



MIKROPAINOVOIMAINEN PALAMINEN

Kirjallisuustyö

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

Tuomo Mutru

Tarkastaja: Dosentti Kari Myöhänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Tuomo Mutru

Mikropainovoimainen palaminen

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

30 sivua, 16 kuvaa, 0 taulukkoa ja 0 liitettä

Tarkastaja: Dosentti K.M

Avainsanat: mikropainovoima, palamistutkimus, esisekoittamaton diffuusioliekki

Kandidaatintyössä mikropainovoimaista palamista tutkittiin kirjallisuuskatsauksena aiemmin tehtyjen tutkimusten avulla. Työssä tarkasteltiin kolmea mikropainovoimassa suoritettua esisekoittamattoman diffuusioliekin palamistutkimusta. Tutkimuskohteet olivat kynttilän, kiinteän pinnan ja pisaran palaminen. Lopuksi työssä pohdittiin, voisiko mikropainovoimainen palamistutkimus auttaa jotenkin myös painovoimaista palamista.

Merenpinnan tasolla kynttilän liekki palaa kirkkaan keltaisena ja se muistuttaa putoavan nestepisaran muotoa. Näille ilmiöille painovoimalla on keskeinen merkitys. Liekin muoto syntyy kuumen liekin ympärillä muodostuvien tiheyserojen nostattavasta vaikutuksesta. Palamisreaktiot pilkkovat sydänlangasta höyrystyvän vahan eri hiilyhdisteiksi. Kaasumolekyylien viritystilojen purkautuminen synnyttää liekin alaosaan sinisen värin. Tiheyserot tehostavat vapaata konvektiota ja syntyneet hiilyhdisteet palavat nopeasti ja korkeassa lämpötilassa. Tällöin palamisessa muodostuu palamisen lopputuotteita ja nokea, joka synnyttää liekille kirkkaan keltaisen värin. Mikropainovoimassa painovoiman vaikutus häviää. Tästä syystä tiheyserojen ja vapaan konvektion vaikutus liekkiin eivät enää päde. Mikropainovoimassa liekki palaa hitaammin ja alemmassa lämpötilassa, muodostamatta nokea. Tällöin liekki näyttäytyy sinertävänä, mikä johtuu kaasumolekyylien viritystilojen purkautumisesta.

Mikropainovoimassa kynttilän liekki palaa hyvissä olosuhteissa pitkään. Kiinteä pinta osoitautui palavan joko tasaisella tai kasvavalla liekillä. Suuren heptaanipisaran palamistutkimuksessa havaittiin liekin palavan kuumen liekin lisäksi niin sanotulla ”viileällä liekillä”. Työssä käsitellyt tutkimukset korreloivat toistensa kanssa hyvin. Tästä voidaan päätellä, että mikropainovoimassa liekki palaa alemmassa lämpötilassa ja puhtaammin, kuin painovoimassa. Mikropainovoimainen palaminen luo maanpäälliseen palamistutkimukseen uuden tarkastelukulman, jonka avulla voidaan kehittää nykyistä polttotekniikkaa entistä tehokkaammaksi ja vähäpäästöiseksi.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Tuomo Mutru

Microgravity combustion

Bachelor's thesis

2022

30 pages, 16 figures, 0 tables and 0 appendices

Examiner: Adjunct Professor K.M

Keywords: microgravity, combustion research, non-premixed diffusion flame

This bachelor's thesis investigated microgravity combustion as a literature review through previous research. There were three combustion research projects about non-premixed diffusion flames. Research projects investigated candle flames, flame spread over thin solids, and droplet combustion. Finally, the work considered whether microgravity combustion research could somehow also help combustion on Earth.

At sea level, the candle flame burns bright yellow and resembles the shape of a teardrop. Gravity plays a key role in these phenomena. The shape of the flame is created by the density differences around the hot flame. Combustion reactions break down the vaporizing wax from the wick into different carbon compounds. After excitation the gas molecules return to their ground state and emit blue color wavelength at the bottom of the flame. Density differences enhance free convection and carbon compounds burn quickly and at high temperatures, so the final products of combustion and soot are formed. Forming soot gives the flame a bright yellow color. In microgravity, the effect of gravity disappears. For this reason, the effect of density differences and free convection on the flame no longer applies. In microgravity, the flame burns more slowly and at a lower temperature, without forming soot. In this case, the flame appears bluish, because excitation of the gas molecules return to their ground state.

In microgravity, a candle burns in good conditions for a long time. The thin solids turned out to be burning with either a stable or growing flame. In large n-heptane burning, researchers discovered that the flame was also burning with a so-called "cool flame". Results correlate well to each other, which leads to the conclusion that in microgravity the flame burns at a lower temperature and soot-free. Microgravity combustion creates a new perspective for combustion research. This can be used to develop current combustion technology to be more efficient with low emissions.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

BASS	Burning and Suppression of Solids
CFI	Cool Flame Investigation
CFIG	Cool Flame Investigation with Gases
CIR	Combustion Integrated Rack
FLEX	Flame Extinguishment Experiment
FSR	Flame Standoff Ratio
ISS	International Space Station
LLL-UV	Low Light Ultraviolet
MDCA	Multi-User Droplet Combustion Apparatus
MSG	Microgravity Science Glovebox
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NO _x	typen oksidit
PM	hiukkaspäästöt
SIBAL	Solid Inflammability Boundary At Low-Speed
STS-50	Space Teleportation System-50
USML-1	United States Microgravity Laboratory 1

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1. Johdanto.....	6
2. Teoriaosuus.....	7
2.1. Painovoimaisen palamisen fysiikka	7
2.2. Mikropainovoimainen palaminen	9
3. Tehdyt tutkimustyöt.....	13
3.1. Kynttilän palaminen mikropainovoimassa.....	13
3.2. Kiinteän pinnan palaminen mikropainovoimassa	16
3.3. Pesarapalaminen mikropainovoimassa	20
4. Onko mikropainovoimaisesta palamistutkimuksesta hyötyä?.....	25
5. Johtopäätökset	28
Lähteet	29

1. Johdanto

Palamisreaktiot ja palaminen ovat keskeisiä nyky-yhteiskunnan liikenteessä, teollisuudessa sekä sähkön- ja lämmöntuotannossa. Tämä tekee palamistutkimuksesta tärkeää. Tässä kandidaatintyössä käsitellään mikropainovoimaista palamista kirjallisuustyönä. Mikropainovoima, joka arkikielessä usein mielletään painottomuudeksi, aiheuttaa palamisreaktiossa ja liekissä muutoksia verrattuna painovoimaiseen palamiseen. Tämän työn tarkoituksena on syventyä mikropainovoimaiseen palamiseen tutkimusten avulla. Lopussa pohditaan, voisivatko nämä auttaa jotenkin myös painovoimaisen palamisen tutkimusta. Tämä kandidaatin työ luo uuden tarkastelukulman palamisesta aiemmin tehtyyn tutkimustyöhön verrattuna.

Aiempi tutkimus on osoittanut mikropainovoimaisen palamisen mahdolliseksi. Mikropainovoimassa liekin lämpöhäviöt suhteessa palamisessa syntyvään lämpöön ovat painovoimaista suuremmat. Tästä syytä liekki palaa mikropainovoimassa painovoimaista palamista alemmassa lämpötilassa ja se muodostaa enimmäkseen sinertävän liekin. Tutkimuksia on suoritettu laajasti eri materiaaleilla ja niiden pääasiallinen tutkimustarkoitus on ollut avaruuden paloturvallisuus. Tutkimukset ovat osoittaneet liekin leviävän mikropainovoimassa hyvin, jos tutkimusympäristö on palamiselle suotuisaa.

Tutkimuksia on suoritettu enimmäkseen vain yhdestä perspektiivistä, missä palamisilmiötä on tutkittu yhdellä materiaalilla. Tässä kandidaatintyössä kootaan keskeisimmät tutkimukset yhteen. Tehtyjä tutkimuksia tarkastellaan liekin muodon ja värien näkökulmasta, mikä tässä työssä on tärkeintä.

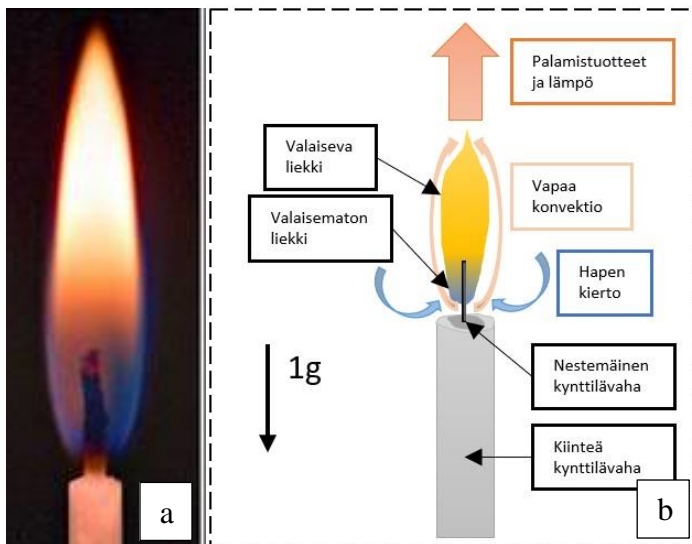
Tutkimuksen tavoitteena on käsitellä mikropainovoimaista palamista aiheesta tehtyjen tutkimusten avulla. Tutkimusongelma on selvittää, olisiko niistä jollain tavalla hyötyä myös painovoimaisen palamisen tutkimustyöhön. Tutkimusmateriaalia on verrattain paljon, joten työ rajataan käsittelemään historian varrelta keskeisimpiä esisekoittamattomista diffuusio- liekeistä tehtyjä tutkimustöitä. Työn aluksi tutustutaan teoreettisesti mikropainovoimaiseen palamiseen ja sen eroihin verrattuna painovoimaiseen palamiseen. Toisessa kappaleessa käsitellään tarkemmin mikropainovoimaisesta palamisesta tehtyjä tutkimuksia sekä niiden tuloksia. Tutkimuksista on eritelty selkeät pääteemat, joita työssä käsitellään. Tämän jälkeen pohditaan kolmannessa kappaleessa aiemmin määriteltyä tutkimusongelmaa eli sitä, että voisiko mikropainovoimainen palaminen auttaa jollain tapaa myös painovoimaisen palamisen tutkimusta.

2. Teoriaosuus

Tässä osiossa käsitellään mitä oikeastaan mikropainovoimainen palaminen tarkoittaa. Osion alkuun kerrotaan painovoimaisen palamisen fysiikkaa, jonka jälkeen syvennytään siihen, miten mikropainovoimainen palaminen eroaa painovoimaisesta palamisesta. Osio toimii lukijalle teoreettisena viitekehystenä, joka auttaa ymmärtämään enemmän tulevien tutkimusten käsittelyä. Tutkimukset on rajattu käsittelemään esisekoittamattomien diffuusioliekkien palamista mikropainovoimassa. Diffuusioliekki tarkoittaa mitä vain liekkiä, jossa polttoaine ja happi ovat erillään ennen palamista. Diffuusioliekin esimerkkejä ovat kynttilän palaminen ja pisarapalaminen (Williams, F. A. 1985, 38). Teoriaosuudessa käsitellään kynttilän palamista, koska tämä on useimmiten käytetty menetelmä vertailtaessa diffuusioliekin palamisen eroja painovoiman ja mikropainovoiman välillä (Ross, H.D. 2001, 3).

2.1. Painovoimaisen palamisen fysiikka

Merenpinnan tasolla kynttilää poltettaessa liekki palaa tutulla tavalla. Liekki muodostaa alhaalta ylöspäin suppenevan muodon, kuten havainnollistavasta kuvasta (1a) voidaan havaita. Kuvaan (1b) on lisätty myös kynttilän palamiseen ja liekin muotoon liittyvä fysiikka, jota käsitellään tarkemmin vielä kuvan jälkeen.



Kuva 1a. Kynttilän liekin palaminen merenpinnan tasolla (NASA, 2014a). Kuva 1b. Liekin muotoon ja väreihin liittyvä fysiikka merenpinnan tasolla (Mutru, 2022)

Tutkitaan liekin muotoa ja väriä merenpinnan tasolla ilmakehän paineessa asettaen taserajan sisälle kynttilä ja siinä palava liekki sekä näiden lähiympäristö. Systemi on avoin, jolloin

taserajan yli voi virrata ainetta ja energiaa. Taserajan sisälle tulee viileää hapekasta ilmaa ja taserajasta poistuu palamisreaktiossa syntyneitä lämpöenergiaa sekä palamistuotteita. Hapekas viileämpi ilma virtaa palamisreaktioon sekä diffuusion, että luonnollisen konvektion vaikutuksesta. Vapaan konvektion vaikutus on palamisessa niin suuri, että käytännössä diffuusion vaikutus voidaan olettaa tässä tarkastelussa olemattomaksi.

Kynttilä sytytetään sen sydänlangasta, joka on palavaa materiaalia. Sydänlangan palaessa kiinteä kynttilävaha sulaa päältä nestemäiseksi alkuliekin lämpöenergian vaikutuksesta. Kynttilässä nestemäinen vaha nousee ylöspäin sydänlankaa pitkin kapillaari-ilmiön seurauksena liekin keskelle. Nestemäinen vaha kaasuuntuu lämpöenergiaa saadessaan, joka toimii kynttilälle niin sanottuna polttoaineena. Kaasuuntunut kynttilän vaha hajoaa eri palamisyhdisteiksi reagoiden samalla hapen kanssa. (McAllister, S. et al. 2011, 139.)

Palamisreaktiossa syntyvät eri palamistuotteet virittyvät korkeassa lämpötilassa emittoiden näkyvää valoa eri aallonpituuksilla. Tästä kynttilän liekki saa sille ominaiset värinsä (McAllister, S. et al. 2011, 112). Liekin alaosassa väri on sinertävä, kuten kuvista (1a ja 1b) nähdään. Väri aiheutuu hiilivety-yhdisteiden, pääasiassa CH^* radikaalin viritystilän purkautumisesta (Mälkönen, P. 2016, 10) (McAllister, S. et al. 2011, 112). Tässä kohtaa kynttilän liekin lämpötila on suhteellisen alhainen. Kuvassa (1b) sinertävä alue on kuvattu valaisemattomana liekinä johtuen siitä, että sen valon voimakkuus on kirkkaan keltaiseen valoon nähden huomattavasti himmeämpi. Tiheyserojen vaikutuksesta vapaa konvektio tehostaa palamista, jolloin palaminen on nopeaa ja liekki palaa suuressa lämpötilassa. Tällöin hiilivedyt jatkavat reagoimista hapen kanssa, jonka lopputuloksena palamisessa syntyy hiilidioksidia, vettä ja nokea. Noki kasvattaa liekissä säteilyn emissiviteettiä lähelle todellista mustan kappaleen emissiviteettiä. Tämä tarkoittaa sitä, että liekin lämpötila korreloi liekin väriin, minkä syystä liekki on tässä kohtaa keltainen. (Mälkönen, P. 2016, 11) Liekin kellertävä alue saa siis värinsä, kun liekissä muodostuu nokea (McAllister, S. et al. 2011, 140). Kuvassa (1b) tämä alue on merkitty valaisevaksi liekiksi, koska sen valaiseva vaikutus on liekissä suuri.

Liekin muotoa tarkasteltaessa lämmennyt ilma ja palamistuotteet lämmittävät vapaan konvektion ja säteilyn avulla lähiympäristöään, eli ilmaa. Kappaleen tuntema painovoima on massan ja gravitaatiovakion tulo. Massa voidaan niin edelleen pilkkoa tilavuuden ja tiheyden tuloksi. Kun oletetaan tarkastelussa tilavuuden ja gravitaatiovakion pysyvän vakioina, todetaan kappaleen tiheyden olevan suoraan verrannollinen sen tuntemaan painovoimaan. Liekin lämmönsiirrosta lämmennyt ilma on kylmää ilmaa kevyempää, koska ilman tiheys pienenee

lämpötilan funktiona (Bergman, T. L. et al. 2017, 925). Liekin lämmönsiirrosta lähiympäristöön syntyvät lämpötilagradientit synnyttävät lähiympäristössä tiheyseroja. Lämmin ilma kohoaa ylöspäin suhteessa kylmään ilmaan, koska sen tuntema painovoima on pienempi, kuin kylmän ilman. Kohoava ilma nostaa samalla myös liekkiä, minkä syystä liekki saa sille tutun suipon muodon. Liekissä suurin vaikuttava lämmönsiirron muoto on säteily, mutta sillä ei ole vaikutusta liekin muotoon. Tiheyserot synnyttävät liekin ympärille liikettä, jota kutsutaan vapaaksi konvektioksi (Çengel, Y. A. et al. 2008, 834–835). Vapaassa konvektiossa lämpö siirtyy tiheyserojen vaikutuksesta kuumemmasta lämpötilasta kylmään (Bergman, T. L. et al. 2017, 549).

Liekin palamisen lisäksi on tärkeää käsitellä myös liekin sammumista. Liekin sammuminen painovoimassa voidaan havaita helposti näköhavainnolla. Kun kynttilä sammutetaan puhaltamalla, havaitaan, että liekki sammuu. Tätä liekin sammumista kutsutaan niin sanotuksi diffuusiviseksi liekin sammumiseksi. Kun tutkitaan mikropainovoimaista palamista, voidaan todeta, että liekin sammutustila voi olla myös säteilevä. (Axelbaum R. L. et al. 2007, 665–666.) Sammutustilassa kyse on siitä, että liekki säteilee enemmän energiaa liekistä pois päin, mitä palamisessa ehtii syntyä (Axelbaum R. L. et al. 2007, 675).

2.2. Mikropainovoimainen palaminen

Tieteellisesti sana ”mikro” tarkoittaa miljoonasosaa tarkastellusta vertailuarvosta. Mikropainovoima käsitteenä tarkoittaa siis sitä, että kappaleen kokema gravitaatiovoima on miljoonasosa verrattuna merenpinnan tasolla koettuun gravitaatiovoimaan. Toisin sanoen kappaleen tuntema painovoima on marginaalisen pieni.

Mikropainovoimainen tutkimusympäristö voidaan teoreettisesti toteuttaa kahdella eri tavalla. Kappaleen on joko oltava huomattavan kaukana maapallon pinnasta, jolloin tähän ei enää kohdistu juurikaan maan vetovoimaa tai vastaavasti kappaleen on oltava vapaapudotuksessa kohti maan keskipistettä. Usein ymmärretään maapalloa kiertävien kappaleiden olevan mikropainovoimassa siitä syystä, että ne ovat tarpeeksi kaukana maapallon pinnasta, eivätkä ne koe maan vetovoimaa. Todellisuudessa mikropainovoiman aiheuttaa lähiavaruudessa kappaleiden kokema jatkuva vapaapudotus, kun ne kiertävät maapalloa ympäri sopivalla nopeudella. Avaruusalus kokee jatkuvasti putoavansa kohti maapalloa, mutta koska sen nopeus on sopivan suuri, se ei koskaan ehdi pudota maanpinnalle maapallon kaareutuvuuden syystä. (Ross, H.D. 2001, 11–12.) Voidaan siis todeta, että näistä vapaapudotus on

tällä hetkellä ainoa vaihtoehto toteuttaa mikropainovoimainen tutkimusympäristö. Tässä työssä käsiteltävien mikropainovoimaisen palamisen tutkimukset ovat toteutettu joko lähiavaruudessa tai niin sanotusti keinotekoisesti aiheuttaen tutkimusympäristöön painovoimaton tila pudotuskokeiden tai lentokoneen avulla. Näissä tapauksissa painovoimaton tila saavutetaan myös vapaapudotuksen avulla.

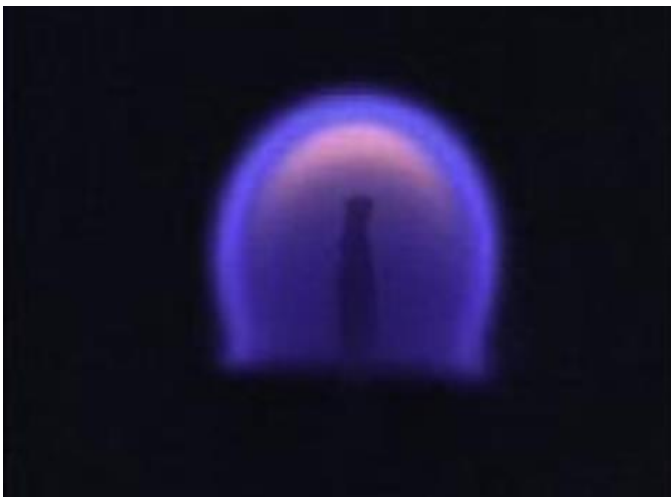
Mitä sitten liekille tapahtuu mikropainovoimassa? Painovoima synnyttää kirkkaan valoisian ja putoavan nestepisaran muotoisen liekin tiheyserojen ja vapaan konvektion syystä. Painovoimassa liekin lämmönsiirrosta lähiympäristöön syntyvät lämpötilagradientit synnyttävät liekin ympärille tiheyseroja. Aiemmin todettiin kappaleen tiheyden olevan myös suoraan verrannollinen sen tuntemaan painovoimaan. Kun gravitaatiovoima on noin miljoonasosa merenpinnan tasosta, kappaleiden tuntemaan painovoiman erotus on olemattoman pieni, vaikka tiheyseroja syntyisikin. Tiheyserojen vaikutus liekin muotoon mikropainovoimaisessa palamisessa voidaan siis olettaa olemattomaksi. Luonnollisen konvektion lämmönsiirto perustuu tiheyseroihin ja siihen, kuinka lämpö siirtyy väliaineen tiheyserojen avulla kuumasta kylmään (Bergman, T. L. et al. 2017, 549). Koska mikropainovoimassa tiheyserojen vaikutus ei päde samaan tapaan kuin merenpinnan tasolla, voidaan todeta myös luonnollinen konvektio mikropainovoimaisessa palamisessa olemattomaksi. Mikropainovoimassa eri lämpötilat ja konsentraatiot ajan kuluessa kuitenkin sekoittuvat johtuen diffuusiosta. Mikropainovoimassa palaminen pysyy ainutlaatuisen paikallaan. Stefan-virtausta lukuun ottamatta liekin tarvitsema happi ja polttoaine kulkeutuvat ainoastaan diffuusion avulla palamisreaktioon ja sieltä pois (Dietrich D.L. et al. 2000, 3).

Mikropainovoimaista palamista voidaan tarkastella teoreettisesti kynttiläpalamisen kautta. Mikropainovoimaisessa palamisessa todetaan kynttilän synnyttävän alkuhetkillä sydänlangan palaessa kirkkaan keltaisen ja pallomaisen liekin (kuva 2). Liekki on kellertävä, koska siinä muodostuu nokea (McAllister, S. et al. 2011, 140).



Kuva 2. Kynttilän liekki mikropainovoimassa sytytyshetkellä (NASA, 2014a)

Hetken kuluttua liekin väri ja muoto muuttuivat tutkimuksissa sinertäväksi ja puolipallo-maiseksi (kuva 3). Sydänlangan palamisreaktioista syntyvä lämpö sulattaa kynttilän vahaa ja lopulta tätä alkaa höyrystyä. Höyrystynyt kynttilän vaha jatkaa pilkkoutumista pienemmiksi hiilivety-yhdisteiksi, jotka palavat reaktiossa. Tässä polttoaine palaa niin, että alkuainehiiltä eli nopea palamisreaktioiden välituotteena ei synny. Sininen väri johtuu tällöin vain palamistuotteiden, pääasiassa CH^* radikaalin viritystilän purkautumisesta. Tämän lisäksi liekki säteilee voimakkaasti ultraviolettivaloa, mitä ei voi havaita paljaalla silmällä. (Mälkönen, P. 2016, 10.)



Kuva 3. Kynttilän liekin muuttunut väri ja muoto mikropainovoimassa (NASA, 2014b)

Liekin valoisuus väheni tutkimusten edetessä, kunnes liekki lopulta sammui. Näiden ilmiöiden osalta tutkimukset NASA:n STS-50 avaruussukkulassa (USML-1) vuonna 1992, Venäläisellä Mir-avaruusasemalla vuonna 1995, lyhytaikaisen mikropainovoiman tuottavassa lentokoneessa vuonna 1989 sekä 5.2 sekuntia kestävässä pudotustestissä NASA:n Lewis

Research – keskuksessa vuonna 1991 osoittavat kynttilän liekin käyttäytyvän mikropainovoimassa samoin. (Dietrich D.L. et al. 2000, 5.)

Kuvat ja tutkimukset osoittavat kynttilän liekin palavan mikropainovoimassa puolipallomaisena ja sen väri on sinertävä. Väri muodostuu ainoastaan hiilivetyjen viritystilojen purkautumisen emittoimasta säteilystä (Mälkönen, P. 2016, 10). Mikropainovoimassa liekin lämpöviäyt ovat suhteessa tuotettuun lämpöön suuremmat, kuin merenpinnan tasolla. Tämä aiheuttaa liekille alhaisemman lämpötilan verrattuna painovoimaiseen palamiseen ja nopea ei synny (Dietrich D.L. et al. 1995, 33). Liekki palaa mikropainovoimassa noen muodostumista alemmassa lämpötilassa, mikä tarkoittaa, että se on vähäpäästöisempi. Palaminen eroaa siis mikropainovoimassa suuresti verrattuna painovoimaiseen palamiseen. Erityisesti tämä seikka on tuottanut tutkijoissa kiinnostusta tutkia entistä tarkemmin palamisilmiöitä mikropainovoimassa.

3. Tehdyt tutkimustyöt

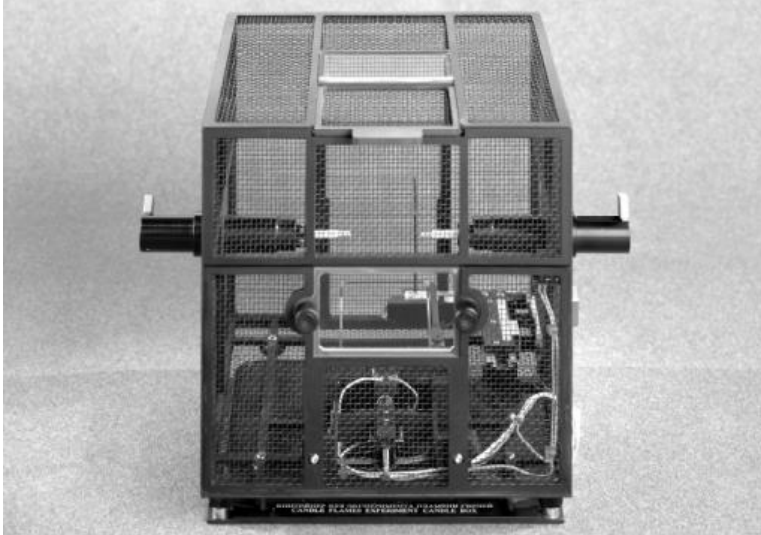
Tässä osiossa käsitellään mikropainovoimaisesta palamisesta tehtyjä tutkimuksia. Tutkimuksista keskeisimmät pääteemat on jaoteltu eri alakappaleisiin. Niistä ensimmäisenä syvennytään jo hieman teoriaosuudessa käsiteltyyn kynttiläpalamiseen. Tämän jälkeen tutustutaan kiinteän pinnan palamiseen mikropainovoimassa. Viimeisenä tutkitaan vielä pisarapalamista mikropainovoimassa. Tutkimusten eri palamismuodot osoittavat, kuinka liekki käyttäytyy mikropainovoimassa.

3.1. Kynttilän palaminen mikropainovoimassa

Teoriaosuudessa käsiteltiin jo hieman kynttilän palamista mikropainovoimassa. Tehdyt tutkimukset osoittivat, että kynttilän liekki palaa sinertävän puolipallomaisena mikropainovoimassa. Ensimmäinen tutkimus toteutettiin lähiavaruudessa NASA:n avaruussukkulan STS-50 (Space Teleportation System-50) USML-1-mittauslaitteistolla (United States Microgravity Laboratory 1) vuonna 1992. Toinen tutkimus toteutettiin Venäläisellä Mir-avaruusasemalla vuonna 1995. Tutkimusten tarkoituksena oli tutkia, miten liekki käyttäytyy mikropainovoimassa. Näistä yksi tutkimusten aiheista oli kynttilän palaminen. Molemmissa tutkimuksissa gravitaatiovaikutus mitattiin alle 10^{-5} suuruiseksi merenpinnan tasoon nähden, joten tutkimusympäristöt todettiin mikropainovoimaisiksi. (Dietrich D.L. et al. 2000, 3.)

Venäläisellä Mir-avaruusasemalla tutkimusympäristönä käytettiin metalliverkosta rakennettua kuutiota, jonka sivun pituus oli noin 20 cm (kuva 4). Mittauslaitteistossa oli käytössä sytytin, joka poistui automaattisesti noin 4–5 sekunnin kuluttua sytytyksestä. Tutkimusympäristö oli asetettu ilmakehän paineeseen ja hapen mooliosuus oli 0,22 ja 0,25 välillä. Tämä tarkoittaa sitä, että happipitoisuus mittauksissa oli hieman korkeampi ilmakehän happipitoisuuteen (0,21) verrattuna. STS-50 lennolla käytettiin sen sijaan mittauslaitteistona polykarbonaatista rakennettua kuutiota, jonka sivun pituus oli 11,5 cm. Laitteistossa oli erillinen sytytin, joka poistettiin sytytyksen jälkeen käsin. Mittaukset suoritettiin ilmakehän paineessa ja happipitoisuus oli lähellä ilmakehän happipitoisuutta (0,217). Mittauslaitteiden suurimpana erotuksena oli se, että Mir-avaruusasemalla metalliverkon ansiosta hapen kulkeutuminen palamisreaktioon ja palamistuotteiden kulkeutuminen pois palamisesta diffuusion vaikutuksesta oli vapaampaa, kuin STS-50 lennolla. Molemmat mittaukset kuvattiin ja

analysoitiin verraten saatuja tuloksia aiemmin tehtyihin mallinnuksiin liekin muotoon liittyen. (Dietrich D.L. et al. 2000, 3–4.)

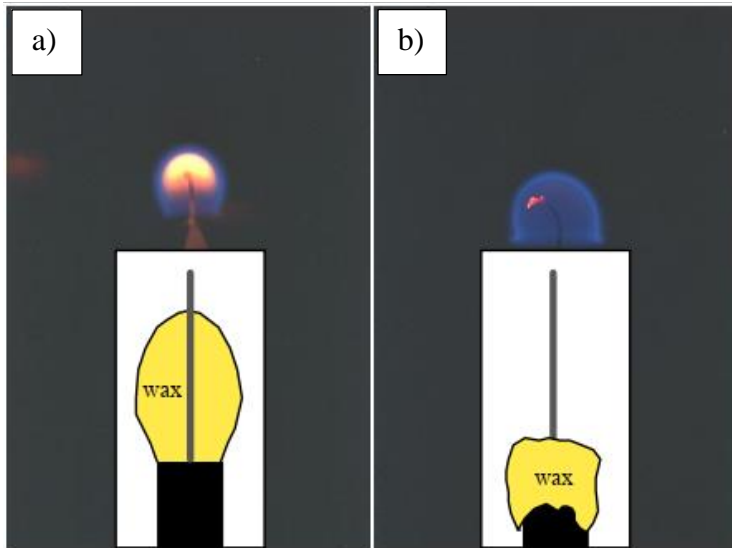


Kuva 4. Mir-avaruusasemalla käytetty mittauslaitteisto (Ferkul, P. et al., 1999)

Kynttilässä oli 80 % parafiinia ja 20 % steariinihappoa, jolloin kynttilän vaha oli sopivan sitkeää. Tutkimuksissa kynttilän pituus vaihteli 1,2 ja 2 cm välillä ja sen halkaisija oli joko 0,5 tai 1 cm ja käytössä oli muutama eri paksuinen sydänlanka. (Dietrich D.L. et al. 2000, 4–5.) Kun kynttilä sytytettiin, liekki osoittautui STS-50 lennon mittauksessa alusta alkaen pallomaiseksi ja se paloi kirkkaan keltaisena noin 8–10 sekuntia. Tutkimusten alussa Mir-avaruusasemalla vastaavasti sama ilmiö kesti jopa muutamia minuutteja, joka johtui oletusten mukaan korkeammasta happipitoisuudesta. Tutkimuksen alussa kynttilän vaha oli vielä kiinteää ja ainoa palava aines oli sydänlanka. Liekin kirkkaan keltainen väri johtui noen muodostumisesta liekissä. STS-50 tutkimuksessa noin 10 sekunnin kuluttua liekki muuttui sinertäväksi ja puolipallomaiseksi, jolloin sen arvioitiin olleen halkaisijaltaan noin 1,5 cm. Tästä hetkestä myös liekin valon voimakkuuden todettiin vähentyneen ajan funktiona. Kynttilä paloi STS-50 lennon tutkimuksissa 40–60 sekuntia, ja ennätysaika oli 105 sekuntia. Ennen liekin sammumista, liekki värähteli viimeisen viiden sekunnin ajan, kunnes sen liekki sammui. (Dietrich D.L. et al. 2000, 5–6.)

Mir-avaruusasemalla kynttilän vaha alkoi sulaa nopeasti liekin vaikutuksesta. Tutkimuksissa kynttilän kiinteä vaha sulii kokonaan muutamissa minuuteissa riippuen tarkemmin siitä, oliko kynttilän halkaisija 0,5 vai 1 cm (kuva 5a). Kynttilä pysyi tässä vaiheessa stabiilina. Tämän jälkeen havaittiin kuplien, oletettavasti hapen kiertävän sulassa vahapallossa sydänlangan kautta johtuen syntyneistä lämpötilagradienteista. Liike aiheutti sen, että jossain kohtaa

tutkimusta sulanut vahapallo muuttui yhtäkkiä epästabiiliksi, vahapallon rakenne hajosi ja se alkoi valua takaisin kynttilänjalkaan. Valumisen jälkeen liekin väri muuttui tumman sinertäväksi ja sen muoto muuttui puolipallomaiseksi (kuva 5b). Tämän jälkeen liekin väri ja muoto pysyi vakaana sammumiseen asti. (Ferkul, P. et al. 1999, 5.)



Kuva 5a. Alussa kynttilän vaha sulii kokonaan. Kuva 5b. Liekin muutos, kun vaha valui kynttilänjalkaan (Ferkul, P. et al., 1999)

Liekin koko kasvoi siihen asti, kunnes sulaneen vahapallon rakenne hajosi, jonka jälkeen liekin koko ei muuttunut tutkimuksessa oleellisen paljon. Tutkimukset osoittivat myös sen, että liekistä tulevan valon voimakkuus himmeni aina sammumiseen asti. Mir-avaruusaseman tutkimuksissa syntyi myös STS-50 lennon tapaista värähtelyä suuremmilla sydänlangan halkaisijoilla, jotka kestivät jopa 90 sekuntia (Dietrich D.L. et al. 2000, 6). Tutkimuksissa kynttilät paloivat 100 sekunnista aina 45 minuuttiin asti, joista pisimmät paloajat syntyivät ohuimmilla sydänlangoilla. Tutkimuksen lopussa Mir-avaruusasemalla tutkijat havaitsivat kynttilän sammumisen jälkeen sen tilalle syntyneen 2–3 kertaa suuremman valkoisen, pyöreähkön höyrypilven, jonka oletettiin muodostuneen pääasiassa höyrystyneestä vahasta, joka oli kulkeutunut vahapallosta etäälle liekistä. (Ferkul, P. et al. 1999, 5.)

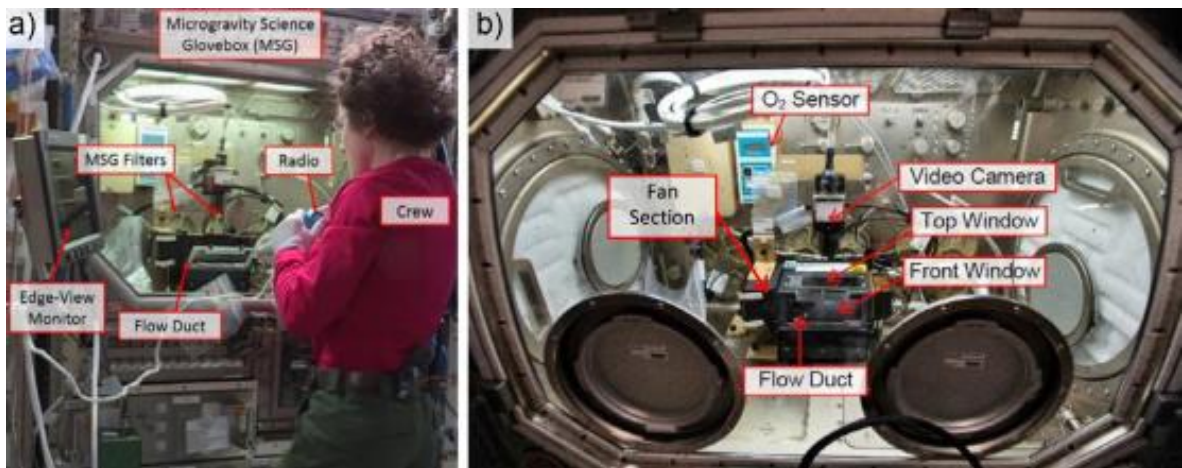
Tutkimukset osoittivat kynttilän palavan mikropainovoimassa diffuusion vaikutuksessa hyvin. Kynttilän liekki osoittautui käyttäytyvän hyvin samalla tavalla koko paloajan molemmissa tutkimuksissa. Tulokset kuitenkin eroavat hieman toisistaan. Liekin automaattinen sytyttäminen Mir-avaruusasemalla toi tuloksien tarkasteluun tarkempaa korrelaatiota toisiinsa nähden, kuin STS-50 lennon tutkimukset. Eroja tutkimuksissa syntyi myös paloajassa sekä

kynttilän vahan käyttäytymisessä Mir-avaruusasemalla johtuen mitä luultavammin happi-konsentraatioiden sekä käytettyjen mittauslaitteiden eroista.

3.2. Kiinteän pinnan palaminen mikropainovoimassa

Tässä osiossa käsitellään kiinteään pintaan tehtyä palamistutkimusta. Osiossa tutustutaan tutkimusasema ISS:llä sijaitsevaan mittauslaitteistoon, jolla on suoritettu kiinteän pinnan palamistutkimusta mikropainovoimassa. Kiinteän pinnan palamisilmiötä mikropainovoimassa tutkitaan palamistutkimuksen lisäksi myös avaruuden paloturvallisuuden kehittämiseksi. Tästä syystä tähän osioon löytyi eniten tutkimustietoa. Tähän kandidaatintyöhön on koottu näistä tutkimuksista yksi esimerkki kiinteän pinnan palamisilmiön havainnollistamiseksi mikropainovoimassa.

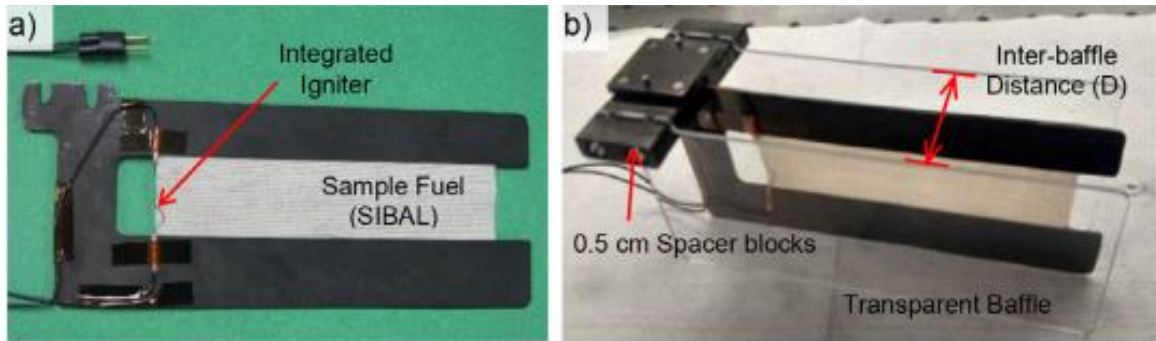
Kansainvälisellä avaruusasema ISS:llä on suoritettu monia mikropainovoimaan liittyviä tutkimuksia. Yksi lähivuosien tutkituin tieteenala on ollut mikropainovoimainen palaminen. Avaruusjärjestö NASA:n tutkimusprojekti BASS (Burning and Suppression of Solids) tutki lukuisten kiinteiden materiaalien palamisen ja tukahduttamisen ominaisuuksia mikropainovoimassa (Glenn Research Center, 2020). Kansainvälisellä avaruusasema ISS:llä sijaitsee näihin tutkimuksiin erikoistunut MSG-mittauslaitteisto (Microgravity Science Glovebox), jolla voi tutkia pienten kiinteiden näytteiden palamista mikropainovoimassa (kuva 6).



Kuva 6. ISS:llä sijaitseva MSG-mittauslaitteisto. Kuva 6a. Miehistön jäsen on yhteydessä tutkijoihin Glenn Research Center -tutkimuskeskukseen mittauksien ajan. Kuva 6b. Tarkempi kuvaus mittausjärjestelystä, jossa keskellä olevassa mustassa laatikossa näytteet palavat. (Li, Y. et al. 2021, 41)

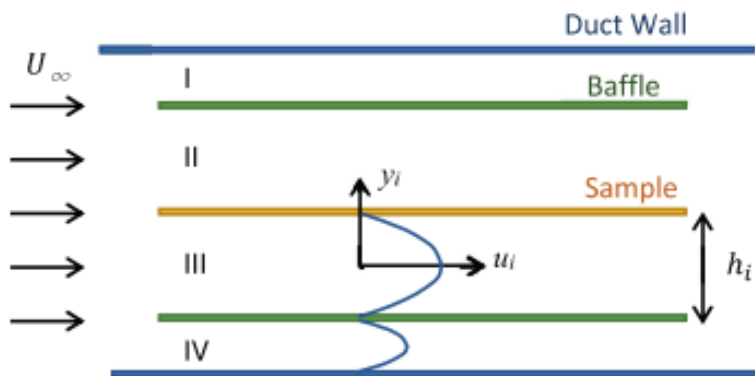
Tässä tutkimuksessa tutkittiin 75 % puuvilla- ja 25 % lasikuitusekoituksen (SIBAL) palamista ilmapirralla pienessä virtauskanavassa. Suorakulmisen särmiön muotoinen virtauskanava oli 20 cm pitkä ja se sivujen mitat olivat 7,6 cm × 7,6 cm. Palavan näytteen pituus

oli 10 cm ja leveys 2,2 cm. Tutkimukset suoritettiin virtauskanavaan asennettujen välilevyjen (eng. baffle) kanssa ja ilman niitä. Virtauskanavaa muutettiin tutkimuksessa käytettyjen välilevyjen avulla niin, että välilevyjen etäisyydet olivat symmetrisesti yhtä suuret palavan näytteen (eng. sample) pinnalta (kuva 7). (Li, Y. et al. 2021, 39.)



Kuva 7. Näyte (Sample fuel) ja virtauskanavassa käytettävät välilevyt (Baffle). Kuva 7a. Näyte sekä sähkövastukseen perustuva sytytysmekanismi. Kuva 7b. Näyte on kiinnitetty välilevyjen kanssa yhteen, joka kuvastaa paremmin mittaushetkeä. Kuvassa näkyvä välilevy on läpinäkyvä välilevy (Transparent Baffle). (Li, Y. et al. 2021, 41)

Tutkimuksessa välilevyjen etäisyyttä muutettiin, jotta saatiin laajempi otanta tuloksille. Välilevyille oli myös valittu kolme eri materiaalia, joissa oli eri säteilyominaisuudet toistensa välillä. Tällä uskottiin olevan vaikutusta palamisen ominaisuuksiin. Kuvassa (7b) nähdään mittauksissa käytetty läpinäkyvän pinnan välilevy. Tämän lisäksi mittauksissa välilevyjen materiaalien pinnat oli valittu mustiksi tai kiiltäviksi. Alla vielä yksinkertaistettu havainnekuva (8) mittaustilanteesta.

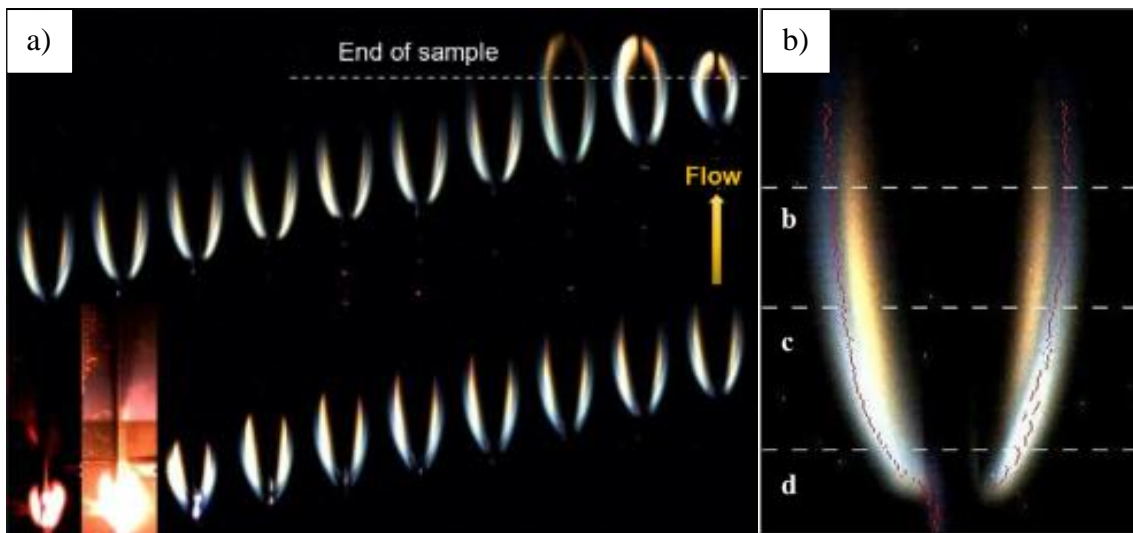


Kuva 8. Havainnekuva mittauksesta. Kuvassa U_∞ kuvaa ilmavirran nopeutta sekä tulosuuntaa, siniset levyt kanavan seinää, vihreät levyt välilevyä ja keltainen levy palavaa näytettä. (Li, Y. et al. 2021, 43)

Kansainvälisellä avaruusasema ISS:llä oltiin reaaliajassa yhteydessä Glenn Research Center -tutkimuskeskukseen mittauksien ajan. Tämän lisäksi mittaukset taltioitiin video- ja kuvamateriaalina. Mittauksien aikana ilmanpaine oli ilmakehän paineessa ja happikonsentraatio oli keskimäärin 22 %. Mittauksissa valittu ilmavirran nopeus U_∞ vaihteli eri mittauksien ajan

3 ja 32 cm/s välillä. Mittauksia suoritettiin välilevyillä sekä ilman niitä. Välilevyjen etäisyydet toisistaan olivat mittauksissa 1, 2, 3, 4 ja 5 cm. (Li, Y. et al. 2021, 40–42.)

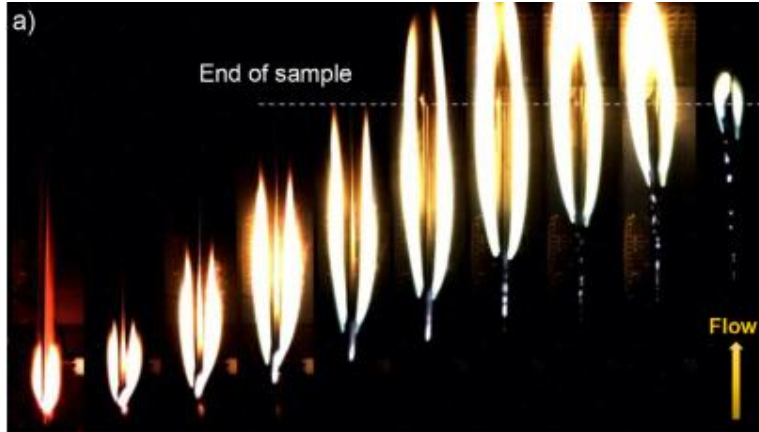
Tuloksissa käy ilmi, että pienillä virtausnopeuksilla ($U_\infty = 5\text{--}6\text{ cm/s}$) saavutetaan tasaisesti palava liekki kaikissa muissa tapauksissa, paitsi lyhyimmällä välilevyn välillä ($D = 1\text{ cm}$). Lyhyimmillä välilevyn väleillä näyte ei alkanut palaa. Kahdessa edellisessä tapauksessa ei nähdä eroja käytettävien välilevyjen materiaalien kesken. Kuva (9a) havainnollistaa tasaisen liekin palamisilmiötä, jossa näyte palaa mustien välilevyjen välissä suurimmalla etäisyydellä ($D = 5\text{ cm}$) ja pienellä virtausnopeudella ($U_\infty = 6\text{ cm/s}$). Kuva (9b) kuvaa mittauksissa tyyppillistä tasaisen liekin palamista. Liekin rakenteesta havaittiin, että sen värit (kuva 9b) jakautuvat karkeasti kahteen eri osaan. Keltainen ohut, niin sanottu noen muodostumiskerros oli näytteen pinnan puolella ja sininen paksu kerros oli välilevyjen puolella. Tutkimuksessa arvelaan noen muodostumisen johtuvan sisäosan riittämättömästä hapen saannista. Työssä arvelaan myös ulomman kerroksen lämpöhäviöiden olleen sisempää liekkiä suuremmat. Tästä syystä liekin lämpötila olisi niin alhainen, ettei tällä alueella synny nokea, jolloin ulompi kerros näyttäytyy enimmäkseen sinertävänä. (Li, Y. et al. 2021, 44–46.)



Kuva 9. Mittauksissa saatu tyyppillinen tasaisen palamisen liekki. Kuva 9a. Palavan näytteen palaminen alkaen alavasemalta ja päättyen yläoikealle (End of sample). Kuva 9b. Mittauksien tyyppillinen tasainen liekki. (Li, Y. et al. 2021, 45)

Kun välilevyjen välinen etäisyys oli pieni ($D < 3\text{ cm}$) ja virtausnopeus suuri ($U_\infty \geq 17\text{ cm/s}$), tulokset korreloivat tasaisesti palavaa liekkiä. Tästä suuremmat välilevyjen etäisyydet antoivat kuitenkin tuloksia, jossa liekin koko kasvoi koko mittauksen ajan ja tasaisesti palavaa liekkiä ei näissä saavutettu (kuva 10). Tälle ilmiölle nähtiin myös mahdolliseksi se, että annetuilla alkuarvoilla mittausjärjestelyt olisivat vaatineet suurempaa kokoluokkaa.

Esimerkiksi näyte olisi tarvinnut lisää pituutta, jotta palaminen olisi ehtinyt saavuttaa tasaisesti palavan liekin. Kuva (10) havainnollistaa kasvavan liekin palamisilmiötä, jossa näyte paloi heijastavien välilevyjen välissä suurimmalla etäisyydellä ($D = 5 \text{ cm}$) ja suurella virtausnopeudella ($U_\infty = 28 \text{ cm/s}$). (Li, Y. et al. 2021, 46.)



Kuva 10. Mittauksissa saatu kasvavan liekin palamisilmiö. (Li, Y. et al. 2021, 46)

Mittauksissa havaittiin, että liekin pituus on näissä tapauksissa miltei kaksinkertainen tasaiseen liekkiin verrattuna. Liekki paloi kasvaen aina näytteen loppuun asti, kunnes se sammui. Liekki on kuvien mukaan kirkkaan valoisa ja nokinen, jonka myös mittauksia tehneet tutkijat kansainvälisellä avaruusasema ISS:llä varmistivat. Sinistä valoa havaittiin hieman vain liekin juuressa. Kuvassa (10) sinistä väriä liekissä ei juurikaan erota, koska sen näkyvyys kirkkaan keltaisessa liekissä on heikko. Kasvava liekki paloi mittauksissa suuressa lämpötilassa, joka mahdollisti noen muodostumisen palamisreaktiossa. Tämän seurauksena liekki näyttää kuvassa (10) kirkkaan keltaisena. (Li, Y. et al. 2021, 46.)

Lopuksi tutkimuksessa vielä pohdittiin sitä, mitkä asetetuista tilanteista aiheuttivat palamiselle edullisimmat olosuhteet. Tutkimuksessa todettiin, että tasaisen liekin palamisessa pienillä virtausnopeuksilla ($U_\infty = 6 \text{ cm/s}$), välilevyjen toiseksi suurimmalla etäisyydellä ($D = 4 \text{ cm}$) kiiltävän pinnan välilevyillä liekin pituus ja leviämisenopeus olivat suurimmat. Välilevyistä musta tuotti toiseksi parhaat tulokset ja läpinäkyvä huonoimmat. Tuloksien arvioidaan johtuvan heijastavan välilevyn säteilyominaisuuksien eroista, sekä virtauskanavan sopivasta koosta tutkitulle näytteelle, jolloin tarpeellinen määrä happea pääsi virtaamaan palamisreaktioon. (Li, Y. et al. 2021, 49.)

3.3. Pisarapalaminen mikropainovoimassa

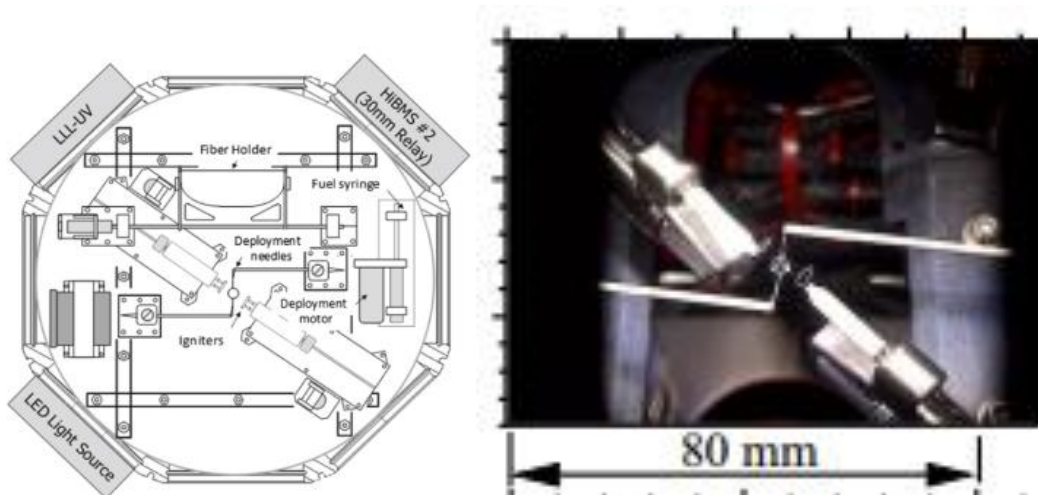
Tässä osiossa käsitellään pisarapalamiseen tehtyä mikropainovoimaista palamistutkimusta. Pisarapalaminen on yleinen tapa tutkia palavien nesteiden palamista, jonka syystä sen esittely tässä kandidaatintyössä nähdään tarpeelliseksi. Mikropainovoimassa pisara palaa symmetrisesti pallon muotoisena. Tämän osoittavat lukuisat tutkimukset, jotka suoritettiin pudotustesteillä ja lentokoneiden avulla (Dietrich, D. L. et al. 2014, 66). Tutkimus, jota tässä työssä käsitellään, on suoritettu kansainvälisellä avaruusasema ISS:llä, jossa mikropainovoimainen tutkimusympäristö on pysyvää. Tällöin pisarapalamista voidaan tutkia niin pitkään, kuin näyte palaa. Tämä tutkimus kuului osaksi Nasan suorittamia FLEX-tutkimuksia (Flame Extinguishment Experiment). (Dietrich, D. L. et al. 2014, 66.)

Kansainvälisellä avaruusasema ISS:llä sijaitsee CIR-mittauslaitteisto (Combustion Integrated Rack), jonka sisällä on palamistutkimuksissa käytettävä, sylinterin muotoinen polttokammio (kuva 11). Polttokammion tilavuus on 90 litraa. Mittauslaitteistolla voidaan muokata tarkasti polttokammion ympäristön tilaa mittauksille haluttuihin arvoihin. Tämän lisäksi sen kautta pidetään yhteyttä maahan Glenn Research Center -tutkimuskeskukseen mittauksien ajan. (Dietrich, D. L. et al. 2014, 66.)



Kuva 11. CIR-mittauslaitteisto ja sen keskellä oleva sylinterin muotoinen polttokammio (Glenn Research Center, 2021a)

Polttokammion sisälle voidaan asentaa mittauslaite, jossa palamistutkimus suoritetaan. Tässä tutkimuksessa mittauslaitteena toimi MDCA (Multi-User Droplet Combustion Apparatus). Kuva (12) näyttää tutkimuksissa käytetyn MDCA-mittauslaitteen rakenteen polttokammion sisältä.



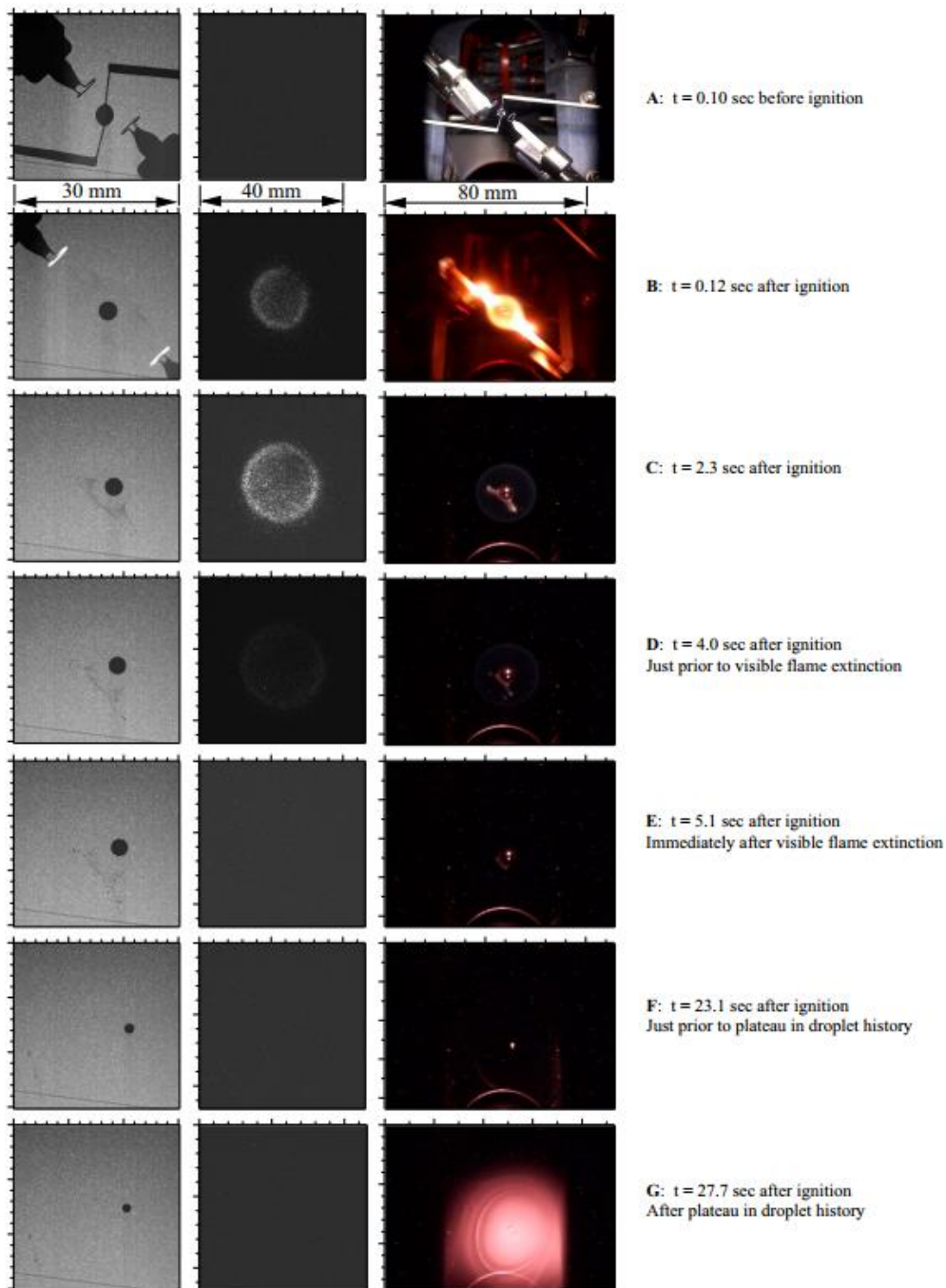
Kuva 12. Vasemmalla MDCA-mittauslaitteen rakenne polttokammion sisältä (Dietrich, D. L. et al. 2014, 67). Oikealla on otettu kuvankaappaus suoritettujen mittausten videomateriaalista juuri ennen sytytystä. Kuvan keskellä näkyy polttoainepisara, polttoainetta syöttävät neulat sekä kuumalanka-sytyttimet (Dietrich, D. L. et al. 2014, 69).

Mittauslaitteessa polttoainepisara synnytetään polttokammion keskelle polttoaineneulojen (eng. deployment needles) avulla. Näiden kautta polttoainetta virtaa polttokammioon. Molemmista polttoaineneuloista virtasi eri polttoainetta, toisesta heptaania ja toisesta metanolia. Mittauksissa käytettyä polttoainetta, sen halkaisijaa sekä ympäristön tilaa vaihdeltiin aina tarpeen mukaan. Kun pisara oli halutun kokoinen, polttoaineneulat liikkuivat nopeasti ulommas, jolloin pisara jäi paikalleen. Heti sen jälkeen kuumalanka-sytyttimet (eng. igniters) sytyttivät pisaran, ja kun pisara oli syttynyt, sytyttimet liikkuivat ulommas ja pisara jatkoi palamista. (Dietrich, D. L. et al. 2014, 66–67.) Tutkimuksessa gravitaatiovaikutus mitattiin alle 10^{-5} suuruiseksi merenpinnan tasoon nähden, joten tutkimusympäristö todettiin mikropaino-voimaiseksi (Dietrich, D. L. et al. 2014, 68).

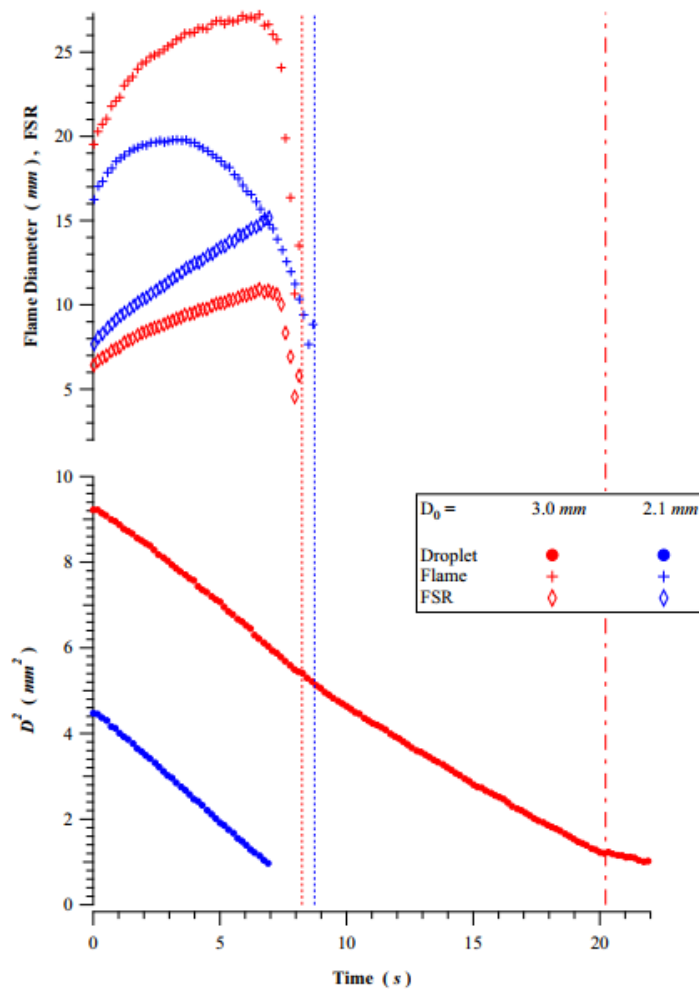
Metanolin pisarapalamisessa tutkimusten alussa sen palamishalkaisija kasvoi äkisti ensimmäiset sekunnit ($t < 2$ s), jonka jälkeen se laski, kunnes sen liekki sammui. Mittauksissa kävi ilmi, ettei metanolin palamisessa muodostunut nokea. Osassa testeissä liekki värähteli ennen kuin se sammui. (Dietrich, D. L. et al. 2014, 72–75.)

Heptaanin palaminen sen sijaan yllätti tutkijat. Alla oleva kuva (13) kertoo kuvasarjan mitausten ajalta, joissa heptaanin pisarapalamista on kuvattu kolmella eri CIR-

mittauslaitteiston kameralla. Kuvien alla on kerrottu mittasuhteet kuvien välillä. Vasemmalla olevat kuvat ovat kuvattu pisaran taustavalaistulla kameralla, keskimäinen heikon ultraviolettivalon (LLL-UV) kameralla ja oikeanpuoleinen on kuvattu värikameralla. Ultraviolettivaloa syntyy palamisessa, kun liekki on sinertävä. Kuvasarjan jälkeen kerrotaan tarkemmin heptaanin palamisen vaiheet ja siinä havaitut ilmiöt. Heptaanin palamisilmiön havainnollistetaan tarkemmin seuraavassa kuvassa (14). (Dietrich, D. L. et al. 2014, 67.)



Kuva 13. Heptaanin palamisen kuvasarja mittauksista. Vasen kuvasarja on kuvattu taustavalaistulla kameralla, keskimäinen heikon ultraviolettivalon (LLL-UV) kameralla ja oikea värikameralla. (Dietrich, D. L. et al. 2014, 69)



Kuva 14. Kahden heptaanipisaran palamisesta piirretty kuvaaja, josta liekki mitattiin heikon ultraviolettivalon (LLL-UV) kameralla. Ylempi kuvaajista kertoo tutkimuksissa mitattujen liekkien koot (FSR) ajan funktiona ja alempi kuvaaja kertoo pisaran halkaisijan neliön ajan funktiona. (Dietrich, D. L. et al. 2014, 71) Molemmilla pisarakoilla polttoainetta höyrystyy ympäristöön palamisen aikana, joka saa pisaratoon kuvaajat laskemaan ajan funktiona.

Tutkimuksissa heptaania poltettiin pienellä ($D = 2,1$ mm) ja suurella ($D = 3,0$ mm) pisarakoolla ja eri ympäristön tiloissa. Pientä pisaraa kuvaavat siniset kuvaajat. Kuvaajista sininen risti kertoo tutkimuksissa mitatun liekin halkaisijan ajan funktiona. Sininen pallo kertoo taas höyrystyvän pisaran halkaisijan neliön ajan funktiona. Alussa liekin koko kasvoi palaen kirkkaan keltaisena, jonka jälkeen se muuttui nopeasti kirkkaan siniseksi. Tästä lähtien liekin koko pieneni sammumiseen asti. Liekin sammumispistettä kuvaa sininen katkoviiva. Tutkimuksen lopussa havaittiin pisaran liikkuneen pois mittauksen havaitsemisalueelta, joten kuvaajat jäävät kuvassa (14) kesken.

Suuremmassa pisarassa palamisilmiö erosi pieneen verrattuna huomattavasti. Suurta pisaraa kuvaavat punaiset kuvaajat. Liekin halkaisija tässä kasvoi koko näkyvän liekin ajan. Alussa liekki oli kirkkaan valoisa, mutta se muuttui nopeasti tumman siniseksi. Näkyvän liekin aikana tumman sininen valo himmeni liekissä koko mittauksien ajan. Elin aika oli suurella ja

pienellä pisarakoolla suurin piirtein yhtä pitkät. Suuremmalle pisaralle näkyvän liekin häviämistä kuvaa punainen vasen katkoviiva. Kuvassa (14) punaiset ristit osoittavat, että suurempi pisara kasvoi miltei koko näkyvän liekin ajan.

Näkyvän valon eliniän loppuvaiheessa havaittiin myös liekille värähtelyä, jota tapahtui enemmän heptaanille, kuin metanolille. Liekin halkaisija muuttui tällöin värähtelyn omaisesti. Värähtelyjen jälkeen näkyvä liekki sammui. Värähtelyt nähtiin tutkimuksessa samankaltaisina, kuten molemmissa kynttilän palamisesta tehdyissä tutkimuksissa. On myös huomioitavaa, että värähtelyä tapahtui vain tapauksissa, joissa sammutustila oli säteilevä. (Dietrich, D. L. et al. 2014, 70.)

Sammumisesta huolimatta suuremman pisaran kuvaaja jatkaa laskuaan miltei lineaarisesti, kuten kuva (14) osoittaa. Tämä tarkoittaa sitä, että vaikka näkyvä liekki oli sammunut, niin pisara jatkoi höyrystymistään kymmeniä sekunteja ennen mittauksien lopun tasannetta. Höyrystymisen loppumista kuvaa oikea punainen katkoviiva. Hieman ennen tasannetta värikamerassa nähtiin hyvin suuri höyrypilvi. Höyrypilven uskotaan johtuneen viileän liekin palamistuotteiden tiivistymisestä. (Dietrich, D. L. et al. 2014, 71.) Tämä ilmiö taas korreloi Mir avaruusasemalla havaittuun höyrypilveen hyvin.

Näkyvän valon sammumisen jälkeen liekki palaa niin sanotusti ”viileällä liekillä” (eng. cool flame), jossa alemman lämpötilan palamisreaktiot jatkuvat. Kuva (14) osoittaa suuremman pisaran palavan samaan tasoon pienemmän liekin kanssa, kunnes kuvaaja tasaantuu. Tämä havainto tarkoittaa sitä, että liekki voi palaa tietyllä kokoalueella joko kuumalla liekillä näkyvästi tai viileällä liekillä näkymättömästi. Alkutila pisaralle määrää sen, kummalla alueella liekki palaa. Viileät liekit havaittiin tutkimuksissa monissa eri ympäristöissä, jossa happea laimennettiin tyypellä, hiilidioksidilla tai heliumilla. Tärkein havainto tutkimuksissa oli se, että viileä liekki ilmeni vain tutkimuksissa, missä sammutustila oli säteilevä. Numeeriset laskennat osoittavat viileän liekin suurimman lämpötilan olleen 700K. (Dietrich, D. L. et al. 2014, 72.)

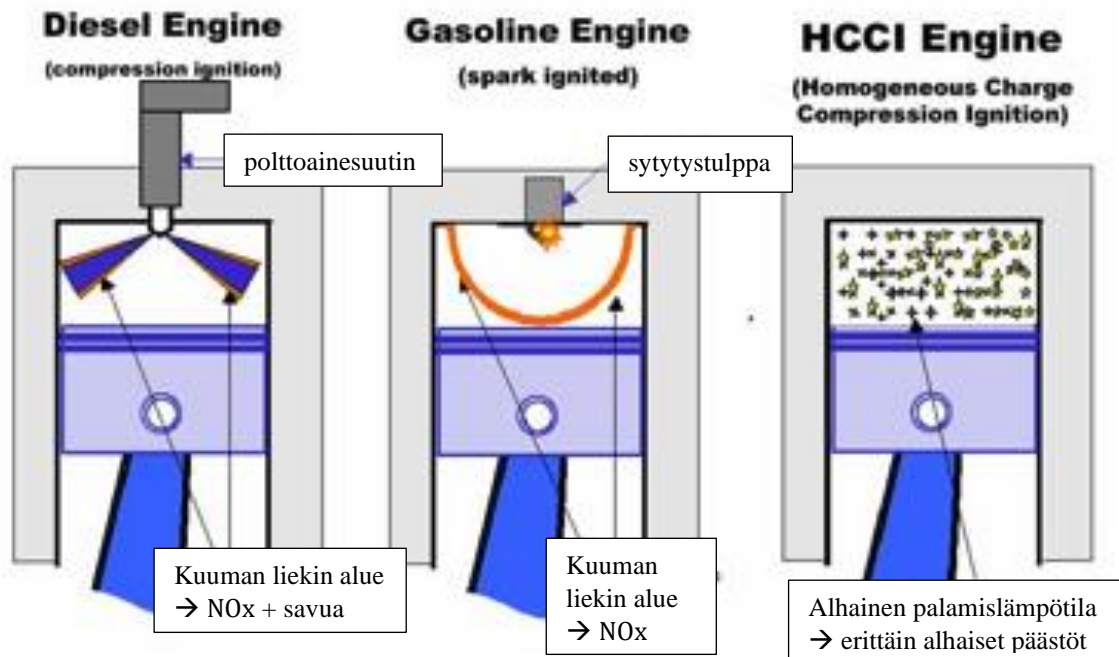
Tutkimus osoitti heptaanipisaran palavan kuumien liekkien lisäksi viileillä liekeillä. Tämä osoittautui heptaanin palamisessa aivan uudeksi ilmiöksi. Myös todisteet säteilevälle ja diffusiiviselle sammutustilalle nähdään tärkeinä. (Dietrich, D. L. et al. 2014, 75.) Tutkimuksessa huomattiin myös samankaltaisuutta kynttilän palamisen tutkimuksiin, mikä nähdään myös merkittävänä.

4. Onko mikropainovoimaisesta palamistutkimuksesta hyötyä?

Tässä kappaleessa pohditaan aiemmin määriteltyä tutkimusongelmaa eli sitä, miten mikropainovoimainen palaminen voisi auttaa painovoimaisen palamisen tutkimusta. Mikropainovoimaisessa tutkimusympäristössä voidaan tutkia palamisreaktiota tarkemmin, kun tiheuserojen ja vapaan konvektion vaikutukset eivät päde (NASA, 2015, 8). Tämä mahdollistaa palamistutkimukseen uuden tarkastelukulman. Näin on saatu kehitettyä tehokkaampia ja vähäpäästöisempiä polttimia ja moottoreita. Tässä kandidaatintyössä työn rajauksen syystä tutkimustöinä tarkasteltiin vain esisekoittamattomia diffuusioliekkejä, jossa happi ja polttoaine ovat ennen palamista erillään. Tässä kohtaa todetaan kuitenkin painovoimaisessa palamisessa esisekoitetun palamisen tuottavan samankaltaisen palamisympäristön, kuin mikropainovoimaiset palamistutkimukset ovat osoittaneet. Tästä syystä alla esiteltävät sovellukset perustuvat tekniikkaan, jossa happi ja polttoaine sekoitetaan hyvin ennen palamista. Näin liekin lämpötilaa ja niin edelleen sen palamistuotteita voidaan hallita.

Avaruusjärjestö NASA on keskittynyt viime vuosien ajan (2019–2020) tutkimaan tarkemmin mikropainovoimaista palamista. Muun muassa NASA:lla on ollut niin sanottu Flame Design -projekti, jossa ensisijaisena tavoitteena on ollut parantaa ymmärrystä liekin noen muodostumisesta. Tämän avulla on saatu tietoa, miten happirikastettua palamista voidaan suunnitella niin, että liekki ei muodosta nokea, mutta on myös samalla vahva. Flame Design –projektiin liittyen ulkopuolinen arviointipaneeli oli maininnut, että hyvällä suunnittelulla ja tutkimuksella voidaan kehittää polttimia, jotka ovat tehokkaampia ja vähemmän saastuttavia, kuin nykyiset mallit (Glenn Research Center, 2022).

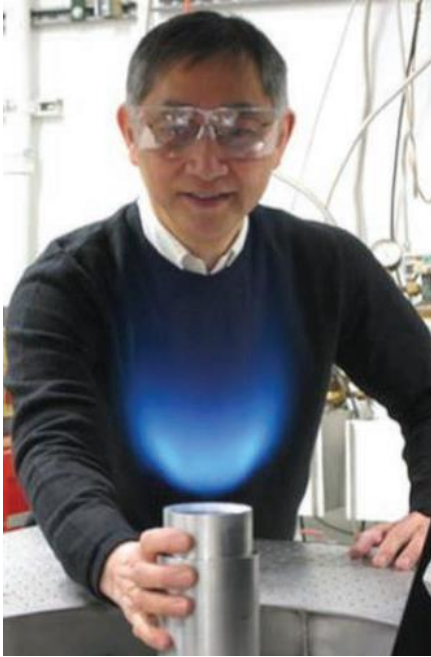
Viileiden liekkien tutkimista (CFI ja CFG) on myös jatkettu, jossa tavoitteena on ollut lisätä perusymmärrystä viileiden liekkien palamisilmiöstä. Tämän kerrotaan olevan tärkeää, jotta voidaan ymmärtää hyvin palavien polttoaineiden sekä niiden lisäaineiden sytytysilmiötä. Viileillä liekeillä nähdään myös olevan keskeinen rooli uusien polttoaineiden kehittämisessä ja valinnassa niin sanotuille kehittyneille moottoreille, kuten esimerkiksi puhtaille ja tehokkaille HCCI-moottoreille (kuva 15) (Glenn Research Center, 2021b).



Kuva 15. Polttomoottorien sytytysmekanismien erot ja niiden selitykset. HCCI-moottori palaa muihin polttomoottoreihin verrattuna matalammassa lämpötilassa tuottaen erittäin pienet päästöt. (Glenn Research Center, 2021b)

HCCI-moottori perustuu tekniikkaan, jossa polttoaine sekoittuu hyvin ilman kanssa ja syttyy itsestään vapauttaen suuren määrän lämpöä. HCCI-moottori palaa pienemmässä lämpötilassa, kuin muut polttomoottorit tuottaen kuitenkin korkeamman lämpöhyötysuhteen, mutta pitäen samalla typen oksidi- (NO_x) ja hiukkaspäästöt (PM) nykyisten tiukkojen päästö määräyksien alla. Koska polttoaine palaa alemmassa lämpötilassa, HCCI-moottori tuottaa enemmän hiilivety- (HC) ja hiilimonoksidipäästöjä (CO), kuin muut polttomoottorit. (Srivastava, D. K. et al. 2018, 44.) HCCI-moottori on yksi sovellus siitä, miten mikropainovoimainen palamistutkimus voi auttaa painovoimaista palamistutkimusta.

Toinen esimerkki taas perustuu mikropainovoimassa suoritettujen esisekoitettujen liekkien tutkimuksista johtaneeseen Low Swirl Combustion -polttimen keksimiseen (kuva 16) (NASA. 2015, 25). Poltin perustuu tekniikkaan, jossa polttoaine sekoittuu palamisilman kanssa niin, että liekki palaa turbulenttisen pyörteisesti. Tällä tavoin polttimen liekki palaa matalassa lämpötilassa ja kirkkaan sinertävänä. Näin palaminen tuottaa huomattavasti vähemmän typen oksideja (NO_x) vaikuttamatta merkittävästi lämpöhyötysuhteeseen tai hiilimonoksidi (CO) päästöihin. (Cheng, R.K. et al. 2000, 1306.) Kuvassa (16) on esitetty esimerkki tästä polttimesta. Kuvasta voidaan havaita lämpötilan polttimen juuressa pysyvän niin viileänä, että sitä voi käsin koskettaa.



Kuva 16. Tutkija R.K. Cheng pitelee kädessään Low Swirl Combustion -poltinta, jonka lämpötila pysyy tarpeeksi viileänä kosketukselle. Kuva on otettu NASA-Lawrence Berkeley laboratoriossa, jossa suoritettiin erittäin puhtaan Low Swirl Combustion -polttimen projekti. (NASA. 2015, 26)

Mikropainovoimaisen palamisen tutkimuksista voidaan siis todeta, että niistä on ollut hyötyä maanpäällisessä palamistutkimuksessa. Mikropainovoimainen tutkimusympäristö mahdollistaa palamistutkimukselle sellaiset olosuhteet, joita painovoimassa on hankala toteuttaa. Kun tiheyserojen ja vapaan konvektion vaikutus mikropainovoimassa poistuu, palamisilmiötä voidaan tutkia tarkemmin uudesta perspektiivistä. Perinteiselle palamiselle löytyy tällöin ilmiöitä, joita ei olisi löydetty painovoimassa. Kun palamisilmiöt liekissä tunnetaan tarkemmin, maanpäällistä palamista voidaan kehittää entistä tehokkaammaksi ja vähäpäästöiseksi aiempaan verrattuna.

5. Johtopäätökset

Lopuksi voidaan todeta tutkimusten tavoitteiden täyttyneen hyvin. Tutkimusaineisto rajattiin vastaamaan esisekoitetuista diffuusioliekeistä tehtyjä tutkimuksia. Työssä onnistuttiin käsittelemään diffuusioliekeistä kolmea eri palamisilmiötä mikropainovoimassa, jossa pääteemoina olivat kynttilän liekki, kiinteän pinnan palaminen ja pisarapalaminen.

Tutkimukset osoittivat diffuusioliekin palavan hyvin mikropainovoimassa eri materiaaleilla, kun tutkimuksessa oli asetettu palamiselle otollinen tutkimusympäristö. Mikropainovoimassa liekin palamisilmiöt eroavat suuresti painovoimaiseen palamiseen verrattuna. Mikropainovoimassa liekin lämpöhäviöiden suhde tuotettuun lämpöön nähden ovat suuremmat kuin painovoimassa. Tästä syystä liekki palaa usein painovoimaista liekkiä alemmassa lämpötilassa muodostaen enimmäkseen sinertävän liekin. Kiinnostava löytö työssä oli se, että kun liekki palaa alemmassa lämpötilassa, se on vähäpäästöisempi ja se ei muodosta nokea. Pisarapalamisen tutkimuksissa havaittiin diffuusioliekin palavan kuuman liekin lisäksi viileällä, näkymättömällä liekillä, joka myös nähdään merkittävänä löytönä.

Mikropainovoima asettaa palamistutkimuksiin uuden tarkastelukulman, jonka avulla palamisilmiöitä voidaan tiheyserojen ja vapaan konvektion vaikutuksen hävittäessä tutkia tarkemmin. Näiden tutkimusten avulla voidaan kehittää entistä tehokkaampaa ja vähäpäästöisempää palamista myös maan päällä.

Tutkimustulokset korreloivat toistensa kanssa hyvin. Muun muassa kynttilän liekin ja pisarapalamisen tutkimukset osoittivat palamisilmiöissä merkittäviä samankaltaisuuksia. Tutkimukset korreloivat hyvin myös aiemmin tehtyjen tutkimusten kanssa.

Mikropainovoimainen palaminen on palamistutkimuksessa tieteenala, jonka käyttökelpoisuutta maanpäälliseen palamistutkimukseen on alettu vasta ymmärtää. Tästä syystä jatkotutkimukset nähdään tarpeellisiksi myös tulevaisuudessa. Etenkin vähäpäästöisen palamisen jatkotutkimukset olisivat hyödyllisiä. Mikropainovoimaisen palamisen tutkimuksilla nähdään olevan potentiaalia vaikuttaa polttotekniikan kehitykseen tulevaisuudessa.

Lähteet

Axelbaum R. L. et al. 2007. Radiative extinction of gaseous spherical diffusion flames in microgravity. *Combustion and Flame*. [Online] 151 (4), s. 665–675.

Bergman, T. L. et al. 2017. *Incropera's principles of heat and mass transfer*. Global ed. Wiley. s. 978.

Çengel, Y. A. et al. 2008. *Fundamentals of thermal-fluid sciences*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill. s. 1093.

Cheng, R. et al. 2000. Scaling and development of low-swirl burners for low-emission furnaces and boilers. *Proceedings of the Combustion Institute*. [Online] 28 (1), s. 1305–1313.

Dietrich D.L. et al. 2000. Candle flames in non-buoyant atmospheres. *Combustion Science and Technology*. Vol. 156, issue 1, s. 1-24.

Dietrich, D. L. et al. 2014. Droplet Combustion Experiments Aboard the International Space Station. *Microgravity Science and Technology*. [Online] 26 (2), s. 65–76.

Dietrich, D.L. et al. 1995. Candle flames in microgravity. *The 3rd International Microgravity Combustion Workshop*, s. 31-36.

Ferkul, P. et al. 1999. Combustion experiments on the Mir space station. *American Institute of Aeronautics & Astronautics*. s. 1-14. Luettu 14.4.2022. Saatavissa <https://history.nasa.gov/SP-4225/science/combustion.pdf>

Glenn Research Center. 2020. Burning and Suppression of Solids (BASS). NASA. Luettu 3.4.2022. Saatavissa <https://www1.grc.nasa.gov/space/iss-research/msg/bass/>

Glenn Research Center. 2021a. Combustion Integrated Rack (CIR). NASA. Luettu 3.4.2022. Saatavissa <https://www1.grc.nasa.gov/space/iss-research/iss-fcf/cir/>

Glenn Research Center. 2021b. Cool Flames Investigation (CFI). NASA. Luettu 3.4.2022. Saatavissa <https://www1.grc.nasa.gov/space/iss-research/iss-fcf/cir/mdca/experiments-using-the-mdca/cfi/>

Glenn Research Center. 2022. ACME Status. NASA. Luettu 3.4.2022. Saatavissa <https://www1.grc.nasa.gov/space/iss-research/iss-fcf/cir/acme/current-status/>

- Li, Y. et al. 2021. Experimental study of concurrent-flow flame spread over thin solids in confined space in microgravity. *Combustion and Flame*. [Online] 227. s. 39–51.
- McAllister, S. et al. 2011. *Fundamentals of Combustion Processes*. [Online]. New York, NY: Springer New York.
- Mälkönen, P. 2016. *Prosessiuunien toiminnan seuraaminen mallintamalla*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. s. 77.
- NASA. 2014a. *Combustion Continues to Draw Researchers to Space Station*. Luettu 3.4.2022. Saatavissa https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/bassII
- NASA. 2014b. *Experiments in Microgravity - Candle Flame*. Luettu 3.4.2022. Saatavissa <https://www.nasa.gov/audience/foreducators/microgravity/multimedia/me-candleFlame.html>
- NASA. 2015. *A Research Guide to: International Space Station Combustion Science*. Johnson Space Center. Luettu 3.4.2022. Saatavissa https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/np-2015-10-034-jsc_combustion_in_reduced_gravity-iss-mini-book-011116-508.pdf
- Ross, H. D. 2001. *Microgravity combustion: fire in free fall*. London: Elsevier Science and Technology Ltd. s. 601.
- Srivastava, D. K. et al. 2018. *Advances in Internal Combustion Engine Research*. [Online]. Singapore: Springer Singapore. s. 345.
- Williams, F. A. 1985. *Combustion theory: the fundamental theory of chemically reacting flow systems*. 2nd ed. Menlo Park, Calif: Benjamin/Cummings. s. 680.