Suuri lämpötilaero kaasun ja ympäristön välillä vaikuttaa suoraan siirtyvän energian määrään. Regeneraattoreiden avulla kaasun lämpötilan nousua pyritään hillitsemään varastoimalla lämpöenergiaa puristusvaiheessa ja vapauttamaan sama energia purkuvaiheessa. Regeneraattorit voivat myös estää kaasun vapaata virtaamista kaasutilavuudessa, jolloin lämmön siirtyminen kaasusta paineakun runkoon hidastuu.

Regeneraattorin suunnittelussa suuria haasteita muodostuu kaasutilavuuden tilavuuden vaihtelusta. Rakko- sekä kalvoakuissa kalvo puristuu kiinni paineakun öljypuolen pätyyn, öljypuolen ollessa tyhjänä. Paineakkujen täyttyessä nesteestä, erotuselimet liikkuvat puristaen kaasutilavuutta kasaan. Puristumisen aikana erotuselimen tarkkaa liikettä on hyvin vaikea ennustaa, joten kaasutilavuuden tarkkoja mittoja on hyvin vaikea arvioida tilavuuden

den muutoksen funktiona. Tämä asettaa haasteita suunniteltaessa regeneraattorin sijoittamista kalvo- tai rakkoakun kaasutilavuuteen. Kalvon sekä rakon liikkeen rajoittaminen on myös hankalaa, sillä joustava erotuselin rikkoutuu herkästi sen painautuessa liikettä rajoittavaa kappaletta vasten. Vaihtoehtoisesti regeneraattorista pitäisi tehdä joustava, jolloin se voisi liikkua ja puristua kalvon tai rakon mukana, toisaalta tämä asettaa merkittäviä rajoitteita regeneraattorissa käytettäville materiaaleille ja konstruktiolle.

Mäntäakussa männän liike voidaan laskea yksinkertaisesti sylinterin poikkipinta-alan sekä paineakkuun virtaavan öljyn tilavuuden perusteella. Tällöin männän liike voidaan öljyn tilavuusvirran ohjauksen avulla tarvittaessa rajoittaa sellaiseksi, että regeneraattori mahtuu olemaan kaasutilavuudessa. Varmempi tapa rajoittaa männän liikettä ilman tietoa akkuun virtaavasta tilavuusvirrasta on suunnitella sylinteriputkeen olake tai muu rajoitinpinta, joka estää männän liikkeen fyysisesti. Fyysinen liikkeen esto on ohjauksen avulla toteutettua liikkeenrajoitusta toimintavarmempi, mutta haittapuolena liikkeen rajoituksen muuttaminen on huomattavasti hankalampaa.

Kaasutilavuutta ei voida myöskään kasvattaa ilman että paineakun muut ominaisuudet kuten puristussuhde muuttuvat. Regeneraattorin pitäisi siis pystyä mukautumaan männän liikkeisiin. Stroganov ja Sheshin ovat kehitelleet mäntäakkuun asennettavaa metallisista lamelleista koostuvaa haitarinomaista konstruktiota, joka joustaa männän liikkeen mukaan kaasutilavuudessa (kuva 6) [12]. Tällä konstruktiolla on kyseisessä tutkimuksessa saavutettu noin 15 % hyötysuhteen nousu. Metallisen lamelliregeneraattorin syrjäyttämä kaasutilavuus sekä lamelliston rajallisen kokoonpuristuvuuden aiheuttamat rajoitukset saavutettaville puristussuhteille ovat konstruktion merkittävimmät haittapuolet. Lamelliston kokoonpuristuvuutta voidaan kasvattaa muuttamalla lamellien rakennetta, mutta tällöin lamellien liitoskohtien lujuus kärsii ja regeneraattorin toimintavarmuus heikkenee.

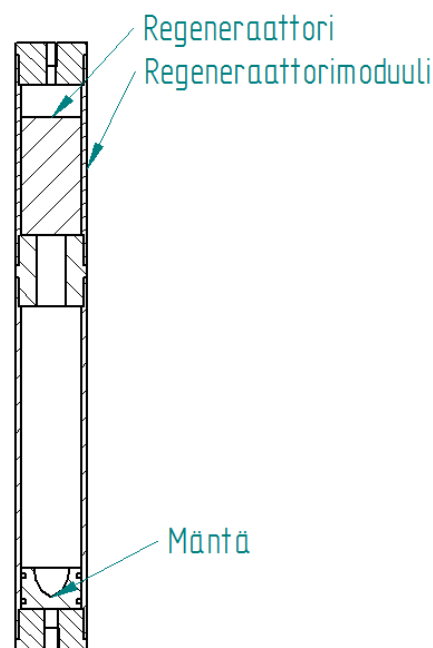


Kuva 6. Metallisista lamelleista koostuva lämpöregeneraattori mäntäpaineakussa [12]

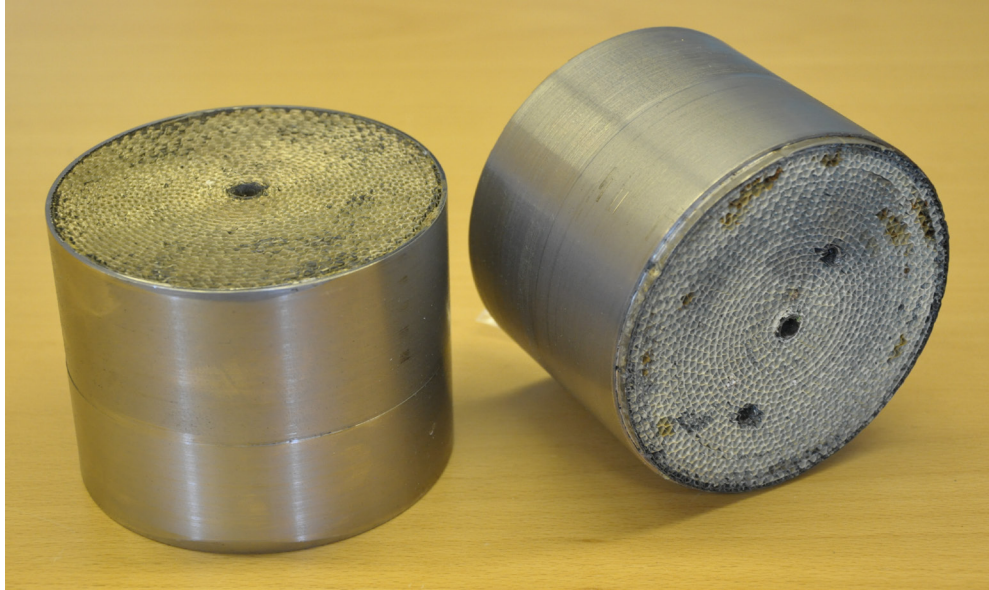
Pourmovahed [13, 14] puolestaan on kehittänyt ja testannut muun muassa avoinsoluisen (engl. open cell foam) polyesteri-uretaani-vaahdon käyttöä lämpöregeneraattorissa mäntäakun kaasutilavuudessa. Kyseisessä koelaitteistossa joustavuutensa ansiosta vaahto puristui ja laajeni männän liikkuessa paineakussa. Vaahto estää kaasun vapaan virtaamisen kaasutilavuudessa samalla mahdollistaen männän lähes täysin vapaan liikkumisen. Lämmön siirtyminen konvektiolla pois kaasusta pienenee merkittävästi kaasun vapaan virtauksen estämisellä. Tutkimuksissa vaahto säilytti 36 000 syklin jälkeen kemiallisen rakenteensa. Vaahdon rakenteelliset ominaisuudet kuitenkin muuttuivat selvästi testin aikana. Vaahdon kokoonpuristuvuus nimittäin laski 25 % lähtötilanteeseen verrattuna, joka näkyi paineakun hyötysuhteen laskuna 84 %:sta 81 %:iin. Mittauksissa käytetyn mäntäpaineakun hyötysuhde ilman regeneraattoria oli 66 %.

Toistuvien lataus- ja purkusykyjen myötä regeneraattorissa käytettävä joustava materiaali menettää rakenteellisia ominaisuuksiaan ja voi täten jopa murentua. Pienet kiinteät partikkelit ovat lisäksi merkittävä männän tiivisteiden elinikää lyhentävä tekijä. Vaurioituessaan tiivisteet päästävät kaasun ja öljyn sekoittumaan keskenään, joka voi olla erittäin vaarallista koko hydraulijärjestelmän toiminnan kannalta. Tämän takia akussa oleva regeneraattori tulisi suunnitella kestäväksi paineakun puristus- sekä purkuvaiheiden aiheuttamat kuormitukset murenematta.

Juhala [9] on tutkimuksissaan mitannut erillisen regeneraattorimoduulin toimivuutta mäntäakun yhteydessä. Juhalan käyttämässä rakenteessa normaalin mäntäakun kaasutilavuuden yhteyteen liitettiin moduuli, jonka sisällä oli metallinen hunajakennorakenne regeneraattorina. Kuvassa 7 on esitettyä kyseinen rakenteen periaatekuva. Metallinen hunajakkenno (kuva 8) koostuu kahdesta halkaisijaltaan noin 102 mm teräsputkesta, joiden sisään hunajakkenno on sijoitettu. Teräsputkien seinämänpaksuus oli noin 2 mm ja pituus 78 mm. Kennoston puolikkaat asennettiin regeneraattorimoduuliin peräkkäin ja lämpötilamittauksia varten lämpötila-anturille oli tehty poraukset hunajakkennoon.



Kuva 7. Mäntäakkuun liitetty regeneraattorimoduuli



Kuva 8. Hunajakennoregeneraattorin puolikkaat [9]

Mittauksissa todettiin erilliseen tilavuuteen asennetun regeneraattorin nostaneen mittauksissa käytetyn mäntäakun hyötysuhdetta noin 70 prosentista noin 82 prosenttiin. Regeneraattorimoduulin liitoskappale estää männän liikkumisen regeneraattorimoduulin sisään ja näin mahdollistaa myös jäykän regeneraattorimateriaalin käyttämisen. Regeneraattorimoduuli lisää paineakun kaasutilavuutta, mikä pitää ottaa huomioon käyttöarvoja laskeuttaessa. Lisääntynyt tilavuus ei vaikuta öljytilavuuden suuruuteen, koska liitoskappale pysäyttää männän samaan pisteeseen kuin ilman regeneraattorimoduulia käytettäessä.

3 Faasimuutosmateriaalit

Kaikissa energian talteenottoa hyödyntävissä järjestelmissä energian varastointimenetelmä on tärkeässä roolissa. Energiavaraston pitäisi olla mahdollisimman dynaaminen sekä kokonaiskapasiteetin pitäisi olla suuri. Energiavaraston dynamiikalla tarkoitetaan energiavaraston kykyä varastoida ja luovuttaa energiaa aikayksikössä. Nopea energian vastaanotto mahdollistaa energian talteenoton myös nopeista sykleistä kuten lyhyistä jarrutuksista ajoneuvoissa. Toisaalta syklistä saatavissa oleva energia pitäisi saada varastoitua mahdollisimman hyvin, jotta seuraavaan avustettavaan sykliin olisi saatavilla maksimaalinen energiamäärä.

Korkeaa dynamiikkaa sekä suurta kokonaiskapasiteettia harvoin kuitenkaan löytyy yhdestä komponentista yhtä aikaa, jolloin energiavarasto joudutaan kokoamaan useammasta erilaisesta moduulista. Tällöin järjestelmässä voi olla hyvin dynaamisia pienen kokonaiskapasiteetin energiavarastoja sekä näiden rinnalla suuren kokonaiskapasiteetin, mutta heikomman dynamiikan varastoyksiköitä. Tämä järjestely vaatii toimiakseen kehittyneitä ohjaus- sekä säätötekniikkaa, jotta järjestelmästä saadaan paras mahdollinen hyöty. Hänninen on tutkimuksissaan toteuttanut modulaarisen energian talteenottojärjestelmästä kurotustrukin hyötysuhteen parantamiseksi [15]. Kyseisessä järjestelmässä trukin laskusyklin aikana potentiaalienergiaa varastoidaan useaan pieneen mäntäpaineakkuun ja paineakkujen latausta ohjataan digitaalihuuliikan avulla. Digitaalihuuliikan sekä paineakun hyödyntämistä työkonoiden energian talteenottojärjestelmässä on tutkinut myös Juhala [16]. Juhalan tutkimus on keskittynyt erityisesti kyseisen energian talteenottojärjestelmän simulaatiomallin kehittämiseen ja validointiin. Juhalan tutkimuksessa toteutetulla järjestelmällä saavutettiin järjestelmässä jopa 35 % hyötysuhteen parannus testisyklissä.

Hydraulipaineakkuun toteutettavassa regeneraattorissa on otettava huomioon energian talteenottojärjestelmien tapaan regeneraattorin kyky ottaa lämpöenergiaa nopeasti vastaan sekä varastoitavan energian kokonaismäärä. Nopeasta varastointikyvystä kertoo materiaalin lämmönjohtavuus. Metallit ovat tyypillisesti hyviä lämmönjohteita kun taas kaasut ovat huonoja lämmönjohteita. Hyvä lämmönjohtavuus mahdollistaa myös paksumpien kerros-paksuuksien käytön regeneraattorissa, jolloin regeneraattorista suurempi osuus voi olla lämpöenergian varastointiin tarkoitettua materiaalia. Materiaalin ominaislämpökapasiteetti puolestaan kertoo materiaalin kyvystä varastoida lämpöenergiaa kun materiaalissa ei tapahdu faasimuutosta (kaava 3). Faasimuutoksella tarkoitetaan materiaalin olomuodon muutosta esimerkiksi kiinteästä olomuodosta nesteeksi ja päinvastoin.

$$Q = cm\Delta T \quad (3)$$

Kaavassa 3 Q tarkoittaa vastaanotettua lämpöenergiaa jouleina. Termi c on materiaalin ominaislämpökapasiteetti ja sen yksikkönä on $[J/kg\cdot K]$, m on kappaleen massa kilogrammoina ja ΔT kappaleen lämpötilan muutos Kelvin-asteina.

Materiaalin lämpötilan ollessa materiaalin sulamis- tai höyrystymispisteen kohdalla ei ominaislämpökapasiteetti yksinään riitä kertomaan kappaleeseen varastoitunutta kokonaisenergiaa. Kullakin materiaalilla on ominainen sulamislämpö (kaava 4) sekä höyrystymislämpö (kaava 5) [17].

$$Q_s = ms \quad (4)$$

Kaavassa 4 Q_s tarkoittaa kappaleen sulamiseen vaatimaa energiaa jouleina. Kappaleen massa m on kilogrammoina ja s materiaalin sulamislämpö yksikössä [J/kg].

$$Q_r = mr \quad (5)$$

Kaavassa 5 Q_r tarkoittaa kappaleen sulamiseen vaadittavaa energiaa jouleina. Kappaleen massa kilogrammoina kaavassa on m ja r materiaalin höyrystymislämpö yksikössä [J/kg].

Kappaleen lämpötilan nousu tai lasku pysähtyy edettäessä faasimuutospisteen yli. Esimerkiksi vettä keitettäessä veden lämpötilan nousu pysähtyy kiehumispisteeseen, jonka jälkeen lämpötila lähtee nousemaan vasta kaiken veden höyrystyttyä. Tätä ominaisuutta käytetään hyödyksi muun muassa kohteissa, joissa on pidettävä tasainen lämpötila [21]. Tällöin valitaan materiaali, jonka faasimuutos tapahtuu tavoitellussa lämpötilassa. Taulukossa 1 on listattuna erilaisia aineita ja näiden sulamislämmöt lämpötiloineen sekä ominaislämpökapasiteetit normaalipaineessa. Kaikki listatut yhdisteet muuttuvat faasimuutoksen aikana kiinteästä nesteeksi. Olemassa on myös orgaanisia yhdisteitä, jotka muuttuvat faasimuutoksen aikana kiinteästä kiinteäksi [18].

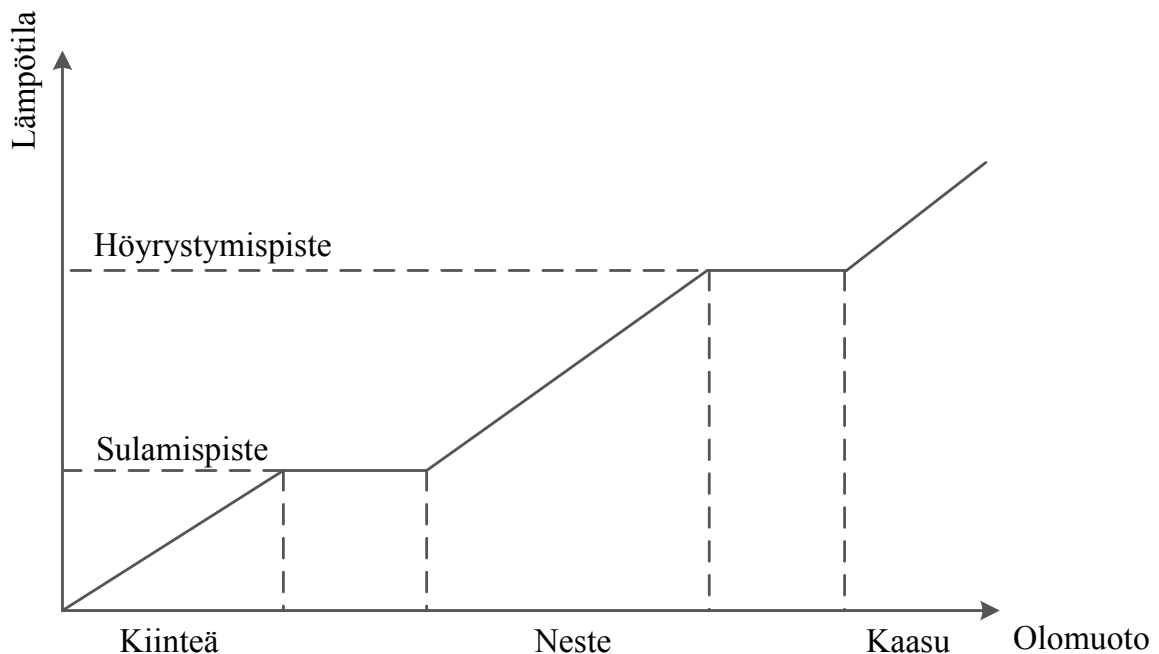
Taulukko 1. Materiaalien ominaisuuksien vertailua [19, 20]

Materiaaliryhmä	Sulamislämpötila [°C]	Sulamislämpö [kJ/kg]	Materiaaliesimerkkejä
Orgaaniset yhdisteet	- 12...+187	125-400	Parafiinit, n-alkeenit, rasvahapot, alkoholit, sokerit
Hydratut epäorgaaniset suolat	20-140	270-650	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Epäorgaaniset suolat	<150	200-500	LiNO_3 , NaNO_3 , MgCl_2 , K_2CO_3
Eutektiset metalliseokset	30-25	200-800	Bi-Pb-Cd-Sn-In metallien eutektiset seokset

Laskettaessa materiaalin vastaanottamaa kokonaislämpöenergiaa yhdistetään kaavat 3,4 ja 5, jolloin saadaan kokonaislämpöenergialle kaava 6.

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} cm dT + Q_s + \int_{T_2}^{T_3} cmdT + Q_r + \int_{T_3}^{T_4} cmdT \quad (6)$$

Kaavassa 6 T_1 on lämpötila, josta kappale alkaa lämmitä kohti sulamislämpötilaa T_2 . Lämpötilan nousu pysähtyy lämpötilaan T_2 faasimuutoksen ajaksi, jonka jälkeen kappale alkaa jälleen lämmitä kohti höyrystymislämpötilaa T_3 . Höyrystymisen jälkeen lämpötila alkaa nousta kohti loppulämpötilaa T_4 (kuva 9).



Kuva 9. Faasimuutokset

Lämpöenergiaa varastoitaessa materiaalin höyrystymispistettä ei ole järkevää ylittää höyrystymisen aiheuttaman laajenemisen takia. Kokonaisenergian laskentakaava yksinkertaistuu tämän takia muotoon, joka on esitettyä kaavassa 7. Kaasua on nestettä tai kiinteää faasia vaikeampi käsitellä sekä paineen nousu voi muuttaa astian räjähdysvaaralliseksi paineastiaksi.

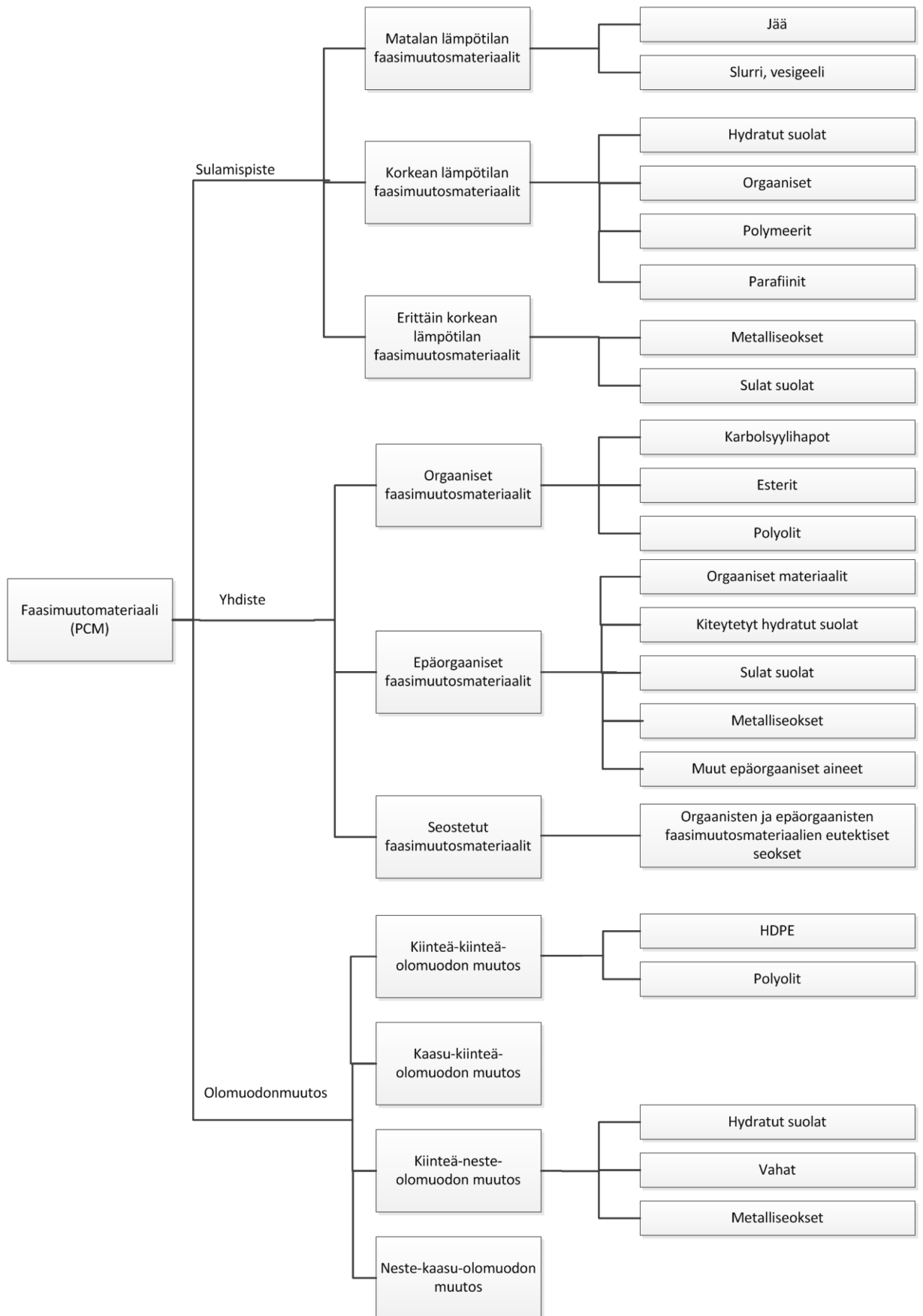
$$Q = \int_{T_1}^{T_2} cm dT + Q_s + \int_{T_2}^{T_3} cmdT \quad (7)$$

Energianvarastointiin tarkoitetuilla faasimuutosmateriaaleilla on lämmönjohtavuuden, sulamispisteen ja sulamislämmön lisäksi faasimuutosmateriaalin ominaisuuksiin vaikuttavana ominaisuutena materiaalin vanheneminen, joka tulee tarvittaessa huomioida käyttökohdeissa. Materiaalin vanhenemisella tarkoitetaan tässä materiaalin kemiallisten ja fyysisten ominaisuuksien muuttumista lämpötilasykliä myötä. Tämä vanheneminen vaikuttaa erityisesti suolaliuksissa, joissa tapahtuu faasimuutosyökyä myötä suolan saostumista liuoksesta. Sekoittamalla suolaliuosta saostuminen voidaan estää, mutta tämä tulee huomioida suunnitteluvaiheessa. Suunnittelussa konstruktion pitää tarvittaessa lisätä esimerkiksi mekanismi, joka sekoittaa suolaliuosta säännöllisesti. Jos saostumista ei estetä, heikkenee suolaliuksen sulamislämpö merkittävästi. Korroosio on suolaliuksia käsiteltäessä huomiotava esimerkiksi käyttämällä säiliömateriaalina haponkestävää terästä tai muuta hyvin korroosiota kestävä materiaalia [21].

Uusiin ja vähemmän käytettyihin faasimuutosmateriaaleihin voidaan laskea sokerialkoholeihin perustuvat liuokset sekä metallit, joilla on erittäin matala sulamispiste. Sokerialkoholien ongelmana on alijäähtymisilmiö. Alijäähtymisellä tarkoitetaan tilannetta, jossa sokerialkoholiliuos pysyy nesteinä reilusti kiteytymislämpötilaa alemmissa lämpötiloissa. Alijäähtynyt neste voi ulkoisen voiman, esimerkiksi iskun, seurauksena kiteytyä, jolloin faasimuutoksen energia vapautuu. Perinteisissä faasimuutosmateriaaleja käyttävissä järjestelmissä, kuten kylmäkuljetusjärjestelmissä, tämä ilmiö on erittäin haitallinen koska faasimuutos ei välttämättä tapahdukaan halutussa lämpötilassa. Tätä ilmiötä ja sen hyödyntämistä muissa järjestelmissä kuten pitkään varastoitavissa kylmäakuissa tai kaukolaukaistavissa kylmäakuissa tutkitaan jatkuvasti. [21]

Metalleilla on merkittävänä etuna muihin faasimuutosmateriaaleihin erittäin korkea lämmönjohtavuus. Sulamislämpö on tyypillisesti merkittävästi pienempi kuin esimerkiksi parafiineilla, mutta metallien suurempi tiheys mahdollistaa suuremman massan sijoittamisen regeneraattoriin. Metalleilla ei kuitenkaan pystytä seostamalla valitsemaan seoksen sulamislämpötilaa yhtä laajalta skaalalta kuin muilla materiaaleilla. Metalleja ja niiden seoksia käytetään yleisemmin korkeissa lämpötiloissa, joissa esimerkiksi parafiinit eivät enää pysy vakaina.

Kuvassa 9 on esitettyinä faasimuutosmateriaalien jako sulamislämpötilan, materiaalin luokan sekä faasimuutoksen perusteella. Faasimuutosmateriaalit voidaan jaotella sulamislämpötilansa, kemiallisen koostumuksensa tai faasimuutoksensa mukaisesti pääryhmiin. Jaottelun avulla kuhunkin käyttötarkoitukseen voidaan hakea sopivaa faasimuutosmateriaalien alaryhmää. Esimerkiksi käyttötarkoitukseen, jossa pyritään pitämään lämpötila lähellä nollaa celsiusastetta, voidaan jaottelun avulla todeta jään olevan käyttötarkoitukseen soveltuva materiaali. Kuvan 10 kaavio ei ole kattava luettelo olemassa olevista faasimuutosmateriaaleista vaan kustakin alakategoriasta on tuotu esille yleisimmät materiaalit.



Kuva 10. Faasimuutosmateriaalien jako luokkiin [20]

4 Regeneraattorin suunnittelu

Tässä luvussa laaditaan vaatimuslista paineakkuun toteutettavalle lämpöregeneraattorille. Lämpöregeneraattorin vaatimuslistan perusteella tutustutaan eri faasimuutosmateriaaleihin sekä lopulta esitellään työssä toteutettu lämpöregeneraattorikonstruktio.

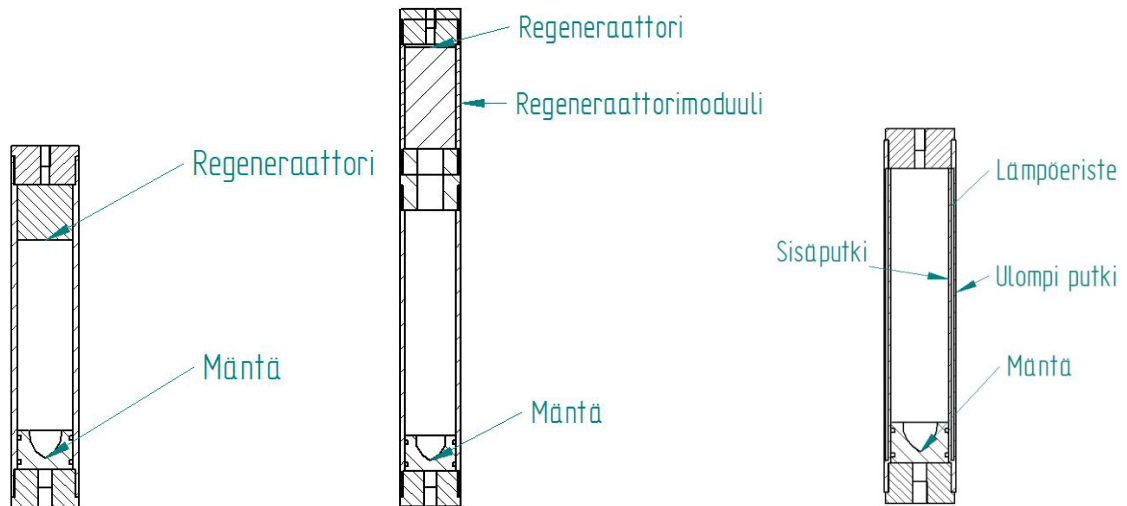
4.1 Vaatimuslista

Hydraulipaineakkuun toteutettavan regeneraattorin suunnittelu aloitettiin määrittelemällä vaatimukset ja halutut ominaisuudet toteutettavalle järjestelmälle. Regeneraattorin tulisi pystyä varastoimaan vähintään yhden puristussyklin aikana kaasutilavuudessa syntyvä lämpöenergia, jotta kaasutilavuuden lämpötilan muutos työsyklin aikana olisi mahdollisimman pieni. Faasimuutosmateriaalilla, jonka sulamispiste on valittu sopivasti ympäristön lämpötilan suhteen, pystytään hillitsemään lämpötilan nousua mahdollisimman tehokkaasti. Suunnittelussa oletetaan ympäristön lämpötilan olevan 25 °C astetta.

Suunnittelussa on käytetty työkiertona tilannetta, jossa paineakku ladataan noin 5 sekunnissa ja lataus pidetään akussa noin 80 sekuntia, jonka jälkeen akun lataus puretaan. Tämän tyyppinen työkierto on yleinen esimerkiksi käytettäessä haarukkatrukkia varastossa tavaroiden noutamiseen hyllyvarastosta. Trukissa akku ladataan tavaraa laskettaessa hyllystä ja akkuihin varastoitua latausta hyödynnetään nostettaessa seuraavaa lastia hyllyyn.

Varastoitavaa energiamäärää laskettaessa oletettiin käytettävän 5,5 litran mäntäpaineakkuja, jonka esilatauspaine on 7,5 MPa ja korkein latauspaine 25 MPa. Nopea akun lataus johtaa siihen, että puristusvaihe on hyvin lähellä adiabaattista prosessia eli lämpöenergiaa ei vaihdu puristusvaiheen aikana ympäristön ja kaasun välillä. Luvussa 2.2 esitettyjen kaavojen perusteella suunnittelussa käytetyn testiakkuun varastoidaan noin 15 kJ energiaa. Faasimuutosmateriaalia käytettäessä on energian varastointikyky suotavaa mitoittaa riittävästi yli, jotta kaikki materiaali ei pääse vaihtamaan faasiaan. Tilanteessa jossa kaikki materiaali pääsee vaihtamaan faasia alkaa materiaalin lämpötila nousta voimakkaasti, joka vuorostaan kasvattaa häviöitä paineakun seinien läpi ympäristöön. Regeneraattorin tehokkaan toiminnan takia materiaalikerrokset pidettiin mahdollisimman ohuina, jotta lämpöenergia siirtyisi tehokkaasti faasimuutosmateriaaliin.

Regeneraattorin sijoituspaikka on vapaasti valittavissa paineakun rakenteessa. Mahdollisia paikkoja ovat kaasutilavuus, kaasutilavuuden yhteyteen liitettävä erillinen moduuli tai kaasutilavuuden ulkopuolelle. Jälkimmäisessä sijoituspaikassa regeneraattori sijoittuu samaan paikkaan, missä eristetyissä paineakuissa on lämpöeriste eli sylinteriputken ja paineakun rungon väliin. Kuvassa 11 on esitettyinä kaikki kolme mahdollista sijoituspaikkaa.



Kuva 11. Regeneraattorin sijoituspaikat. Vasemmalla kaasutilavuudessa, keskellä kaasutilavuuteen liitettyssä erillisessä moduulissa ja oikealla sylinteriputken ja rungon välissä eristettynä kaasutilavuudesta

Regeneraattorin rakenteen ja materiaalin tulee kestää satoja tuhansia kuormitusyklejä ilman huollon tarvetta. Liian usein huoltoa kaipaava regeneraattori nostaa tarpeettomasti paineakun käyttökustannuksia ja aiheuttaa käyttökatoja järjestelmään, johon akku on liitetty. Mäntäakut itsessään kaipaavat hyvin harvoin huoltoa, joten edullisimmassa tilanteessa regeneraattorin huoltoväli olisi samaa luokkaa paineakun kanssa.

Taulukkoon 2 on koottu edellä mainitut regeneraattorille asetetut vaatimukset.

Taulukko 2. Regeneraattorille laadittu vaatimuslista

Vaatus	
Paineakun tyyppi	Mäntäakku
Männän halkaisija	100 mm
Paineakun tilavuus	5,5 litraa
Esilatauspaine	7,6 MPa
Latauspaine	25 MPa
Ympäristön lämpötila	25 °C
Puristusvaiheen kesto	5 sekuntia
Latauksen pitoaika	80 sekuntia
Purkusyklin kesto	4 sekuntia
Varastoitava energia	15 kJ
Huoltoväli	sama kuin itse paineakulla

4.2 Regeneraattorin materiaalin valinta

Syklin aikana varastoitavan ja luovutettavan lämpöenergian määrä asettaa suuret vaatimukset regeneraattorin materiaalille. Materiaali, jonka faasimuutos ei tapahdu kaasutilavuudessa syntyvillä lämpötiloilla kykenee varastoimaan lämpöenergiaa ominaislämpökapasiteettinsa mukaisesti. Tällöin regeneraattorin fyysiset mitat kasvavat herkästi epäkäytännöllisen suuriksi. Jotta regeneraattori saadaan tehtyä mahdollisimman kompaktiksi, on materiaalilla oltava täten korkea ominaislämpökapasiteetti tai materiaalin faasimuutoksen on tapahduttava sopivalla lämpötilalla.

Alempana toimintalämpötilana toimii vaatimuksissakin todettu ympäristön lämpötila 25 °C astetta. Kaasutilavuuden ylempi toimintalämpötila voidaan laskea riittävällä tarkkuudella kaavan 1. avulla, kun oletetaan puristuksen tapahtuvan adiabaattisesti. Laskennallisesti kaasun maksimilämpötila on 150 °C astetta. Reaalimaailman järjestelmässä lämpötila ei todennäköisesti nouse laskennalliselle tasolle, mutta regeneraattori on syytä suunnitella kestäämään teoreettinen maksimilämpötila. Maksimilämpötila ei kuitenkaan vallitse kovin pitkään, sillä lämpötilaero kaasun ja ympäristön välillä alkaa tasaantua hyvin nopeasti termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti.

Hydraulijärjestelmässä kiertävän hydrauliikkaöljyn lämpötilan voidaan odottaa nousevan 60-70 °C asteeseen. Hydraulijärjestelmiä suunniteltaessa öljyn lämpötila pyritään rajoittamaan huonoimmassakin tilanteessa 80 °C asteeseen ja normaali toiminta tämän alapuolelle. Mäntäakun männän tai rungon kautta kaasutilavuuteen virtaavan lämpöenergian määrän voidaan olettaa kuitenkin olevan pieni, sillä hydrauliakussa ei tapahdu varsinaista läpivirtausta. Neste pääsee vaihtumaan akussa, jos akun kytkentään käytettävän putkituksen tilavuus on pienempi kuin akkuun varattava öljytilavuus. Jos putkiston tilavuus on sama tai suurempi kuin akkuun ladattava tilavuus, liikkuu öljy edestakaisin putkistossa eikä pääse vaihtumaan merkityksellisessä ajassa. Tämän heikon virtauksen takia suunniteltaessa regeneraattoria ei mitoituksessa huomioida öljyn mahdollista lämmittävää tai jäähdyttävää vaikutusta.

Käytettäessä materiaaleja, jotka muuttavat muotoansa puristussyklin aikana, on suunnittelussa turvattava männän ja männäntiivisteiden oikea toiminta. Ongelmaksi voi muodostua esimerkiksi faasimuutosmateriaalin sulaminen kaasutilassa ja sulan joutuminen sylinteriputken seinämille, jossa tämä voi rikkoa männän tiivisteet männän liikkuessa. Tämän takia faasimuutosmateriaalit on koteloitava riittävän hyvin tai on valittava amorfisia materiaaleja, jotka eivät muutu nesteeksi faasimuutoksessa. Amorfisilla materiaaleilla ei ole varsinaista sulamispistettä. Lasi on tunnettu esimerkki amorfisesta materiaalista, mutta myös esimerkiksi parafiinista voidaan tehdä amorfisen seostamalla siihen sopivasti hiilikuitua [18].

Olettaen että regeneraattori pyrkisi estämään kaasutilavuuden nousun yli 30 °C asteella alkutilasta, voidaan laskea regeneraattorin fyysiset mitat eri materiaaleilla. Jos regeneraattori toteutettaisiin helposti työstettävästä ja kohtuullisen hintaisesta alumiinista, tarvittaisiin kaavan 3 perusteella alumiinin massaksi:

$$Q = cm\Delta T$$

$$m = \frac{Q}{c\Delta T} = \frac{15 \text{ kJ}}{0,897 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 30 \text{ K}} = 0,56 \text{ kg}$$

Verrattaessa tulosta esimerkiksi parafiiniin samoilla lähtöarvoilla saadaan parafiinin massa laskettua kaavan 7 perusteella:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} cm dT + Q_s + \int_{T_2}^{T_3} cmdT$$

$$m = \frac{15 \text{ kJ}}{\int_{52}^{25} 2,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} dT + 173 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,06 \text{ kg}$$

Laskennassa oletettiin kaiken parafiinin lämpenevän alkulämpötilasta faasimuutoslämpötilaan ja kaikki parafiini muutti muotoaan kiinteästä nesteeksi. Taulukkoon 3 on koottu vertailua myös muilla varteenotettavilla materiaaleilla regeneraattorikäytössä.

Taulukko 3 Regeneraattorin mitoitus

Materiaali	Ominais- lämpö [kJ/kg*K]	Sulamis- lämpö [kJ/kg]	Sulamis- piste [°C]	Lämmön- johtavuus [W/(m*K)]	massa [kg]
Alumiini	0,897	10,71	660,32	237	0,56
Teräs	0,449	13,81	1538	80,4	1,11
Kupari	0,385	13,26	1084,62	401	1,29
Parafiini RT52	2,9	173	49-52	0,22	0,06
Parafiini RT31	2,9	169	29-31	0,22	0,08
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	1,76	251	32,4	0,544	0,06
Bi _{44,7} Pb _{22,6} In _{19,1} - Sn _{8,3} Cd _{6,3}	0,197	36,8	47	>50	0,30

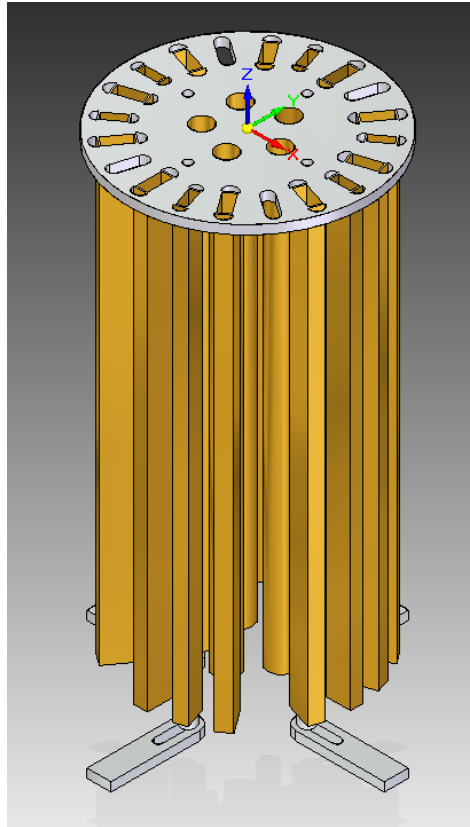
Taulukon 3 perusteella faasimuutoksen vaikutus lämmön varastointikykyyn on merkittävä. Regeneraattorin pienen massan myötä alkuperäisen paineakun massa ei kasva merkittävästi. Tästä on etua, sillä varsinkin liikkuvissa koneissa massan vähentäminen nostaa kokonaisuuden hyötysuhdetta. Tästä syystä parhaimmiksi aineiksi regeneraattorissa nousee taulukon 3 mukaisesti parafiini RT52 sekä Na₂SO₄·10H₂O suolaliuos. Parafiini on suolaliuosta vakaampi aine, koska se ei saostu suurellakaan käyttösyklimäärällä. Saostuminen voidaan korjata lisäämällä sekoitin suolaliuokseen, mutta tämä nostaa järjestelmän massaa sekä monimutkaisuutta.

Parafiinin suuri sulamislämpö, kemiallinen vakaus sekä myrkyttömyys tekevät siitä hyvän valinnan suunniteltavaan regeneraattoriin. Parafiinin suurin heikkous on sen heikko lämmönjohtavuus suolaliuoksiin tai erityisesti metalleihin verrattuna.

4.3 Toteutettu konstruktio

Regeneraattorissa käytettävän faasimuutosmateriaalin valinnan jälkeen suunnittelussa siirryttiin suunnittelemaan regeneraattorin varsinaista rakennetta. Parafiinin heikon lämmönjohtavuuden takia parafiini pitää sijoittaa regeneraattoriin ohuina kerroksina, jotta regeneraattorin dynamiikka ei heikkene liikaa. Huono dynamiikka hidastaa regeneraattorin kykyä vastaanottaa ja luovuttaa lämpöenergiaa, jolloin lämpötilat pääsevät vaihtelemaan voimakkaammin kaasutilavuudessa.

Dynamiikan parantamiseksi regeneraattori koostuu ohuista metalliputkista kootusta lämmönvaihtimesta. Rakenteessa parafiini on sijoitettu putkien sisälle. Kuvassa 12 on esitettynä tietokonemalli lämmönvaihtimesta. Lämmönvaihdin koostuu yhteensä 21 putkesta. Putkia on kolme eri kokoa ja putkien poikkileikkaukset vaihtelevat. Tällä järjestelyllä pyrittiin hakemaan tasapainoa ohuen parafiinikerrosten sekä parafiinin massan välillä.



Kuva 12. Regeneraattorin runko

Regeneraattorin konstruktiossa ei ole suljettu lämmönvaihtimen putkien yläpäätä. Tällä konstruktiolla ratkaistiin parafiinin lämpölaajenemisen sekä kaasutilassa vaikuttavan korkean paineen aiheuttamat ongelmat. Putkien ollessa avoimia toisesta päästä pääsee paine vaikuttamaan putkien sisä- sekä ulkopuolelle, jolloin putken seinämän ei tarvitse kestää painenvaihtelun aiheuttamia voimia eikä parafiini laajetessaan kuormita putkia. Konstruktiio rajoittaa kuitenkin näin ollen regeneraattorin asennuskulmaa ja tätä kautta paineakun asennuskulmaa. Kehitettäessä konstruktiota eteenpäin on tämä rajoite ratkaistava.

Metalliputket konstruktiossa ovat messinkiä ja putkien mitat sekä kappalemäärät ovat listattuna taulukossa 4.

Taulukko 4. Metalliputkien mitat ja kappalemäärät

Mitat [mm x mm x mm]	Seinämän paksuus [mm]	Kappalemäärä	Tilavuus/kpl [mm ³]
9,5x4,8x150	0,04	10	171
7,9x4,0x150	0,04	6	142
7,9x150	0,04	5	148

Regeneraattorissa parafiinin ohella myös muilla käytetyillä materiaaleilla on ominaislämpökapasiteettia, mikä on otettu huomioon kokonaisuutta arvioitaessa. Putkistoissa käytetyn messingin ohella regeneraattorissa käytettiin alumiinia päätylevyssä, johon messinkiputket on liitetty. Putkien liitoksissa sekä putkien toisen pään sulkemiseen on käytetty juotostinaa, joka koostuu pääasiassa tinasta sekä lyijystä. Juotostinan vaikutus kokonaisuuteen on erittäin pieni ja täten se voidaan jättää laskelmissa huomioimatta. Tukirakenne, jolla varmistetaan regeneraattorin asemointi paineakun sisällä, on tehty teräksestä. Taulukkoon 5 on koottu käytettyjen materiaalien massat sekä ominaislämpökapasiteetit ja kokonaisuuden vastaavat arvot.

Taulukko 5. Regeneraattorin materiaalien ominaisuudet

Materiaali	Massa [kg]	Ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg*K]	Sulamispiste [°C]
Parafiini, RT52	0,073	2,9	52
Messinki	0,239	0,375	920
Alumiini	0,029	0,897	660
Teräs	0,130	0,449	1538

Paineakussa syntyvissä lämpötiloissa ainoastaan parafiini voi saavuttaa sulamislämpötilansa. Näin ollen saadaan regeneraattoriin sitoutuvan lämpöenergian määrä laskettua, kun oletetaan parafiinin sulavan täydellisesti ja lähtötilanteessa regeneraattorin lämpötilan olevan 25 °C. Regeneraattorin loppulämpötila on tässä tilanteessa sama kuin parafiinin sulamispiste eli 52 °C.

$$Q = c_{\text{Cu}}m_{\text{Cu}}\Delta T + c_{\text{Fe}}m_{\text{Fe}}\Delta T + c_{\text{messinki}}m_{\text{messinki}}\Delta T + c_{\text{RT52}}m_{\text{RT52}}\Delta T + c_{\text{Al}}m_{\text{Al}}\Delta T + s_{\text{RT52}}m_{\text{RT52}}$$

Sijoittamalla lukuarvot saadaan Q arvoksi:

$$Q = 23 \text{ kJ}$$

Regeneraattorin varastoima energia on suurempi kuin edellisessä kappaleessa käytetty vertailuarvo 15 kJ. Näin ollen osa parafiinista jää sulamatta eikä regeneraattorin lämpötila nouse suunnittelussa käytetyllä syklillä yli parafiinin sulamispisteen. Regeneraattoriin varastoitunut lämpöenergia ennen parafiinin faasimuutosta on noin 10 kJ, joten kaiken regeneraattorin sisältämän parafiinin faasimuutokseen tarvittavan energian määrä on noin 13 kJ. Täydellisen faasimuutoksen vaatima energia on hyvin merkittävä suhteessa regeneraattorin lämmittämiseen tarvittuun energiaan ja tästä syystä faasimuutosmateriaalit soveltuvat käytettäväksi lämpövarastoina esimerkiksi juuri lämpöregeneraattorissa.

5 Koejärjestelyn kuvaus

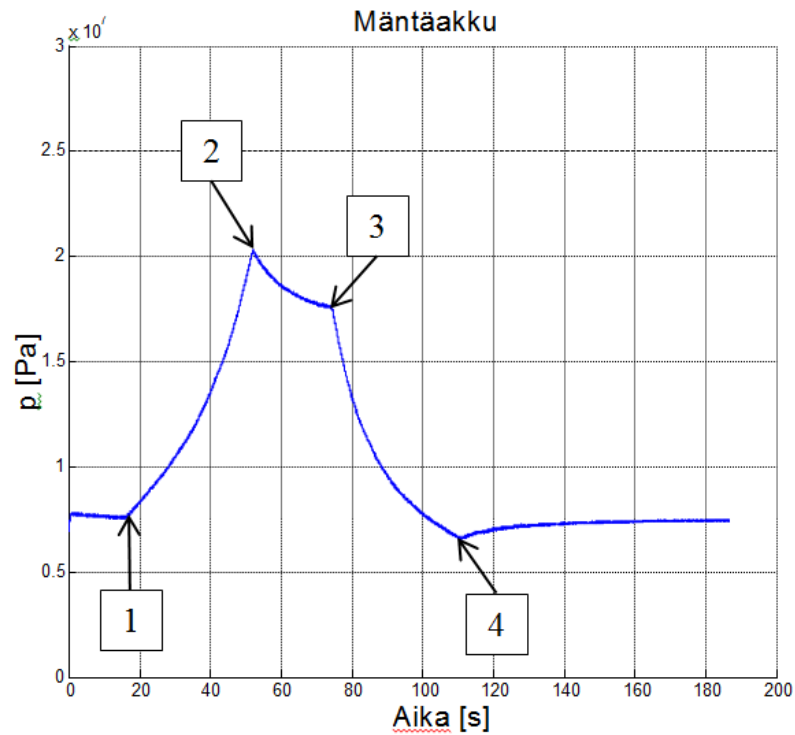
Tässä luvussa tutustutaan lämpöregeneraattorin testaamiseen käytettyyn mittausjärjestelmään sekä tarkastellaan lähemmin mittausjärjestelmän osa-alueiden toimintaa. Toiminnan lisäksi tulosten analysoinnin vaiheet käydään kunkin osa-alueen kohdalla lävitse. Osa-alueet käsittävät sekä mittausjärjestelmän tiedonkeruun, tiedonkäsittelyn ja tallentamisen sekä mittausjärjestelmän ohjausjärjestelmän.

5.1 Mittauslaitteisto

Tässä luvussa tarkastellaan työssä käytetyn mittausjärjestelmän mittaustekniikan osa-alueita sekä näistä saatavan tiedon analysoinnin vaiheet. Kultakin osa-alueelta esitellään myös tässä työssä käytetyt anturit sekä mahdolliset vahvistimet.

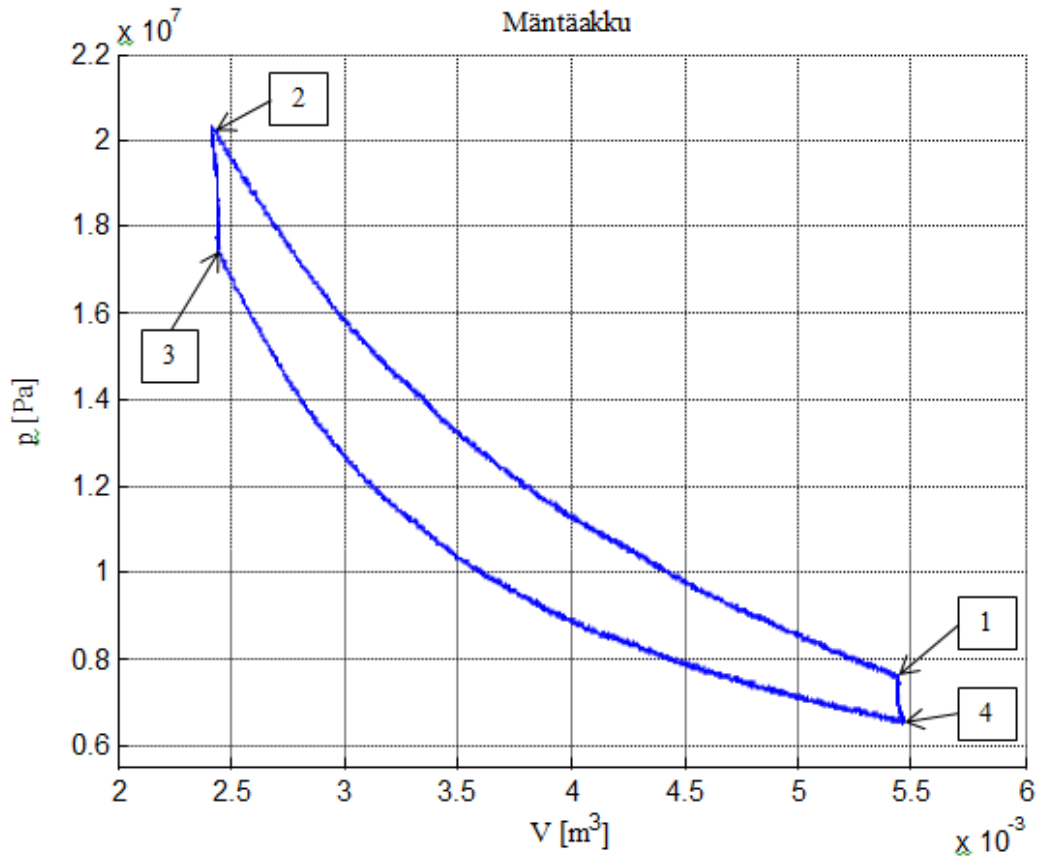
5.1.1 Paineen mittaus

Koejärjestelyssä paineakun hyötysuhde saadaan laskettua paineakun kaasutilavuudessa olevan painemittauksen avulla. Kuvassa 13 on kyseiset mittauspisteet, joiden avulla saadaan laskettua paineakun hyötysuhde puristus-purku -syklille. Kuvaajassa x-akselilla on aika ja y-akselilla paine paineakun kaasutilavuudessa. Painetasot mitataan lähtötilanteessa ennen puristusta (1), puristusvaiheen päätyttyä (2), ennen purkuvaiheen alkamista (3) sekä purkuvaiheen loputtua (4). Paineakun esilatauspaine esiintyy kuvaajan 13 kohdassa 1. Kohdassa 2 puristusvaihe on juuri loppunut ja paineakun kaasutilavuudessa oleva kaasu on lähellä korkeinta lämpötilaansa. Tämän vaiheen jälkeen lämpöenergiaa alkaa siirtyä kuumasta kaasusta viileämpään ympäristöön kuten paineakun seinämän kautta ympäristöön, männän kautta öljyyn tai regeneraattoriin tämän läsnä ollessa. Tässä vaiheessa kaasu alkaa energian siirtymisen takia jäähtyä ja, koska akkuun ei tuoda uutta öljyä, ei kaasutilavuuden koko muutu ja täten paine kaasupuolella alkaa laskea. Tämän työn mittauksissa käytettiin 60 sekunnin varastointiaikaa, jonka jälkeen alkaa purkusykli (kohta 3). Purkusyklin jälkeen paineakun kaasun lämpötila on matalampi kuin lähtötilanteessa koska vaiheiden 2 ja 3 välillä energiaa poistuu akusta ympäristöön. Männän palatessa lähtöasemaan purkusykli päättyy, jolloin painetaso kirjataan ylös. Kohdan 4 jälkeen energiaa alkaa virrata kylmään kaasuun, jonka takia paine kaasutilavuudessa lähtee nousemaan verkkaisesti.



Kuva 13. Esimerkki paineakun kaasutilavuuden painemittauksesta

Edellä mainittujen neljän mittapisteen avulla sekä paineakkuun ajettun tilavuusvirran avulla voidaan piirtää pV-kuvaaja, jossa x-akselilla on paineakun kaasutilavuuden suuruus ja y-akselilla paineakun kaasutilavuudessa vallitseva paine mitatuissa pisteissä. Kuvassa 14 on esitettyä kyseisen painemittauksen sekä kaasutilavuuden muutoksen perusteella laadittu pV-kuvaaja.



Kuva 14. Esimerkki pV-kuvaajasta

Paineakun hyötysuhde pystytään laskemaan pV-kuvaajan avulla kuvaajan sisään jäävästä pinta-alasta. Ideaalisessa tapauksessa kuvaajan pinta-ala olisi nolla, jolloin energiaa ei häviäsi prosessista työsyklin aikana.

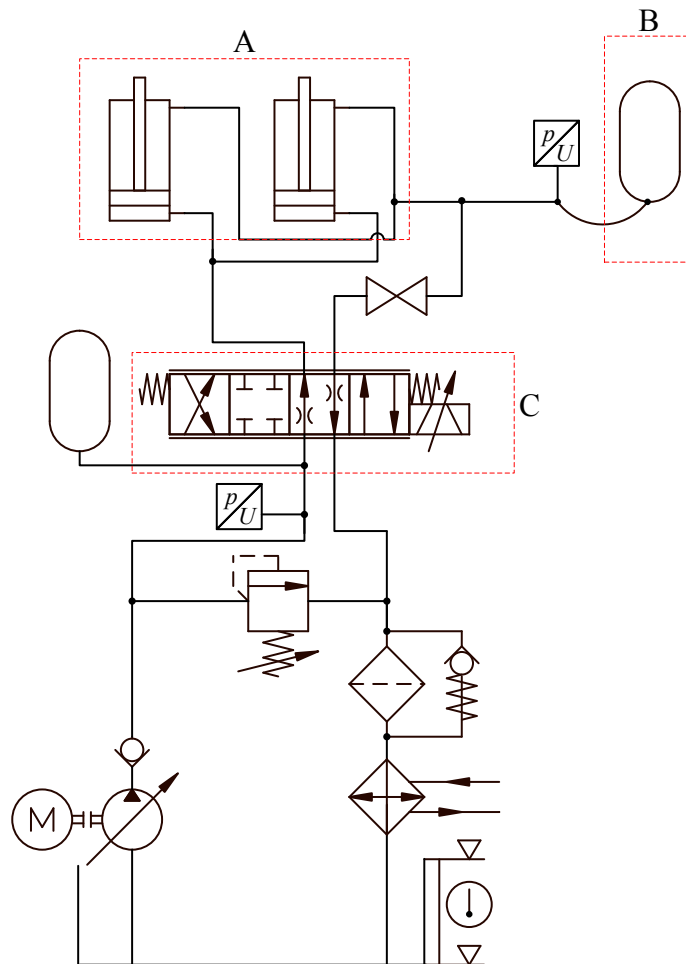
Testijärjestelmässä kaasutilavuuden painemittauksen lisäksi painetta mitattiin koneikolta tulevasta syöttölinjasta sekä paineakun öljylinjasta. Paineantureina käytettiin Kellerin PA-23S antureita, joiden mitta-alue on 0-40 MPa ja mittatarkkuus 0,25 % FS [22]. Antureiden nollapisteet asetettiin samaan arvoon ilmanpaineen avulla. Tällöin öljylinjat oli ilmattu ja yhteydessä öljysäiliöön sekä paineakun kaasutilavuus oli avoin ympäristöönsä.

5.1.2 Paineakun kaasutilavuuden mittaus

Paineakun hyötysuhteen laskemisessa paineen mittaamisen lisäksi tärkeää on mitata paineakun kaasutilavuuden muutosta työsyklin aikana. Muutosta voidaan mitata esimerkiksi paineakun männän asemaa mittaamalla suoraan tai epäsuorasti paineakkuun tulevan ja lähtevän tilavuusvirran avulla. Tilavuusvirrasta pystytään integroimaan öljypuolen tilavuus kuluneen ajan avulla.

Tämän työn testijärjestelmässä käytettiin epäsuoraa mittaumenetelmää kaasutilavuuden selvittämiseksi. Testilaitteistossa paineakku ladattiin kahden Nurmi Hydraulics:n valmistaman 63/40x1000 hydraulisylinterin avulla, eikä suoraan hydraulikoneikon painelinjasta venttiilistön kautta. Hydraulisylinterit (Kuva 15, A) olivat kytkettynä rinnan ja paineakku (Kuva 15, B) oli yhdistettynä sylintereiden miinuskammioon. Sylintereiden pluskammioon ohjattiin tilavuusvirtaa ohjausventtiilin (Kuva 15, C) avulla hydraulikoneikolta. Tällä jär-

jestelyllä paineakkuun virtaava tilavuusvirta pystyttiin selvittämään hydraulisylinterien iskunpituuden mittauksella. Iskunpituutta mitattiin Wenglor OY1P303P0102 laseretäisyysmittarilla, jonka toiminta perustuu valon edestakaisen kulkuajan mittaamiseen anturin ja kohteen välillä [23]. Testijärjestelmän hydraulikaavio on esitetty kuvassa 15. Hydraulisylinterien ollessa vuodottomia pystyttiin paineakkuun virrannut öljyn määrä laskemaan sylinterien männän halkaisijan, 63 mm, varren halkaisijan, 40mm, sekä iskunpituuden, 0-1000 mm, avulla.



Kuva 15. Hydraulijärjestelmän kaaviokuva

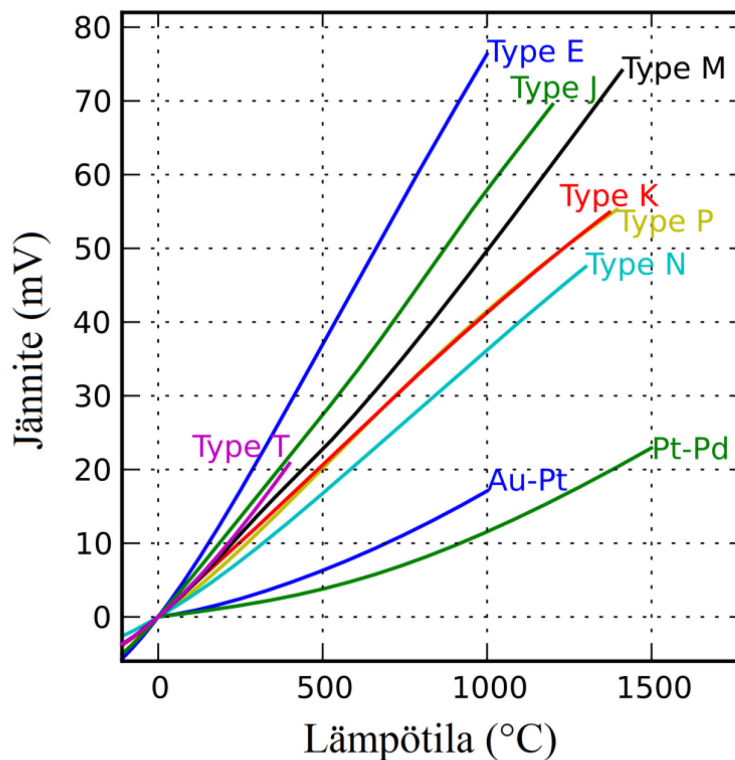
Paineakun hyötysuhteeseen vaikuttaa myös paineakun lataus- sekä purkusyklin nopeus eli tilavuusvirran suuruus. Hyötysuhde laskee tyypillisesti tilavuusvirran kasvaessa. Iskun mittauksen avulla testijärjestelmässä toteutettiin mittaustietokoneessa PI-säädin, jonka avulla tilavuusvirta pystyttiin pitämään kussakin testisyklissä pyydetyssä arvossa.

5.1.3 Lämpötilan mittaus

Paineakun puristus- ja purkusyklin aikana erityisesti paineakun kaasutilavuuden lämpötila vaihtelee voimakkaasti. Puristus- ja purus- ja purkusyklin aikana erityisesti paineakun kaasutilavuuden lämpötila vaihtelee voimakkaasti. Puristus- ja purus- ja purkusyklin aikana erityisesti paineakun kaasutilavuuden lämpötila vaihtelee voimakkaasti. Puristus- ja purus- ja purkusyklin aikana erityisesti paineakun kaasutilavuuden lämpötila vaihtelee voimakkaasti. Puristus- ja purus- ja purkusyklin aikana erityisesti paineakun kaasutilavuuden lämpötila vaihtelee voimakkaasti.

pienentämään tätä kaasun lämpenemistä ja näin vähentämään energian virtausta kaasusta ympäristöön. Regeneraattorin aiheuttaman kaasun lämpenemisen muutoksen mittaamiseksi kaasutilavuuteen sijoitettiin yksi K-tyyppin (Type K) termoelementtianturi. Lisäksi paineakun kuoren lämpenemisen mittaamiseksi paineakun ulkopintaan asetettiin kolme K-tyyppin termoelementtianturia. Yksi anturi kiinnitettiin regeneraattorin kohdalle, toinen noin puoleenväliin paineakkua ja viimeinen lähelle paineakun öljypäätä.

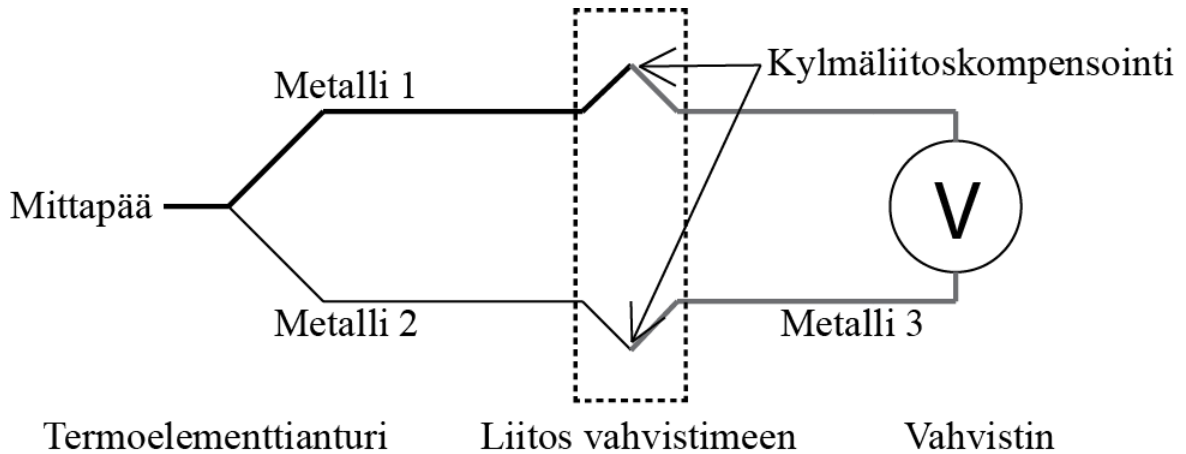
Termoelementtianturit perustuvat lämpösähköilmiöön, jossa johtimeen muodostuu jännite johtimen päiden ollessa eri lämpötiloissa. Jännite riippuu johtimessa käytettävästä metalliparista. Tämän takia termoelementtiantureissa käytetään metallipareja, joiden välille syntynyt jännite lämpötilan funktiona on hyvin ennustettava sekä toistettava. Hyvän ennustettavuuden lisäksi on huomioitava metalliparin muut ominaisuudet kuten maksimi- ja minimikäyttölämpötila. Yleisin käytössä oleva termoelementtityyppi on K-tyyppi, jonka käyttölämpötila on tyypillisesti välillä $-200\dots+1350\text{ }^{\circ}\text{C}$. K-tyyppin termoelementissä metalliparin muodostaa NiCr- sekä Al-Ni-Mn-Sn - seokset. Näiden metalliseosten välille muodostuu noin $41\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ jännite lämpötilan funktiona. Kuvassa 16 on esitettyä mittausjärjestelmissä käytettyjen termoelementtityyppien jännite lämpötilan funktiona. Kuvassa termoelementtiantureista käytetään näiden englanninkielisiä nimityksiä, sillä nämä nimitykset ovat vakiintuneita termejä termoelementtiantureista puhuttaessa.



Kuva 16. Termoelementtityyppien jännite lämpötilan funktiona [24]

Termoelementtimittauksessa anturin toinen pää viedään mitattavaan kohteeseen ja toinen pää kytketään tyypillisesti termoelementtivahvistimeen. Vahvistimen tehtävänä on vahvistaa termoelementissä syntynyt jännite korkeammalle ja näin helpommin mitattavalle tasolle. Vahvistimen tehtävänä on vahvistuksen lisäksi suorittaa niin sanottu kylmäliitoskompensointi, sillä termoelementissä syntyy jännitteitä myös vahvistimen metalliliitosten ja termoelementin välillä. Vahvistimen tulee näin ollen tietää oma lämpötilansa, jotta se kyke-

nee kompensoimaan omassa päässä syntyvät häiriöjännitteet ja näin antamaan varsinaisen mitattavan pään lämpötilan. Kuvassa 17 on esitettyä periaatekuva termoelementtiparin kytkennästä termoelementtivahvistimeen ja vahvistimessa oleva kylmäliitoskompensointi.



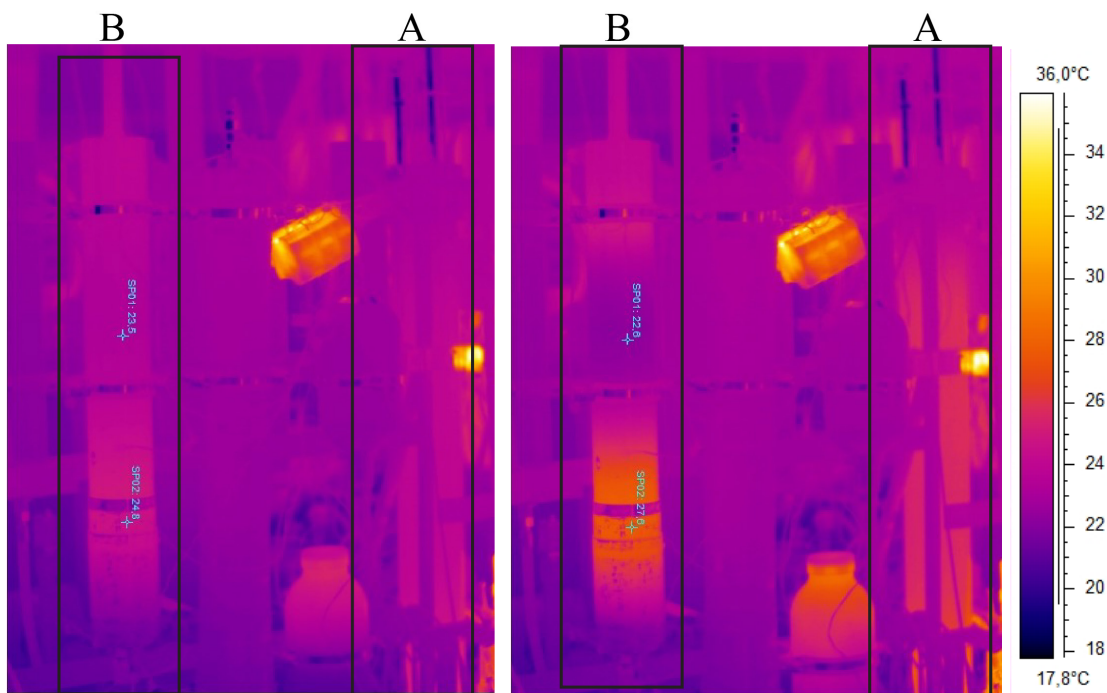
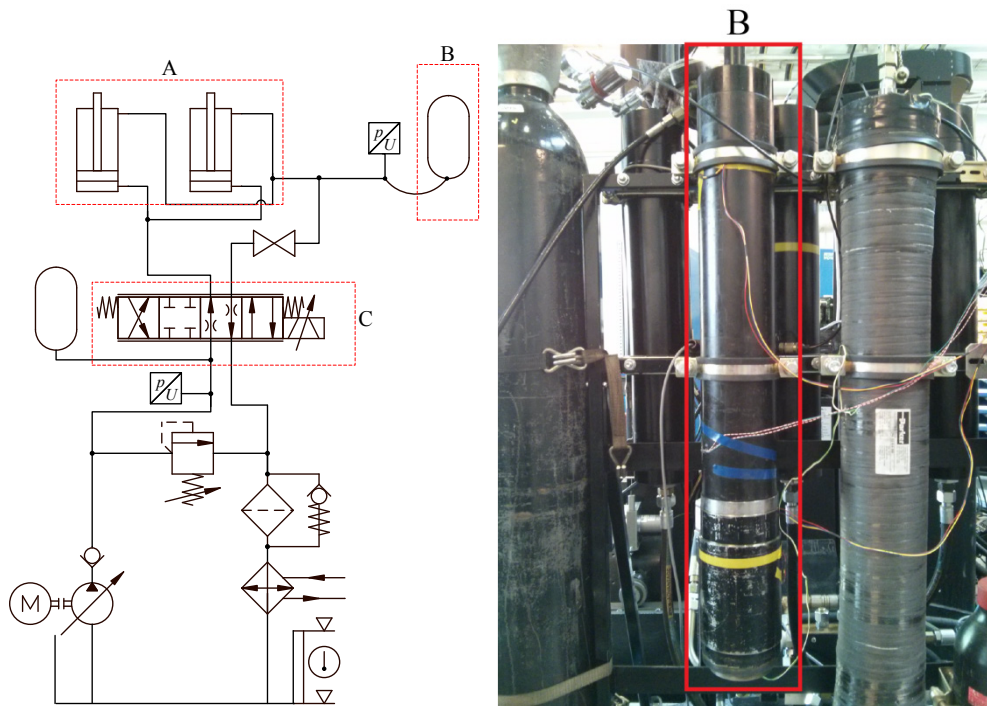
Kuva 17. Termoelementtianturin kytkentä vahvistimeen

K-tyyppin termoelementtien vahvistimina käytettiin koejärjestelyssä Nokeval:n valmistamia Nokeval 6821 lähetinyksiköitä. Lähetinyksikköön voi kytkeä termoelementtiantureita tai muun muassa Pt100 lämpötila-antureita. Lämpöanturin tyyppi ohjelmoidaan lähetinyksikköön, minkä jälkeen lähetin käsittelee ja vahvistaa anturilta saatavan signaalin ja lähettää sen eteenpäin joko jännite- tai virtaviestinä. Lähetinyksikön avulla anturit voidaan myös kalibroida tunnettujen lämpötilojen avulla joko yhdessä tai kahdessa pisteessä. Lähetinyksikön avulla pystytään tarvittaessa myös suorittamaan yksinkertaisia funktioita ja lähettämään käsitelty signaali eteenpäin. Tällöin ei vastaanottavassa päässä tarvita ylimääräistä laskentatehoa ja täten tullaan toimeen yksinkertaisemmalla järjestelmällä.

Tässä koejärjestelyssä ei termoelementtiantureilta saatavaa signaalia käsitelty kalibrointia lukuun ottamatta lähetinyksikössä. Kalibrointi suoritettiin kullekin termoelementtianturille erikseen ja referenssilämpötiloina käytettiin jää-vesi-seosta, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, sekä kiehuvaa vettä, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nokeval lupaa lähetinyksikölle $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lineaarisen virhemarginaalin käytettäessä K-tyyppin termoelementtiä lämpötila-alueella $-150\dots 1370\text{ }^{\circ}\text{C}$ [25]. Anturilta tulevan jännitteen lähetinyksikkö muuntaa koejärjestelmässä $0\dots 10\text{ V}$ jännitesignaaliksi.

Termoelementeillä suoritettujen lämpötilamittausten lisäksi paineakun ulkopinnan lämpötilaa mitattiin Flir:n valmistamalla SC660 lämpökameralla ja kuvien analysointiin käytettiin Flir ThermaCam Reseacher Pro -ohjelmistoa. Lämpökamera soveltuu termoelementtejä paremmin laajojen pintojen lämpötilan mittaamiseen, sillä kamera mittaa koko kuva-alaltaan saapuvan infrapunasäteilyn voimakkuuden ja tallentaa sen. Kappaleiden säteilymän infrapunasäteilyn voimakkuuteen vaikuttaa lämpötilan lisäksi kappaleen pinnan emissiviteetti. Kappaleen pinnan emissiviteetti kuvaa pinnan kykyä absorboida siihen osuvaa säteilyä ja emissiviteetin arvo, ϵ , voi vaihdella välillä 0-1. Ideaalisen mustan kappaleen pinnan emissiviteetti on yksi eli se ei heijasta lainkaan siihen saapuvaa säteilyä. Esimerkiksi puuhiilen emissiviteetti on hyvin lähellä yhtä. Kiiltävä metallipinta puolestaan heijastaa tehokkaasti siihen osuvaa säteilyä ja tämän takia sen emissiviteetti on pieni. Ideaalinen musta kappale asettuu ympäristönsä kanssa termiseen tasapainoon, jolloin kappaleen pinnan säteilyspektri riippuu vain kappaleen lämpötilasta [26].

Kun pinnan emissiviteetti tunnetaan, voidaan sen ja mitatun infrapunasäteilyn avulla laskea pinnan lämpötila. Lämpökameran kalibroinnissa paineakun pinnan emissiviteetiksi mitattiin 0,95. Emissiviteetin määrittämisen tukena käytettiin termoelementteiltä saatua lämpötilaa, jota pidettiin referenssiarvona. Lämpökameran mittatarkkuus on termoelementtiantureita heikompi. Flir lupaa kyseiselle kameralle mitta-alueeksi $-40\dots+1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja tarkkuudeksi $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ tai $\pm 2\text{ }\%$ lukemasta [27]. Kuvassa 18 on esitettyinä lämpökameralla otetut kuvat koejärjestelmästä ennen paineakun puristussykliä sekä purkussyklin jälkeen. Kuvissa näkyvät tutkittavan paineakun sekä työsylintereiden lisäksi lämpiminä näkyvät myös oikealla ylhäällä termoelementtien lähetinyksiköt sekä etenkin puristusvaiheen jälkeen oikealla alhaalla sijaitseva paineakku, joka tasaa paineen vaihteluita ohjausventtiilin syöttölinjassa.



Kuva 18. Testijärjestelmän hydraulikaavio (ylhäällä vasemmalla), mitattava paineakku (ylhäällä oikealla) sekä lämpökamerakuvat paineakusta ennen puristussykliä (alhaalla vasemmalla) ja purkussyklin jälkeen (alhaalla oikealla)

5.1.4 Tiedonkeruu- ja ohjausjärjestelmä

Tiedonkeruu- ja ohjausjärjestelmien tärkeimpiä ominaisuuksia ovat luotettavuus ja ennustettavuus. Mittauksia tehtäessä on voitava luottaa siihen, että tiedonkeruujärjestelmä saa tallennettua kaiken tarvittavan tiedon halutulla näytteenottotaajuudella. Aikakriittisissä

järjestelmissä tiedonkeruujärjestelmän näytteenottotaajuuden vaihtelu tai näytteiden häviäminen voi pahimmassa tapauksessa pilata koko mittauksen. Samoin ohjausjärjestelmän on pystyttävä luotettavasti noudattamaan ohjelmointiaan ja näin ohjaamaan mittausjärjestelmää luotettavasti.

Ohjausjärjestelmissä itse järjestelmän luotettavuus ei takaa haluttua toiminnallisuutta, sillä ohjelmointivirheitä voi syntyä eikä ohjausjärjestelmä usein pysty itsenäisesti tunnistamaan näitä virheitä. Tämän takia ohjausjärjestelmän simulointi ja testaus ennen kytkemistä varsinaiseen testijärjestelmään on tärkeää. Simuloinnin ja testauksen aikana voidaan huomata mahdolliset virheet ja epäloogisuudet, joita ohjelmoinnissa on saattanut syntyä ja näin estää vaaratilanteet testijärjestelmää ajettaessa.

Laajemmissa ja erityisesti aikakriittisissä testijärjestelmissä tiedonkeruu- ja ohjausjärjestelmät toteutetaan usein reaaliaikatiekoneiden avulla. Reaaliaikatiekoneissa käytetään erityisiä reaaliaikakäyttöjärjestelmiä, joissa on keskitytty erityisesti käyttöjärjestelmän keveyteen ja vakauteen. Kyseisissä käyttöjärjestelmissä on karsittu graafinen käyttöliittymä, jos sitä on lainkaan. Tämä on esimerkki siitä, miten karsittuja reaaliaikakäyttöjärjestelmät ovat. Ne on suunniteltu ainoastaan suorittamaan niihin ohjelmitua ohjelmaa ja suorittamaan taustalla hyvin minimaalisia prosesseja. Tästä syystä reaaliaikatiekoneiden kanssa on usein käytössä erillinen työasema, jolla suoritetaan niiden ohjelmointi ja tiedonsiirto koneiden välillä. Tästä järjestelystä johtuen reaaliaikatiekoneita kutsutaan usein orjako-neiksi ja niitä ohjelmoivaa työasemaa isäntäkoneeksi.

Tämän työn testijärjestelmässä tiedonkeruu- ja ohjausjärjestelmä toteutettiin käyttäen reaaliaikatiekoneetta. Reaaliaikatiekoneen käyttöjärjestelmäksi valittiin MathWorks:n xPC Target - käyttöjärjestelmä [28], jonka ohjelmointiin käytetään niin ikään MathWorks:n graafista ohjelmointi- ja simulointiohjelmistoa Simulink:iä, joka on saman yrityksen Matlab-ohjelmiston lisäosa [29,30]. Matlab-ohjelmistolla käsiteltiin sekä analysointiin kerättyä tietoa.

Simulink-ohjelmiston avulla toteutettu testiohjelma keräsi antureilta tulevia signaaleja ja käsitteli ne sopivaan muotoon ohjausjärjestelmän käyttöä sekä tallentamista varten. Ohjelma suoritti pyydettyjen toimintojen ja antureilta kerättyjen signaaleiden perusteella myös testijärjestelmän ohjauksen. Hydraulijärjestelmän ohjausta varten järjestelmässä oli Parke-rin valmistama D_fplus-proportionaaliventtiili. Proportionaaliohjausventtiilin avulla öljyn virtausta hydraulisyylintereille, ja tätä kautta paineakulle, pystyttiin säätelemään testien vaatimalla tarkkuudella.

Tietokoneet käsittelevät diskreettiä digitaalista tietoa, mutta antureilta tulevat ja ohjaukseen tarvittavat signaalit ovat usein analogisessa muodossa. Digitaalisen ja analogisen maailman yhteensovittamiseksi tarvitaan analogi-digitaali-muuntimia (A/D-muunnin) sekä digitaali-analogi-muuntimia (D/A-muunnin). Tietokoneeseen liitettäviä A/D- sekä D/A-muuntimia sisältäviä laitteita kutsutaan yleisesti mittakorteiksi.

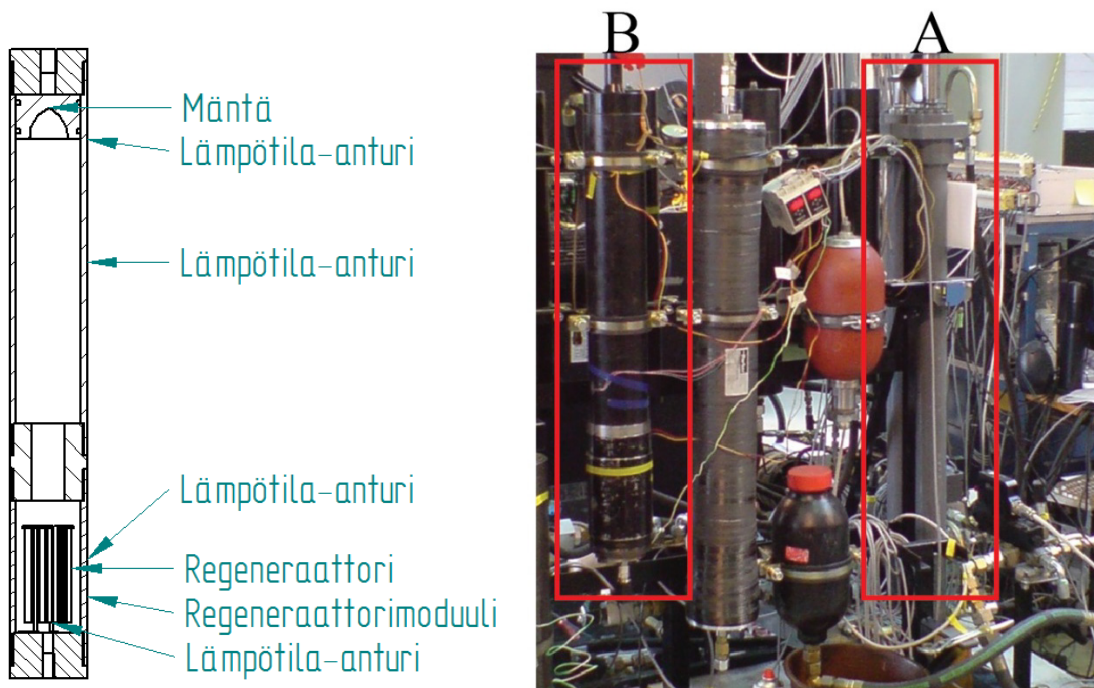
A/D-muuntimien avulla antureilta tulevat jännite- tai virtaviestit pystytään muuntamaan tietokoneen ymmärtämään digitaaliseen muotoon. D/A-muunnin toimii käänteisesti A/D-muuntimeen verrattuna eli se muuntaa tietokoneen digitaalisen viestin jänniteviestiksi jota voidaan käyttää esimerkiksi toimilaitteiden, kuten ohjausventtiilin, ohjaamiseen. A/D-muuntimien tärkeimpiä ominaisuuksia ovat niiden muunnokseen käyttämä bittimäärä sekä korkein näytteenottotaajuus. Muunnokseen käytettävä bittimäärä vaikuttaa suurimpaan mahdolliseen resoluutioon johon A/D-muunnin pystyy sisään tulevan signaalin jakamaan. Esimerkkinä A/D-muunnin, jonka sisääntulo on 0...+10V ja muunnokseen on käytettävissä 16 bittiä eli suurin käytettävissä oleva luku on 65536. Tällöin koko sisääntulon kuvaami-

seen on käytettävissä 65536 lukua ja täten yksi yksikkö tietokoneella vastaa sisääntulossa 0,15 mV jännitettä. Näytteenottotaajuus puolestaan kertoo miten usein sisään tulevan signaalin arvo pystytään lukemaan ja tulkitsemaan aikayksikössä.

Tässä työssä reaaliaikatiетokoneen yhteyteen oli asennettu National Instrumentsin valmistama PCI-6733-mittakortti. D/A-muunnosta varten sekä PCI-6031E-mittakortti A/D-muunnoksia varten. PCI-6733-mittakortissa on 8 analogista jänniteulostuloa sekä 8 digitaalista sisään/ulos-tulolinjaa. Analogisia ulostuloja mittakortti kykenee näytteistämään miljoona kertaa sekunnissa ja digitaalisia linjoja puolestaan 10 miljoonaa kertaa sekunnissa. Analogisissa ulostuloissa on muunnokseen käytettävissä 16 bittiä ja jänniteulostuloissa on korkeintaan ± 10 V. PCI-6031E-mittakortissa puolestaan on 32 differentiaalista jännitesisääntuloa, ja kortin näytteenottotaajuus on korkeintaan 100 000 näytettä sekunnissa käyttäen 16 bittistä A/D-muunnosta. Jännitealue sisääntuloissa on korkeintaan ± 10 V. [31, 32]

5.2 Koejärjestely

Koejärjestelmässä käytettiin mäntäpaineakkaa, jonka nimellinen kaasutilavuus oli 4 litraa. Paineakun todellinen kaasutilavuus oli kuitenkin suurempi paineakkuun asennetun lisäosan takia. Regeneraattorimoduulin tuoma lisätilavuus oli noin 2 litraa, jolloin paineakun kokonaistilavuudeksi muodostui noin 6 litraa. Lisäosan sisälle pystyttiin mittauksissa asentamaan suunniteltu regeneraattori eikä näin ollen paineakun männällä ollut vaaraa törmätä regeneraattoriin. Regeneraattorin syrjäyttämä tilavuus muuttaa kaasutilavuuden suuruutta ja tämä huomioitiin mittauksia suoritettaessa. Perinteisesti paineakut asennetaan pystyyn niin että kaasutilavuus on paineakussa yläpuolella. Koejärjestelyssä paineakku on kuitenkin asennettu öljypuoli ylöspäin, jotta paineakun sisällä kaasu virtaisi luontaisen konvektion ansiosta paremmin regeneraattorin ympärillä. Kuvassa 19 on esitetty poikkileikkauskuva paineakusta, jossa näkyy regeneraattorin sijainti regeneraattorimoduulin sisällä sekä termoelementtiantureiden sijainti paineakun sisällä ja ulkopinnassa.



Kuva 19. Regeneraattori asennettuna paineakkuun (vasemmalla) sekä valokuva koejärjestelmästä

Koko koejärjestelmän hydraulikaavio on esitetty kuvassa 15. Koejärjestelmässä paineakku (kuvassa 19 kohta B) ladataan kahden rinnan kytketyn sylinterin (kuvassa 19 kohta A) avulla. Sylinterien varret on kiinteästi kytketty toisiinsa, jolloin sylinterit liikkuvat pakotetusti samassa tahdissa. Sähköisesti ohjatulla proportionaaliventtiilillä ohjataan sylintereiden +-kammion tilavuusvirtaa. Sylintereiden iskuä mitataan laser-etäisyysanturilla, jonka avulla voidaan laskea paineakkuun virtaavan nesteen määrä kun sylinterin mitat tunnetaan. Sylintereissä tapahtuu paineenlennys, sillä männän varren puolella oleva rengaspinta-ala on pienempi kuin +-kammion puolella oleva pinta-ala männänvarren pinta-alan takia. Tästä syystä tarvitaan painemittaus myös paineakulle lähtevään öljylinjaan proportionaaliventtiilille tulevan syöttöpaineen mittauksen lisäksi. Öljyn paineen mittauksen lisäksi paineakussa mitattiin kaasutilavuuden painetta erillisellä kaasupäätyyn asennetulla paineanturilla.

Paineakun öljypuolen ilmaus pystytään suorittamaan avaamalla käsiventtiili, joka avaa yhteyden paineakulta proportionaaliventtiin läpi tankkilinjan. Ilmaus tulee suorittaa aina, kun paineakun liitännät ovat olleet auki ja järjestelmään on päässyt ilmaa. Jos ilmausta ei suoriteta, esiintyy järjestelmässä epätoivottua joustoa johtuen ilman suuresta kokoonpuristuvuudesta.

Taulukossa 6 on kuvattu kokonaisuudessaan tämän työn mittaus- ja ohjausjärjestelmän sisältämät anturit, toimilaitteet sekä tietojen tallentamiseen ja käsittelyyn tarvittavat komponentit ja laitteet.

Taulukko 6. Yhteenveto mittaus- ja ohjausjärjestelmästä

Tehtävä	Komponentti/laite	
Painemittaus	Keller PA23S, 3 kpl	
Lämpötilamittaus	Termoelementti, K-tyyppi, 4 kpl	Nokeval 6821 termoelementtivahvistin, 2 kpl
	Flir SC660 lämpökamera	
Etäisyydenmittaus	Wenglor OY1P303P0102, 1 kpl	
Mittakortit	NI PCI-6733, D/A-muunnin	
	NI PCI-6031E, A/D-muunnin	
Reaaliaikakäyttöjärjestelmä	MathWorks xPC Target	
Ohjausventtiili	Parker DFPlus, proportionaalisuuntaventtiili	
Ohjelmointi sekä tietojen analysointi	Mathworks Simulink Mathworks Matlab, Flir ThermaCam Researcher Pro	

6 Tulokset

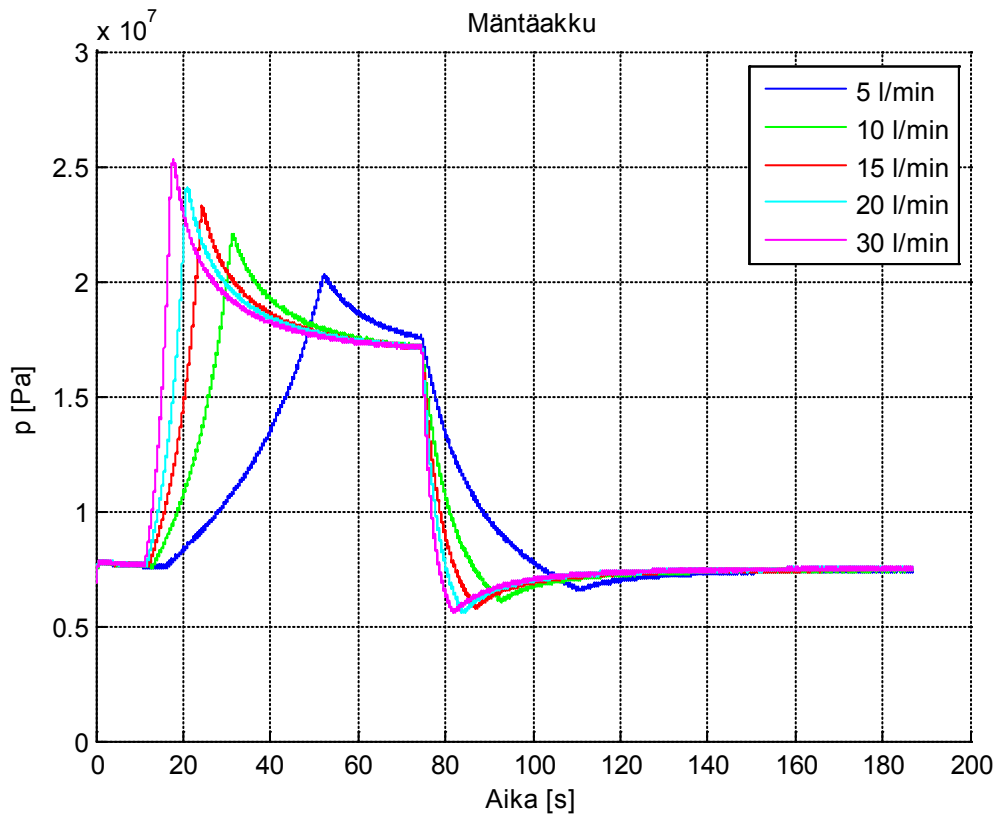
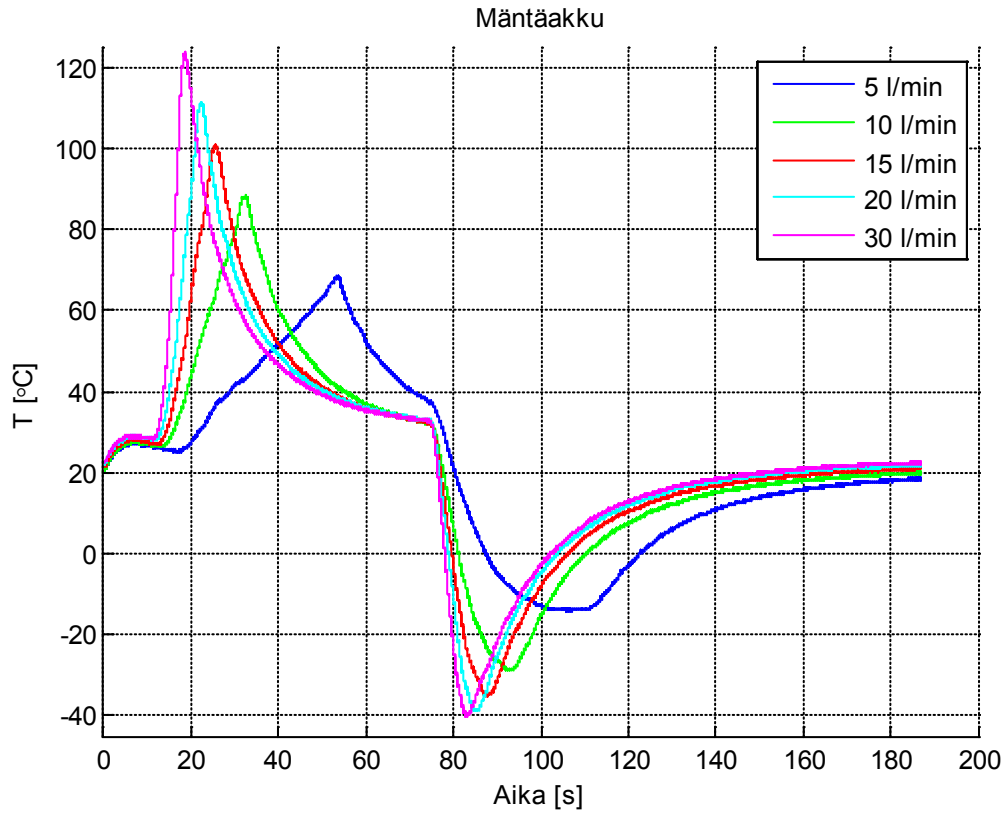
Mittaussarjat suoritettiin käyttäen tutkittavaa paineakkua ilman regeneraattoria paineakun sisällä sekä parafiiniregeneraattori asennettuna. Parafiiniregeneraattorin toimivuutta verrattiin Juhalan suunnittelemaan hunajakennon rakenteeseen [9] perustuvaan regeneraattoriin. Juhalan mittaustuloksia ei käytetty suoraan vertailuarvoina, koska testijärjestelmässä oli tapahtunut muutoksia ja näiden vaikutus tahdottiin poistaa mittaustuloksista, joten mittaukset suoritettiin uudestaan käyttäen Juhalan regeneraattoria. Ainoastaan tilavuusvirtaa vaihdeltiin mittausten välillä ja muut muuttujat pyrittiin pitämään vakiona. Mittausten välillä paineakun sisälämpötilan annettiin tasoittua lähelle alkuarvoa, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia. Taulukossa 7 on esitettynä koesarjojen parametrit.

Regeneraattoreiden aiheuttama kaasutilavuuden muutos on huomioitu mittauksissa muuttamalla alkutilanteen öljytilavuutta sekä asettamalla esilatauspaine samaan arvoon kuin vertailumittauksissa.

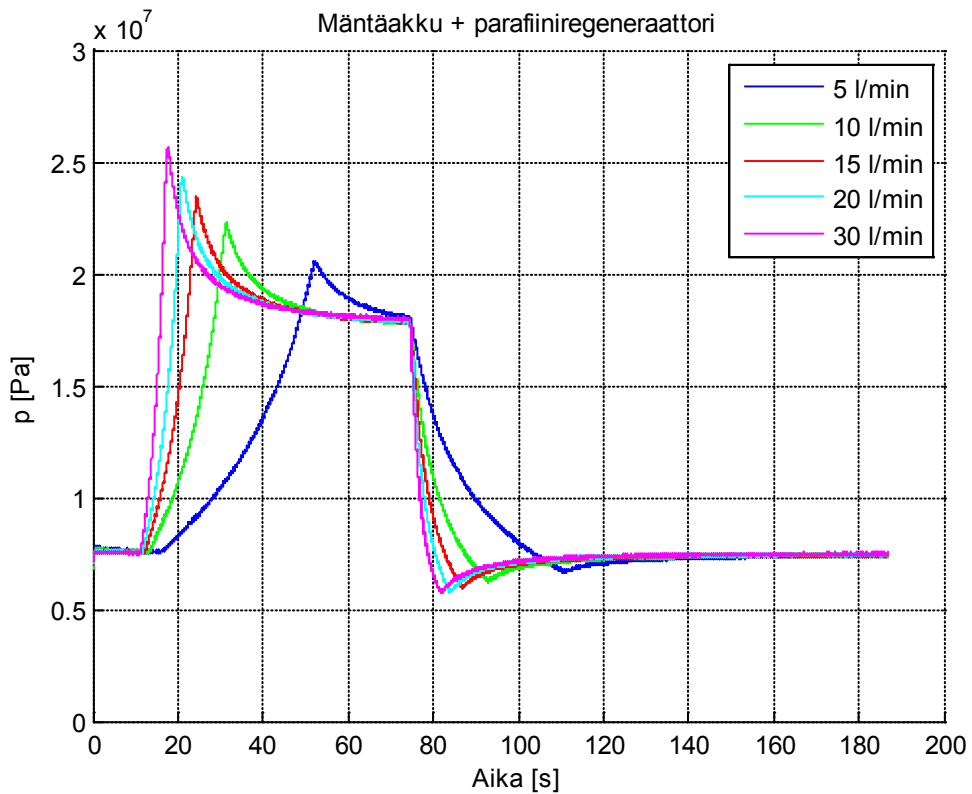
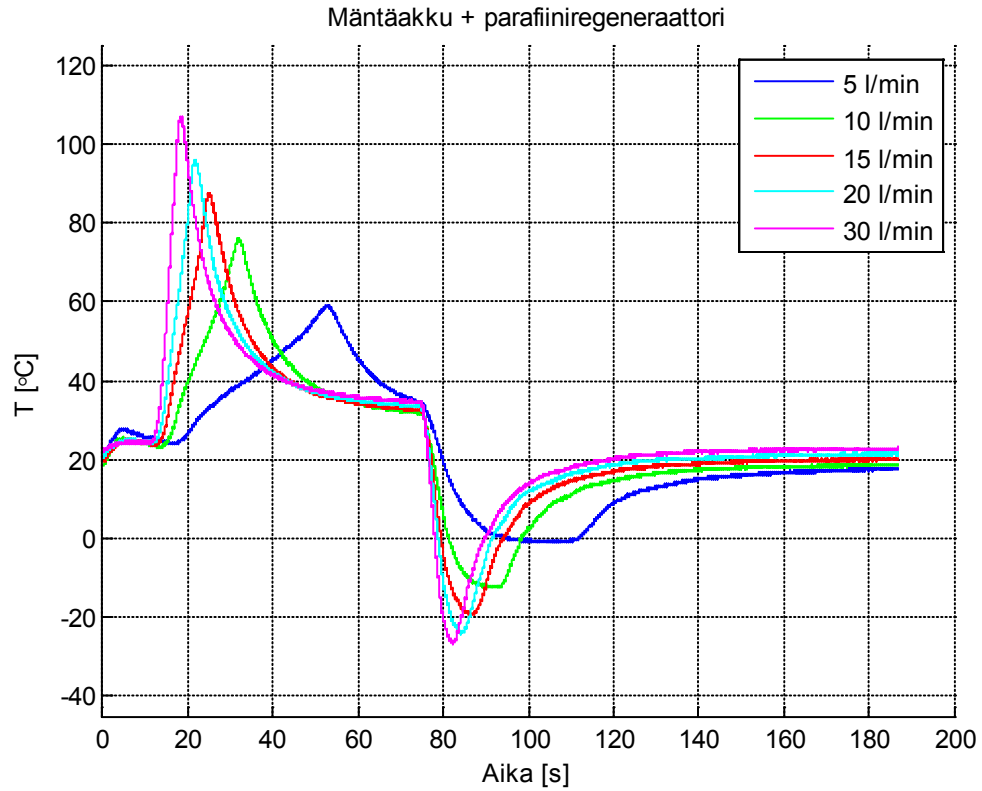
Taulukko 7. Koesarjojen parametrit

	Mäntäpaineakku	Mäntäpaineakku + parafiiniregeneraattori	Mäntäpaineakku + hunajakennon regeneraattori
Esilatauspaine [MPa]	7,6	7,6	7,6
Tilavuusvirta [l/min]	5, 10, 15, 20, 30	5, 10, 15, 20, 30	5, 10, 15, 20, 30
Ulkolämpötila [°C]	25	25	25
Alkutilavuus (kaasu) [l]	5,5	5,5	5,5
Lopputilavuus (kaasu) [l]	2,5	2,5	2,5

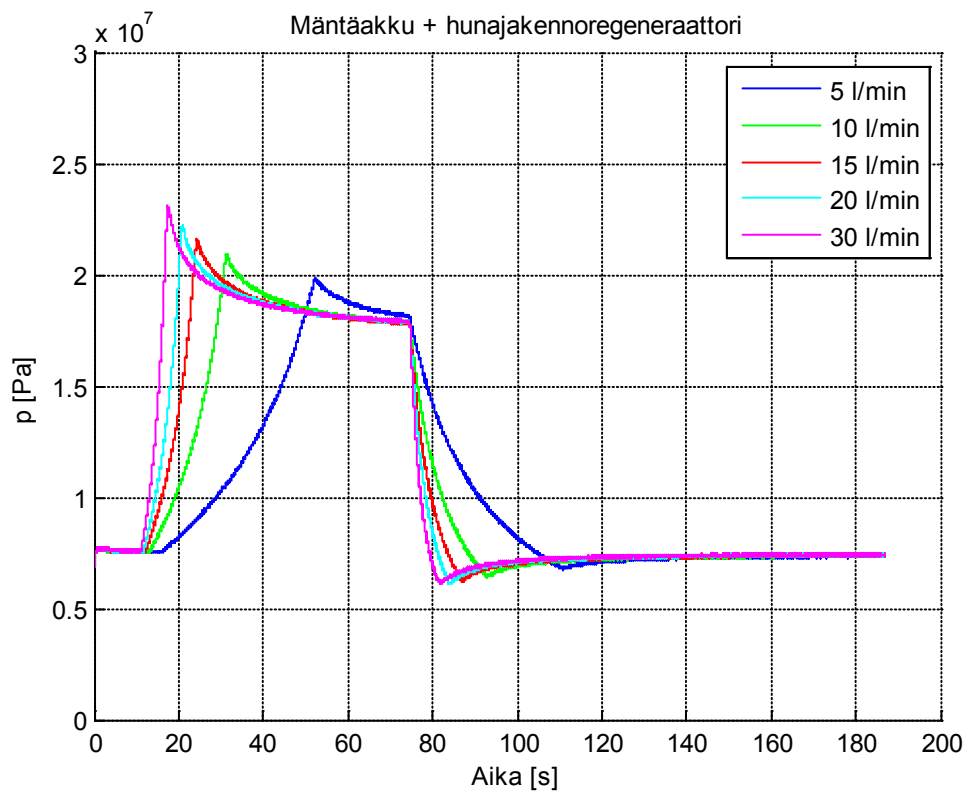
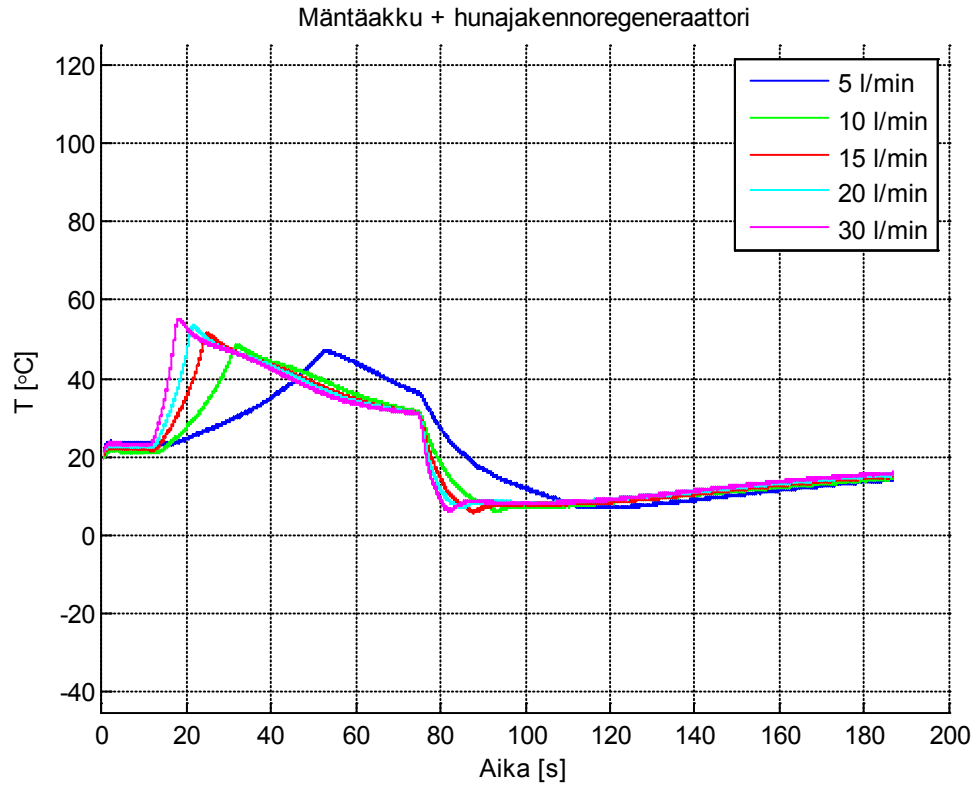
Kuvissa 20-22 on esitettynä mittaussarjojen tulokset kaasunpaineen sekä kaasun lämpötilan osalta kaikille kolmelle paineakkukokoonpanolle testissä käytetyillä tilavuusvirroilla.



Kuva 20. Mäntäakun kaasun lämpötila (ylhäällä) sekä paine eri tilavuusvirran arvoilla

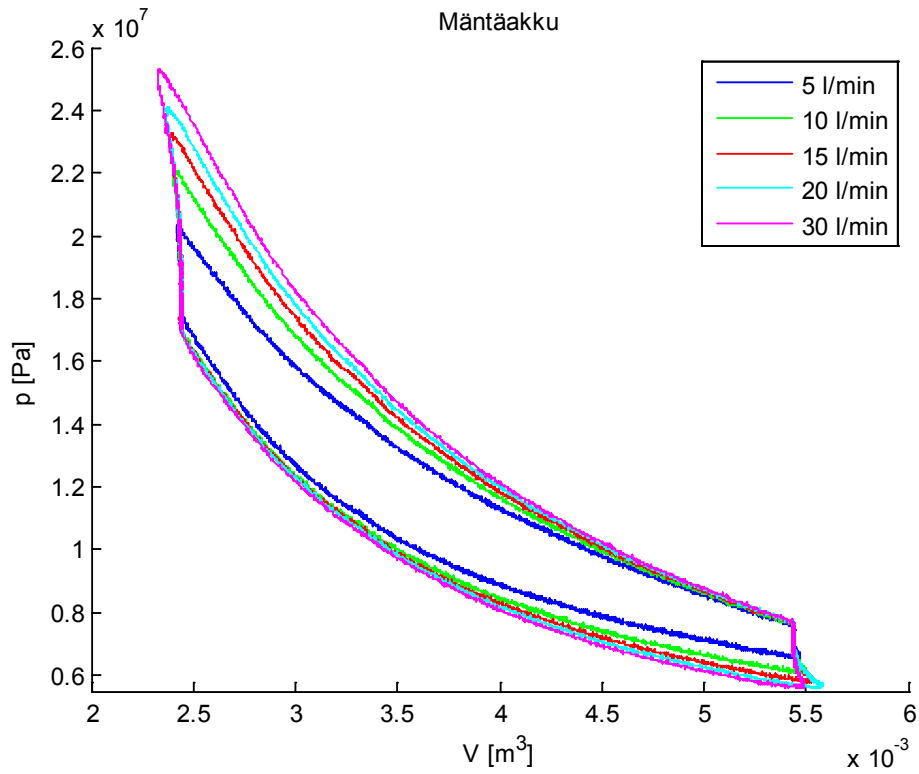


Kuva 21. Parafiiniregeneraattorilla varustetun paineakun kaasun lämpötila (ylhäällä) sekä paine eri tilavuusvirran arvoilla

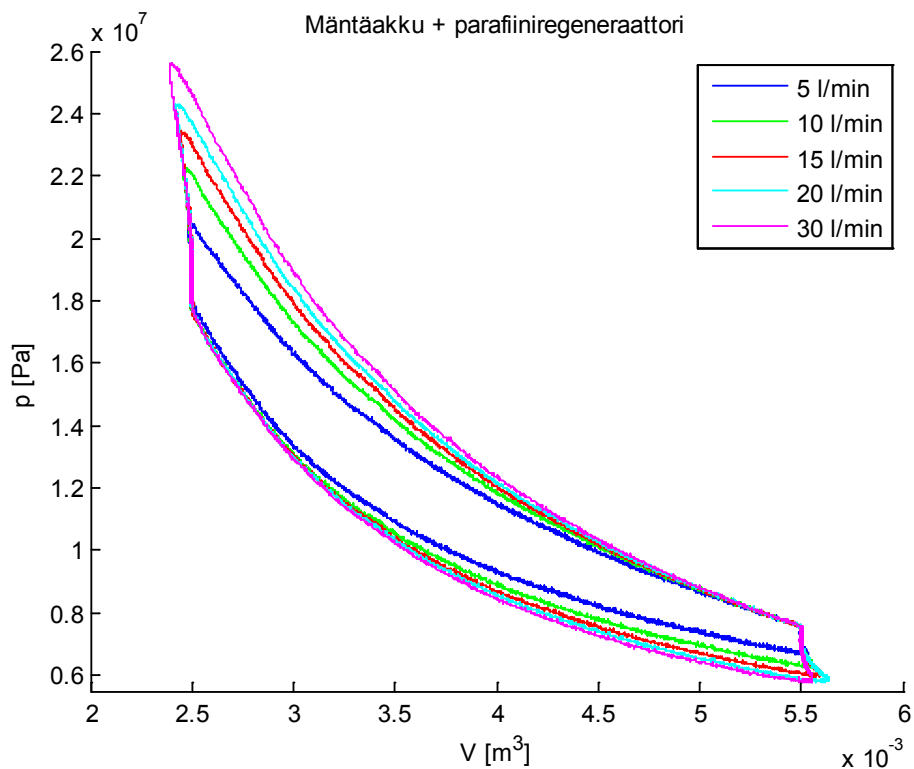


Kuva 22. Hunajakennoregeneraattorilla varustetun paineakun kaasun lämpötila (ylhäällä) sekä paine eri tilavuusvirran arvoilla

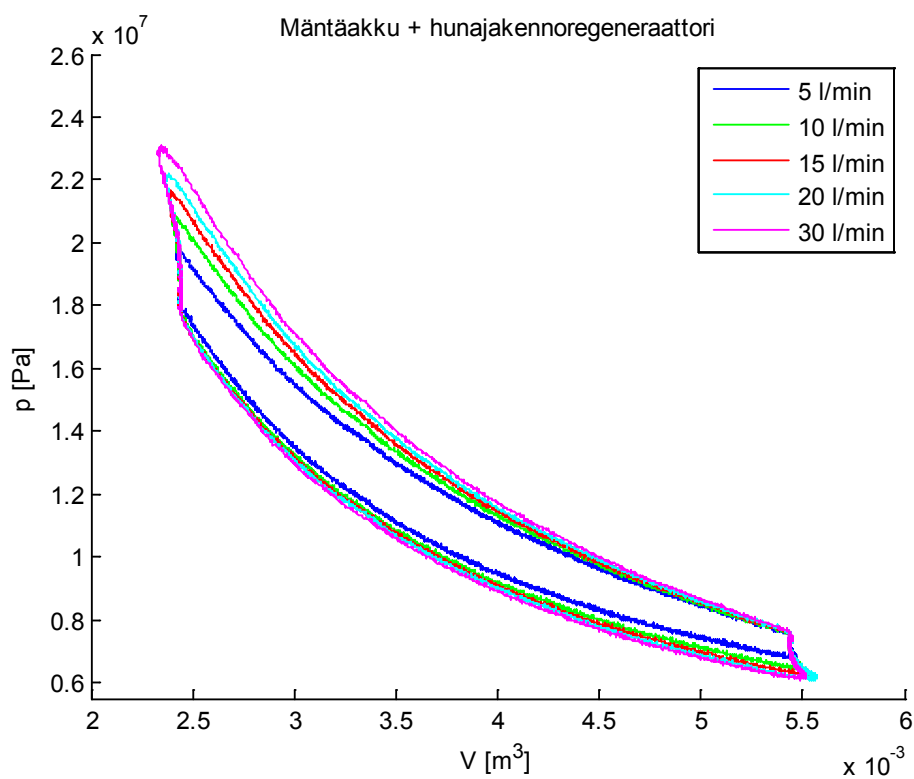
Piirtämällä kuvien 20-22 painemittausten sekä männän asematiedon perusteella lasketun kaasutilavuuden perusteella paine-tilavuus-diagrammit (pV-diagrammi) saadaan laskettua eri kokoonpanoille hyötysuhteet eri tilavuusvirran arvoilla. Kuvissa 23-25 on esitettyä kyseiset pV-diagrammit.



Kuva 23. Mäntäakun pV-diagrammit eri tilavuusvirran arvoilla



Kuva 24. Parafiiniregeneraattorilla varustetun paineakun pV-diagrammit eri tilavuusvirran arvoilla



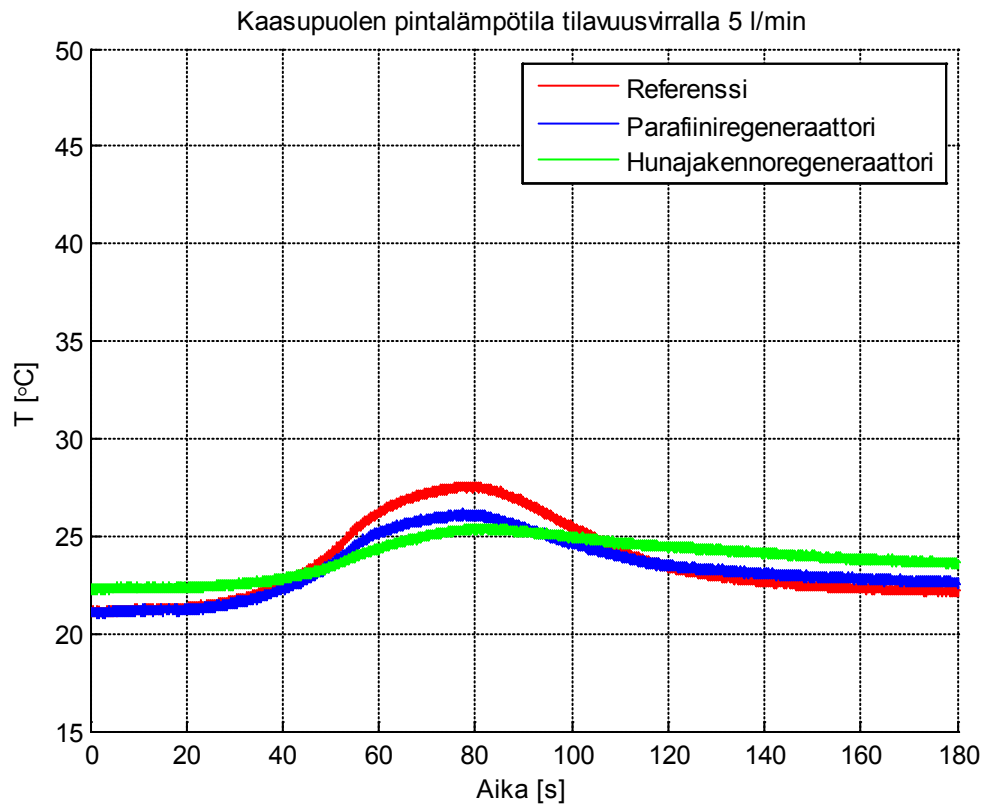
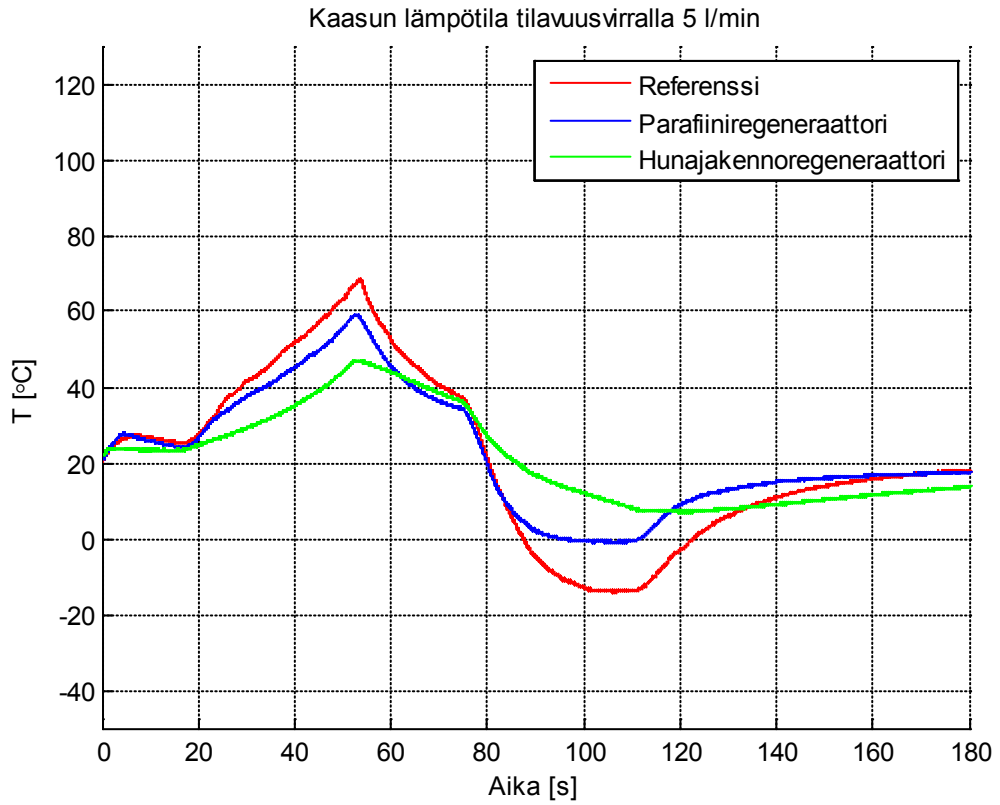
Kuva 25. Hunajakennoregeneraattorilla varustetun paineakun pV-diagrammit eri tilavuusvirran arvoilla

Hyötysuhde saadaan laskettua kuvien 23-25 pV-diagrammeista kunkin käyrän väliin jäävästä pinta-alasta. Suurempi pinta-ala tarkoittaa huonompaa hyötysuhdetta. Taulukkoon 8 on koottu kuvaajista lasketut pinta-alat eli hyötysuhteet.

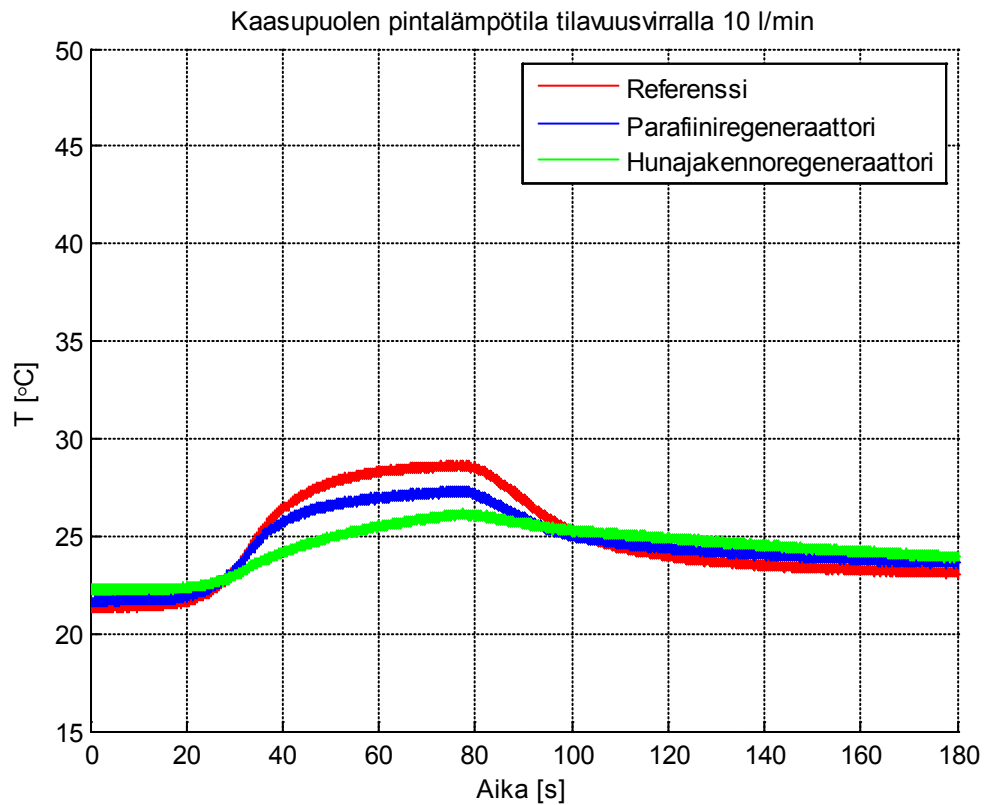
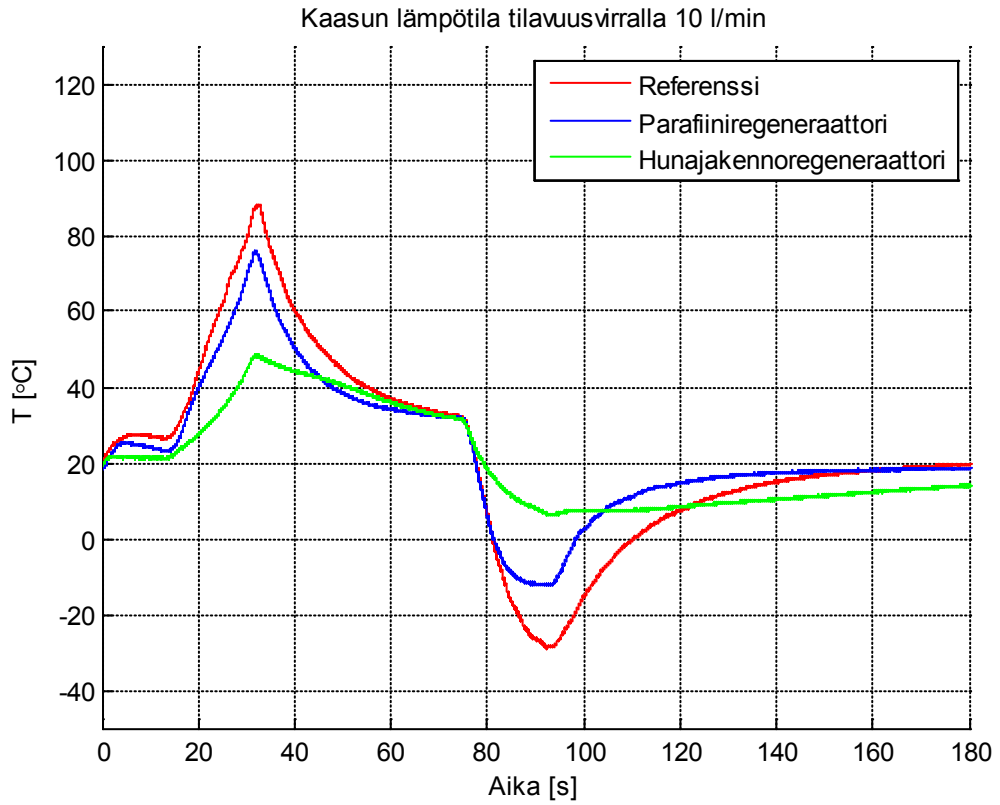
Taulukko 8. Hyötysuhde tilavuusvirran funktiona

Tilavuusvirta [l/min]	Mäntäpaineakku	Mäntäpaineakku + parafiiniregeneraattori	Mäntäpaineakku + hunajakennoregeneraattori
5	80,5 %	82,1 %	87,2 %
10	73,4 %	76,1 %	81,7 %
15	70,5 %	72,4 %	79,5 %
20	68,8 %	70,2 %	78,0 %
30	63,4 %	65,7 %	73,6 %

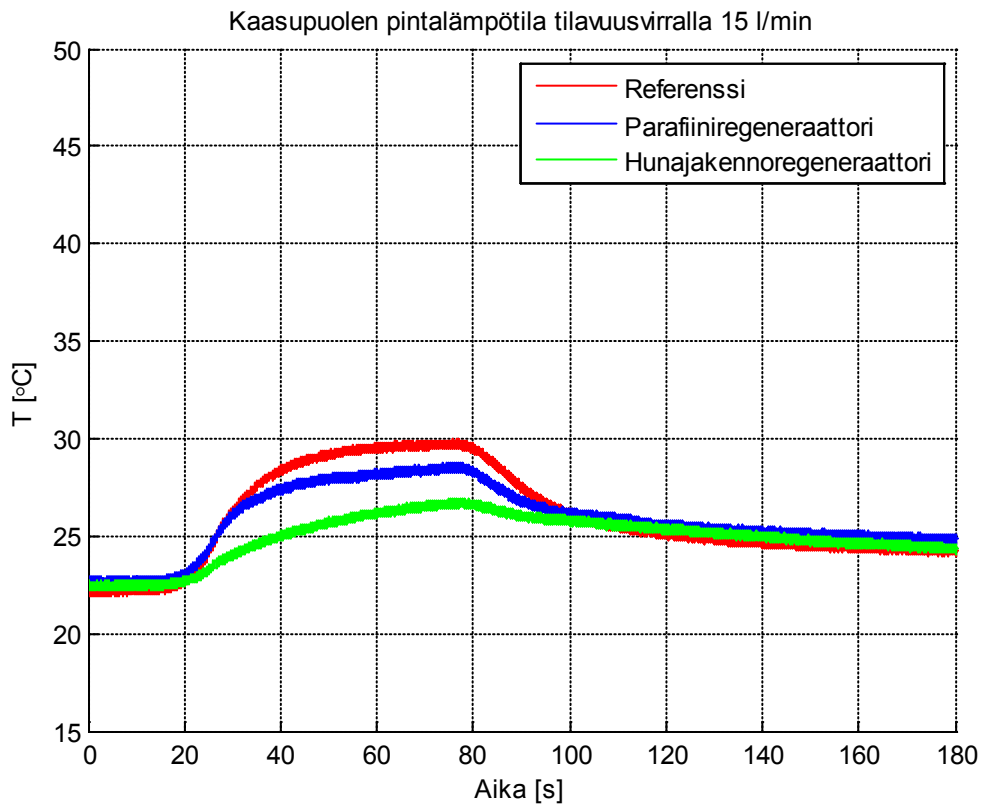
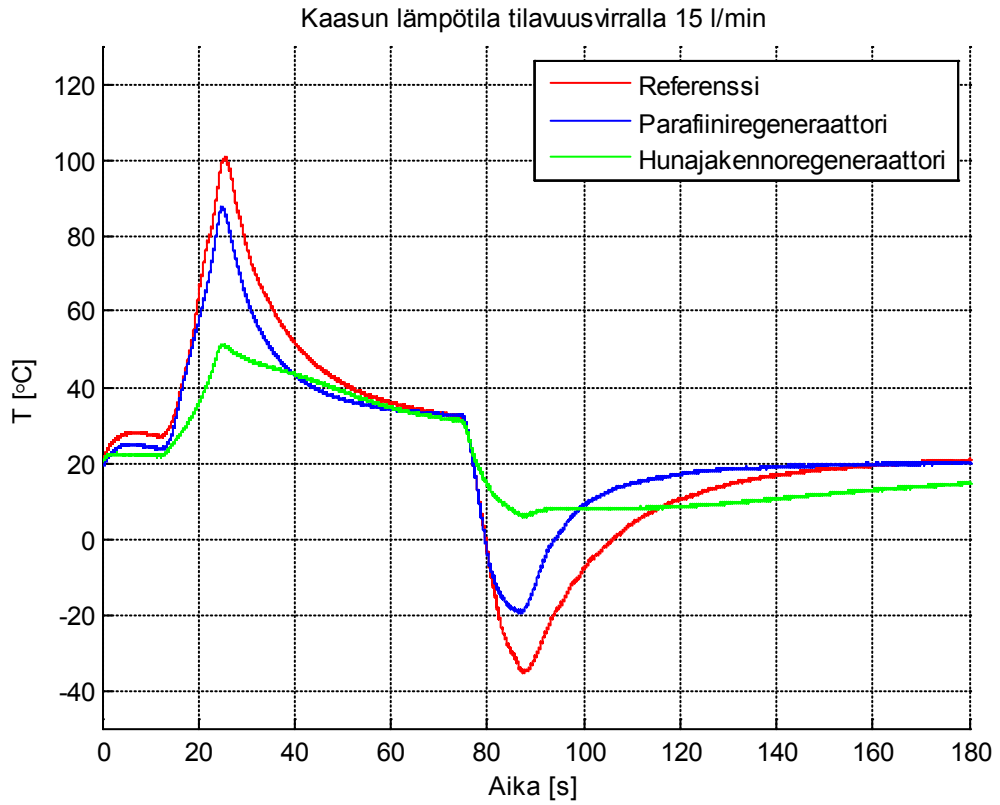
Kuvissa 26-30 on esitettyä sekä paineakun kaasun että termoelementtianturilla mitatun kaasupuolen ulkopinnan lämpötilan käyttäytyminen mittauksessa käytetyillä tilavuusvirroilla kullakin paineakkukonstruktioilla.



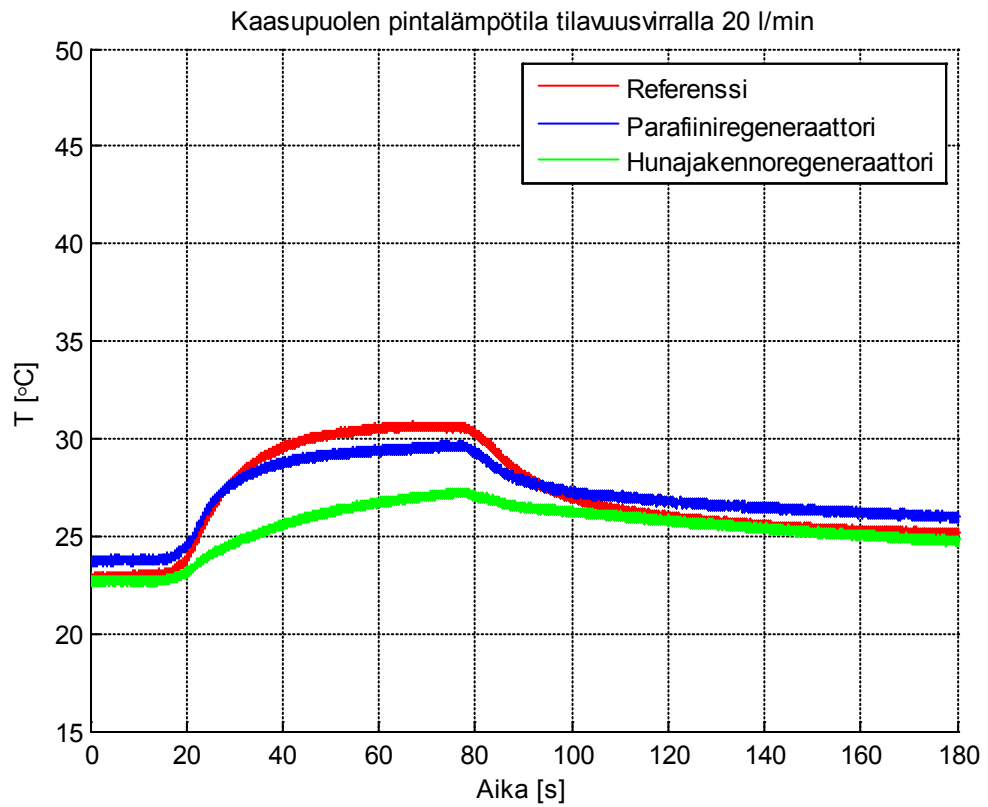
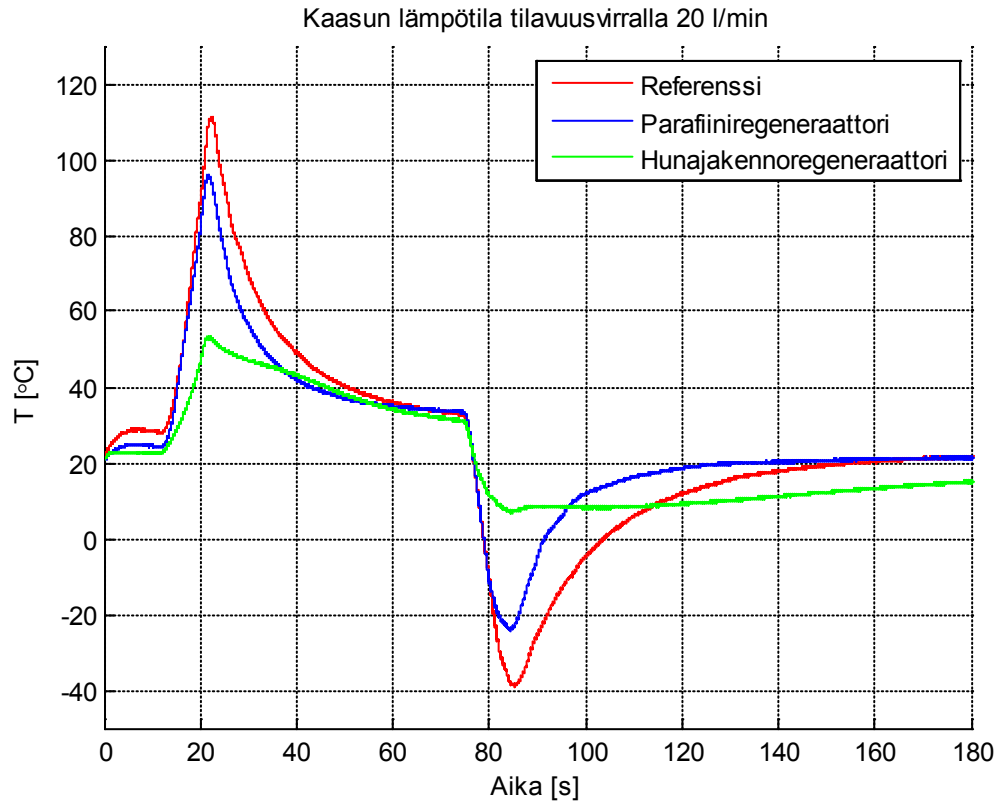
Kuva 26. Kaasun (ylhäällä) sekä kaasupuolen pintalämpötilan käyttäytyminen 5 l/min tilavuusvirralla



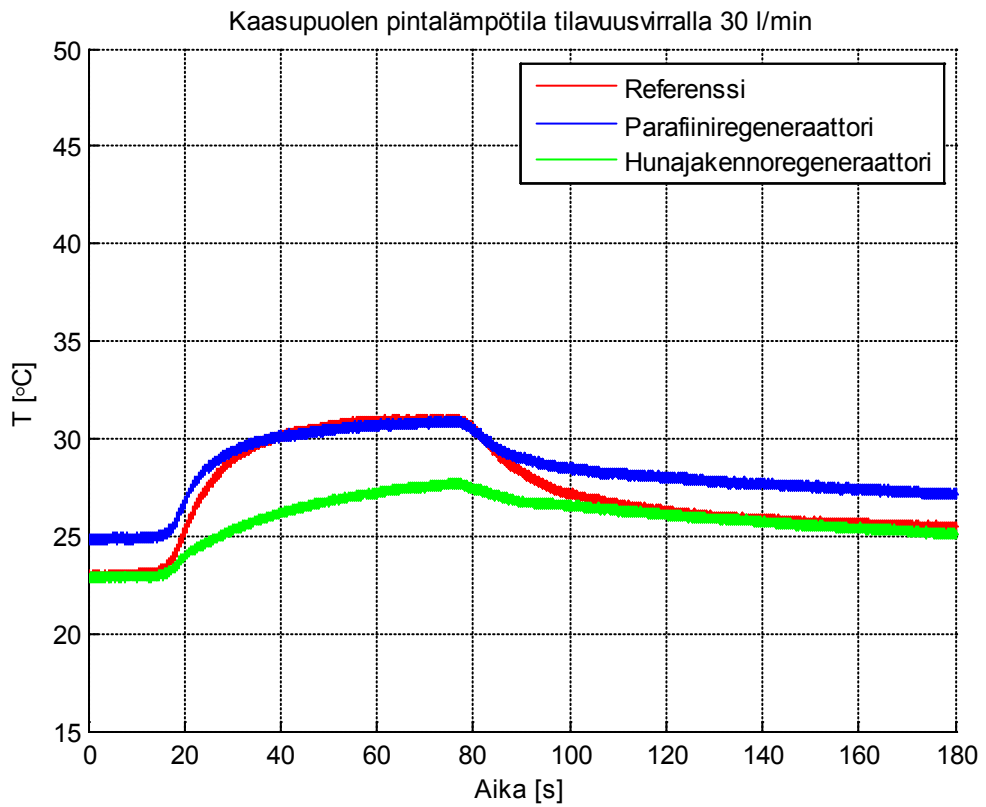
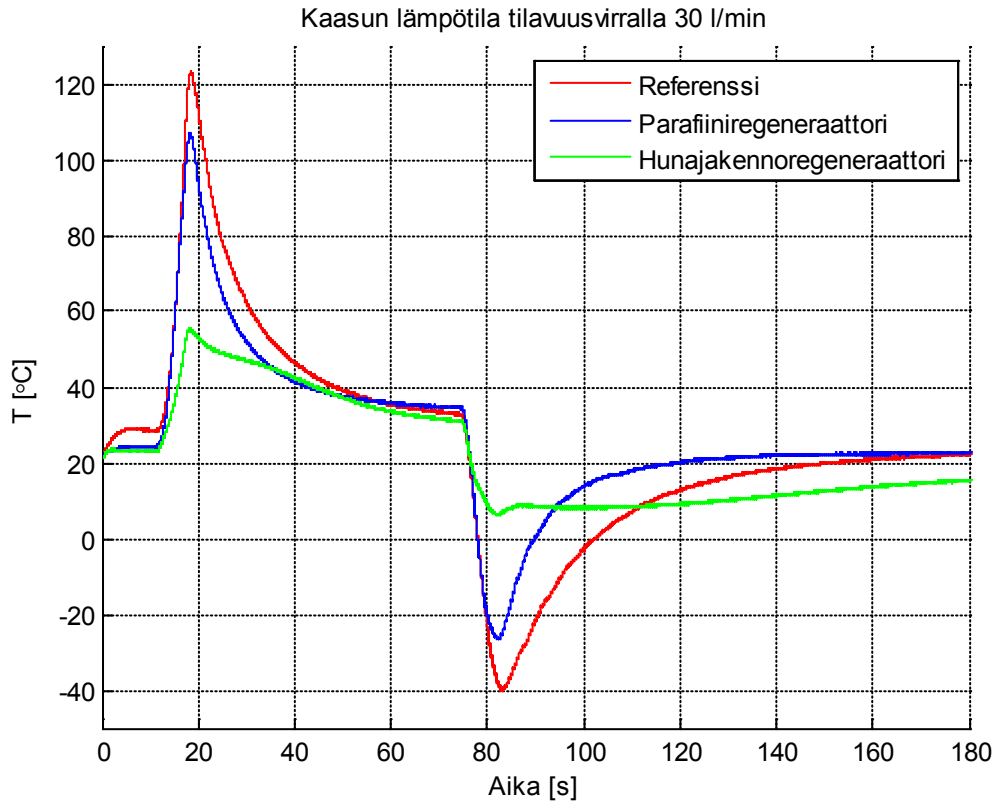
Kuva 27. Kaasun (ylhäällä) sekä kaasupuolen pintalämpötilan käyttäytyminen 10 l/min tilavuusvirral-
la



Kuva 28. Kaasun (ylhäällä) sekä kaasupuolen pintalämpötilan käyttäytyminen 15 l/min tilavuusvirral-
la

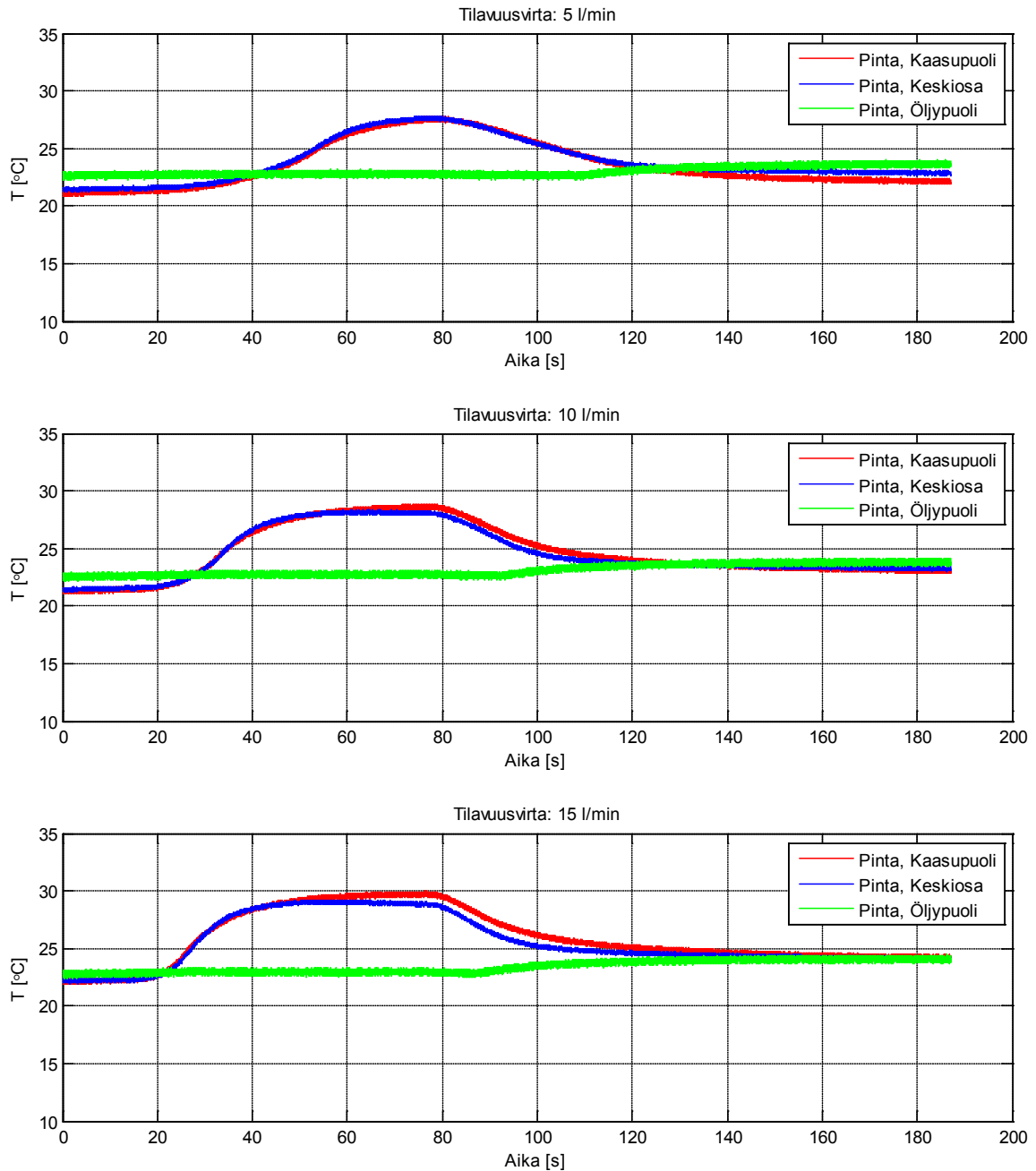


Kuva 29. Kaasun (ylhäällä) sekä kaasupuolen pintalämpötilan käyttäytyminen 20 l/min tilavuusvirralla

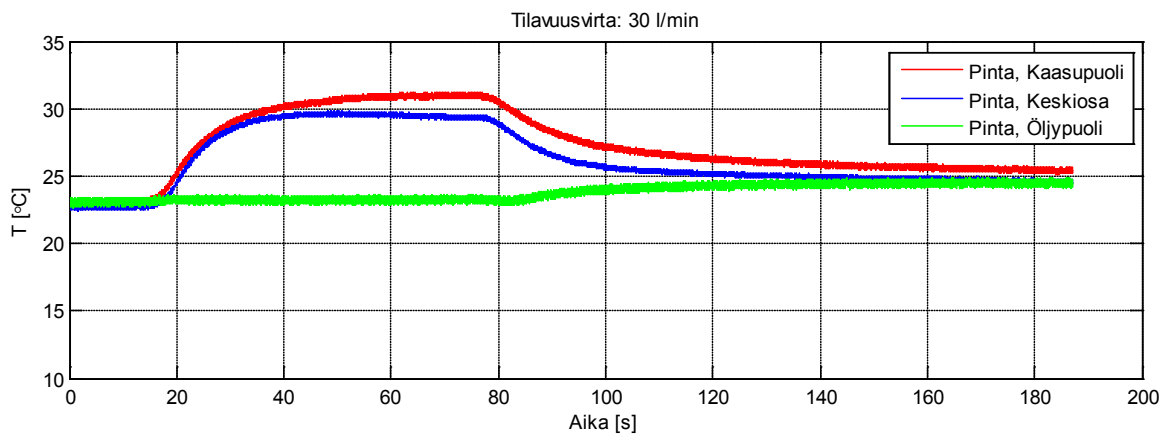
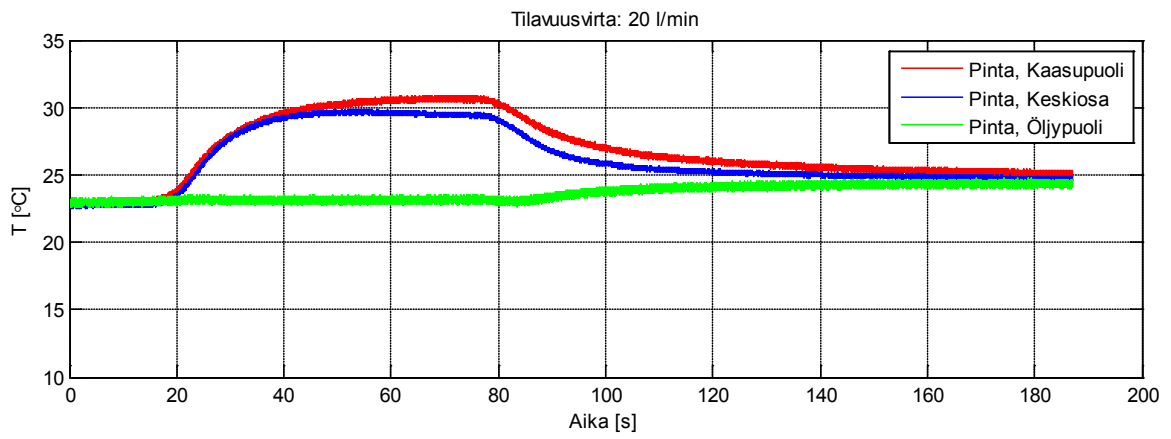


Kuva 30. Kaasun (ylhäällä) sekä kaasupuolen pintalämpötilan käyttäytyminen 30 l/min tilavuusvirral-
la

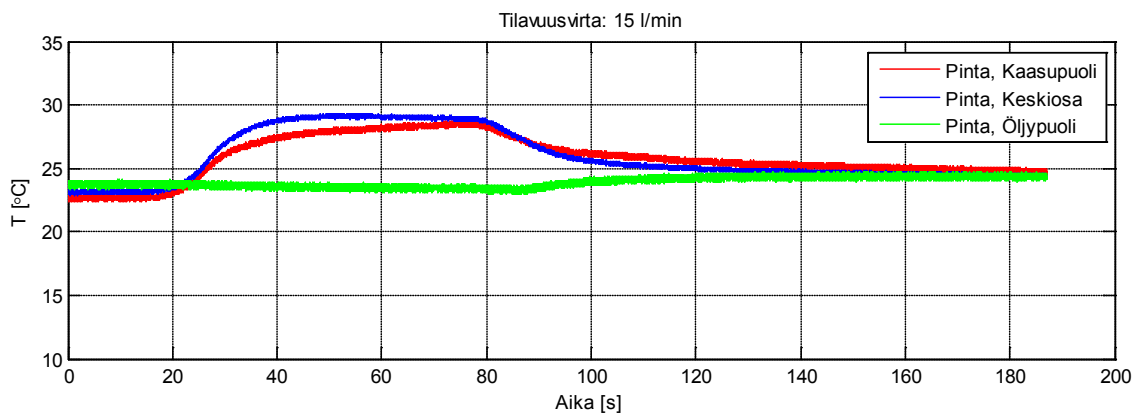
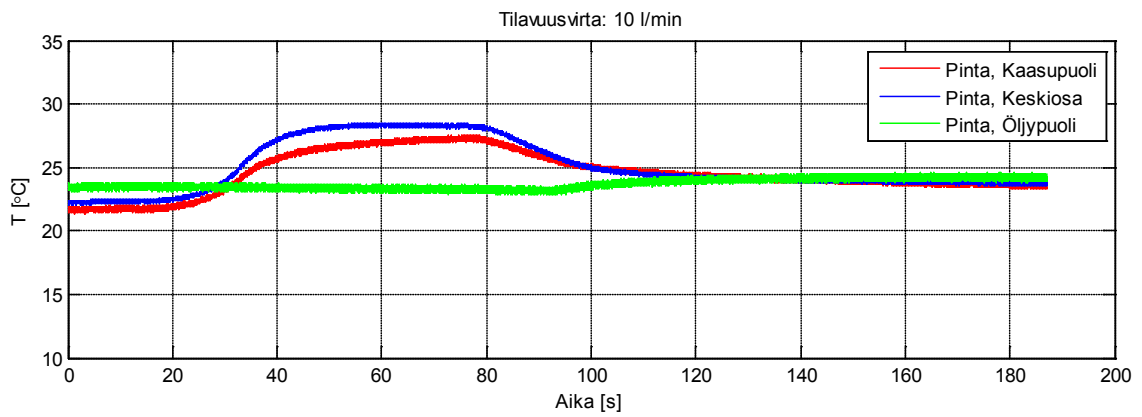
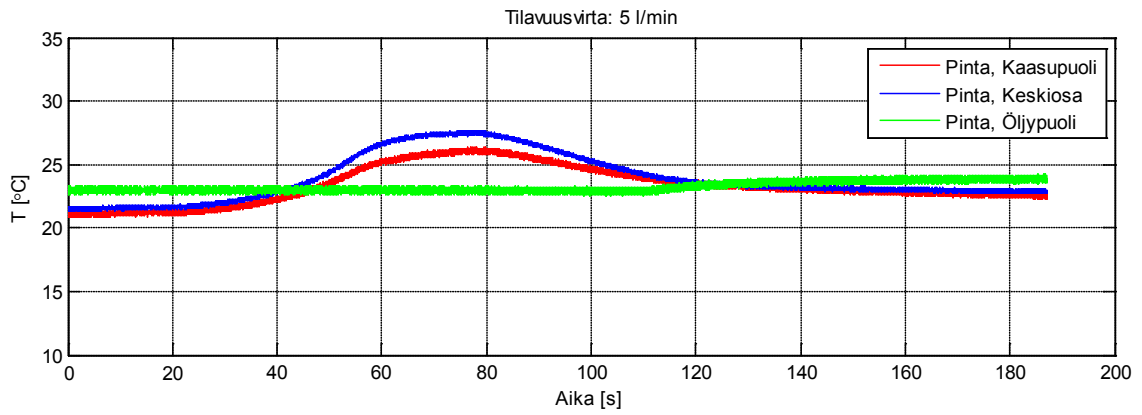
Kuvissa 31-36 on esitettyä termoelementtiantureilla mitatut paineakkujen pintalämpötilat mittaussykleiltä. Lämpötila-anturit oli sijoitettu niin, että yksi oli kaasutilavuuden kohdalla kiinni, yksi oli noin puolessa välissä paineakkua ja kolmas anturi oli paineakun öljypäädyn kohdalla kiinni.



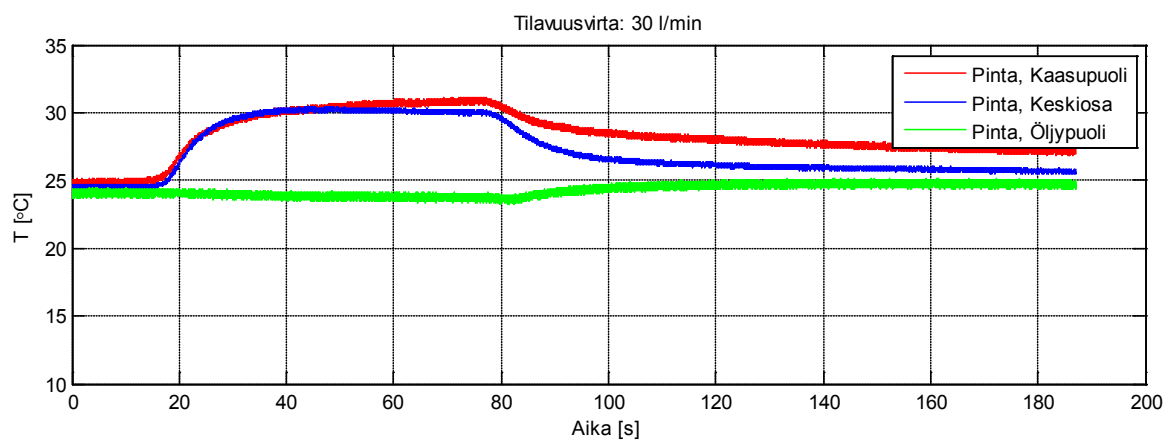
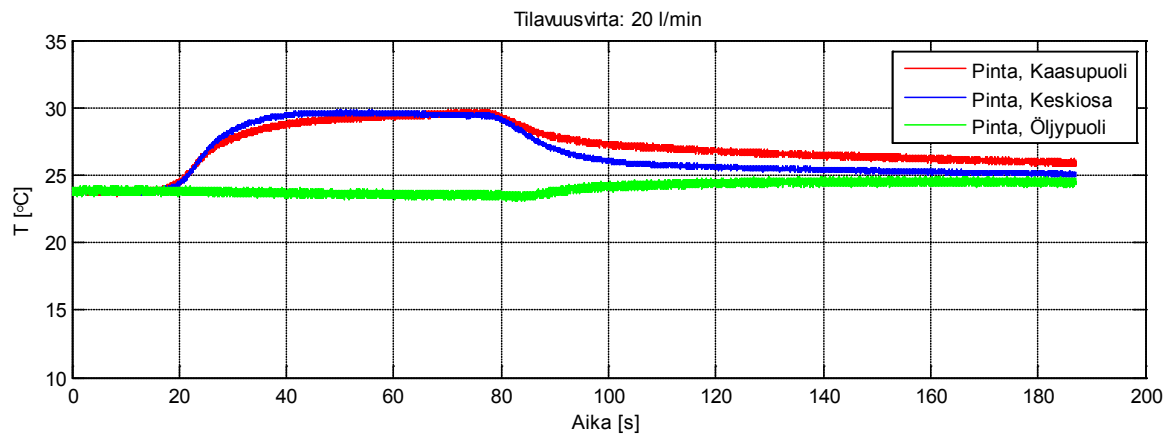
Kuva 31. Referenssipaineakun pintalämpötilat



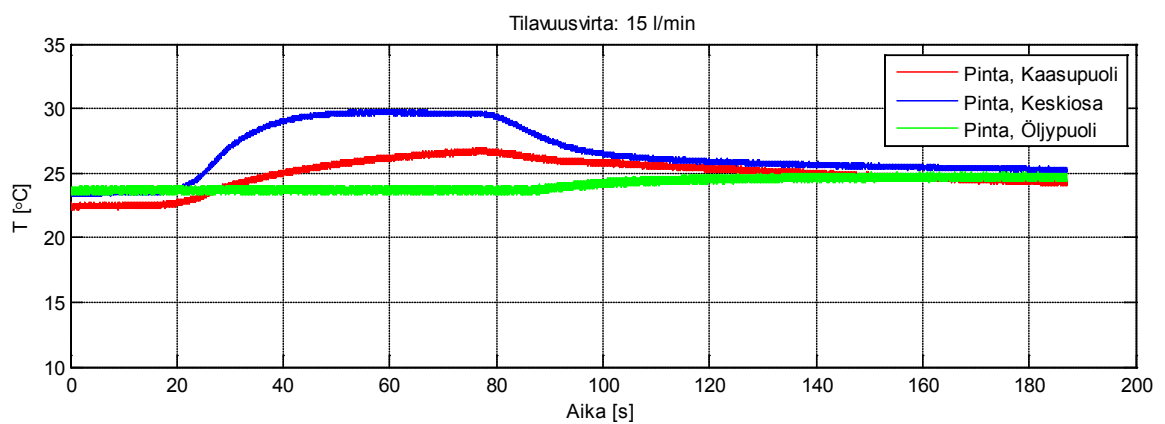
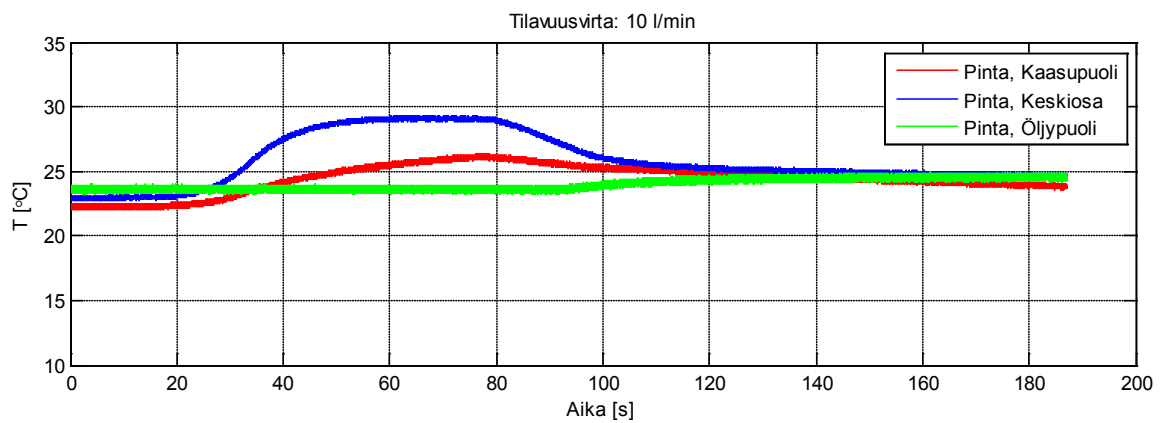
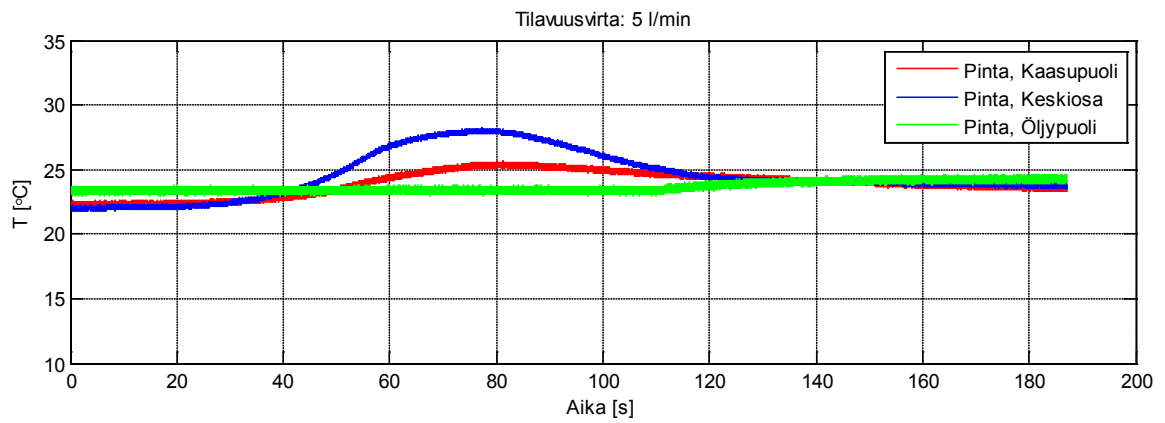
Kuva 32. Referenssipaineakun pintalämpötilat



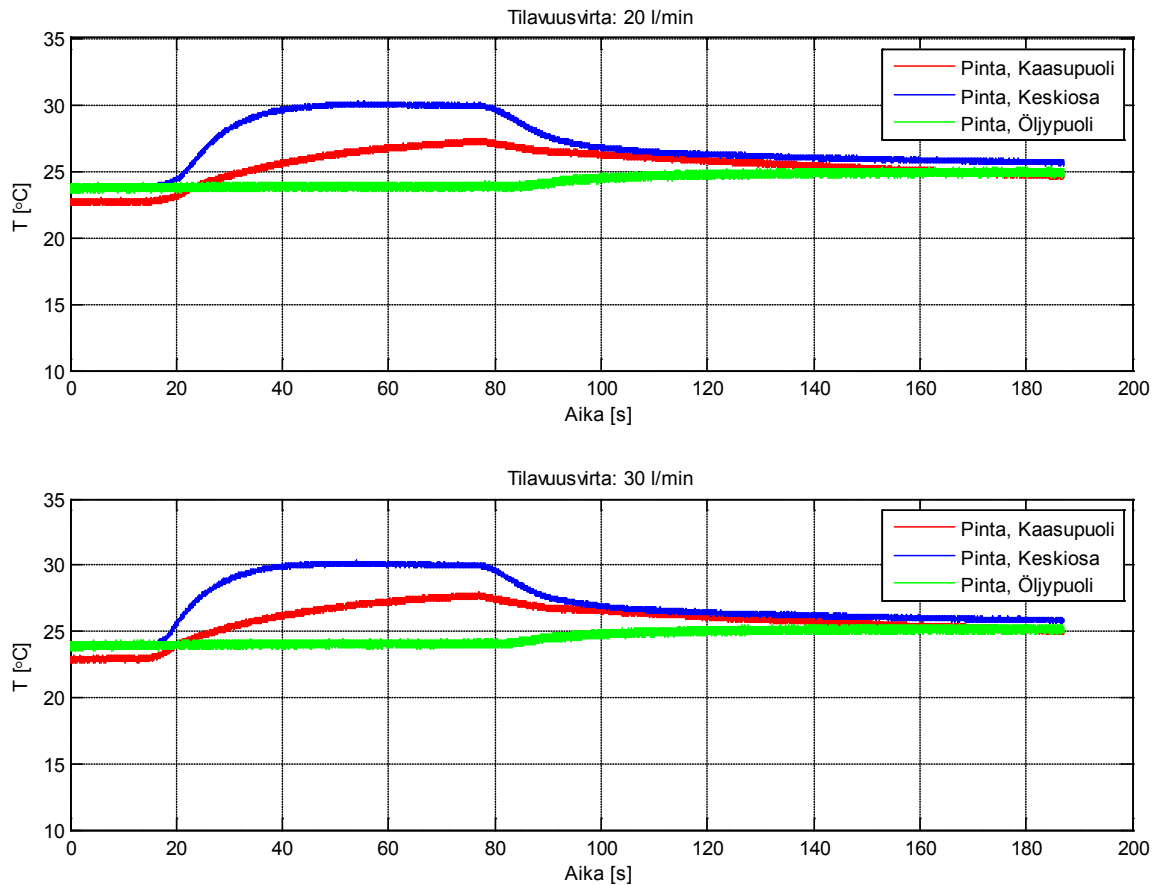
Kuva 33. Parafiiniregeneraattorilla varustetun paineakun pintalämpötilat



Kuva 34. Parafiiniregeneraattorilla varustetun paineakun pintalämpötilat



Kuva 35. Hunajakennoregeneraattorilla varustetun paineakun pintalämpötilat



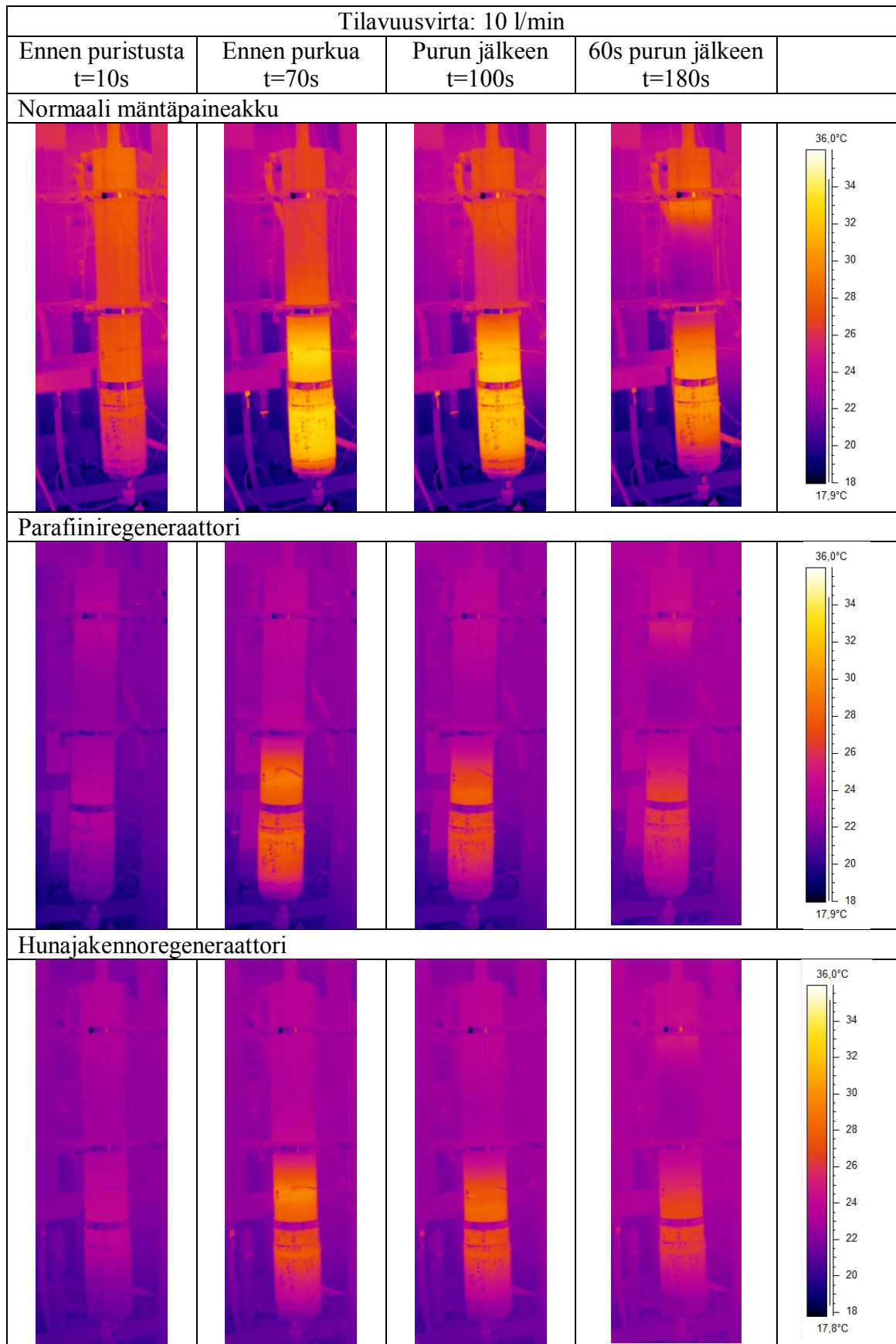
Kuva 36. Hunajakennoregeneraattorilla varustetun paineakun pintalämpötilat

Mittauksissa otettiin termoelementtiantureiden lisäksi lämpökameralla kuvia paineakkujen pinnasta. Mittausten aikana lämpökamera otti sekvenssikuvauksella yhden sekunnin välein valotuksia. Kuvasarjoista taulukoihin 9-13 on poimittu paineakun lämpötilamittauksen kannalta tärkeimmät kuvat. Ensimmäisenä on kuva hetkeltä juuri ennen paineakun puristussyklin alkua, jolloin paineakun lämpötila ei ole vielä muuttunut. Toisessa kuvassa puristussykli on päättynyt ja paineakkua pidetään ladattuna. Tällöin kaasun lämpötila on ylittänyt huippuarvonsa ja lämpöenergiaa virtaa paineakun kuoren kautta ympäristöön. Kolmannessa kuvassa purkussykli on päättynyt, kaasun lämpötila on lähellä minimiarvoaan ja lämpöenergiaa on alkanut virrata paineakun rungosta kaasuun. Viimeinen kuva on testisyklin lopusta, jolloin paineakun lämpötilat ovat saaneet tasaantua noin 60 sekuntia purkussyklin päättymisen jälkeen. Kussakin taulukossa on koottuna yhdellä tilavuusvirralla tehdyt mitaukset kustakin paineakkukonstruktioista.

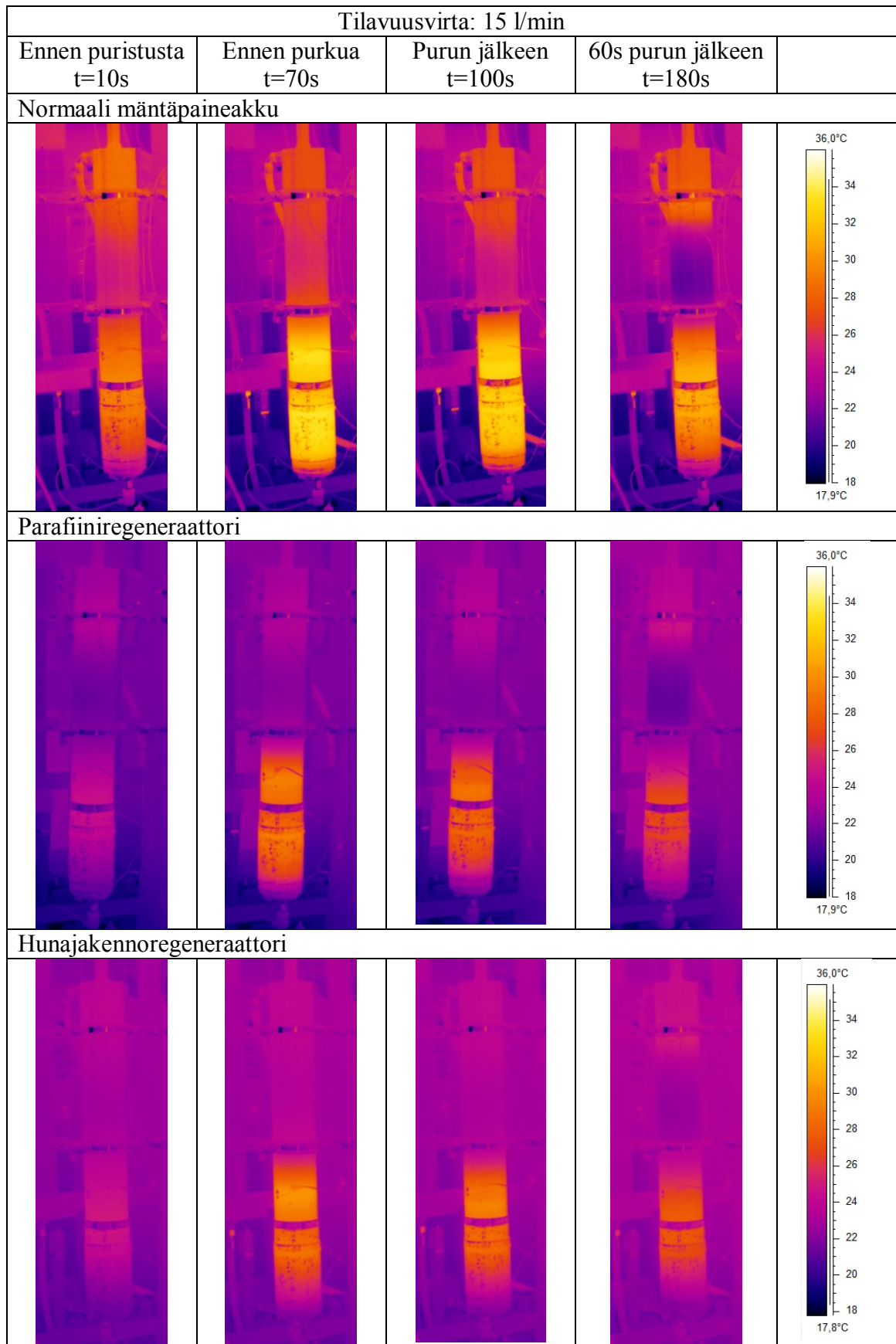
Taulukko 9. Lämpökamera kuvat tilavuusvirralla 5 l/min

Tilavuusvirta: 5 l/min				
Ennen puristusta t=10s	Ennen purkua t=70s	Purun jälkeen t=100s	60s purun jälkeen t=180s	
Normaali mäntäpaineakku				
Parafiiniregeneraattori				
Hunajakennoregeneraattori				

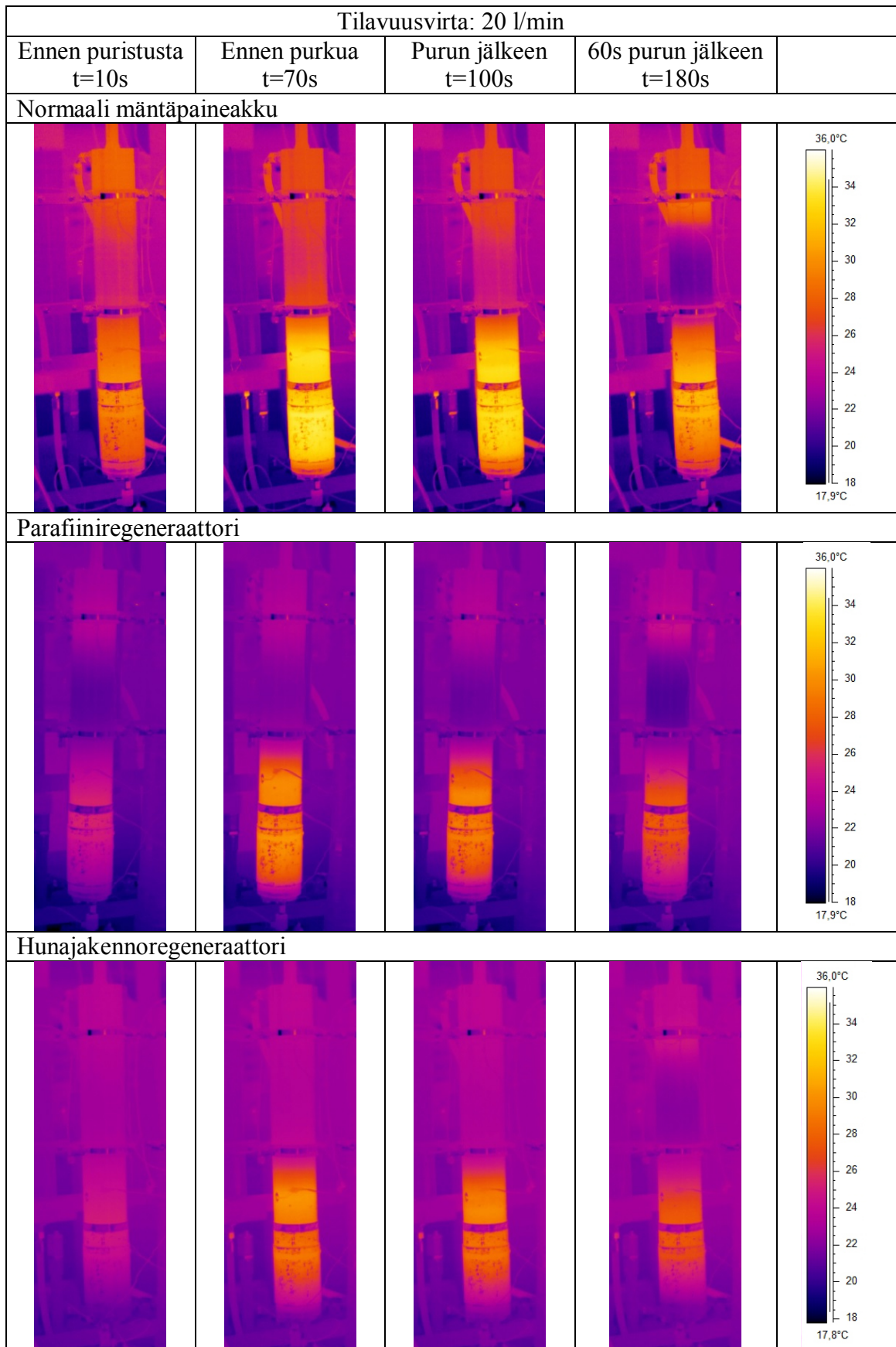
Taulukko 10. Lämpökamera kuvat tilavuusvirralla 10 l/min



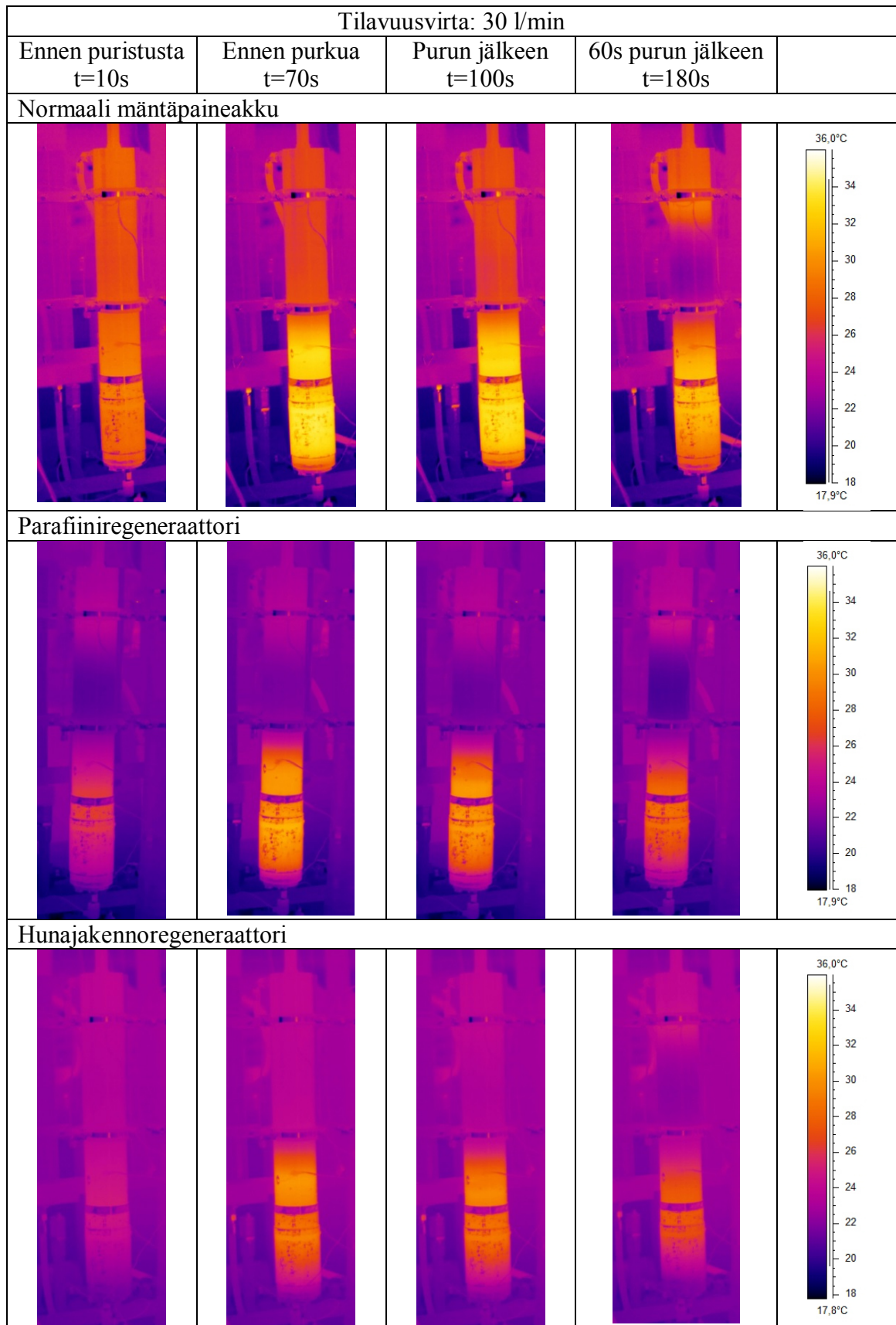
Taulukko 11. Lämpökamera kuvat tilavuusvirralla 15 l/min



Taulukko 12. Lämpökamera kuvat tilavuusvirralla 20 l/min



Taulukko 13. Lämpökamera kuvat tilavuusvirralla 30 l/min



7 Pohdinnat

Hydraulipaineakussa merkittävä hyötysuhteeseen vaikuttava tekijä on kaasun lämpeneminen ja lämpöenergian virtaaminen ympäristöön. Erityisesti tilanteissa, joissa käytetään korkeita puristussuhteita sekä suuria tilavuusvirtoja, kaasu lämpenee merkittävästi paineakussa ja täten syntyvä häviö on myös suuri. Tätä lämpöenergian virtaamisen aiheuttamaa häviötä voidaan pienentää esimerkiksi heikentämällä paineakun kuoren lämmönjohtavuutta tai kasvattamalla paineakun kaasutilavuuden ominaislämpökapasiteettia sekä hidastamalla kaasun virtaamista kaasutilavuudessa. Kaasun sekä paineakun rungon välistä lämpöenergian vaihtoa voidaan vähentää hidastamalla kaasun virtausnopeuksia. Kaasutilavuuden ominaislämpökapasiteetin kasvattamisella puolestaan voidaan hillitä kaasun lämpötilan nousua, jolloin lämpöenergian virtaus kaasusta kuoreen vähenee. Paineakun kuoren lämmönjohtavuuden heikentämisellä puolestaan voidaan hidastaa kuoresta ympäristöön virtaavan energian määrää ja näin pitää energia paineakussa.

Tässä työssä keskityttiin erityisesti näistä menetelmistä kaasutilavuuden ominaislämpökapasiteetin kasvattamiseen. Työssä suunniteltiin lämpöregeneraattori, joka asennettiin kaasutilavuuteen, jolloin kaasutilavuuden ominaislämpökapasiteettia saatiin kasvatettua. Työssä käytettiin mäntäpaineakkuja, johon oli lisätty erityinen lämpöregeneraattorimoduuli kaasutilavuuden yhteyteen ja jonka sisälle pystyttiin asentamaan lämpöregeneraattori. Moduulia käytettiin myös tyhjänä, jolloin saatiin vertailuarvot perinteisellä mäntäpaineakulla. Mittauksissa sekä regeneraattorilla että ilman regeneraattoria saatuja mittaustuloksia verrattiin Juhalan suunnittelemaan hunajakennoregeneraattoriin, jonka konstruktio on hyvin erilainen kuin työssä suunniteltu regeneraattori. Juhalan suunnittelema ja toteuttama regeneraattori perustui enemmän kaasun virtausten hidastamiseen sekä erittäin suuripinta-alaisen metallisen lämmönvaihtimen ominaislämpökapasiteetin hyödyntämiseen.

Tässä työssä suunnitellussa lämpöregeneraattorissa pyrittiin kasvattamaan kaasutilavuuden ominaislämpökapasiteettia hyödyntämällä erityisten faasimuutosmateriaalien sulamisenergiaa lämpöenergian varastoimiseksi.

Faasimuutosmateriaaleilla tarkoitetaan tässä yhteydessä materiaaleja, joiden joko sulamispiste tai kiehumispiste sijaitsee prosessin lämpötiloihin nähden sopivalla lämpötila-alueella. Tämä lämpötila-alue paineakkujen tapauksessa asettuu huonelämpötilan ja noin 100 celsiusasteen välille, koska paineakun kaasun lämpötila vaihtelee tyyppillisesti tällä alueella. Sulamis-/höyrystymisenergia on merkittävästi suurempi kuin materiaalin ominaislämpö ja tämän johdosta materiaalia tarvitaan suhteessa vähemmän saman energiamäärän varastoimiseksi. Pienempi materiaalmäärä mahdollistaa pienemmän regeneraattorin toteuttamisen ja näin paineakun koko sekä massa kasvaa mahdollisimman vähän alkuperäiseen verrattuna. Pieni massa sekä fyysinen koko helpottavat paineakun asemointia ja parantavat esimerkiksi liikkuvissa koneissa koko koneen hyötysuhdetta ja käytettävyyttä.

Suunnittelussa päädyttiin käyttämään faasimuutosmateriaalina parafiinia, jonka sulamispiste on 52 celsiusastetta. Tällöin regeneraattorin avulla saatiin nostettua kaasutilavuuden ominaislämpökapasiteettia 385 J/K sulamispisteen ympärillä ja parafiinin sulamispisteessä arvoon 13 kJ/K. Pelkällä tyypellä kaasutilavuuden ominaislämpökapasiteetti työssä käytetyllä paineakulla sekä esilatauspaineella on noin 500 J/K.

Mittaukset suoritettiin kolmella eri kokoonpanolla, normaalilla mäntäpaineakulla ilman regeneraattoria, samalla paineakulla parafiinia sisältävä regeneraattori asennettuna sekä metallisella hunajakennoregeneraattorilla. Kuvassa 19 on esitettyä paineakun halkileikkaus, jossa näkyy regeneraattorin sijainti kaasutilavuudessa.

Mittaukset suoritettiin viidellä eri tilavuusvirralla, jotta regeneraattorin toimintaa pystyttiin testaamaan pienillä sekä suurilla puristusnopeuksilla. Suurilla tilavuusvirroilla paineakussa kaasun lämpötila nousee normaalisti nopean puristuksen takia hyvin nopeasti korkeisiin arvoihin, jolloin regeneraattorin dynamiikan merkitys korostuu. Matalemmilla tilavuusvirroilla lämpötilojen nousu on rauhallisempaa, jolloin regeneraattorilla on enemmän aikaa varastoida sekä luovuttaa energiaa eli regeneraattorin dynamiikan vaikutus ei ole niin merkittävä.

Regeneraattoreiden vaikutusta paineakun hyötysuhteeseen mitattiin sekä paineakussa esiintyvien paineiden että lämpötilojen avulla. Paineita mitattiin sekä paineakun öljy- että kaasupuolelta ja lämpötiloja mitattiin kaasutilavuudesta, sekä paineakun ulkopinnalta. Ulkopinnan lämpötilamittaukseen käytettiin sekä termoelementti- että infrapunakuvaustekniikkaa. Hyötysuhde saatiin laskettua mittaussykleistä piirrettyjen pV-diagrammien avulla (kuvat 23-25).

Hyötysuhteissa, jotka on laskettu pV-diagrammien avulla, parafiiniregeneraattorin vaikutus paineakun hyötysuhteeseen on noin +1,5...3 prosenttiyksikköä. Hunajakennoregeneraattori puolestaan nostaa paineakun hyötysuhdetta 6,5...10 prosenttiyksikköä.

Parafiiniregeneraattorilla on huomattava vaikutus paineakun kaasutilavuudessa vallitsevaan paineeseen sekä lämpötiloihin (kuvat 26-30). Vaikutus kuitenkin pienenee tilavuusvirran kasvaessa eikä esimerkiksi kaasun sekä kaasupuolen ulkopinnan lämpötilassa ole enää suurimmalla 30 l/min tilavuusvirralla merkittävää eroa vertailuna käytettyyn ilman regeneraattoria toimivaan paineakkuun (kuva 30). Kaasun lämpötilan vaikutus kaasun paineeseen on myös merkittävä. Hunajakennoregeneraattoria käytettäessä paine-ero paineakun puristusyklin jälkeen ja juuri ennen purkuvaihetta on tilavuusvirrasta riippuen noin 1,7-4,5 Mpa, kun vastaava luku parafiiniregeneraattorilla on noin 2,6-7,7 MPa ja ilman regeneraattoria 3,1-8,2 MPa. Ideaalisessa tapauksessa tämä paine-ero olisi 0 Mpa, jolloin kaikki paineakkuun varastoitu energia saataisiin hyödynnettyä purkuvaiheessa.

Mittausten perusteella hunajakennoregeneraattori on merkittävästi parempi konstruktio paineakun hyötysuhteen nostamisen kannalta. Vaikka parafiiniregeneraattorissa on merkittävästi suurempi lämpöenergian varastointikyky, nousee paineakkukäytössä suurempaan arvoon regeneraattorin dynamiikka. Nopea dynamiikka mahdollistaa regeneraattorin ottaa ympäröivästä kaasusta nopeasti lämpöenergiaa vastaan ja näin estää kaasun lämpötilan nousu myös suurilla tilavuusvirroilla. Vastaavasti regeneraattori kykenee luovuttamaan energiaa takaisin kaasuun purkusyklin aikana, jolloin kaasun lämpötilan lasku puolestaan hidastuu.

Testattu parafiiniregeneraattori kykenee hitailla tilavuusvirroilla varastoimaan ja luovuttamaan energiaa, mutta suuremmilla tilavuusvirroilla se osoittautui liian hitaaksi, jolloin kaasun lämpötilat lähestyvät ilman regeneraattoria toimivan akun arvoja. Erityisesti kaasupuolen ulkopinnan lämpötilassa huomataan regeneraattorimoduulin jäävän testisyklin jälkeen lämpimämmäksi kuin ilman regeneraattoria toimittaessa. Tämä osoittaa regeneraattoriin puristusyklin aikana varastoituneen energian jatkavan vapautumistaan myös purkusyklin jälkeen. Tätä regeneraattoriin jäänyttä energiaa ei kuitenkaan huomioida hyötysuhdetta laskettaessa, joten hyötysuhde asettuu lähelle verrokkiakun arvoja.

Lämpökameralla suoritettut lämpötilamittaukset tukevat paineakun ulkopinnassa olleiden lämpöantureiden tuloksia. Lämpökameran kuvien perusteella regeneraattorimoduuli jää parafiiniregeneraattoria käytettäessä testisyklin jälkeen akun keskiosaa sekä öljypuolta lämpimämmäksi. Ilman regeneraattoria testisyklin aikana paineakusta mitatut pintalämpö-

tilat saavuttavat suuremmat huippuarvot suhteessa regeneraattoreilla suoritettuihin mittauksiin.

Lämpökameran kuvien perusteella paineakussa esiintyy selvästi kolme eri lämpövyöhykettä. Puristusyklin aikana kaasutilavuuden kohdalla paineakku lämpenee voimakkaasti sen sisältämän kaasun lämmitessä (taulukot 9-13). Paineakkuun tuotava hydraulikkaöljy puolestaan lämmittää öljypuolta. Akkuun virtaavan öljyn lämmittävä vaikutus toki riippuu hydraulikkaöljyn lämpötilasta, joka ei merkittävästi noussut tämän työn mittausten aikana. Purkusyklin aikana syntyy kolmas lämpövyöhyke paineakun keskiosan kohdalle. Tällä vyöhykkeellä paineakun pintalämpötila laskee voimakkaasti suhteessa kaasutilavuuden kohdalta mitattuun pintalämpötilaan. Testisykliä aikana havaittiin lämpötilan laskevan jopa alle huoneenlämpötilan paineakun keskivaiheilla.

Lämpötilan lasku oli huomattavaa kaikilla kolmella testikokoonpanolla, joten regeneraattorin sijainti kiinteästi kaasutilavuuden päädyssä voi olla epäedullinen regeneraattorin optimaalisen toiminnan kannalta. Regeneraattorin tulisi kyetä tasaamaan kaasun lämpötilan muutokset koko kaasutilavuudessa myös purkusyklin aikana. Tämä edellyttäisi regeneraattorin liikkumista paineakun männän mukana. Mukana liikkuva regeneraattori tuottaa uusia haasteita regeneraattorin konstruktion kannalta ja lisää myös männän massaa, joka puolestaan vaikuttaa männän dynamiikkaan sekä tiivisteiden suunnitteluun.

Faasimuutosmateriaaleihin perustuvan regeneraattorin kehittämiseksi on selvästi panostettava regeneraattorin dynamiikkaan. Dynamiikkaa voidaan parantaa lisäämällä regeneraattorin kaasua vasten olevaa pinta-alaa, mutta myös lisäämällä faasimuutosmateriaalia vasten olevaa pinta-alaa. Pinta-alojen kasvattamisen ohella faasimuutosmateriaalin lämmönjohtavuudella on merkittävä vaikutus regeneraattorin dynamiikkaan, jolloin lämmönjohtavuutta voi olla kannattavaa kasvattaa sulamislämmön kustannuksella. Työssä käytetty parafiini voitaisiin vaihtaa esimerkiksi paremmin lämpöä johtavaan suolaliuokseen, jota käytettäessä tulee ratkaista mahdollisen saostumisen aiheuttama ikääntyminen. Lisäksi regeneraattorin jakaminen kahteen osaan, joista toinen kiinnittyy mäntään ja toinen kaasupuolen pätyyn, voi edesauttaa regeneraattorin toimintaa tasaamalla lämpötilojen vaihteluja laajemmalla alueella myös kaasutilavuuden muuttuessa.

8 Yhteenveto

Tekniikan kehittyessä laitteiden ja koneiden energia- ja kustannustehokkuus nousevat jatkuvasti merkittävämpään rooliin. Hydraulisilla toimilaitteilla saavutetaan hyvä tehoteho, mutta hydraulijärjestelmien hyötysuhde kokonaisuutena on tyypillisesti matala. Energian talteenottojärjestelmillä voidaan parantaa järjestelmien hyötysuhdetta erityisesti järjestelmissä, joiden työkierto on reversiibeli. Kyseisessä työkierrossa varsinaisen työliikkeen jälkeen suoritetaan vastaava liike paluusuuntaa. Tyypillisenä esimerkkinä tällaisesta työkierrosta on lastaustrukki, jossa taakan nostamisen jälkeen suoritetaan laskuliike ja tästä laskuliikkeestä voidaan kerätä potentiaalienergia talteen energian talteenottojärjestelmällä seuraavaa nostoa varten.

Hydraulisessa energian talteenottojärjestelmässä energiaa varastoidaan paineakkuihin puristamalla paineakun kaasutilavuudessa olevaa kaasua. Puristuksen aikana kaasu paineakussa lämpenee ja tämän myötä lämpöenergiaa alkaa virrata kaasusta pois esimerkiksi paineakun runkoon ja siitä ympäristöön. Tämä muodostaa merkittävimmän yksittäisen paineakun hyötysuhdetta laskevan häviön. Paineakun purkusyklin aikana puolestaan kaasun lämpötila laskee voimakkaasti eikä ympäristöön virrannutta lämpöenergiaa voida enää hyödyntää kaasun lämpötilan tasaamiseen. Muita häviöitä paineakuissa muodostavat muun muassa hydraulinesteen ja kaasun erottavan erotuselimen liikkumisesta syntyvät kitkahäviöt.

Tämän työn tavoitteena oli kehittää lämpöregeneraattori, jonka avulla paineakussa olevan kaasun lämpötilan nousua hidastetaan kasvattamalla paineakun kaasutilavuuden lämpökapasiteettia. Lämpöregeneraattori toimii siis paineakun sisällä lämpövarastona, johon varastoidaan kaasusta vapautuvaa lämpöenergiaa uudelleen käytettäväksi. Lämpövarastosta lämpöenergia voidaan hyödyntää kaasun jäähtyessä paineakun purkusyklin aikana. Kaasun lämpötilan laskeminen puristussyklin jälkeen puolestaan vähentää kaasusta paineakun rungon kautta ympäristöön virtaavan lämpöenergian määrää ja näin parantaa paineakun hyötysuhdetta.

Työssä suunniteltu lämpöregeneraattori perustui faasimuutosmateriaalien hyödyntämiseen. Faasimuutosmateriaaleilla tarkoitetaan materiaaleja, joissa tapahtuu faasimuutos käyttökohteen lämpötiloissa. Esimerkkinä faasimuutoksesta on kiinteän aineen muuttuminen nesteeksi. Faasimuutokseen tarvittava energia on erittäin merkittävä verrattuna materiaalien ominaislämpökapasiteetteihin ja tämän takia ilmiötä hyödynnetään tyypillisesti käyttökohteissa, joissa tarvitaan lämmön varastointia.

Työssä toteutettua lämpöregeneraattoria testattiin mäntäpaineakussa ja tuloksia vertailtiin ilman regeneraattoria suoritettuihin mittauksiin sekä Juhalan aiemmin toteuttamaan metalliseen hunajakennoon perustuvalla regeneraattorilla saatuihin mittaustuloksiin. Mittausten perusteella faasimuutosmateriaaliin perustuvalla lämpöregeneraattorilla on pieni paineakun hyötysuhdetta nostava vaikutus, mutta Juhalan toteuttamalla regeneraattorilla vaikutus oli merkittävästi suurempi. Faasimuutosmateriaaleihin perustuvan lämpöregeneraattorin kyky varastoida lämpöenergiaa oli merkittävästi parempi kuin hunajakennoregeneraattorin, mutta hunajakennoregeneraattorin parempi lämmönjohtavuus teki siitä merkittävästi dynaamisemman.

Tulosten valossa lämpöregeneraattorin kyky varastoida lämpöenergiaa ei ole niin merkittävä kuin regeneraattorin dynamiikka. Nopean dynamiikan avulla regeneraattori kykenee hidastamaan kaasun lämpenemistä myös hyvin nopeilla puristussykleillä. Tulevissa tutkimuksissa tulisikin selvittää faasimuutosmateriaaleihin perustuvan lämpöregeneraattorin dynamiikan parantamiseen liittyviä tekniikoita joko faasimuutosmateriaalia vaihtamalla tai kehittämällä regeneraattorin rakenteellia ratkaisuita.

Lähdeluettelo

- [1] Juhala Jyri, Kauranne Heikki, Pietola Matti. (2011). Improving energy efficiency of hydraulic accumulator. Teoksessa: USB Proceedings of The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'11, May 18-20, 2011, Tampere, Finland, ISBN 978-952-15-2522-3 (USB)
- [2] Lampinen, Markku J. Termodynamiikan perusteet / Markku J. Lampinen. Helsinki : Otatieta, 2010 - (Otatieta ; 582.). ISBN 978-951-672-368-9.
- [3] Juhala Jyri, Kauranne Heikki, Kajaste Jyrki, Pietola Matti. (2010). Energy Losses in Piston Type Hydraulic Accumulator. Teoksessa: 7th International Fluid Power Conference (7th IFK), Aachen, Germany, 22 - 24 March, 2010
- [4] Kauranne, Heikki. ; Kajaste, Jyrki. ; Vilenius, Matti. Hydrauliteknikka / Heikki Kauranne, Jyrki Kajaste, Matti Vilenius. Helsinki : Sanoma Pro, 2013. ISBN 978-952-63-0707-7 (nid.).
- [5] Heikki Palomäki. (2012). Paineakkujen testilaitteiston suunnittelu. Opinnäytetyö. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 65
- [6] PSA Peugeot Citroën 2014. *Hybrid Air, an innovative full hybrid gasoline system* [Homepage of Peugeot S.A.], [WWW]. [Viitattu: 8.5.2014]. Saatavissa: <http://www.psa-peugeot-citroen.com/en/featured-content/automotive-innovation/hybrid-air-engine-full-hybrid-gasoline>
- [7] Puddu, P. & Paderi, M. 2013. "Hydro-pneumatic accumulators for vehicles kinetic energy storage: Influence of gas compressibility and thermal losses on storage capability", *Energy*, vol. 57, pp. 326-335.
- [8] Benedict M, Webb GB, Rubin LC. An empirical equation for thermodynamic properties of light hydrocarbons and their mixtures: constants for twelve hydrocarbons. *Chem Eng Prog* 1951;47:419e22.
- [9] Juhala, J. & Pietola, M. 2011. "Hydraulic accumulator as energy storage", ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2011, pp. 369.
- [10] Aspen Aerogels, I. 2014. *All Insulation Products* [Homepage of Aspen Aerogels, Inc], [WWW]. [viitattu 08.05.2014] Saatavissa: <http://www.aerogel.com/products-and-solutions/all-insulation-products/>.
- [11] Thermal insulation in enhancing performance characteristics of hydraulic accumulator. Bath/ASME Symposium on Fluid Power & Motion Control (FPMC 2012). Bath, UK. 2012. University of Bath. Centre for Power Transmission and Motion Control, pp. 81-92. Juhala, J., Pietola, M. 2011.
- [12] Stroganov, A. & Shenshin, L. 2011. "Improvement of Heat-Regenerative Hydraulic accumulators". *Periodical*, vol. Ventil 17, no. 4. pp. 322-332.

- [13] Pourmovahed, A., Baum, S.A., Fronczak, F.J. & Beachley, N.H. 1988. "Experimental evaluation of hydraulic accumulator efficiency with and without elastomeric foam". *Journal of Propulsion and Power*, vol. 4, no. 2, pp. 185-192.
- [14] Pourmovahed, A. Durability testing of an elastomeric foam for use in hydraulic accumulator. *Journal of Solar Energy Engineering*, August 1990. Volume 112, Issue 3, pp. 223–228.
- [15] Hänninen Henri, Kauranne Heikki, Sinkkonen Antti, Pietola Matti. (2011). Study on energy usage of reach truck equipped with energy recovery system. Teoksessa: Proceedings of The Eleventh Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'09, June 2-4, 2009, Linköping, Sweden,
- [16] Juhala Jyri, Kauranne Heikki, Kajaste Jyrki, Pietola Matti. (2009). Improving energy efficiency of work machine with Digital Hydraulics and pressure accumulator. Teoksessa: The 11th Scandinavian International Conference on Fluid Power (SICPF'09), Linköping, Sweden, June 2-4, 2009 Avainsanat: digital hydraulics, energy efficiency, regenerative, accumulator
- [17] Enthalpy of fusion and enthalpy of vaporization. [WWW]. [viitattu 2.3.2012]. Saatavissa: <http://chemed.chem.wisc.edu/chempaths/GenChemTextbook/Enthalpy-of-Fusion-and-Enthalpy-of-Vaporization-842.html>
- [18] Sarı, A. & Karaipekli, A. 2007. "Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material". *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, no. 8-9, pp. 1271-1277.
- [19] Ge, H., Li, H., Mei, S. & Liu, J. 2013. "Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: An emerging frontier in energy area". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, no. 0, pp. 331-346.
- [20] Cárdenas, B. & León, N. 2013. "High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. vol. 27. pp. 724-737.
- [21] Heikkinen, J., Laurikko, J., Elonen, T. & Seppälä, A. 2009. *Lämpö- ja kylmäakut kuljetusvälineissä*. Tampere. VTT. 93. VTT-R-02312-09
- [22] KELLER AG für Druckmesstechnik. 2014. [Homepage of KELLER AG für Druckmesstechnik]. [WWW]. [Viitattu: 8.5.2014]. Saatavissa: <http://www.keller-druck.com/picts/pdf/engl/23e.pdf>

- [23] Wenglor Sensoric, G. 2014. *Webglor. OY1P303P0102 technical data* [Homepage of Wenglor Sensoric, GmbH]. [WWW]. [Viitattu: 8.5.2014]. Saatavissa: [http://www.wenglor.com/index.php?id=709&tx_wsproductlister_pi1\[ArtikelNR\]=OY1P303P0102&tx_wsproductlister_pi1\[backPID\]=628&cHash=24b959232dc493989cdf2cbb0269f08b](http://www.wenglor.com/index.php?id=709&tx_wsproductlister_pi1[ArtikelNR]=OY1P303P0102&tx_wsproductlister_pi1[backPID]=628&cHash=24b959232dc493989cdf2cbb0269f08b)
- [24] Omega Engineering Inc. 2006. *Thermocouple introduction and theory*. [WWW]. [Viitattu: 08.05.2014]. Saatavissa: <http://www.omega.com/temperature/z/pdf/z021-032.pdf>
- [25] Saunders, Peter. *Radiation thermometry : fundamentals and applications in the petrochemical industry / Peter Saunders*. Bellingham, Wash. : SPIE Press, cop. 2007. - (Tutorial texts in optical engineering ; v. TT 78.). ISBN 9781615837267 (electronic bk.), ISBN 1615837264 (electronic bk.).
- [26] Nokeval, O. 2008. *6821 - ohjelmoitava 2-kanavainen lähetin*. [WWW]. [Viitattu: 8.5.2014]. Saatavissa: http://www.nokeval.com/products.php?product_id=23&mid=5&sid=11&language=finnish
- [27] Flir Systems, I. 2014. *FLIR SC620, FLIR SC640 FLIR SC660 specifications*. [WWW]. [Viitattu: 8.5.2014]. Saatavissa: <http://www.flir.com/cs/apac/en/view/?id=41965>
- [28] The MathWorks, I. 2014. *Simulink Real-Time*. [WWW]. [Viitattu: 8.5.2014]. Saatavissa: <http://www.mathworks.se/products/simulink-real-time/>
- [29] The MathWorks, I. 2014. *Simulink- Simulation and Model-Based design*. [WWW]. [Viitattu: 8.5.2014]. Saatavissa: <http://www.mathworks.se/products/simulink/>
- [30] The MathWorks, I. 2014. *Matlab - The language of technical computing*. [WWW]. [Viitattu: 8.5.2014]. Saatavissa: <http://www.mathworks.se/products/matlab/>
- [31] National Instruments Corporation 2014, , *NI PCI-6733 Datasheet*. [WWW]. [Viitattu: 8.5.2014]. Saatavissa: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/fi/nid/11476>
- [32] National Instruments Corporation 2014, , *NI PCI6031E Datasheet*. [WWW]. [Viitattu: 8.5.2014]. Saatavissa: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/fi/nid/1055>