

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN KORKEAKOULU
ENERGIATEKNIIKAN OSASTO

**SYTTYMINEN JA PALAMISEN ETENEMINEN
PARTIKKELIKERROKSESSA**

LISENSIAATINTUTKIMUS

Työn tarkastajat:
professori Ilmari Kurki-Suonio
professori Risto Raiko

Lappeenrannassa, 30.3.1999

Mika Horttanainen

TIIVISTELMÄ

Horttanainen, Mika

Syttyminen ja palamisen eteneminen partikkelikerroksessa

Lisensiaatintutkimus.

Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan osasto, Lämpö- ja ympäristötekniikan laitos.

Lappeenranta 1999.

120 sivua, 27 kuvaa, 3 taulukkoa

Tarkastajat: professori Ilmari Kurki-Suonio ja professori Risto Raiko

UDK 536.46 : 662.61

Hakusanat: syttyminen, partikkelikerros, liekki- ja liekkirintama, palaminen

Keywords: ignition, fuel bed, fire spread, combustion

Syttymistä ja palamisen etenemistä partikkelikerroksessa tutkitaan paloturvallisuuden parantamista sekä kiinteitä polttoaineita käyttävien polttolaitteiden toiminnan tuntemista ja kehittämistä varten. Tässä tutkimuksessa on tavoitteena kerätä yhteen syttymiseen ja liekkirintaman etenemiseen liittyviä kokeellisia ja teoreettisia tutkimustuloksia, jotka auttavat kiinteäkerrospolto- ja -kaasutuslaitteiden kehittämisessä ja suunnittelussa. Työ on esitutkimus sitä seuraavalle kokeelliselle ja teoreettiselle osalle. Käsittelyssä keskitytään erityisesti puuperäisiin polttoaineisiin. Hiilidioksidipäästöjen vähentämistavoitteet sekä kiinteiden jätteiden energiakäytön lisääminen ja kaatopaikalle viennin vähentäminen aiheuttavat lähitulevaisuudessa kerrospolton lisääntymistä. Kuljetusmatkojen optimoinnin takia joudutaan rakentamaan melko pieniä polttolaitoksia, joissa kerrospolttotekniikka on edullisin vaihtoehto.

Syttymispisteellä tarkoitetaan Semenovin määritelmän mukaan tilaa ja ajankohtaa, jolloin polttoaineen ja hapen reaktioissa muodostuva nettoenergia aikayksikössä on yhtäsuuri kuin ympäristöön siirtyvä nettoenergiavirta. Itsesytyminen tarkoittaa syttymistä ympäristön lämpötilan tai paineen suurenemisen seurauksena. Pakotettu syttyminen tapahtuu, kun syttymispisteen läheisyydessä on esimerkiksi liekki tai hehkuva kiinteä kappale, joka aiheuttaa paikallisen syttymisen ja syttymisrintaman leviämisen muualle polttoaineeseen.

Kokeellinen tutkimus on osoittanut tärkeimmiksi syttymiseen ja syttymisrintaman etenemiseen vaikuttaviksi tekijöiksi polttoaineen kosteuden, haihtuvien aineiden pitoisuuden ja lämpöarvon, partikkelikerroksen huokoisuuden, partikkelien koon ja muodon, polttoaineen pinnalle tulevan säteilylämpövirran tiheyden, kaasun virtausnopeuden kerroksessa, hapen osuuden ympäristössä sekä palamisilman esilämmityksen. Kosteuden lisääntyminen suurentaa syttymisenergiaa ja -lämpötilaa sekä pidentää

syttymisaikaa. Mitä enemmän polttoaine sisältää haihtuvia aineita sitä pienemmässä lämpötilassa se syttyy. Syttyminen ja syttymisrintaman eteneminen ovat sitä nopeampia mitä suurempi on polttoaineen lämpöarvo. Kerroksen huokoisuuden kasvun on havaittu suurentavan palamisen etenemisnopeutta. Pienet partikkelit syttyvät yleensä nopeammin ja pienemmässä lämpötilassa kuin suuret. Syttymisrintaman eteneminen nopeutuu partikkelien pinta-ala - tilavuussuhteen kasvaessa. Säteilylämpövirran tiheys on useissa polttosovellutuksissa merkittävin lämmönsiirtotekijä, jonka kasvu luonnollisesti nopeuttaa syttymistä. Ilman ja palamiskaasujen virtausnopeus kerroksessa vaikuttaa konvektiiviseen lämmönsiirtoon ja hapen pitoisuuteen syttymisvyöhykkeellä. Ilmavirtaus voi jäähdyttää ja kuumaa kaasun virtaus lämmittää kerrosta. Hapen osuuden kasvaminen nopeuttaa syttymistä ja liekkirintaman etenemistä kunnes saavutetaan tila, jota suuremmilla virtauksilla ilma jäähdyttää ja laimentaa reaktiovyöhykettä. Palamisilman esilämmitys nopeuttaa syttymisrintaman etenemistä.

Syttymistä ja liekkirintaman etenemistä kuvataan yleensä empiirisillä tai säilyvyysyhtälöihin perustuvilla malleilla. Empiiriset mallit perustuvat mittaustuloksista tehtyihin korrelaatioihin sekä joihinkin tunnettuihin fysikaalisiin lainalaisuuksiin. Säilyvyysyhtälöihin perustuvissa malleissa systeemille määritetään massan, energian, liikemäärän ja alkuaineiden säilymisyhtälöt, joiden nopeutta kuvaavien siirtoyhtälöiden muodostamiseen käytetään teoreettisella ja kokeellisella tutkimuksella saatuja yhtälöitä. Nämä mallinnusluokat ovat osittain päällekkäisiä. Pintojen syttymistä kuvataan usein säilyvyysyhtälöihin perustuvilla malleilla. Partikkelikerrosten mallinnuksessa tukeudutaan enimmäkseen empiirisiin yhtälöihin. Partikkelikerroksia kuvaavista malleista Xien ja Liangin, /55/, hiilipartikkelikerroksen syttymiseen liittyvä tutkimus ja Gortin, /16/, puun ja jätteen polttoon liittyvä reaktorintaman etenemistutkimus ovat lähimpänä säilyvyysyhtälöihin perustuvaa mallintamista. Kaikissa malleissa joudutaan kuitenkin yksinkertaistamaan todellista tapausta esimerkiksi vähentämällä dimensioita, reaktioita ja yhdisteitä sekä eliminoimalla vähemmän merkittävät siirtomekanismit.

Suoraan kerrospoltoa ja -kaasutusta palvelevia syttymisen ja palamisen etenemisen tutkimuksia on vähän. Muita tarkoituksia varten tehtyjen tutkimusten polttoaineet, kerrokset ja ympäristöolosuhteet poikkeavat yleensä selvästi polttolaitteiden vastaavista olosuhteista. Erikokoisten polttoainepartikkelien ja ominaisuuksiltaan erilaisten polttoaineiden seospoltoa ei ole tutkittu juuri ollenkaan. Polttoainepartikkelien muodon vaikutuksesta on vain vähän tutkimusta. Ilman kanavoitumisen vaikutuksista ei löytynyt tutkimuksia.

ABSTRACT

Author: Horttanainen, Mika

Title: Ignition in Particle Layers and Flame Propagation through Fuel Beds

Licentiate thesis.

Lappeenranta University of Technology, Department of Energy Technology,
Section of Thermodynamics and Environmental Engineering.
Lappeenranta, Finland, 1999.

120 pages, 27 figures, 3 tables

Examiners: Professor Ilmari Kurki-Suonio and Professor Risto Raiko

UDK 536.46 : 662.61

Keywords: ignition, fuel bed, fire spread, combustion

Ignition and flame propagation in fuel beds is usually studied for the purposes of fire safety and solid fuel combustion development. The aim of this thesis is to gather together the most essential results from theoretical and experimental studies which will be useful for the development and design of fixed and moving bed combustion and gasification equipment. This is preliminary work for theoretical and experimental research that will be carried out in the near future. The main interest is in wood-based fuels. Wood, other biofuels and solid waste are being used more and more nowadays for energy production because of the intention to decrease carbon dioxide emissions and solid waste dumping. Fuel transport distances are long in Finland, so it is obvious that small combustion plants will be built to use biofuels and waste for energy production. So far, fixed bed combustion and gasification are the most economical techniques for this kind of energy production.

Ignition is defined as the state and moment when the net energy generated in the reactions between the fuel and oxygen per unit time equals the net energy flow transported to the surroundings. Spontaneous ignition refers to ignition caused by an increase of temperature or pressure in the ambient space. If the fuel is ignited locally by, for example, a flame, spark or hot particle, the phenomenon is called forced or piloted ignition.

Experiments have shown that the most important factors that affect ignition and fire propagation are the fuel moisture content, fuel volatile content and reaction energy, fuel bed porosity, particle size and shape, thermal irradiation intensity at the fuel surface, gas flow rate in the bed, partial pressure of oxygen in surroundings and the temperature of the combustion air. Increasing the fuel moisture content increases the ignition energy requirement and raises the ignition temperature. A volatile content increase lowers the ignition temperature. The ignition time shortens and the reaction front propagation rate increases when the heating value of the fuel increases. As increase in bed porosity has been found to make the flame propagation quicker. Small particles

are usually ignited at a lower temperature and in a shorter time than large particles. Fire spread rate increases with increasing particle surface area to volume ratio. Thermal radiation is the most important heat transfer mechanism in many combustion cases. Increasing the radiation intensity leads to a shortening of the ignition time. Gasflows in the bed affect the oxygen concentration in the reaction zone and the convective heat transfer between the gas and the particles. The increasing oxygen content at the reaction front increases the flame propagation rate until the optimal concentration is reached. After that, any additional air dilutes and cools the bed. It is possible that gas flow may either cool or heat the bed depending on the temperatures of the flow and the bed. Combustion air preheating increases the fire spread rate.

Ignition and flame spread models can be broadly classified as two types that are those based mainly on empirical equations and those based on conservation equations. Empirical models are formed by the correlating experimental measurements in conjunction with some basic physical relations. Conservation equation-based models, which are referred to as physical models, are formed by writing the mass, energy, momentum and species balances for the case. The transport rates are described by theoretical and experimental equations. Hence, these modelling classifications partly overlap. Flat surface ignition is often modelled using conservation equation models. Particle layer modelling is in most cases based on empirical equations. The ignition model for a carbon-packed bed by Xie and Liang, /55/, and the reaction front propagation model for a packed bed by Gort, /16/, are the most conservation equation-based fuel bed ignition and fire propagation models referred to here. All the models are simplified by, for example, decreasing the number of dimensions, reactions and species, and by ignoring the less significant transport mechanisms.

There are few studies that are directly concerned with fixed or moving bed combustion and gasification. Often, the fuel properties, particle bed properties and surrounding conditions differ considerably from the properties and conditions in real combustion equipment. Ignition and fire spread in the mixed combustion of different fuel particle sizes and different fuels have not yet been thoroughly researched. Very little research has been done on particle shape effects and air channelling effects in fuel beds has not been studied at all.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun Energiatekniikan osastolla. Työtä on ohjannut ja valvonut professori TkT Pertti Sarkomaa, jolle esitän erikoiskiitokset arvokkaista neuvoista ja opetuksista sekä motivoinnista. Työn toisena ohjaajana on ollut erikoistutkija TkT Jaakko Saastamoinen VTT Energiasta. Hänelle esitän lämpimät kiitokset neuvoa antavista keskusteluista ja ideoista. Työn tarkastajina olleita professori TkT Ilmari Kurki-Suoniota ja professori TkT Risto Raikoa kiitän rakentavasta kritiikistä ja neuvoista myöhempää tutkimusta varten.

Syttymistutkimus aloitettiin piensahojen uutta kuivaamoprosessia kehittävän projektin osana ja sitä on jatkettu ja jatketaan omana projektinaan. Tutkimusta on rahoittanut Teknologian kehittämiskeskus TEKES, jolle esitän kiitokset mahdollisuudesta täysipäiväiseen tutkimukseen. Kiitän myös Lahja ja Lauri Hotisen säätiötä tutkimusta varten saamastani apurahasta.

Laboratoriohenkilökunnasta kiitän Risto Partamiestä, Harri Loistaa, Antero Sorsaa, Jari Hostikkaa ja Risto Pasasta hyvästä yhteistyöstä. Muista työtovereistani ansaitsevat kiitoksia erityisesti Juha Häkkinen, Raija Lankinen, Pekka Punnonen, Juhani Suihkonen, Juha Kaikko, Petri Onikki, Aimo Rautiainen, Timo Talonpoika ja Simo Hammo joiden kanssa käytyt keskustelut ja joilta saadut ideat ja käytännön apu ovat auttaneet koko LTKK:lla työskentelyni aikana. Muita työtovereitani kiitän työpaikan hyvästä ilmapiiristä ja kaikesta avusta.

Erityisellä lämmöllä kiitän Sari Horttanaista, joka on vaimonani tukenut minua kaikissa tilanteissa, lasteni äitinä mahdollistanut työskentelyni virka-aikojen ulkopuolellakin ja työtoverinani auttanut minua monissa ongelmatilanteissa. Lapseni Simo ja Iida saavat myös kiitoksen muun muassa tehokkaasta auttamisesta työasioiden unohtamisessa vapaa-aikana. Vanhempiani Anja ja Kauko Horttanaista kiitän kaikesta vuosien aikana saamastani varauksettomasta tuesta.

Lappeenrannassa 30.3.1999

Mika Horttanainen

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT.....	1
1 JOHDANTO	4
2 SYTTYMISEEN LIITTYVIÄ KÄSITTEITÄ	6
2.1 YLEISTÄ	6
2.2 TERMINEN SYTTYMINEN	8
2.3 KETJUNHAARAANTUMISSYTTYMINEN JA AUTOKATALYTTINEN SYTTYMINEN	9
2.4 LUOKITTELU SYTYTTÄMISTAVAN MUKAAN.....	10
3 SYTTYMISEEN JA LIEKKIRINTAMAN ETENEMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	11
3.1 YLEISTÄ	11
3.2 POLTTOAINEEN OMINAISUUDET	14
3.2.1 Yleistä	14
3.2.2 Kosteus.....	14
3.2.3 Lämpöarvo	19
3.2.4 Haihtuvat aineet	20
3.2.5 Partikkelikerroksen huokoisuus ja paksuus	22
3.2.6 Partikkelin koko ja näytteen paksuus	23
3.2.7 Partikkelin pinta-ala-tilavuussuhde ja muoto.....	26
3.2.8 Polttoaineen tiheys	28
3.2.9 Syttyvän pinnan säteilyominaisuudet.....	28
3.2.10 Pyrolyysikaasujen absorptiokyky ja emissiivisyys.....	31
3.3 SYTTYMISOLOSUHTEET	34
3.3.1 Säteilyn intensiteetti.....	34
3.3.2 Hapettimen virtaus polttoaineen ympärillä.....	36
3.3.3 Hapen osuus ympäristössä, ympäristön paine ja inertti kaasu	41
3.3.4 Näytteen asento	44
3.3.5 Pilotliekin koko ja sijainti	45
3.3.6 Säteilylähteen spektrin jakauma.....	46
3.3.7 Palamisilman esilämmitys.....	46
3.3.8 Muita syttymiseen ja palamisen etenemiseen vaikuttavia tekijöitä	47
3.4 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSIÄ SYTTYMISEEN JA PALAMISEN ETENEMISEEN VAIKUTTAVISTA TEKIJÖISTÄ	48
4 SYTTYMISEN JA LIEKKIRINTAMAN ETENEMISEN MALLINTAMINEN	49
4.1 MALLINTAMISEN PERUSTEITA.....	49
4.2 SYTTYMISEN JA PALAMISEN ETENEMISEN MALLIEN LUOKITTELU	51
4.2.1 Mallien luokittelun perusteista.....	51
4.2.2 Puhtaat syttymistutkimukset	53
4.2.2.1 Pinnan syttyminen.....	53
4.2.2.2 Yksittäisen partikkelin syttyminen.....	54
4.2.2.3 Partikkelikerroksen syttyminen.....	55
4.2.3 Liekkirintaman eteneminen.....	56
4.3 PRIMAARIYHTÄLÖT	57
4.3.1 Primaariyhtälöt käsitteenä.....	57
4.3.2 Jatkuvuusyhtälö.....	57
4.3.3 Energiayhtälö	59
4.3.4 Alkuaineiden säilymisyhtälö.....	63

4.3.5 Liikemääräyhtälö.....	65
4.4 SEKUNDAARIYHTÄLÖT	67
4.4.1 Yleistä	67
4.4.2 Lämmönsiirto	67
4.4.2.1 Yleistä lämmönsiirrosta partikkelikerroksessa	67
4.4.2.2 Lämmönjohtuminen	68
4.4.2.3 Konvektiivinen lämmönsiirto	71
4.4.2.4 Säteilylämmönsiirto	75
4.4.3 Yhdisteiden siirtyminen	81
4.4.3.1 Yleistä	81
4.4.3.2 Yhdisteiden siirto diffuusiolla.....	82
4.4.3.3 Yhdisteiden siirto faasirajan yli	86
4.4.3.4 Yhdisteiden siirto konvektiolla	87
4.4.4 Reaktiokinetiikka	91
4.5 SYTTYMISKRITEERI.....	100
4.5.1 Syttymiskriteerin merkitys	100
4.5.2 Kriittinen pintalämpötila.....	101
4.5.3 Muut syttymiskriteerit	102
4.6 AINEOMINAISUUDET	107
4.7 ALKU- JA REUNAEHDOT.....	109
4.8 MALLIEN RATKAISEMISESTA	110
5 JOHTOPÄÄTÖKSIÄ	112
6 YHTEENVETO	115
LÄHDELUETTELO.....	116

MERKINNÄT

Arabialaiset kirjaimet

A	reaktion taajuustekijä, $(\text{mol m}^{-3})^{1-n} \text{ s}^{-1}$
a	säteilyn absorptiosuhde, -
B	reaktionopeusvakio, $(\text{mol m}^{-3})^{1-n} \text{ s}^{-1}$
b	kokeellinen vakio, m^{-1}
C	konsentraatio, mol m^{-3}
c	ominaislämpökapasiteetti, $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
c_p	ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa, $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
D_{AB}	yhdisteen A binaarinen diffuusiokerroin $A:n$ ja $B:n$ seoksessa, $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$
d	halkaisija, m
E	reaktion aktivaatioenergia, J mol^{-1}
e	kokonaisominaisenergia, J kg^{-1}
f	reaktion steerinen tekijä, -
\vec{F}	systemiin kohdistuva voimavektori, N
F_{ij}	näkyvyyskerroin pinnalta S_i pinnalle S_j , -
g	maan vetovoiman kiihtyvyys, $9,82 \text{ m s}^{-2}$
h	ominaisentalpia, J kg^{-1}
i	hitaussäde, m
j	vakio, -
K_A	yhdisteen A aineensiirtokerroin, m s^{-1}
k	vakio, -
L	karakteristinen mitta, m
l	etäisyys, m
Le	Lewisin luku, -
M	moolimassa, kg mol^{-1}
m	massa, kg
N	moolimäärä, mol
n	reaktion kertaluku, -
Nu	Nusseltin luku, -
P	tasetilaan tuleva mekaaninen teho, W
Pr	Prandtlin luku, -
Q	lämpöenergia, J
q	lämpöenergia massayksikköä kohti (esim. vapautuva lämpö), J kg^{-1}
R	reaktionopeus massan muutoksena, $\text{kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$
R_u	yleinen kaasuvakio = $8,3143 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
r	reaktionopeus moolimäärän muutoksena, $\text{mol m}^{-3} \text{ s}^{-1}$
Re	Reynoldsin luku, -
S	pinta-ala, m^2
s	pinta-alan ja tilavuuden suhde, m^{-1}
Sh	Sherwoodin luku, -
Sc	Schmidtin luku, -
T	lämpötila, K
t	aika, s
U	sisäenergia, J
u	ominaissisäenergia, J kg^{-1}
v	nopeus, m s^{-1}
W	työ, J
w	aineen massaosuus, -
X_i	yhdiste i

x	x-koordinaatti, m
x_i	yhdisteen i mooliosuus seoksessa, -
Y_i	reaktioon osallistuva alkuaine i
y	y-koordinaatti, m
y_{ij}	alkuaineen Y_i atomien lukumäärä yhdisteessä j
z	z-koordinaatti, m.

Kreikkalaiset kirjaimet

α	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, $W m^{-2} K^{-1}$
α_{kok}	kokonaislämmönsiirtokerroin, $W m^{-2} K^{-1}$
α_m	konvektiivinen aineensiirtokerroin, $m s^{-1}$
α_{th}	lämpötilan johtavuus eli terminen diffusiviteetti, $m^2 s^{-1}$
β	lämpölaajenemisvakio, K^{-1}
χ	säteilyn heijastussuhde, -
Δ	tehollinen aksiaalinen dispersiokerroin, $m^2 s^{-1}$
δ	partikkelikerroksen paksuus, m
ε	emissiivisuus, -
Φ	lämpövirta, W
η	dynaaminen viskositeetti, $kg m^{-1} s^{-1}$
κ	absorptiovakio, m^{-1}
φ	aineen tilavuusosuus, ilman alaindeksiä kaasun tilavuusosuus pedissä, -
λ	lämmönjohtavuus, $W m^{-1} K^{-1}$
ν	reaktioyhtälön stökiometrinen kerroin, -
θ	lämpötilaero, K
ρ	tiheys, $kg m^{-3}$
σ	pintajännitys, $N m^{-1}$
τ	säteilyn läpäisysuhde, -
ν	stökiometrinen hapettimen ja polttoaineen massojen suhde, -
ψ	absorptiokerroin, $m^2 kg^{-1}$

Alaindeksit

A	yhdiste A
a	ilma
B	yhdiste B
b	partikkelikerros
cd	johtuminen
cmb	palaminen
cv	konvektio
D	dispersio
d	vaimeneminen
e	lopputila
eff	tehollinen
eks	eksoterminen reaktio
end	endoterminen reaktio
F	polttoaine
f	filmiominaisuus
frm	muodostuminen
g	faasi g
gen	syntyminen tasetilassa

<i>ht</i>	tasetilan ulkopuolinen lämmitys
<i>i</i>	eri tekijöiden erotteluindeksi
<i>ig</i>	syttyminen
<i>in</i>	sisäänvirtaus tasetilaan
<i>j</i>	eri tekijöiden erotteluindeksi
<i>k</i>	eri tekijöiden erotteluindeksi
<i>kn</i>	kineettinen energia
<i>los</i>	häviöt tasetilasta
<i>l</i>	eri tekijöiden erotteluindeksi
<i>m</i>	molaarinen suure
<i>n</i>	eri tekijöiden erotteluindeksi
<i>O</i>	happi
<i>out</i>	ulosvirtaus tasetilasta
<i>p</i>	partikkeli
<i>pr</i>	liekkirintaman eteneminen
<i>pyr</i>	pyrolysoituminen
<i>q</i>	faasi <i>q</i>
<i>r</i>	säteily
<i>s</i>	kiinteä aine
<i>sf</i>	keskimääräinen tyhjässä kanavassa mitattu (nopeus)
<i>st</i>	varastoituminen
<i>stg</i>	virtaukseton tila eli stagnaatiotila
<i>t</i>	tuntuva
<i>vap</i>	höyrystyminen
<i>vol</i>	haihtuvat aineet polttoaineessa
<i>w</i>	kosteus
<i>wet</i>	kosteuden irroitus
<i>0</i>	alkutila
∞	ympäristön tila

Yläindeksit

,	reaktioyhtälöissä lähtöaine
„	suure pinta-alayksikköä kohti, reaktioyhtälöissä lopputuote
„„	suure tilavuusyksikköä kohti
·	aikaderivaatta (suureen yläpuolella)

1 JOHDANTO

Polttoaineiden syttymistä käsitteleviä julkaisuja löytyy jo 1800-luvulta /12/. Tietoa syttymisestä tarvitaan esimerkiksi tulipalojen ehkäisyssä, polttomoottorien sytytyksen kehittämisessä, lämmön- ja sähköntuotannon polttolaitteiden suunnittelussa sekä rakettimoottoreiden ja rakettipolttoaineiden kehittämisessä. Kokeellisten ja teoreettisten tutkimusten avulla on saavutettu merkittäviä tuloksia: auton moottorin sytytysennakko voidaan ennustaa sekunnin murto-osien tarkkuudella ja tiedetään palavien kaasujen pitoisuuksille raja-arvot, joilla ne syttyvät. Polttoaineiden syttymisessä on kuitenkin yhä useita osa-alueita, joissa todellista syttymismekanismia, syttymisolosuhteita, syttymiskriteerejä, syttymiseen kuluva aikaa tai sytytysenergiaa ei tunneta tai osata ennustaa ilman kokeellista tutkimusta. Yksi näistä vaikeasti mallinnettavista ja mitattavista syttymisen osa-alueista on kiinteiden polttoainekerrosten syttyminen.

Partikkelikerrosten syttymisen tietoja tarvitaan mm. maastopalojen ja teollisuuspalojen ehkäisemisessä. Monet syttymistä ja liekkirintaman etenemistä koskevat tutkimukset onkin tehty tulipalojen ehkäisemistä ja sammutusta ajatellen. Näissä tutkimuksissa polttoaineena on käytetty mm. puiden neulasia ja latvuksia, pensasmateriaaleja sekä ruohoa ja heinää (esim. /34/ ja /52/). Rakennuspalojen välttämisen takia on tehty lisäksi paljon tutkimusta pintojen syttymisestä (esim. /4/, /22/, /33/ ja /47/). Tällaisissa tutkimuksissa käytetyt polttoaineet ovat luonnollisesti rakennus- ja sisustusmateriaaleja. Näistä yleisimpiä ovat puu, luonnonkuitu- ja keinokuitutekstiilit sekä erilaiset muovit.

Tämän tutkimuksen lähtökohtana on kiinteiden polttoaineiden käyttö energiantuotannossa. Syttymistä ja palamisen etenemistä polttoainepartikkelien muodostamassa kerroksessa on tutkittu jonkin verran myös energiantuotantoon käytettävien laitteiden ja prosessien kehittämistä ja suunnittelua varten. Käytännön sovellutuksia ovat esimerkiksi arinapoltto ja kiinteäkerroskaasutus. Energiantuotantoon liittyen on tutkittu syttymistä ja palamisen etenemistä muun muassa yksittäisissä partikkeleissa, hiilipölysuspensioissa ja

hiilipartikkelikerroksissa. Tässä työssä on viitattu tutkimuksiin, jotka on tehty jo 1930-luvulla /32/. Varhaisimmista lähteistä aina uusimpiin 1990-luvun tutkimuksiin saakka löytyy usein mainintoja, joiden mukaan syttymisilmiön tuntemus ja sen mallintaminen ovat vielä monilta osin kehittymättömiä /47/. Syttymiseen vaikuttavien fysikaalisten ja kemiallisten ilmiöiden vaikutusta toisiinsa ei vielä tunneta ja pystytä mallintamaan niin hyvin, että voitaisiin ennustaa luotettavasti, millaiset olosuhteet, millainen tila ja aika tarvitaan polttoainekerroksen syttymiseen koelaitteista, -olosuhteista ja -polttoaineesta poikkeavassa tilanteessa.

Miten syttyminen ja palamisen eteneminen sitten vaikuttavat polttolaitteen toimintaan ja siihen millaisia niistä tehdään? Syttymisaika vaikuttaa tulipesän koon suunnitteluun. Polttoaineen pitää ehtiä syttyä ja palaa loppuun kerroksessa, ennen kuin jäännökset poistetaan tuhkanpoistossa. Syttymisaika voidaan minimoida, kun tiedetään polttoainekerroksen syttymiseen vaikuttavat tekijät, niiden vaikutussuunnat ja vaikutuksen suuruus. Tulipesän ja polttimen suunnittelussa voidaan myös ottaa huomioon syttymiseen tarvittavat lämpövirrat erilaisilla polttoaineilla. Ilmajaot voidaan suunnitella niin, että syttymisvyöhykkeen ja palamisvyöhykkeen ilmamäärät jakautuvat oikealla tavalla. Polttoainetta voidaan esikäsitellä siten, että se syttyy mahdollisimman nopeasti ja pienellä lämpövirralla tai pienessä lämpötilassa, kun tiedetään partikkelikoon ja -muodon sekä kosteuden vaikutus syttymiseen. Polttoainekerros voidaan myös tehdä hyvin syttyväksi syöttölaitteiden ja arinan oikealla suunnittelulla, kun kerroksen paksuuden ja huokoisuuden vaikutukset syttymiseen ja palamisrintaman etenemiseen ovat tiedossa.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää kirjallisuuden avulla puupolttoainekerrosten syttymiseen vaikuttavat tekijät. Kirjallisuustutkimuksella selvitetään myös, miten syttymistä ja syttymisrintaman etenemistä on mallinnettu ja voidaan mallintaa. Palamisen eteneminen partikkelikerroksessa on tuoreen polttoaineen syttymisestä riippuva ilmiö. Liekkirintaman etenemistä tutkitaan ja tarkastellaan siis syttymisilmiön kannalta. Tässä työssä esitetään kirjallisuuden perusteella tutkimuksen teoreettinen pohja. Alan tutkimuksen tämän hetkisen tilan perusteella tehdään

johtopäätöksiä jatkotutkimuksen tarpeista ja kohteista sekä polttolaitteiden kehittämissuunnista. Työ on esitutkimus jatkossa seuraavalle kokeelliselle ja teoreettiselle tutkimukselle.

2 SYTTYMISEEN LIITTYVIÄ KÄSITTEITÄ

2.1 YLEISTÄ

Syttymisen ja palamisen yleinen edellytys on polttoaineen ja hapen sekoittuminen riittävän korkeassa lämpötilassa. Palamisella tarkoitetaan lämpöä vapauttavia eli eksotemisiä aineen hapettumisreaktioita, joita tapahtuu niin paljon, että palamistuotteiden lämpötila nousee huomattavasti korkeammaksi kuin ympäristön lämpötila. Kunkin reaktion toteutumisen edellytyksenä on polttoaine- ja happimolekyylin törmäminen toisiinsa riittävän suurella kineettisellä energialla. Molekyylien kineettinen energia on sitä suurempi mitä suurempi on lämpötila kyseisessä tilassa. Reaktion toteutumiseen tarvittava aktivaatioenergia ylittyy siis sitä todennäköisemmin mitä suuremmassa lämpötilassa polttoaine ja hapetin ovat.

Palamisen etenemisellä tarkoitetaan tässä työssä samaa kuin liekkirintaman etenemisellä, syttymisrintaman etenemisellä ja reaktiorintaman etenemisellä. Työssä käytetään näitä neljää termiä yhdelle käsitteelle lähinnä kielellisen vaihtelun takia. Englannin kielisessä kirjallisuudessa käytetään termejä fire spread (joskus firespread), flame spread, flame propagation ja reaction front propagation. Kiinteän polttoaineen tapauksessa liekkirintaman etenemisen nopeus ei ole sama kuin polttoaineen palamisnopeus tai loppuunpalamisnopeus. Liekkirintaman etenemisnopeus on nopeus jolla syttymisrintama etenee kerroksessa. Syttymisen jälkeen kiinteä polttoaine jää palamaan, kunnes kaikki haihtuvat aineet ja jäännöshiili on palanut loppuun ellei mikään tekijä aiheuta sammumista sitä ennen. Liekkirintaman etenemisnopeuden yksikkönä on yleensä m s^{-1} tai $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$, kun taas palamisnopeuden yksikkönä on kg s^{-1} tai $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Vaikka liekkirintaman etenemisnopeus ja palamisnopeus muunnettaisiinkin samoihin yksiköihin, eivät nämä nopeudet ole aina samat, koska syttymistä edeltävä kinetiikka sekä

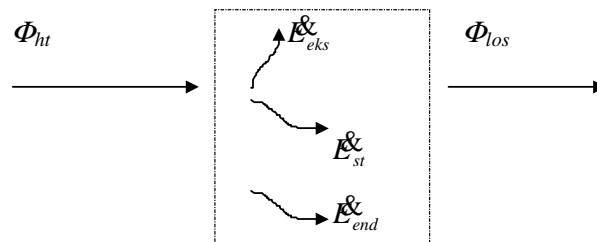
lämmön ja aineen siirtymisnopeudet ovat erilaisia kuin syttymisen jälkeinen palamisen kinetiikka ja siirtonopeudet.

Pyrolyysillä tarkoitetaan kiinteiden ja nestemäisten polttoaineiden yhteydessä polttoaineen niin sanottujen haihtuvien aineiden reaktioita, joissa ne muuttuvat kaasumaiseen olomuotoon ja poistuvat kiinteästä aineesta tai nesteestä. Kiinteässä olomuodossa olevat yhdisteet eivät vain muuta olomuotoaan vaan ne yleensä myös muuttuvat toisiksi yhdisteiksi. Puu koostuu pääasiassa selluloosasta ja hemiselluloosasta sekä ligniinistä, jotka ovat melko suuria hiilivety-yhdisteitä. Pyrolyysissä suuret molekyylit pilkkoutuvat usein pienemmiksi ja kevyemmiksi yhdisteiksi. Pyrolyysireaktiot tapahtuvat lämmön tuonnin ja lämpötilan kasvun seurauksena. Pyrolyysi on siis pääasiassa endoterminen eli lämpöä sitova reaktiosarja. Se ei vaadi happea. Pyrolyysituotteet tosin reagoivat helposti hapen kanssa vapauttaen lämpöä. Puupolttoaineen pyrolyysireaktioissa syntyy mm. tervayhdisteitä, häkää, metaania ja vetyä. Puusta vapautuu haihtuvia aineita noin 80 - 95 % kuiva-aineesta riippuen pyrolysoitumisnopeudesta sekä lämpötilasta, jossa pyrolyysi tapahtuu. Tämä pitoisuus määritellään standardin DIN 51720 mukaan lämmittämällä polttoainetta hapettomassa tilassa 900 °C:n lämpötilassa tietty aika ja mittaamalla kiinteän aineen massan muutos /45/. Joissakin kokeissa puupolttoaine on pyrolysoitunut käytännössä kokonaan, kun lämpeneminen on tapahtunut hyvin nopeasti. Pyrolyysin jälkeen jäljelle jäävää kiinteää osaa sanotaan jäännöshiileksi tai koksiksi. Se sisältää pääasiassa hiiltä ja tuhkaa. Pyrolysointilämpötila ja -aika vaikuttavat jäljelle jäävän koksen osuuteen koko kuiva-aineesta. Pyrolyysissä ei siis aina vapaudu niin paljon haihtuvia aineita kuin olisi mahdollista optimaalisissa olosuhteissa.

Kiinteän polttoaineen tapauksessa erotetaan käsitteet homogeeninen ja heterogeeninen syttyminen ja palaminen. Homogeeninen syttyminen tarkoittaa syttymistä kaasufaasissa. Tällöin sekä polttoaine että happi ovat kaasumaisessa tilassa, eli polttoaine on pyrolyysikaasua. Heterogeenisessä syttymisessä ja palamisessa happi reagoi kiinteän polttoaineen kanssa. Yleensä polttoaineen syttyvä ja palava osa on tällöin jäännöshiili.

2.2 TERMINEN SYTTYMINEN

Useat tutkijat ovat käyttäneet ja käyttävät syttymisen määritelmänä tiettävästi alunperin Semenovin (1935) esittämää määrittelyä. Sen mukaan polttoaine syttyy, kun siinä tapahtuvissa eksotermisissä reaktioissa syntyvän lämpövirran ja syttymistilaan tulevan lämpövirran summa on yhtä suuri kuin häviöihin ja endotermisiin reaktioihin kuluvan lämpövirran summa. Syttymistilaan tuleva lämpöenergia voi tulla ulkopuolisesta lämmönlähteestä, kuten kuumasta polttoainetta koskettavasta pinnasta, lämpöä säteilevästä pinnasta tai kuumasta kaasuvirtauksesta. Lämpöä voi tulla syttymiskohtaan myös jo syttyneen polttoaineen liekistä, savukaasuista tai hiilloksesta. Häviöitä ovat syttymiskohdasta pois johtuva, säteilevä ja konvektoituva lämpö. Endotermisiä eli lämpöä sitovia reaktioita ovat mm. useimmat pyrolyysireaktiot, joissa kiinteän tai nestemäisen polttoaineen molekyylit pilkkoutuvat lämpötilan noustessa pienemmiksi molekyyleiksi ja muuttuvat kaasumaisiksi. Syttyminen on niin sanotusti kestävä (sustained ignition), kun palaminen jatkuu, vaikka lisälämpövirran tuominen taseeseen lopetetaan. Kun reaktioissa syntyvä nettolämpövirta (syntyvän ja kuluvan lämpövirran erotus) ylittää häviöt, alkaa lämpötila nousta nopeasti, kunnes saavutetaan uusi tasapainotila. Tässä tasapainotilassa reaktionopeutta rajoittaa esimerkiksi aineensiiirtonopeus, jolloin palamistilassa syntyvä nettolämpövirta on taas yhtä suuri kuin siitä poistuva nettolämpövirta (poistuva miinus tuleva lämpövirta). Edellä esitettyä Semenovin syttymiskriteerin syttymistapaa kutsutaan myös termiseksi syttymiseksi. Syttyvän tilavuuden energiatase on esitetty kuvassa 1 ja yhtälössä (1). Tässä taseessa otetaan huomioon myös lämmön varastoituminen tasetilaan.



Kuva 1. Syttymistilan yksinkertainen energiatase.

$$\Phi_{ht} + \mathcal{E}_{eks} = \mathcal{E}_{end} + \Phi_{los} + \mathcal{E}_{st} \quad (1)$$

Yhtälössä

- \mathcal{E}_{end} on endotermisiin reaktioihin sitoutuva reaktioenergiavirta,
- \mathcal{E}_{eks} on eksotermisissä reaktioissa vapautuva reaktioenergiavirta,
- Φ_{los} on tasetilasta säteilemällä, konvektoitumalla ja johtumalla häviävä lämpövirta,
- Φ_{ht} on tasetilaan sen ulkopuolelta tuleva lämpövirta ja
- \mathcal{E}_{st} on tasetilassa varastoituva energiavirta.

2.3 KETJUNHAARAANTUMISSYTTYMINEN JA AUTOKATALYTTINEN SYTTYMINEN

Toinen vaihtoehtoinen tai rinnakkainen syttymisen määritelmä on niin sanottu ketjureaktiosyttyminen. Sen mukaan polttoaine syttyy, kun polttoaineessa tapahtuu enemmän reaktioketjun haaraantumisia (chain branching) kuin niiden katkeamisia (termination). Tämä teoria pätee myös räjähdykselle.

Ketjunhaaraantumissyttymistä voidaan selittää radikaalireaktioiden teorialla. Radikaalireaktioiden teorian mukaan kaikki palamisreaktiot ovat radikaalireaktioita. Tämä tarkoittaa sitä, että jokaisessa palamisreaktiossa syntyy ja häviää yhteensä parillinen määrä kemiallisia radikaaleja. Radikaalit ovat molekyyliä tai atomeja, joilla on yksi tai useampi pariton elektroni eli niiltä puuttuu vastakkaispinninen elektroni. Radikaalit ovat epästabiileja eli ne reagoivat hyvin helposti. Radikaalien reaktioiden aktivaatioenergiat ovat siis pieniä. Radikaalien muodostumisen aktivaatioenergiat taas voivat olla suuriakin. Radikaalireaktioiden teorian mukaan reaktiot eivät ole koskaan sellaisia kokonaisreaktioita, joihin palaminen yleensä esitetään, kuten



Sitä vastoin lähtöaineista muodostuu aina ensin yksi tai useampi radikaali, jotka reagoivat toisten radikaalien tai stabiilien molekyylien kanssa. /40/, /15/

Radikaalireaktiot jakautuvat initiaatio-, propagaatio-, ketjunhaaraantumis- ja terminaatioreaktioihin. Initiaatioreaktiossa muodostuu radikaalittomista molekyyleistä kaksi radikaalia. Initiaatioreaktiot ovat hyvin endotermisiä ja niiden aktivaatioenergia on yleensä suuri. Propagaatioreaktioissa reaktiotuotteisiin muodostuu yhtä monta radikaalia kuin on lähtöaineissa. Propagaatioreaktioissa vapautuu lämpöä ja niiden aktivaatioenergia on pieni tai kohtalainen. Ketjunhaaraantumisreaktioissa radikaalien määrä kasvaa pareittain, jolloin esimerkiksi lähtöaineissa oleva yksi radikaali tuottaa haaraantumisreaktiossa kolme radikaalia lopputuotteisiin. Nämä reaktiot ovat hyvin endotermisiä ja niiden aktivoitumiseen vaaditaan suuri energiamäärä. Terminaatioreaktioissa radikaalien määrä vähenee pareittain (päinvastoin kuin haaraantumisreaktioissa). Terminaatioreaktio on voimakkaasti eksoterminen ja sen aktivaatioenergia on pieni tai nolla. /40/

Ketjunhaaraantumissyttymistä voidaan pitää oikeastaan yhtenä autokatalyyttisen syttymisen muotona. Autokatalyyttisessä syttymisessä reaktionopeus suurenee reaktiotuotteiden määrän kasvaessa. Reaktiotuotteet siis toimivat reaktion katalysaattorina. Ketjunhaaraantumisreaktioissa radikaalien määrä kasvaa, jolloin reaktionopeus kasvaa nopeasti. Autokatalyyttisessä syttymisessä lämpötilan ei tarvitse välttämättä kasvaa ennen syttymistä.

2.4 LUOKITTELU SYTYTTÄMISTAVAN MUKAAN

Itsesyttyminen (spontaneous ignition, self-ignition, auto-ignition) tarkoittaa syttymistä polttoaineen ja hapettimen lämpötilan suurenemisen seurauksena. Lämpötila voi kasvaa ulkopuolisen energian tuonnin seurauksena tai ympäristön lämpötilan nousemisen mukana. Itsesyttymisen esimerkkitapauksina voidaan pitää vaikka tulipesän kuuman pinnan

säteilylämmön aiheuttamaa lähellä olevan seinän syttymistä tai lämpimässä tilassa olevan hiilikasan syttymistä sisältä päin. Itsesytyminen voi joskus tapahtua alhaisessakin ympäristön lämpötilassa. Esimerkiksi kuivan hiilipartikkelikerroksen itselämpeneminen voi alkaa jo 18 - 105 °C:n lämpötilassa ja johtaa itsesyttymiseen, joka voi tapahtua jo 120 °C:n lämpötilassa /44/.

Pakotettu syttyminen (tai käynnistetty syttyminen) (forced ignition, piloted ignition) tarkoittaa syttymistä kuuman syttymislähteen välittömässä läheisyydessä. Syttymislähteenä voi toimia esimerkiksi liekki, hehkuva partikkeli, sähkökipinä tai kuuma pinta. Pakotetun syttymisen tapauksessa suurin osa varsinaisesta lämpötilan kasvattamiseen ja syttymiseen tarvittavasta lämmöstä tulee kuitenkin yleensä muusta lämmönlähteestä kuin syttymislähteestä. Syttymislähde käynnistää palamisreaktiot vain pienellä alueella yleensä kaasumaisessa polttoaineessa. Syttymiselle otolliset olosuhteet on tuotettu jollakin muulla lämmönlähteellä. Jos reaktioissa syntyvä lämpö riittää kasvattamaan lähellä olevan polttoaine-happiseoksen lämpötilaa riittävästi, alkaa palaminen levitä ja syttyminen tapahtuu.

3 SYTTYMISEEN JA LIEKKIRINTAMAN ETENEMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

3.1 YLEISTÄ

Syttymisen toteutumiseen, siihen tarvittavaan energiaan, siihen kuluvaan aikaan ja syttymislämpötilaan vaikuttavat mm. lämmönsiirto, virtaukset, aineensiirto, kemialliset reaktiot, aineominaisuudet ja faasit. Nämä tekijät taas vaikuttavat toisiinsa, joten niiden yhteisvaikutus syttymiseen ja palamiseen on hyvin monimutkainen.

Partikkelikerroksessa lämpöä siirtyy säteilemällä, konvektiolla ja johtumalla. Esimerkiksi arinapolton tapauksessa lämpöä säteilee tuoreeseen polttoaineeseen pääasiassa liekestä, muuratuista seinämäpinnoista ja

polttoainehiilloksesta. Liekkisäteily on kaasujen säteilevistä komponenteista, noesta ja kaasun mukaan tempautuneista pienistä hiukkasista emittoituvaa lämpösäteilyä. Lämpösäteily etenee partikkelikerroksessa sitä paremmin, mitä enemmän tyhjää tilaa partikkeleiden välissä on. Lämpöä voi kulkeutua eli konvektoitua savukaasujen mukana palamisalueelta tuoreeseen polttoaineeseen ja vastaavasti ylimääräinen reagoimaton palamisilma voi jäädyttää palavaa kerrosta tai kaasua. Lämmön johtuminen kiinteän aineen sisällä on merkittävä tekijä haihtuvien aineiden vapautumisnopeuden kannalta. Lämpö johtuu myös paikallaan olevissa kaasukerroksissa, esimerkiksi rajakerroksissa. Lämmönsiirto polttoaineeseen ja polttoaineessa vaikuttaa siis pyrolyysinopeuteen ja siten syttymisrintaman etenemisnopeuteen.

Virtausolosuhteet partikkelikerroksessa ja sen ulkopuolella vaikuttavat muunmuassa hapen ja polttoaineen sekoittumiseen ja konvektiiviseen lämmönsiirtoon. Mitä suurempi on virtausnopeus sitä paremmin lämpö siirtyy konvektiolla ja sitä paremmin happi- ja polttoainekaasuvirtaukset sekoittuvat toisiinsa. Toisaalta virtauksen painehäviöt kasvavat virtausnopeuden kasvaessa. Virtaukset voivat kanavoitua esimerkiksi siten, että lähes koko ilmavirtaus kulkee polttoainekerrokseen muodostuneesta aukosta, eikä happea riitä muussa osassa kerrosta partikkeleiden palamiseen. Jos eksotermiset palamisreaktiot loppuvat kerroksessa, lämpötila laskee palamisen edistyminen hidastuu tai kerros voi jopa sammua kokonaan.

Aineensiirto voi tapahtua diffuusiolla tai konvektiolla. Ainetta konvektoituu virtausten mukana. Aineen diffundoituminen johtuu paikallisten konsentraatioerojen tasoittumispyrkimyksestä. Diffuusion merkitys on suurin matalissa lämpötiloissa tapahtuvassa kuivumisessa ja jäännöshiilen palamisessa. Partikkelista diffundoituu ulospäin mm. vettä ja pyrolyysikaasuja. Korkeissa lämpötiloissa syntyvä paine-ero saa aikaan nopean massansiirron partikkelin sisältä pintaan, jolloin ei ole kysymys diffuusiosta. Partikkelin kuivuminen on edellytys sen lämpötilan nousemiselle ja pyrolysoitumiselle. Pyrolyysikaasuja tarvitaan, jotta palamista tapahtuisi kaasufaasissa. Diffuusionopeuteen vaikuttavat lämpötila ja kiinteän aineen rakenne, esimerkiksi huokoisuus. Lämpötilaan puolestaan vaikuttaa lämmönsiirto

partikkelin sisällä. Haihtuvien aineiden irtoamisen jälkeen jäännöskoksin pintakerros reagoi hapen ja hiilidioksidin kanssa. Tämän palamisvaiheen nopeuteen vaikuttaa hapen diffuusionopeus jäännöskoksinpartikkelin ulkopinnalle ja huokosten sisäpinnoille. Diffuusionopeuteen puolestaan vaikuttaa koksin huokoisuus, joka puolestaan riippuu monimutkaisella tavalla mm. pyrolysoitumisvaiheen reaktioista ja aineensierrosta.

Kemialliset reaktiot sitovat tai vapauttavat energiaa ja muuttavat yhdisteitä toisiksi. Energian sitominen tai vapauttaminen vaikuttaa virtauksiin ja lämpövirtojen siirtymisuuntiin. Paikalliset lämpötilagradientit aiheuttavat nostevoimia ja muuttavat diffuusionopeuksia. Yhdisteiden muuttumisessa muuttuvat usein faasit ja aineominaisuudet. Samalla kiinteän ja kaasumaisen aineen massaosuudet muuttuvat. Kiinteää ainetta häviää ja kaasumaista ainetta tulee lisää, mikä puolestaan muuttaa virtauksia. Reaktioiden seurauksena muuttuvat myös aineiden konsentraatiot, mikä puolestaan muuttaa diffundoitumisnopeuksia ja -suuntia. Lämpötilat ja lämmönsiirto vaikuttavat siihen, mitä kemiallisia reaktioita tapahtuu, mihin tasapainotilaan nämä reaktiot pyrkivät ajautumaan ja kuinka nopeasti reaktiot tapahtuvat. Reaktiokinetiikka on erityisen voimakkaasti riippuvainen lämpötilasta, jossa reaktiot tapahtuvat. Pienissä lämpötiloissa reaktionopeus voi rajoittaa prosessin etenemisnopeutta. Reaktiot puolestaan vaikuttavat lämpötiloihin ja siten lämmön siirtymiseen.

Aineominaisuudet vaikuttavat lämmönsiirtoon, virtauksiin ja kemiallisiin reaktioihin. Lämmönjohtavuus vaikuttaa luonnollisesti lämmön johtumiseen, emissiivisyys, absorptiokyky ja säteilyn läpäisevyys säteilylämmönsiirtoon sekä tiheys viskositeetti ja pintaominaisuudet konvektioon. Viimeksi mainitut kolme ominaisuutta vaikuttavat myös virtausten painehäviöihin. Lämmön varastoitumiseen vaikuttavat lisäksi ominaislämpökapasiteetti ja tiheys. Aineominaisuudet muuttuvat lämpötilan funktiona ja reaktioiden seurauksena.

Eri faasit määritellään yleensä aineen olomuodoiksi: kiinteä, nestemäinen ja kaasumainen. Toinen mahdollisuus faasi-käsitteen määrittämiseen on erottaa toisistaan kaikki fysikaalisilta tai kemiallisilta ominaisuuksiltaan toisistaan poikkeavat aineet ja partikkelit. Tämä jälkimmäinen määrittelytapa laajentaa

faasikäsitettä siten, että eri faaseiksi voidaan lukea aineen eri olomuotojen lisäksi esimerkiksi eri ainetta olevat kaasut ja partikkelit, eri kokoluokkiin kuuluvat partikkeliryhmät, eri muotoiset partikkelit, eri tiheyksiset partikkelit ja niin edelleen. Kerroksen partikkelikoot ja partikkelikokojakauma vaikuttavat kerroksen läpi kulkevan virtauksen jakautumiseen ja siten hapen saatavuuteen eri osissa kerrosta. Partikkelikokojakauma vaikuttaa myös lämmön siirtymiseen kerroksessa säteilemällä, johtumalla ja virtauksen mukana siirtyvällä energialla eli konvektiolla. Aineensiirto tapahtuu yleensä partikkelissa sitä nopeammin mitä pienempi partikkeli on, mutta toisaalta lämmönsiirto ja hapen saatavuus voi olla huonompaa pienten partikkelien alueella, jolloin aineensiirto heikentyy. Pienimmät ja kevyimmät partikkelit tempautuvat helposti virtauksen mukaan, jolloin ne voivat joutua pois korkean lämpötilan alueelta tai päinvastoin päästä liekkivyöhykkeelle ja palaa nopeasti pois. Tervamaisia aineita voi joissakin olosuhteissa kondensoitua pintaan.

3.2 POLTTOAINEEN OMINAISUUDET

3.2.1 Yleistä

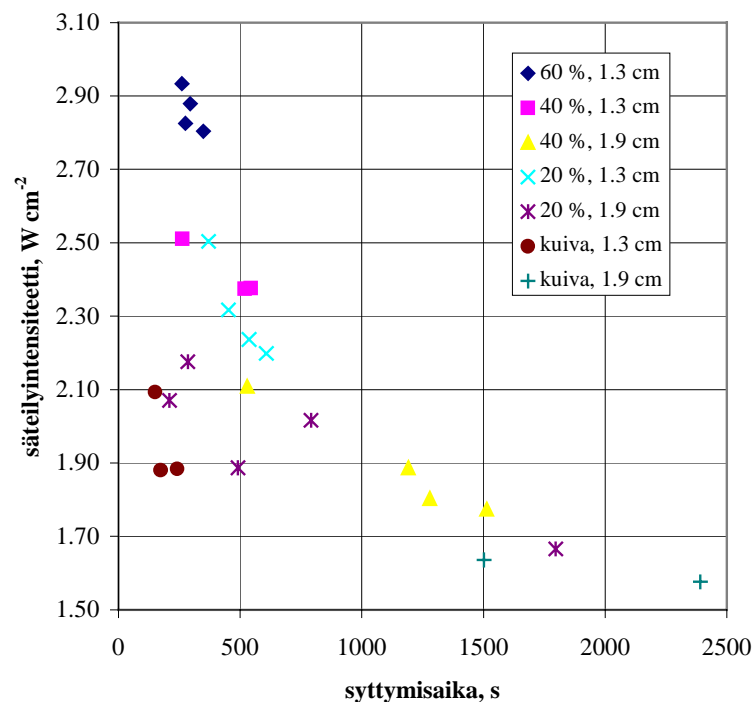
Polttoaineen fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet vaikuttavat luonnollisesti syttymiseen ja palamisen etenemiseen. Polttoaineen kemiallinen koostumus vaikuttaa olennaisesti esimerkiksi siihen, kuinka paljon energiaa tarvitaan polttoaineen pyrolyysiin ja missä lämpötilassa pyrolyysi tapahtuu. Kemiallisesta koostumuksesta riippuu myös se, kuinka suuri on polttoaineen kuiva-aineen lämpöarvo. Fysikaalisista ominaisuuksista esimerkiksi partikkelin ja kerroksen huokoisuus vaikuttavat sekä aineen- että lämmönsiirtoon partikkelissa ja kerroksessa. Polttoaineen sisältämällä kosteudella on merkittävä vaikutus syttymiseen ja palamisen etenemiseen. Tässä kappaleessa on käytetty osittain tekijän aikaisemmin keräämiä tietoja, jotka on julkaistu kiinteän polttoaineen syttymistä käsittelevässä kirjallisuustutkimuksessa /18/.

3.2.2 Kosteus

Kiinteät polttoaineet sisältävät usein kosteutta vapaana vetenä, solurakenteiden sisällä olevana vetenä ja/tai yhdisteisiin kiinnittyneenä vetenä. Vesi vaikuttaa luonnollisesti polttoaineen syttymiseen ja liekkirintaman etenemiseen, koska sen haihduttamiseen kuluu reaktioiden tai ulkopuolisen lähteen lämpöä. Partikkelien sisältämä kosteus vaikuttaa lisäksi materiaalin aineominaisuuksiin, kuten lämmönjohtavuuteen, ominaislämpökapasiteettiin ja tiheyteen. Riittävän suuri kosteuspitoisuus estää syttymisen ja liekkirintaman etenemisen kokonaan, jos merkittävää ulkopuolista lämmönlähdettä tai apupolttoainetta ei käytetä.

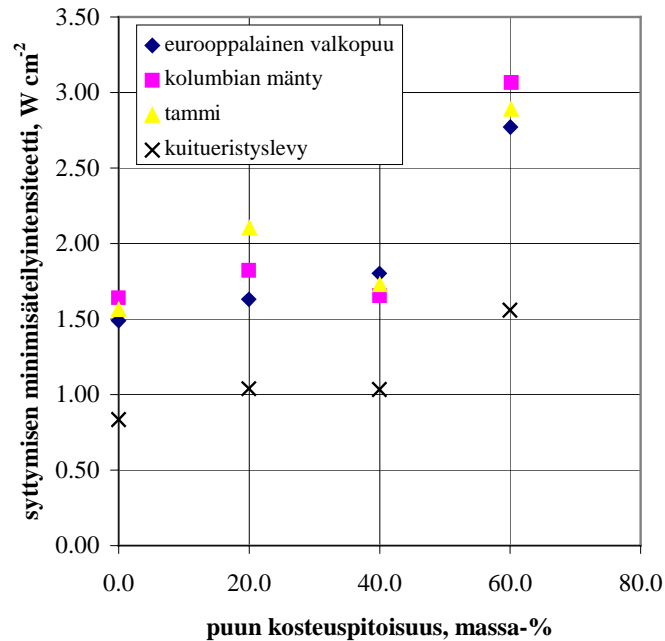
Joillakin kokeellisilla tutkimuksilla ja niiden perusteella tehdyillä malleilla on havaittu, että syttymislämpötila suurenee noin 2 °C puun kosteusprosentin kasvaessa prosenttiyksiköllä /20/. Tässä puun kosteuspitoisuus on määritetty veden ja kuivan puun massojen suhteeksi.

Simms ja Law, /43/, ovat tutkineet kokeellisesti kostean ja kuivan puupinnan syttymistä lämpösäteilyn seurauksena. Tutkimuksessa havaittiin puun kosteuden kasvamisen pidentävän syttymisaikaa ja suurentavan pienintä säteilylämpövuota, jolla pinta saadaan syttymään. Kuvassa 2 on esitetty yhden puulajin kahden eri paksuisen näytteen syttymisajan muutos eri suurilla säteilyintensiteeteillä ja eri kosteuksilla näytteillä.



Kuva 2. Eurooppalaisen valkopuun sytyttämiseen tarvittava säteilyintensiteetti eri sytytysajoilla ja kosteuspitoisuuksilla. /43/

Kuvassa 3 nähdään kosteuden vaikutus kriittiseen säteilyintensiteettiin kolmella eri puulajilla ja kuitueristelevyllä. Kosteus suurentaa selvästi sekä syttymisaikaa että sytytykseen tarvittavaa säteilyintensiteettiä. Kriittinen säteilyintensiteetti on käyttäytynyt kokeissa samalla tavalla kaikilla muilla näytteillä paitsi kuitueristelevyllä.



Kuva 3. Kosteuden vaikutus minimisäteilyintensiteettiin, jolla pinta syttyy. /43/

Mikkola, /27/, on taulukoinut syttymisaikoja puumateriaaleille eri kosteuksissa. Taulukosta 1 nähdään, että syttymisajat pitenevät selkeästi kosteuspitoisuuden kasvaessa. Kokeissa pintaa lämmitettiin yhdeltä puolelta lämpösäteilyllä. Koekappaleet olivat pintamitoiltaan $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ja paksuudeltaan 1...38 mm.

Taulukko 1. Syttymisaikoja (t_{ig}) puumateriaalien eri kosteusarvoilla (w_w) säteilyn intensiteetin (Φ'') ollessa vakio. Suluissa olevat arvot esittävät syttymisaikojen vaihteluväliä. /27/

	Φ'' (kW m ⁻²)	$w_w \cdot 100$ (%)	t_{ig} (s)
Kuusi	50	0	8 (1,5)
	50	10	16 (3)
	50	20	26 (4)

Mänty	50	0	9 (2)
	50	10	22 (3)
Lastulevy	50	0	26 (2)
	50	8	37 (3)
Vaneri	50	0	15 (2)
	50	8	24 (4)
Kuitulevy	30	0	14 (2)
	30	8	23 (2)

Catchpole et al., /7/, ovat tutkineet kokeellisesti syttymisrintaman etenemistä erilaisissa metsämateriaaleista koostuvissa polttoainekerroksissa. Tutkimuksessa on tehty 357 palokoetta tuulitunnelissa. Yhtenä tutkittavana muuttujana oli polttoaineen kosteus. Syttymisrintaman etenemisnopeuden havaittiin pienenevän polttoaineen vesipitoisuuden kasvaessa. Etenemisnopeus oli koetulosten mukaan seuraavalla tavalla verrannollinen kosteuteen:

$$R \propto \exp(-w_w k_d). \quad (3)$$

Tässä

w_w on polttoaineen veden massan suhden kuiva-aineen massaan ja

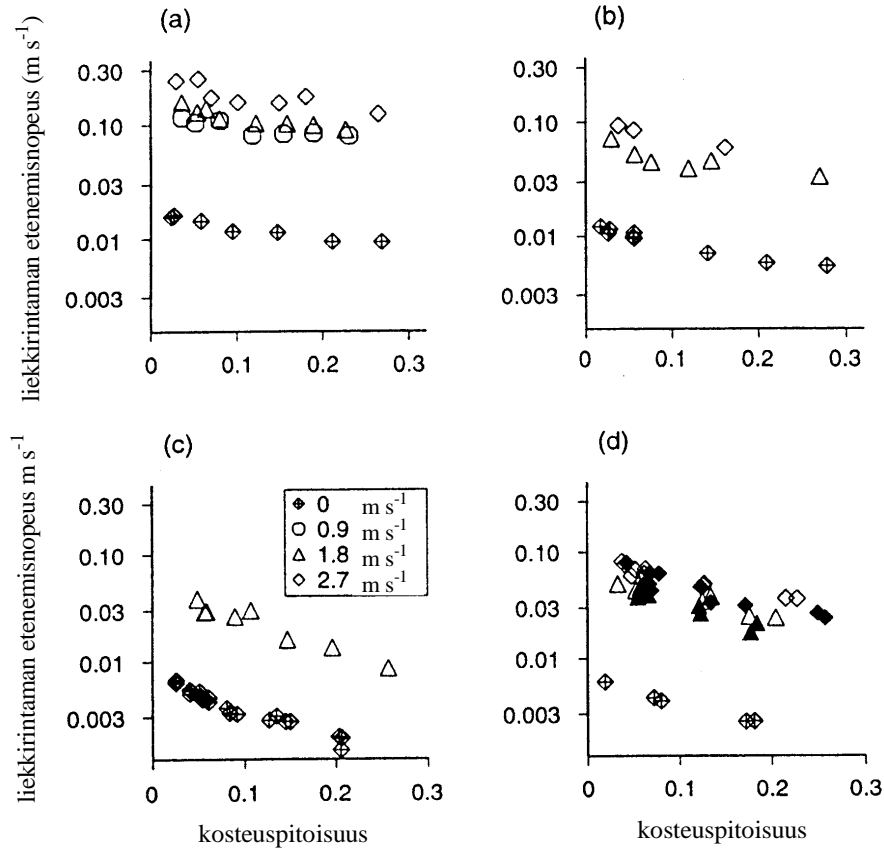
k_d on kosteudesta riippumaton vaimenemiskvakio.

Osa kokeista tehtiin säännöllisesti järjestetyillä kerroksilla ja osa satunnaisesti järjestyneillä kerroksilla. Polttoaineina käytettiin ohuita ja paksumpia poppelilastuja sekä ponderosamännyn neulasia ja sydänpuusta tehtyjä tikkuja. Kerrokset olivat noin 1...30 cm paksuja ja kerrosten kiintoaineen tilavuusosuus, φ_s , vaihteli välillä 0,0025...0,094. Kerrokset olivat siis erittäin huokoisia. Tikkerkerrokset oli tehty pystyyn säännölliseen hilaan asetetuista tikuista. /7/

Kuvassa 4 nähdään kosteuden vaikutus liekkirintaman etenemisnopeuteen (logaritmisella asteikolla) erilaisissa polttoainekerroksissa. Kuvassa 4 a on normaalipaksuisten poppelilastujen muodostaman kerroksen palamisen etenemisnopeuksia. Kerroksen paksuus, δ , on ollut 10 cm ja kiintoaineen tilavuusosuus 0,005. Tuulettomissa olosuhteissa tehtyjen koetulosten arvot on saatu Wilsonin 1990 tekemästä julkaisusta, jossa kerroksen paksuus on ollut 20 cm. Kuvassa 4 b on saman polttoaineen koetuloksia, kun kerroksen paksuus on

ollut 2,5 cm tuulettomissa olosuhteissa (Wilson) ja 10 cm virtaavan ilman tapauksissa. Kiintoaineen osuus on ollut 0,02.

Kuvan 4 c tapauksessa on käytetty männyn neulasia. Kiintoaineen osuus kerroksissa on ollut 0,065. Kerroksen paksuus on ollut tuuliolosuhteissa 2,5 cm ja tuulettomissa olosuhteissa Andersonin ja Rothermelin 1965 tekemässä tutkimuksessa välillä 6...8 cm.



Kuva 4. Liekkirintaman etenemisnopeus polttoaineen kosteuden funktiona erisuuruksilla ilman virtausnopeuksilla. /7/

Kuvassa 4 d on polttoaineena tikkuja ja virtaavan ilman tapauksissa paksumpia lastuja. Tuulettomassa tapauksessa (Wilson, 1990) partikkelien pinta-alan ja tilavuuden suhde on ollut 2520 m^{-1} , kiintoaineosuus 0,02 ja kerroksen paksuus 2,5 cm. Virtaavan ilman tapauksissa kiintoaineosuus on ollut 0,03. Avoimet kärjellään olevat neliöt ja kolmiot tarkoittavat tapauksia, joissa kerroksen paksuus, δ , on ollut 7,5 cm ja mustat kolmiot ja neliöt tapauksia, joissa $\delta = 15 \text{ cm}$. /7/

Polttoaineen kosteuden havaittiin vaikuttavan niin sanottuun etenemisvuohon, Φ_{pr} . Etenemisvuo määritellään keskimääräiseksi energian siirroksi liekistä ja palamisvyöhykkeestä syttymättömään polttoaineeseen palamisrintaman suuntaisen pystysuoran poikkipinta-alayksikön läpi. Toisaalta etenemisvuo on yhtä suuri kuin syttymisrintaman etenemisnopeus kerrottuna sillä lämpömäärällä, joka tarvitaan kerroksen tilavuusyksikön lämmittämiseen kylmästä ja kosteasta tilasta syttymispisteeseen. Tässä otetaan huomioon se, että vain osa polttoaineen massasta tarvitsee lämmittää tähän pisteeseen. Kosteuden kasvu pienensi etenemisvuota neulasten ja karkeiden lastujen kerroksissa. Normaalien lastujen kerroksissa kosteus ei vaikuttanut merkittävästi etenemisvuon suuruuteen. Kosteuden kasvu suurentaa kerroksen tilavuusyksikköä kohti tarvittavaa sytytysenergiaa ja pienentää syttymisen etenemisnopeutta. Tämä selittää sen, että kosteuden kasvu vaikuttaa vähemmän etenemisvuohon kuin syttymisrintaman etenemiseen. /7/

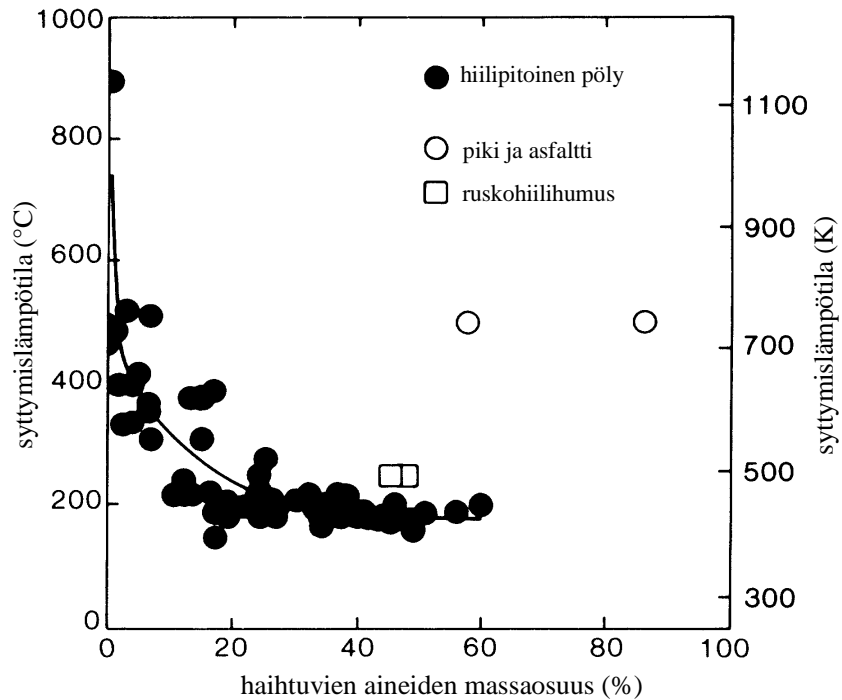
3.2.3 Lämpöarvo

Polttoaineen lämpöarvon vaikutusta syttymiseen ja syttymisrintaman etenemiseen ei ole erikseen paljonkaan tutkittu. Polttoaineen lämpöarvollahan tarkoitetaan sen palamisessa massayksikköä kohti vapautuvaa lämpömäärää. Lämpöarvo riippuu polttoaineen palamisessa tapahtuvien reaktioiden reaktiolämmöistä. Eksotermisten reaktioiden summa vähennettynä endotermisten reaktioiden summalla on palamisessa vapautunut lämpömäärä. Tästä lämmöstä osa kuluu vielä polttoaineen itsensä lämmittämiseen ja polttoaineen sisältämän kosteuden höyrystämiseen. Lämpöarvo voidaan ilmoittaa käyttötilassa olevalle polttoaineelle, kuivalle polttoaineelle tai kuivalle ja tuhkatomalle aineelle. Lämpöarvo voidaan määritellä kalorimetrisenä, jolloin lämpömäärässä on mukana vesihöyryn lauhtumislämpö. Niin sanotussa alemmassa lämpöarvossa veden oletetaan jäävän savukaasuissa kaasumaiseen muotoon, jolloin veden höyrystymiseen käytetty lämpömäärä menee hukkaan ja lämpöarvo on pienempi. Lämpöarvoon vaikuttavat polttoaineen alkuainekoostuksesta pääasiassa hiilen ja vedyn osuus. Mitä suurempi näiden osuus kuiva-aineesta on, sitä suurempi on polttoaineen lämpöarvo.

Polttoaineen palamisessa massayksiköä kohti vapautuvalla lämpömäärällä on merkittävä vaikutus siihen, miten polttoaine syttyy ja miten liekkirintama siinä etenee. Jos haihtuvien aineiden palamisreaktioissa vapautuva lämpövirta on suuri, syttyy polttoaine pysyvästi helpommin kuin pienemmän lämpövirran vapauttava polttoaine. Pienen lämpöarvon omaavia pyrolyysikaasuja tarvitaan suurempi määrä ja virtaus, jotta niiden syttymisessä vapautuva lämpö ei kuluisi kokonaan häviöihin vaan johtaisi pysyvään palamiseen. Mitä suurempi osuus partikkelikerroksen pienen osan lämmöstä kuluu sen itsensä sytyttämiseen sitä vähemmän lämpöä riittää liekkirintaman eteenpäin siirtämiseen ja lämmön hyötykäyttöön. Näin ollen pieni lämpöarvo johtaa hitaaseen syttymiseen ja palamisen etenemiseen.

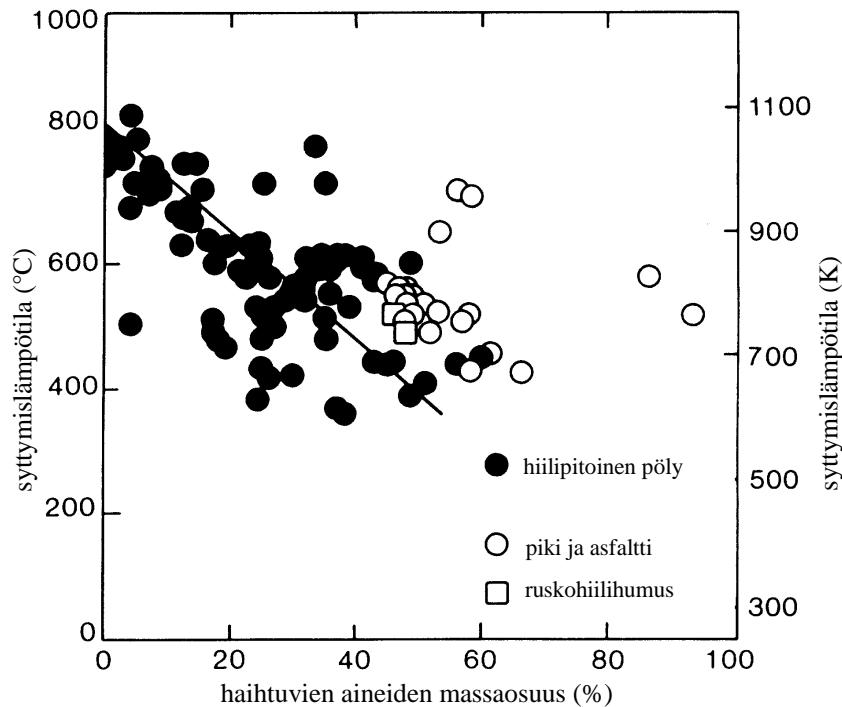
3.2.4 Haihtuvat aineet

Haihtuvien aineiden osuuden vaikutusta syttymislämpötilaan on tutkittu useilla kiinteillä polttoaineilla. Kuvassa 5 nähdään haihtuvien aineiden pitoisuuden vaikutus kolmen eri polttoaineen itsesyttymiseen, kun polttoaineet ovat pölykerroksena. Kuvassa 6 nähdään itsesyttymislämpötila samoille polttoaineille saman muuttujan funktiona, kun polttoaineet ovat pölypilvenä. Syttyminen tapahtuu siis sitä pienemmässä lämpötilassa mitä enemmän haihtuvia aineita polttoaine sisältää. Kerroksessa syttymislämpötila on selkeästi alhaisempi kuin pölypilvessä. Kuvan 5 mukaan hiilipitoinen haihtuvia aineita sisältävä pölykerros voi syttyä jopa alle 200 °C lämpötilassa. Muissakin tutkimuksissa on päädytty samanlaisiin tuloksiin, mistä esimerkkinä voidaan mainita lähteen /53/ tutkimus./44/



Kuva 5. Hiilipitoisten pölykerrosten syttymislämpötila polttoaineen haihtuvien aineiden prosenttisuuden funktiona. (Alkuperäinen lähde Nagy et al., 1965)

/44/



Kuva 6. Hiilipitoisten pölypilvien syttymislämpötila polttoaineen haihtuvien aineiden prosenttisuuden funktiona. (Alkuperäinen lähde Nagy et al., 1965)

/44/

Tietyn polttoaineen haihtuvien aineiden määrä ei ole kuitenkaan vakio. Polttoaineesta vapautuvien haihtuvien aineiden osuus kuiva-aineesta on sitä suurempi mitä suurempi on polttoaineen lämpenemisnopeus ja

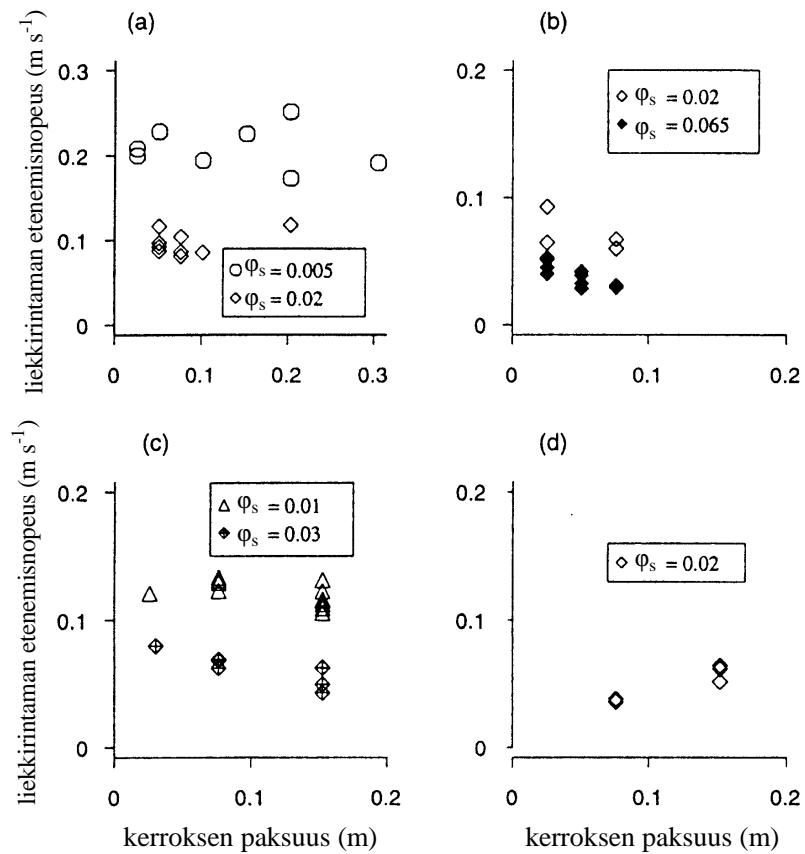
pyrolyysilämpötila /36/. Lämpötilan muutosnopeus vaikuttaa lisäksi pyrolyysikaasun koostumukseen. Hitaassa lämpenemisessä pyrolyysi tapahtuu ns. jakotislauksena, jossa tietyt yhdisteet muuttuvat kaasumaisiksi niille ominaisissa lämpötiloissa. Nopeassa lämpötilan kasvussa haihtuvat aineet vapautuvat lähes yhtäaikaan ja pilkkoutuvat samalla pienemmiksi yhdisteiksi. Näin ollen syttymislämpötilakin riippuu lämpenemisnopeudesta ja ympäristön lämpötilasta. Tulipesäolosuhteissa pienten partikkeleiden lämpeneminen tapahtuu yleensä nopeasti, mutta suurien partikkeleiden lämpeneminen on hidasta. Siten partikkelikokokin vaikuttaa vapautuvien haihtuvien aineiden määrään.

3.2.5 Partikkelikerroksen huokoisuus ja paksuus

Partikkelikerroksissa virtaus- ja lämmönsiirto-olosuhteet ovat selvästi erilaiset kuin tasomaisen pinnan rajakerroksessa. Lämmön siirtymiseen ja virtauksiin vaikuttavat silloin itse polttoainemateriaalin ominaisuuksien lisäksi kerroksen kiintoaine- ja kaasutilavuuksien suhde sekä kerroksen paksuus. Partikkelikerroksessa on enemmän lämmönsiirto-, aineensiirto-, reaktio- ja virtauskanavapintaa kuin tasaisen laajan pinnan tapauksessa. Partikkelikerroksessa lämpö voi siirtyä johtumisen lisäksi konvektiolla ja säteilyllä. Johtumisen osuus lämmönsiirrosta jääkin tutkimusten mukaan pieneksi suhteessa säteilyyn ja luonnolliseen tai pakotettuun konvektioon.

Aiemminkin mainitussa Catchpolen, /7/, tutkimuksessa on tarkasteltu kokeellisesti myös kerroksen kiintoaineen tilavuusosuuden ja paksuuden vaikutusta palamisen etenemisnopeuteen. Ilmavirtaus kulkee partikkelikerroksen yli tai tikkuhilan läpi vaakatasossa ja syttymisrintama etenee virtauksen suunnassa. Kiintoaineen tilavuusosuudet olivat erittäin pieniä verrattuna yleisiin kiintoaineosuuksiin kerrospoltossa. Tutkimuksessa havaittiin, että kerroksen kiintoainepitoisuuden suureneminen pienentää syttymisrintaman etenemisnopeutta. Tämä voidaan nähdä kuvasta 7. Kerroksen paksuuden vaikutus palamisen etenemisnopeuteen ei ole kokeiden mukaan selkeä eikä ainakaan kovin merkittävä tämän tyyppisissä kerroksissa.

Kuumalla pinnalla tehdyissä pölykerroksen syttymiskokeissa, /25/, /28/, kerroksen paksuudella havaittiin olevan selkeä vaikutus sytytyslämpötilaan ja tarvittavaan lämpövirran tiheyteen. Mitä paksumpi kerros oli sitä pienempi oli sytytykseen tarvittava levyn pinnan lämpötila ja lämpövuoto. Tämä johtuu siitä, että paksumpi kerros estää tehokkaammin lämpöhäviöitä kerroksesta. Kokeissa pölyn partikkelikoko oli hyvin pieni ja ima virtasi vain luonnollisen konvektion seurauksena. Lähteen /25/ tutkimuksessa käytettiin polttoaineena ns. Derner normaalihiihtä, jonka partikkeleista 90 % oli halkaisijaltaan pienempiä kuin 63 μm . Useissa tapauksissa syttyminen johti kytevään palamiseen.



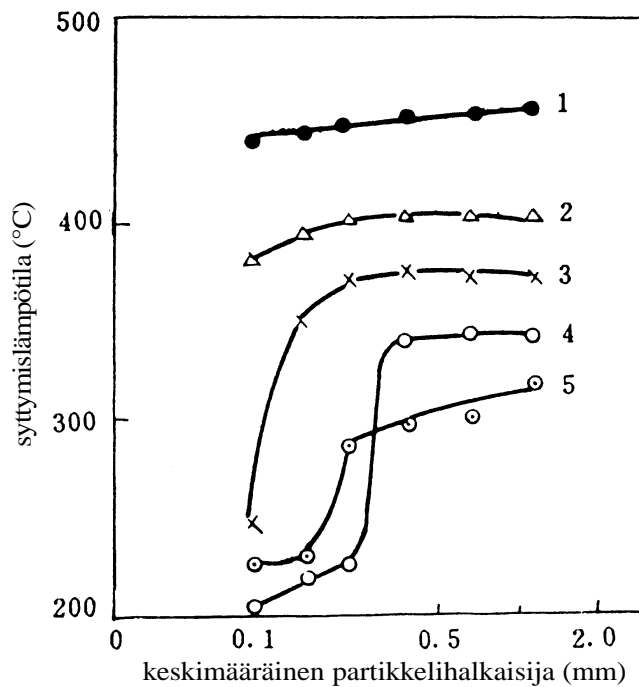
Kuva 7. Partikkelikerroksen paksuuden ja kiintoaineen tilavuusosuuden, ϕ_s , vaikutus liekkirintaman etenemisnopeuteen. (a) normaalit lastut, (b) männyn neulaset, (c) paksummat lastut ja (d) tikut. /7/

3.2.6 Partikkelin koko ja näytteen paksuus

Partikkelikoon pieneneminen lisää polttoaineen ja ympäröivän kaasun välistä lämmön- ja aineensiirtopinta-alaa, jos polttoaineen koko massa tai tilavuus pidetään vakiona. Silloin kerroksessa olevien partikkeleiden lämmön- ja

aineensirtonopeus kasvaa. Yksittäisen partikkelin koon pienentäminen nopeuttaa lämmön ja aineensirtoa partikkelissa, mutta rajoittavaksi tekijäksi voi tulla kemiallinen kinetiikka.

Lähteessä /53/ on tutkittu pienten hiilikerrosnäytteiden (100 mg) itsesyttymistä koeuunissa. Kokeissa partikkelikoon kasvattaminen suurensi syttymislämpötilaa, kuten nähdään kuvasta 8. Syttymislämpötila määriteltiin kokeissa ympäristön lämpötilana, jossa syttyminen tapahtuu. Ligniitin (4 ja 5) sekä bitumihiilen (3) syttymislämpötilat suurenevät hyvin nopeasti partikkelikoon kasvaessa suuremmaksi kuin 0,1 mm. Antrasiitin (2) ja koksen (1) syttymislämpötilojen kasvu partikkelin suurenemisen myötä oli vähäisempää mutta kuitenkin selkeää. Tämän lähteen kokeissa haihtuvien aineiden pitoisuuden kasvamisella oli suurin vaikutus syttymislämpötilan pienenemiseen.

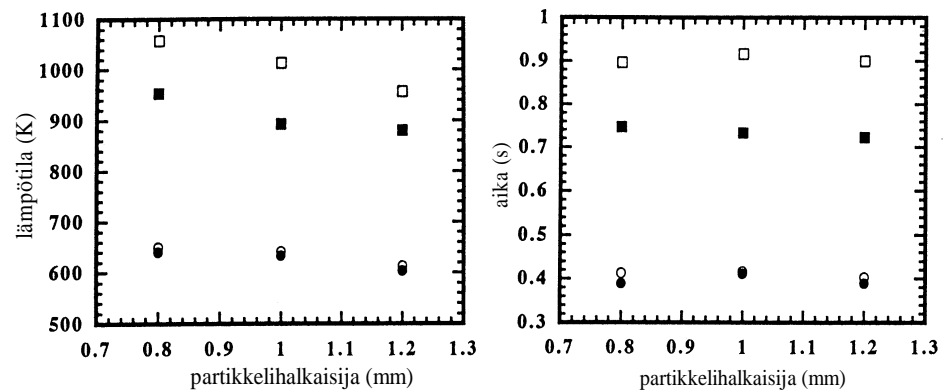


Kuva 8. Partikkelikoon vaikutus eri hiililaatujen syttymislämpötilaan. 1 - Datong, koksi; 2 - Yangquan, hiili; 3 - Datong, hiili; 4 - Huangxiang, hiili; 5 - Shulan, hiili./53/

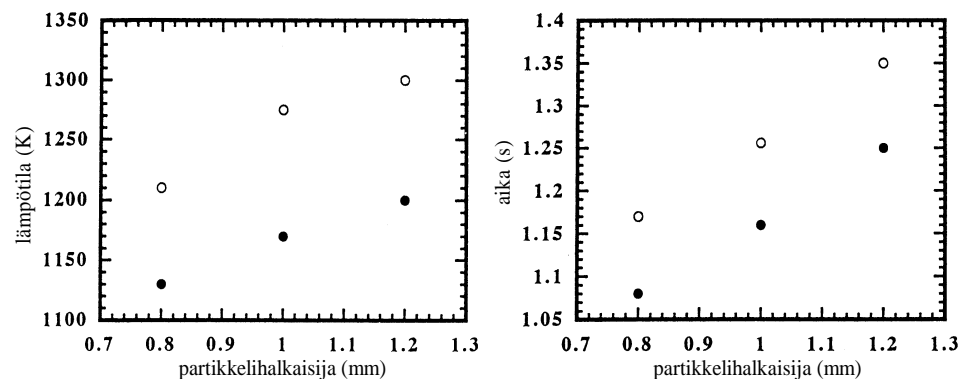
Lähteessä /23/ esitetään yksittäisen hiilipartikkelin itsesyttymisen kokeellisia tutkimustuloksia, jotka on tehty lähes painovoimattomassa tilassa. Kuvasta 9 a nähdään, että pyrolyysikaasun syttymislämpötilat pienenevät jonkin verran partikkelikoon suuretessa. Samanlaisen tulokseen normaaleissa

painovoimaolosuhteissa ovat katsausartikkelin /9/ mukaan päässeet myös Chen et al. (1981) ja Karcz et al. (1980). Partikkelikoon vaikutus yksittäisen partikkelin syttymisaikaan on kuitenkin kuvan 9 b mukaan mitätön. Verrattaessa edellisen kuvan tapaukseen huomataan, että yksittäisen partikkelin syttymislämpötilat ovat selkeästi suurempia (ero 150...400 K) kuin partikkelikerroksen syttymislämpötilat.

Samassa lähteessä /23/ esitetään myös partikkelikoon vaikutus koksijäännöksen syttymislämpötilaan ja -aikaan. Kuvasta 10 a nähdään, että partikkelikoon kasvu suurentaa koksen syttymislämpötilaa. Koksen syttymislämpötilat ovat 100...200 K suurempia kuin haihtuvien aineiden syttymislämpötilat. Kuvan 10 b-kohdan mukaan koksen syttymisviive suurenee selkeästi partikkelikoon kasvaessa.



Kuva 9. a: Partikkelikoon vaikutus haihtuvien aineiden vapautumis- ja syttymislämpötilaan (ympyrät tarkoittavat haihtuvien aineiden vapautumista ja neliöt syttymistä) mikrogravitaatio-olosuhteissa (valkoiset) sekä normaaleissa gravitaatio-olosuhteissa (mustat). **b:** Partikkelikoon vaikutus haihtuvien aineiden vapautumis- ja syttymisaikaan (symbolit kuten a:ssa) ./23/



Kuva 10. a: Partikkelikoon vaikutus jäännöshiilen (char) syttymislämpötilaan mikrogravitaatio-olosuhteissa (valkoiset ympyrät) sekä normaaleissa

gravitaatio-olosuhteissa (mustat). **b:** Partikkelikoon vaikutus koksen syttymisaikaan (symbolit kuten a:ssa) ./23/

Monissa lähinnä paloturvallisuuteen liittyvissä syttymistutkimuksissa on ollut lähtökohtana puoliäärettömän pinnan syttyminen, jolloin partikkelikokoa ei luonnollisestikaan ole tutkittu. Näissä tutkimuksissa näyte on usein oletettu paksuksi, jolloin se pinta, johon lämpövirtaa ei kohdistu, pysyy alkulämpötilassa. On tutkittu myös ohuempia näytteitä ja määritelty, millainen paksuus vaikuttaa syttymiseen ja miten. Mikkola ja Wichman, /20/, ovat määritelleet eri syttymiskorrelaatiot paksulle, puolipaksulle ja ohuelle näytteelle. Tyypillisillä puun ominaisuuksilla paksut näytteet ovat vähintään 15 - 20 mm paksuja ja ohuet enintään 1 - 2 mm paksuja ja puolipaksut tällä välillä. Tällaisissa tutkimuksissa lämpövirta on oletettu kohdistuvaksi näytteeseen vain yhdeltä puolelta, jolloin paksuuden pieneneminen on vaikuttanut syttymisviivettä pidentävästi. Paksu näyte käyttäytyy kuten eriste, jolloin lämmitetyn pinnan lämpötila nousee nopeammin kuin ohuen näytteen tapauksessa, jossa lämpövirta näytteen läpi on suuri.

Lähteessä /20/, joka on puupintojen syttymiskatsaus, viitataan Simmsin ja Östmanin tutkimusten tuloksiin, joiden mukaan näytteen suureneminen pienentää syttymisaikaa. Östmanin tutkimuksessa on vertailtu $200 \times 200 \text{ mm}^2$ ja $100 \times 100 \text{ mm}^2$ pinta-alaltaan olevien puisten näytekappaleiden pinnan syttymistä. Tutkimuksen perusteella on päätelty, että pinnan nelinkertaistaminen pienentää syttymisaikaa 20 % tai vähemmän. Simmsin mukaan pinnan yli kulkevan virtauksen pitää muuttua turbulenttiseksi riittävän lähellä pintaa, jotta syttyminen tapahtuisi. Tämä tapahtuu suuremmilla pinnoilla aikaisemmassa vaiheessa lämmitysprosessia. Nämä tulokset koskevat kuitenkin lähinnä puoliäärettömän pinnan syttymistä eivätkä partikkelien syttymistä.

3.2.7 Partikkelin pinta-ala-tilavuussuhde ja muoto

Catchpole et al., /7/, ovat tutkineet muiden tekijöiden lisäksi kerroksen partikkelien pinta-ala-tilavuussuhteen vaikutusta palamisen etenemisnopeuteen. Kun koetuloksia muunnettiin laskennallisesti siten, että polttoaineiden

kosteusvaihtelun vaikutus saatiin eliminoitua, saatiin etenemisvuo Φ_{pr} pinta-ala-tilavuussuhteen funktiona kuvan 11 mukaiseksi.

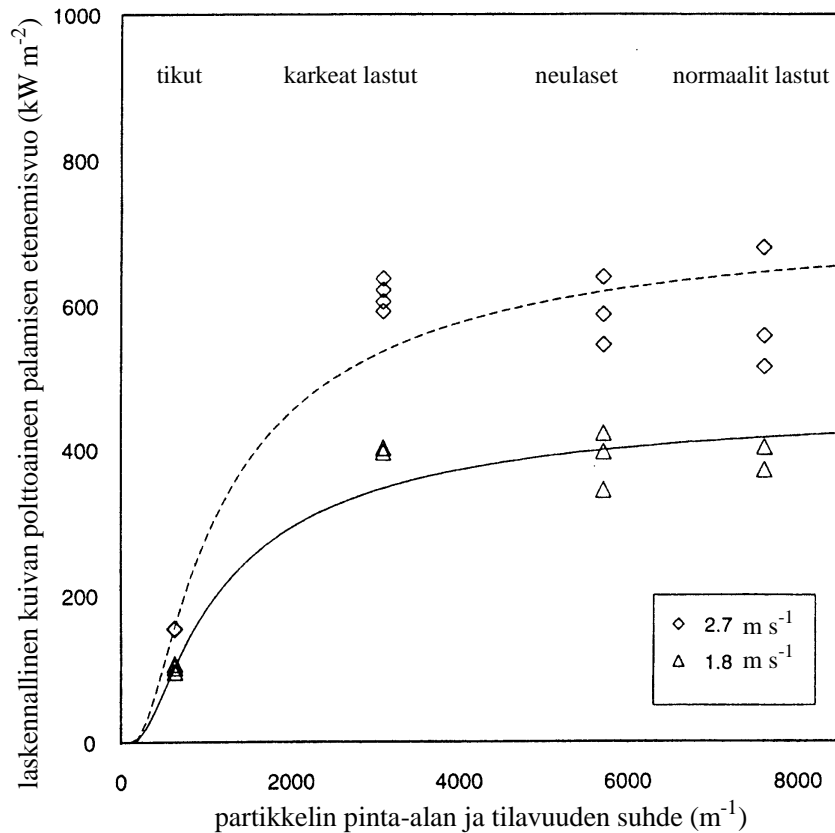
Palaminen etenee siis sitä paremmin mitä suurempi on partikkelien pinta-alan ja tilavuuden suhde. Kokeissa käytetyt polttoaineet olivat kaikki puuperäisiä, mutta niiden ominaisuudet poikkesivat toisistaan muutenkin kuin kosteuden ja pinta-ala-tilavuussuhteen puolesta. Tulos on kuitenkin looginen, koska yleisesti tiedetään palamisen etenevän paremmin esimerkiksi höylän lastujen muodostamassa kerroksessa kuin sahanpurukasassa. Sovitekäyrät ovat muotoa

$$\Phi''_{pr\ dry} \propto \exp\left| -\frac{b}{s} \right|, \quad (4)$$

jossa $\Phi''_{pr\ dry}$ on liekkirintaman etenemisvuo kuivalle polttoaineelle, kW m^{-2} ,

b on kokeellinen vakio, m^{-1} ja

s on partikkelin pinta-alan ja tilavuuden suhde, m^{-1} .



Kuva 11. Polttoainepartikkelien pinta-alan ja tilavuuden suhteen vaikutus palamisen etenemisvuohon kahdella ilmapvirtauksen nopeudella. Polttoaineina ovat olleet vasemmalta oikealle tikut, karkeat lastut, neulaset ja normaalit

lastut. Polttoainekerrosten paksuus oli 7,5 cm ja kiintoaineksen tilavuusosuus kerroksessa 2 %. /7/

Partikkelin pinta-alan ja tilavuuden suhde on yksi partikkelimuodon mittari. Tämä suhde on sitä suurempi mitä ohuempi tai ulokkeisempi partikkeli on. Jos partikkelissa on ohuita ulokkeita, teräviä särmiä tai muuta vastaavaa, lämpiävät nämä osat nopeammin kuin muu kappale. Tällöin syttyminenkin tapahtuu ensin näissä särmissä ja ulokkeissa. Poltettavien kappaleiden särmikkyys ja ulokkeisuus siis nopeuttaa syttymistä. Partikkelimuodon vaikutuksesta ei ole löytynyt muuta kokeellista tutkimusta kuin edellä mainittu pinta-alan ja tilavuuden suhteen vaikutuksen tutkimus. Lähteissä /49/ ja /48/ on tutkittu analyttisesti särmikkään kappaleen särmän kulman suuruuden vaikutusta syttymiseen. Tutkimuksissa on havaittu, että syttyminen voi tapahtua partikkelin kulman lähellä paikallisesti lämpötilan noustessa tarpeeksi suureksi. Syttymiskohdasta palaminen etenee nopeasti partikkelin muihin osiin.

3.2.8 Polttoaineen tiheys

Gardnerin ja Thomsonin tutkimuksessa, /14/, erilaisista puumateriaaleista tehtyjen levyjen syttymisaikat pitenivät lineaarisesti polttoaineen tiheyden kasvaessa, kun säteilyintensiteetit olivat 20 ja 40 kW m⁻². Suuremmalla säteilyintensiteetillä (60 kW m⁻²) tiheyden muuttuminen ei vaikuttanut merkittävästi syttymisaikaan. Kokeissa eri tiheyksiset puulevyt olivat myös eri puulajia, joten niiden muutkin ominaisuudet voivat poiketa jonkin verran toisistaan. Julkaisussa ei esitetty puunäytteiden muita ominaisuuksia, kuten haihtuvien aineiden osuutta ja lämpöarvoa.

3.2.9 Syttyvän pinnan säteilyominaisuudet

Pintaan kohdistuvasta lämpövirrasta osa absorboituu, osa heijastuu ja osa voi mennä läpi materiaalin, mitä voidaan kuvata pinnalle tulevan säteilyn taseyhtälöllä

$$\Phi_r'' = \Phi_{r,abs}'' + \Phi_{r,ref}'' + \Phi_{r,tr}'' , \quad (5)$$

jossa Φ_r'' on pintaan kohdistuva kokonaissäteilyvuo riippumatta aallonpituudesta, W m^{-2} ,

Φ_{rabs}'' on pinnan absorboima säteilyvuo, W m^{-2} ,

Φ_{rref}'' on pinnan heijastama säteilyvuo, W m^{-2} ja

Φ_{rtr}'' on pinnan läpäissyt säteilyvuo, W m^{-2} .

Pinnan absorptiivisuus (absorptiosuhde) a , reflektiivisyys (heijastussuhde) χ ja transmittiivisuus (läpäisysuhde) τ vaikuttavat siihen, kuinka suuri osa pintaan kohdistuvasta lämpövirrasta lisää materiaalin sisäenergiaa. Nämä pinnan ominaisuudet on määritelty seuraavasti:

$$a = \frac{\Phi_{rabs}''}{\Phi_r''}, \quad (6)$$

$$\chi = \frac{\Phi_{rtr}''}{\Phi_r''} \text{ ja} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{\Phi_{rref}''}{\Phi_r''} \text{ sekä} \quad (8)$$

$$a + \chi + \tau = 1. \quad (9)$$

Vain absorboitunut säteily lisää materiaalin sisäenergiaa ja nopeuttaa siten polttoaineen kuivumista, lämpenemistä ja pyrolysoitumista. Syttyminen tapahtuu siis sitä nopeammin, mitä suurempi on sytyttävän pinnan absorptiivisuus. Pinnan syttymislämpötilaan vaikuttavat kuitenkin lämmönsiirto materiaaliin ja ympäristöön sekä polttoaineen kosteus ja pyrolyysikaasujen vapautuminen, joten absorptiosuhteen vaikutusta syttymislämpötilaan ei voida suoraan päätellä.

Useimmat kiinteät polttoaineet oletetaan yleensä himmeiksi (opaque), jolloin säteily ei mene ollenkaan pinnan läpi eli $\Phi_{rtr}'' = \tau = 0$. Varsinkin puupolttoaineet on huomattu lämpöä läpäiseviksi (diathermanous). Tämän ominaisuuden vaikutusta pinnan lämpenemiseen ei kuitenkaan tunneta hyvin. Simms on suositellut syttymiskoekappaleiden pinnan peittämistä ohuella hiilenmustalla kerroksella ennen testausta, jotta lämmön läpäisy vältettäisiin.

Tämä toimenpide eliminoi myös tehokkaasti aallonpituuden ja lämpötilan vaikutuksen säteilyn absorboitumiseen. /20/

Lähteen /20/ mukaan Simms on mitannut useiden selluloosapitoisten materiaalien absorptiivisuuksia, kun niihin on kohdistettu eri lähteistä peräisin olevia lämpövirtoja. Materiaalien absorptiivisuudet vaihtelivat välillä 0,15...0,95. Absorptiivisuus muuttuu ajan funktiona, koska pinta tummentuu pyrolysoituessaan. Simms on suositellut kokeellisesti saatujen absorptiivisuuden arvojen käyttöä laskennassa. Näitä arvoja voidaan saada vertaamalla keinotekoisesti hiilen mustalla tummennetun pinnan ja luonnollisen pinnan syttymiskokeiden tuloksia toisiinsa.

Melinek on tutkinut saman lähteen mukaan säteilyllä kuumennetun puun tummumista. Hän mittasi reflektiivisyyttä ajan funktiona useilla eri säteilyintensiteeteillä ja sai tulokseksi seuraavan korrelaation:

$$\chi - \chi_e = (\chi_0 - \chi_e)e^{-Kt}, \quad (10)$$

jossa χ_e on heijastussuhde lopussa,

χ_0 on heijastussuhde alussa ja

K on vakio, joka riippuu pinnan lämpötilasta.

Melinek ei ottanut tutkimuksessaan huomioon säteilyn aallonpituuden vaikutusta absorptioon ja heijastumiseen. Hän käytti säteilylähteenä volframilamppua, jonka lähettämän säteilyn maksimi-intensiteetti on noin aallonpituudella 1 μm /19/. /20/

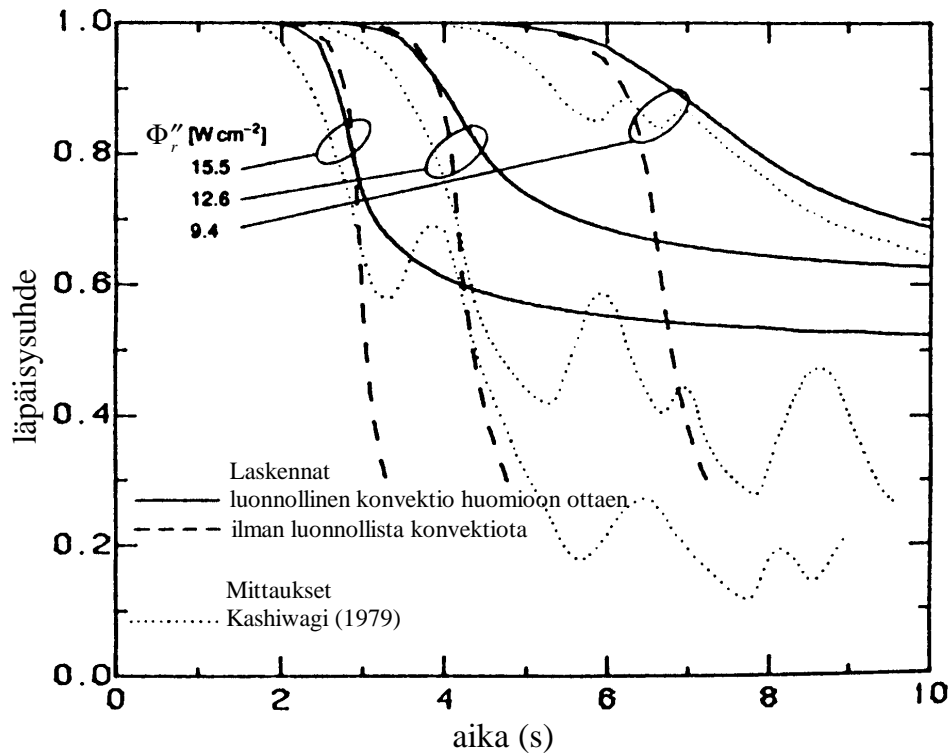
Wesson teki absorptiivisuuskokeita ympäristön lämpötilassa ottamatta huomioon pinnan tummumista. Hän kuitenkin käytti säteilylähteitä, joiden tuottamat säteily-spektrit olivat erilaisia. Liekkilämmittimen säteily absorboitui eri puolajia oleviin näytteisiin lähes samalla tavalla absorptiosuhteen ollessa keskimäärin 0,76. Tavallisen liekin säteily-spektrissä säteilyintensiteetin maksimi esiintyy suuremmalla aallonpituudella kuin volframilampun tai auringon säteilyintensiteetin maksimi, koska sen lämpötila on huomattavasti

alhaisempi kuin volframilampun tai auringon lämpötila (Wienin säteilylaki $\lambda_{max}T = 2897,8 \mu\text{m}\cdot\text{K}$). Volframilampun ja auringon säteily absorboitui puupintoihin huomattavasti nopeammin kuin liekkisäteily ja erot puulajien välillä olivat suurempia kuin liekkisäteilyn tapauksessa. /20/

3.2.10 Pyrolyysikaasujen absorptiokyky ja emissiivisyys

Lämmitettävästä kiinteästä polttoaineesta pyrolysoituneet kaasut voivat absorboida säteilyä, joka tulee ulkopuolisesta säteilylähteestä tai heijastuu ja emittoituu lämmitettävästä pinnasta. Pyrolyysikaasut voivat luonnollisesti myös emittoida säteilyä pinnalle ja ympäristöön. Kaasujen absorptiokyky ja emissiivisyys vaikuttavat pyrolyysikaasujen lämpenemiseen ja siten syttymiseen. Kaasuun absorboituva ulkopuolinen säteily voi myös vähentää pinnalle tulevan säteilyn määrää.

Lähteessä /33/ on tutkittu säteilyn aiheuttamaa kiinteän polttoainepinnan syttymistä. Syttymiselle on tehty malli, jossa otetaan huomioon säteilyn absorptio pyrolyysikaasuihin ja kiinteään pintaan sekä luonnollinen konvektio polttoaineen pinnalla. Sytytettävänä kohteena on ollut pysty- tai vaakasuorassa säteilyyn nähden oleva polymetyylimetakrylaattista (PMMA) tehty levy. Mallilla laskettuja tuloksia on verrattu Kashiwagin (1979) koetuloksiin. Kuvassa 12 on laskennan ja kokeiden tuloksia kaasukerroksen läpi menneen säteilyn osuudesta ajan funktiona.



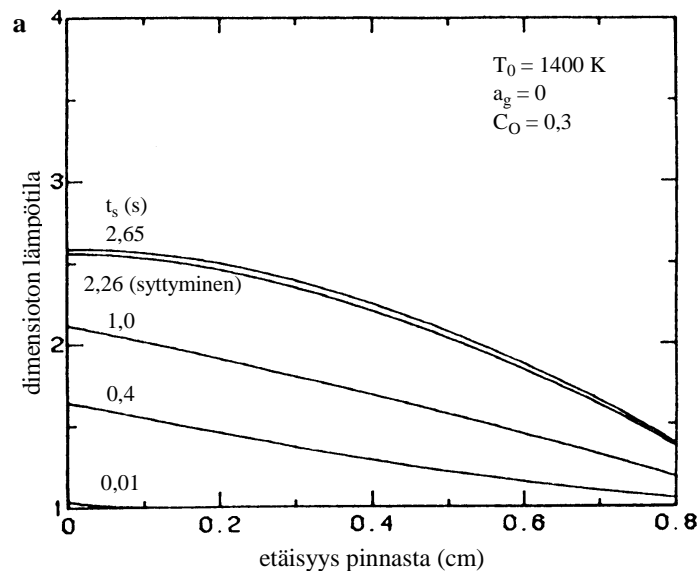
Kuva 12. Polttoaineen ja säteilylähteen välisen kaasun läpäisyysuhde, kun kaasun absorptiovakiona on käytetty arvoa $a_g = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}^{-1} \text{ cm}^{-1} / 33/$

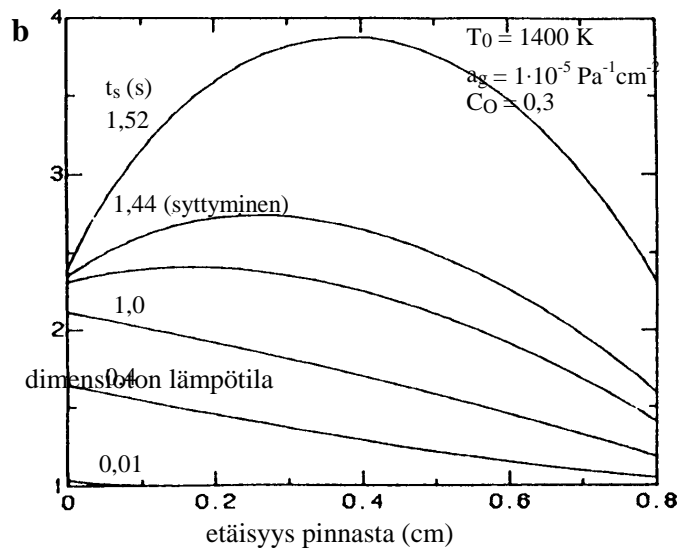
Käyristä nähdään, että aluksi säteily on läpäissyt kaasun täydellisesti, mutta kun pyrolyysikaasuja on alkanut vapautua pinnasta, on läpäisyosuus vähentynyt nopeasti ja huomattavasti. Kokeelliset tulokset on saatu lämmittämällä horisontaalista levyä. Vaakasuurassa tasossa olevan levyn pyrolyysikaasut eivät laimene luonnollisen konvektion seurauksena niin voimakkaasti kuin pystysuurassa tasossa olevan levyn kaasut, koska ne nousevat lähes yhdensuuntaisesti säteilylähteestä tulevaa säteilyä vastaan. Pyrolyysikaasut absorboivat siis voimakkaammin horisontaaliselle levyille tulevaa säteilyä kuin vertikaaliselle levyille tulevaa säteilyä. Mallinnetut läpäisyysuhteet ovat ainakin osittain korreloineet kohtalaisesti koetulosten kanssa.

Samassa tutkimuksessa on laskettu mallilla kaasukerroksen dimensiottomia lämpötilaprofiileja sytytysprosessin eri ajankohtina. Kuvassa 13 nähdään kaasukerroksen dimensiottomia lämpötilaprofiileja pinnasta mitatun etäisyyden funktiona. Parametrina on säteilytysaika. Syttymisviive on merkitty laittamalla kyseisen ajan perään (syttyminen). Kuvan 13 a tapauksessa säteilyn absorptiovakio kaasulle on määritetty nolllaksi. b-kuvan tapauksessa absorptiovakiolle on annettu arvo $1 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}^{-1} \text{ cm}^{-1}$. Kuvista nähdään, että

absorboivan kaasun tapauksessa syttymisaika on huomattavasti lyhyempi (1,4 s) kuin täysin läpäisevän kaasun tapauksessa (2,3 s). Lämpötilat ovat nousseet aluksi molemmissa tapauksissa samalla tavalla, mutta pyrolyysikaasujen vapautumisen alkamisen jälkeen absorboiva kaasu on lämmennyt huomattavasti nopeammin ja korkeampiin lämpötiloihin kuin läpäisevä kaasu. Mallilla lasketut tapaukset ovat kylläkin lyhyen syttymisaajan esimerkkejä (säteilyn intensiteetti on ollut suuri), joissa malli on kuvan 12 mukaan korreloinut huonommin kokeellisten tulosten kanssa kuin pidemmän syttymisaajan esimerkeissä.

Partikkelikerroksista ei ole löytynyt sellaista tutkimusta, jossa olisi otettu huomioon säteilyn absorboituminen haihtuneisiin kaasuihin. Partikkelikerroksessa säteilyn absorboituminen pyrolyysikaasuihin voi olla merkittävämpääkin kuin tasaisen pinnan tapauksissa, koska pyrolyysikaasut pysyvät partikkelien pintojen ympärillä melko pitkään. Kerroksessakin kaasut vähentävät ulkopuolisen säteilyn pääsyä partikkelien pinnoille ja voivat siten hidastaa pyrolyysiä. Toisaalta haihtuneet kaasut absorboivat pinnoilta tulevaa säteilyä ja käynnistävät näkyvän palamisen sitä helpommin mitä suurempi osuus säteilystä niihin absorboituu.





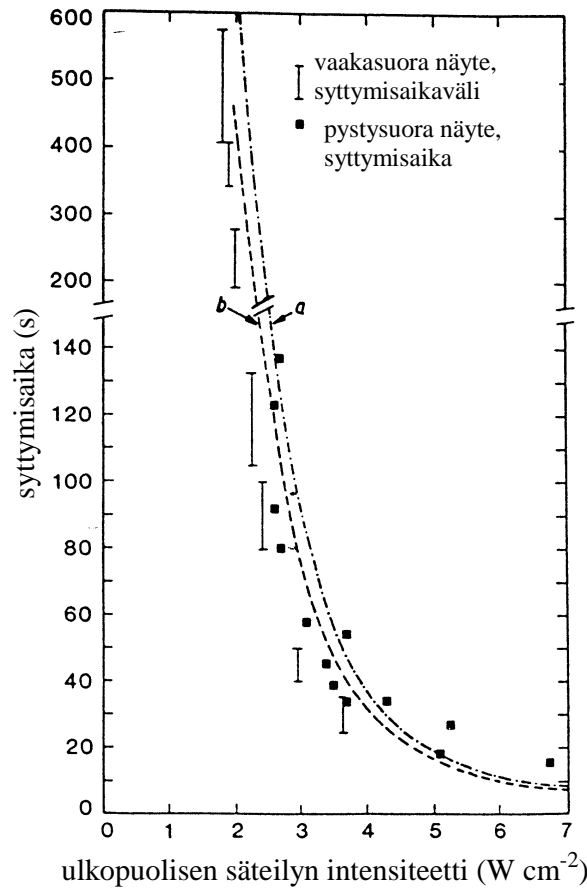
Kuva 13. a: Kaasukerroksen lämpötilaprofiili eri ajankohtina, kun säteilyn absorptiota kaasu-faasiin ei huomioida. **b:** Kaasukerroksen lämpötilaprofiili eri ajankohtina ja syttymisviive, kun säteilyn absorptio kaasuun otetaan huomioon. /33/

3.3 SYTTYMISOLOSUHTEET

3.3.1 Säteilyn intensiteetti

Sytyttävälle polttoainepinnalle tulevan lämpösäteilyn voimakkuus vaikuttaa pinnan ja polttoaineen sisäosan lämpenemiseen sekä materiaalin kuivumis- ja pyrolysoitumisnopeuteen. Lämpenemisilmiöt aiheuttavat puolestaan diffusiivisen massansiirron lisäksi nesteellisiä virtauksia polttoaineen läheisyydessä. Kun pinnan lähellä ollut lämmennyt kaasu nousee ylöspäin tulee ympäristöstä tilalle lisää kaasua, useimmiten ilmaa. Tällä tavalla lämpösäteily vaikuttaa myös hapen ja polttoaineen sekoittumiseen.

Atreyan selluloosapitoisten kiinteiden aineiden syttymistutkimuksessa, /4/, on laskettu mallin avulla polttoainelevyn pinnalle tulleen ulkopuolisen säteilyn tiheyden vaikutusta syttymisaikaan. Mallin antamia käyriä on verrattu Quintieren (1983) kokeellisiin tuloksiin. Laskennassa on pyritty käyttämään sellaisia alkuarvoja ja reunaehtoja, jotka vastaavat koeolosuhteita. Kuvassa 14 nähdään laskennan ja kokeiden tulokset horisontaalisessa ja vertikaalisessa asennossa olleille mahonkipuunäytteille. Kokeelliset tulokset on esitetty neliöillä ja janoilla ja laskennalliset tulokset käyrillä.



Kuva 14. Mitatut ja ennustetut syttymisajat ulkopuolisen säteilyintensiteetin suuruuden funktiona. Mustat neliöt ovat vertikaalisen levyn koetuloksia ja janat horisontaalisen levyn koetuloksia. Käyrä **a** on laskettu vertikaaliselle näyteasennolle ja käyrä **b** horisontaaliselle näytteelle. /4/

Kuvan käyrien laskennassa käytettiin vertikaalisen tapauksen lämmönsiirtokertoimelle (pinnasta kaasuun) arvoa $15 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ja horisontaalisen tapauksen lämmönsiirtokertoimelle arvoa $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Syttymiskriteerinä käytettiin kriittistä pinnan lämpötilaa, joksi valittiin mittaus-tulosten perusteella $375 \text{ }^\circ\text{C}$. Kuvasta nähdään, että syttymisaika pienenee eksponentiaalisesti säteilyintensiteetin kasvaessa. Koetulokset ja mallin antamat käyrät korreloivat ainakin tässä tapauksessa hyvin. Samansuuntaiseen tulokseen on päädytty myös Gardnerin ja Thomsonin tutkimuksessa /14/, jossa yhtenä puumateriaalilevyjen syttymisaikaan vaikuttavana tekijänä tutkittiin säteilyintensiteettiä kolmella eri intensiteetin arvolla ja useilla eri materiaaleilla. Tutkimuksen analysoinnissa säteilytiheyden vaikutusta syttymisaikaan ei pidetä kovin merkittävänä, koska 17 näytteestä kahdella saatiin sama syttymisaika 40 ja 60 kW m^{-2} suuruisilla säteilyintensiteeteillä, ja

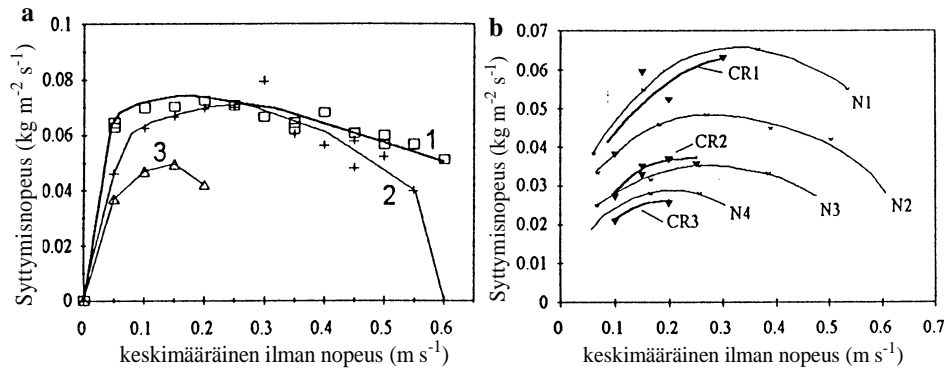
yhdellä näytteellä suurempi intensiteetti johti pidempään syttymisaikaan. Muut 14 näytettä käyttäytyivät kuitenkin jotakuinkin samalla tavalla kuin Atreyan tutkimuksen näytteet, joten säteilyintensiteetin kasvun syttymisaikaa lyhentävä vaikutus lienee melko selkeä.

3.3.2 Hapettimen virtaus polttoaineen ympärillä

Hapettimen virtaus polttoaineen ympärillä vaikuttaa luonnollisesti palamiseen tarvittavan hapen saantiin, mutta lisäksi myös pyrolyysikaasujen laimenemiseen ja kulkeutumiseen pois pinnan läheisyydestä. Pyrolyysikaasu voi syttyä, jos sen pitoisuus ylittää jossakin syttymiselle sopivassa kohdassa alemman syttymisrajan. Tämä syttymiseen sopiva kohta on usein polttoaineen kiinteän pinnan rajakerroksessa, johon säteilylämpöä voi tulla ulkopuolisesta säteilylähteestä ja pinnasta. Virtauksen nopeus ja turbulentsisuus polttoaineen ympärillä vaikuttavat myös lämmönsiirtoon partikkelin ja ympäröivän kaasun välillä. Jos polttoainetta lämmitetään pääasiassa konvektiolla eli kuumalla kaasuvirtauksella, on lämmönsiirto sitä tehokkaampaa mitä turbulentsisempi ja nopeampi kaasuvirtaus on. Toisaalta syttynyt liekki voi irrota pinnasta ja sammua, jos kaasu virtaa liian nopeasti. Jos kaasuvirtaus on kylmempi kuin partikkeli (sytytys säteilyllä), suuret nopeudet ja turbulentsisuudet merkitsevät pinnan tehokasta jäähtytystä.

Gortin väitöskirjassa, /16/, on tutkittu teoreettisesti ja kokeellisesti syttymisrintaman etenemistä puu-, koksi- ja yhdyskuntajätekerroksissa. Kokeellisessa osassa on tutkittu reaktiorintaman etenemistä panospolttoreaktorissa, jossa kerros on arinan päällä. Kokeissa kerros sytytettiin kaasupolttimilla kerroksen päältä. Primaari-ilma tuotiin arinan läpi alhaaltapäin. Syttymisrintama eteni siis ilmavirtaukseen nähden vastavirtaan. Kokeissa mitattiin kerroksen lämpötilaa eri korkeuksilla, kerroksen massaa sekä kaasun koostumusta kerroksen yläpuolella ja kerroksessa. Syttymisrintaman etenemisnopeus laskettiin syttyneenä polttoainemassana sekunnissa arinapinta-alaa kohti, kun tunnettiin kerroksen massa tilavuutta kohti. Kuvassa 15 a on esitetty reaktiorintaman etenemisnopeus puupartikkelikerroksessa keskimääräisen ilman virtausnopeuden funktiona

kahdelle eri partikkelikoolle ja kosteudelle. Keskimääräisellä ilman virtausnopeudella tarkoitetaan tässä nopeutta, joka saadaan, kun jaetaan tulevan ilmavirtauksen tilavuusvirta tyhjän virtauskanavan (reaktorin) poikkipinnalla.



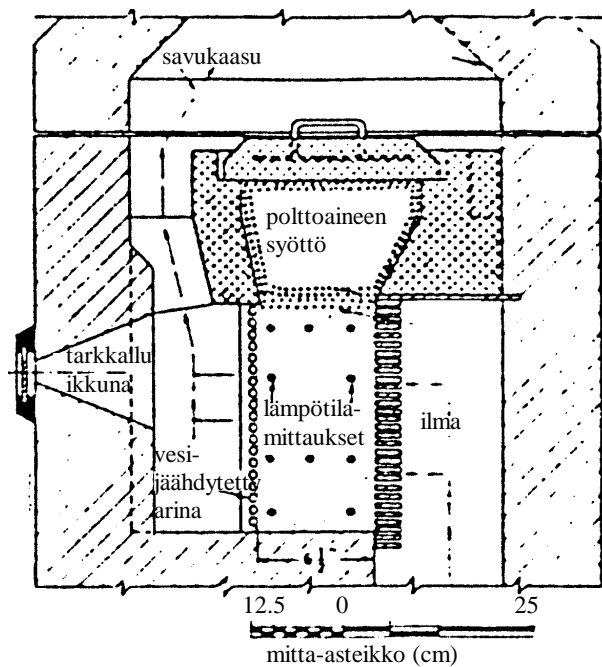
Kuva 15. a) Puupalikkakerroksen syttymisrintaman etenemisnopeus ilman keskimääräisen virtausnopeuden funktiona. Neliöt: sivu 30mm, kosteus 10 %; plussat: 10 mm, 10 %; kolmiot: 10 mm, 30 %.

b) Koksikerroksen reaktorintaman etenemisnopeus ilman keskimääräisen virtausnopeuden funktiona eri partikkelikokoluokilla. CR: Gortin kokeet. CR1: 10 - 20 mm, CR2: 20 - 30 mm, CR3: 30 - 45 mm; N: Nichollsin kokeet, korkeassa lämpötilassa tehty koksi. N1: 13 - 25 mm, N2: 25 - 38 mm, N3: 38 - 51 mm, N4: 51 - 64 mm. /16/

Kuva 15 b on vastaava esitys koksien syttymisrintaman etenemisnopeudesta. CR:llä merkityt käyrät ovat Gortin tutkimuksessa saatuja tuloksia eri partikkelikokoluokilla ja N:llä merkityt ovat Nichollsin vuonna 1934, /32/, saamia koetuloksia lähes vastaavilla partikkelikokoluokilla. Molemmista kuvista nähdään, että syttymisrintaman etenemisnopeus kasvaa ensin ilmavirtauksen kasvaessa. Jollakin virtauksella saavutetaan suurin reaktorintaman etenemisnopeus, jonka jälkeen etenemisnopeudet alkavat pienentyä ilmavirtauksen kasvaessa edelleen. Pienillä ilmavirtauksilla palaminen reaktiovyöhykkeessä on alistökiömetristä. Kun ilmavirtaus kasvaa, kasvaa ilmakerroin. Tämä kasvattaa reaktiovyöhykkeen lämpötiloja, mikä puolestaan tehostaa lämmönsiirtoa reagoimattomalle alueelle. Kuvasta 15 b nähdään, että partikkelikoon kasvaminen hidastaa reaktorintaman etenemistä.

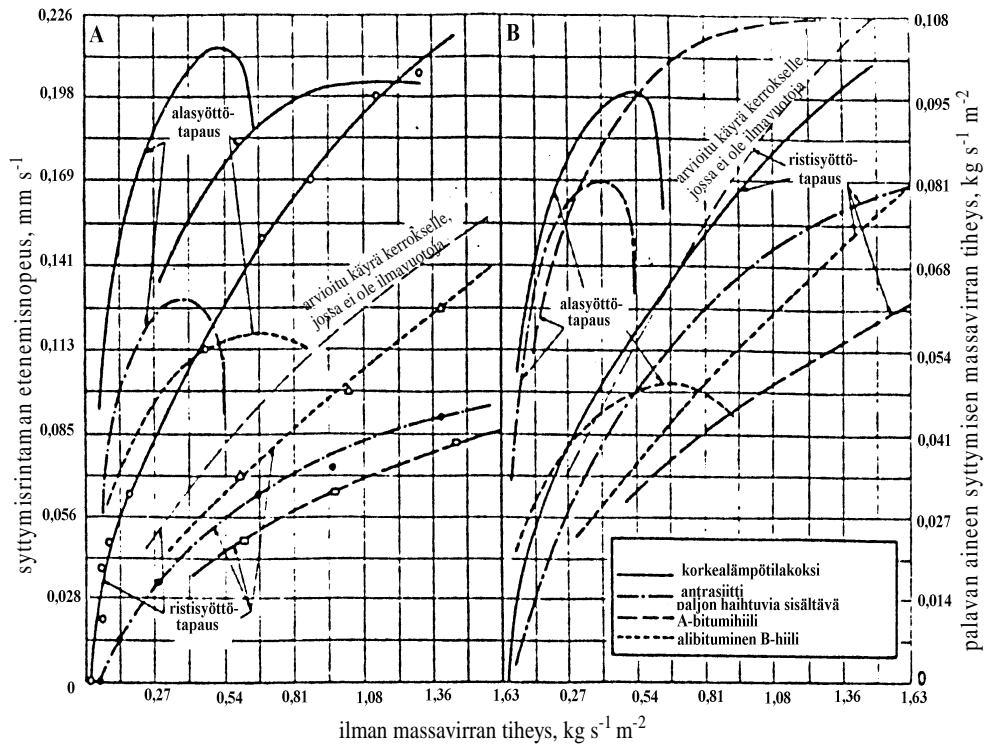
Grafin ja Carmanin 1954 julkaistussa tutkimuksessa, /17/, on aiheena ollut ristivirta -syöttöisen arinan syttyminen ja syttymisrintaman eteneminen. Koelaitte oli suorakulmisen särmiön muotoinen tulipesä, jonka päällä oli pieni

polttoaineen varastosäiliö. Tulipesän yksi sivuseinä on arina, jonka läpi palamisilma virtaa kerrokseen. Tämän seinän vastakkainen seinä oli vesijäähdytetyistä putkista tehty arina, jonka läpi savukaasut pääsevät poistumaan kerroksesta. Kokeiden aikana arinoiden välinen tila oli kokonaan täytetty polttoaineella. Polttoainekerros sytytettiin palavalla partikkelikerroksella ylhäältä päin ja syttymisrintama eteni siis alaspäin. Rintaman etenemistä seurattiin lämpötilamittauksilla, jotka oli asennettu kerrokseen eri korkeuksille ja eri tasoille ilman virtaussuunnassa. Koelaitteen periaatepiirros nähdään kuvassa 16. /17/



Kuva 16. Ristivirta-syöttöisen arinapolton koelaitteen periaatepiirros. /17/

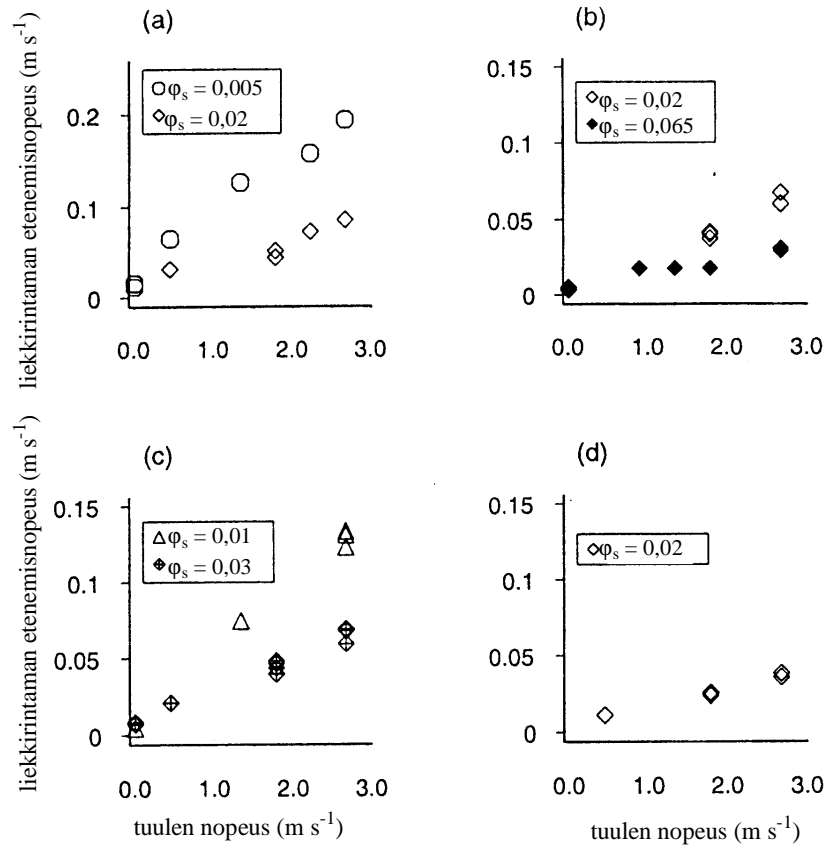
Kokeita tehtiin erisuuruisilla ilmavirtauksilla. Kokeista mitattiin ja laskettiin syttymisrintaman etenemiskulma, syttymisrintaman etenemisnopeus ja syttyneen palavan aineen massa aikayksikössä kerroksen pinta-alayksikköä kohti. Polttoaineina käytettiin yhtä koksilaatua ja kolmea erilaista hiililaatua. Tuloksia verrattiin alasyöttöiseen polttoon, jossa syttymisrintama etenee ylhäältä alaspäin ja ilma alhaalta ylöspäin. Alasyöttöisen polton koetulokset saatiin Carmanin ja Reidin 1945 tekemästä tutkimusjulkaisusta.



Kuva 17. Kaavio A: syttymisrintaman etenemisnopeus ristivirta- ja alasyöttöpoltolle. Ohuella katkoviivalla arvioidaan A bitumihiilen syttymistä, jos ilmaa ei olisi päässyt virtaamaan kerroksen ohi, niinkuin kokeessa kävi. Kaavio B: aikayksikössä syttynyt palavan aineen massa kerroksen pinta-alayksikköä kohti. Tämä on laskettu kaavion A, polttoainekerroksen tiheyden ja sen palavien aineiden pitoisuuden perusteella. /17/

Koetulokset ja niistä tehdyt käyrät nähdään kuvassa 17. Kuvasta nähdään, että kerroksen läpi puhallettavan ilmavirtauksen kasvattaminen nopeuttaa jyrkästi liekkirintaman etenemistä. Alasyöttöisessä tapauksessa käyrät kääntyvät kuitenkin jossakin vaiheessa laskusuuntaan. Tällöin on varmaankin siirrytty tilanteeseen, jossa ilmavirtauksen jäädyttävä vaikutus heikentää palamista. Ristisyöttö-tapauksessa ei ilmene samanlaista etenemisnopeuden maksimiarvoa ainakaan kokeilluilla ilmavirroilla, mutta artikkelissa on arvioitu, että ristisyöttöisessäkin tapauksessa löytyy vastaava maksimikohta. Ristisyöttöpolton syttymisrintaman etenemisnopeudet ovat n. 40...60 % alasyöttöisen polton vastaavista ennen maksimikohtaa. Artikkelissa on ehdotettu tälle erolle syyksi sitä, että ristisyöttötapauksessa pyrolyysikaasut estävät osittain lämmön siirtymistä säteilyllä palamisvyöhykkeeltä syttymättömään polttoaineeseen ja että vapautuvat kaasut "laimentavat ilmaa ja siten jäädyttävät syttymisvyöhykettä". /17/

Catchpole et al., /7/, tutkivat yhtenä vaikuttavana tekijänä kerroksen yli virtaavan ilman virtausnopeuden vaikutusta palamisen etenemisnopeuteen puupitoisissa partikkelikerroksissa. Tuulitunnelissa tehdyissä kokeissa havaittiin, että palamisrintaman etenemisnopeus kasvaa jotakuinkin lineaarisesti tuulen nopeuden suurenemisen mukana ainakin silloin, kun virtausnopeus kerroksen pinnan yli on enintään 3 m s^{-1} . Kokeiden tuloksia nähdään kuvassa 18.



Kuva 18. Syttymisrintaman etenemisnopeus tuulen nopeuden funktiona. Ympäristön lämpötila oli $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ja suhteellinen kosteus 20% . (a) normaali lastu, kerrospaksuus $\delta = 0,1 \text{ m}$; (b) männyn neulaset, $\delta = 0,075 \text{ m}$; (c) karkea lastu, $\delta = 0,075 \text{ m}$; (d) tikut, $\delta = 0,075 \text{ m}$. Kiintoaineosuudet näkyvät kuvissa./7/

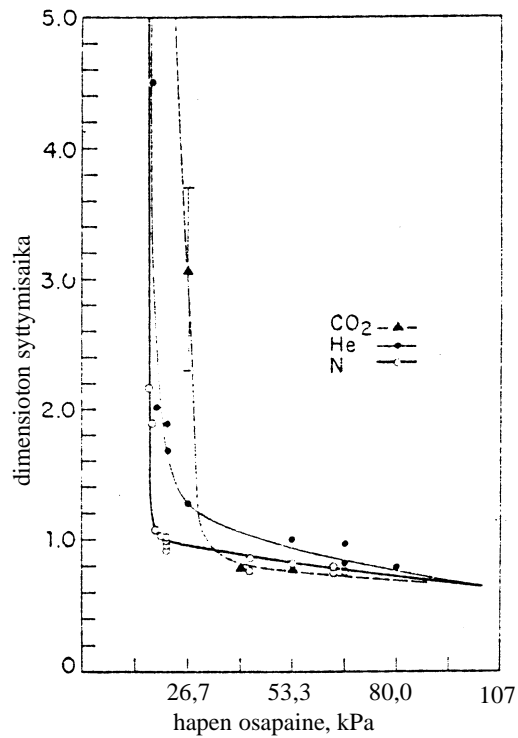
Lähteen /20/ mukaan Simms on päätellyt itsesyttymisen tutkimuksessaan, että syttymisessä liekki ilmestyy ensimmäiseksi sinne, missä virtaus tulee ensin turbulenttiseksi. Saman lähteen mukaan Moseyn ja Muirin tutkimuksessa ilman virtaus vertikaalisen puupolttoainetäytteen ohi vaikutti syttymiseen. Ilman virtausnopeudella $0,25 \text{ m s}^{-1}$ pienensi syttymisaikaa, kun säteilyintensiteetti oli pieni, mutta ei vaikuttanut merkittävästi suuremmilla säteilyintensiteeteillä. Yli

1 m s^{-1} suuruiset virtausnopeudet pidensivät syttymisaikaa. Pienet virtausnopeudet siis paransivat pyrolyysikaasujen ja hapen sekoittumista, mutta suuremmat virtaukset jäähdyttivät pintaa ylimääräisellä ilmalla. Saman katsauksen mukaan Babaurkasin ja Parkerin tutkimuksessa ilmavirtauksen ei havaittu vaikuttavan merkittävästi syttymisaikaan.

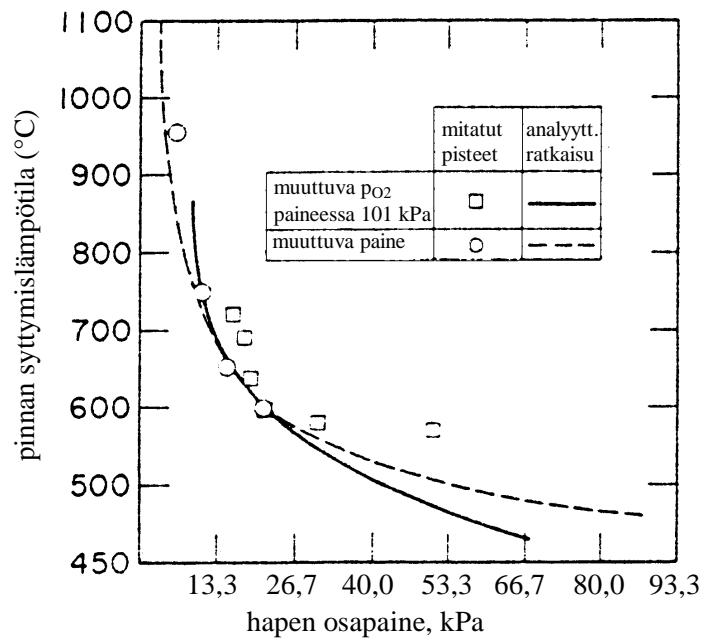
3.3.3 Hapen osuus ympäristössä, ympäristön paine ja inertti kaasu

Palavan aineen ympäristön happipitoisuuden on havaittu vaikuttavan oleellisesti syttymiseen ja palamisrintaman etenemiseen. Hapen osuuden vaikutusta on selvitetty useissa tutkimuksissa, ja yleisesti kaikissa niistä on päädytty samansuuntaisiin tuloksiin. Happipitoisuuden kasvaminen pienentää syttymislämpötilaa ja syttymisaikaa. Tästä esimerkkinä ovat Alvaresin ja Martinin, /3/, tulokset kuvissa 19 ja 20. Kirjoittajat ovat tutkineet kokeellisesti säteilylämmönsiirrolla lämmitetyn selluloosalevyn itsesyttymisaikaa ja syttymisen pintalämpötilaa. Koetuloksia verrataan idealisoidulla mallilla laskettuihin tuloksiin. Kokeissa käytettiin hapen laimentimena typen lisäksi hiilidioksidia ja heliumia.

Hapen osapaine vaikuttaa koetulosten mukaan melko lievästi syttymisaikaan paitsi lähestyttäessä laimeaa syttymisrajaa, jolloin syttymisaika kasvaa hyvin nopeasti kohti ääretöntä. Hapen osapaine ja kokonaispaine vaikuttavat pinnan syttymislämpötilaan melko voimakkaasti siten, että syttymislämpötila kasvaa osapaineen pienentyessä. Kokonaispaineen pieneminen kasvattaa syttymisaikaa, kasvu on nopeaa 50 kPa:a pienemmillä paineilla. Artikkelissa ei ole selitetty kuvan 20 abskissan yksiköintiä osapaineelle ja kokonaispaineelle. Yksikkö lienee mmHg, joka on kuvassa muutettu kPa:ksi. Tutkimuksessa havaittiin, ettei syttymistä tapahdu kokonaispaineen laskettua alle 15 kPa:n. Tällöin hapen konsentraatio laskee alle rikkaan seoksen syttymisrajan. /3/



Kuva 19. Hapen osapaineen vaikutus dimensiottomaan syttymisaikaan. Mittaukset on tehty 101 kPa:n paineessa. /3/



Kuva 20. Hapen osapaineen ja kokonaispaineen vaikutus pinnan syttymislämpötilaan. Kokonaispaineen vaikutuksen kokeissa paine vaihteli välillä 10...100 kPa. /3/

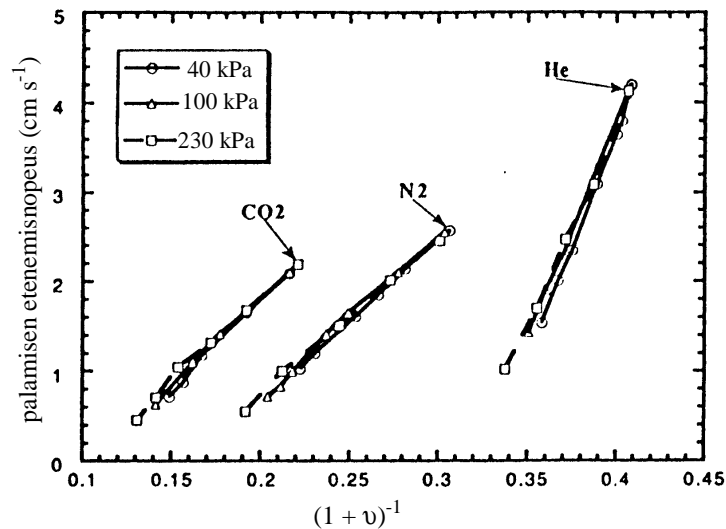
Helium laimentimena aiheutti pidemmän syttymisaajan ja hiilidioksidi lyhyemmän syttymisaajan kuin typpi. Heliumin lämmönjohtavuus on 10-

kertainen typeen verrattuna ja hiilidioksidin lämmönjohtavuus 10 % pienempi kuin typellä. Hiilidioksidilla on suhteellisen suuri lämpökapasiteetti ja emittanssi. Hiilidioksidi voi kolmiatomisena yhdisteenä absorboida lämpösäteilyä enemmän kuin typpi ja helium. Toisaalta lämpökapasiteetin suuruus aiheuttaa sen, että hiilidioksidin lämmittämiseen tarvitaan enemmän energiaa massayksikköä kohti. Hiilidioksidin lämpötila voi kuitenkin nousta paikallisesti nopeammin, koska hiilidioksidi johtaa lämpöä huonommin kuin helium. Lisäksi arveltiin, että hiilidioksidi voi mahdollisesti ottaa osaa reaktioihin, mikä voisi nopeuttaa syttymistä. /3/

Zhang et al., /56/, tutkivat hapen konsentraation ja kokonaispaineen vaikutusta palamisen etenemiseen ohuessa kiinteässä aineessa. Polttoaineena käytettiin tuhkatonta suodatinpaperia, jota oli kuivatettu 2 h 400 K:n lämpötilassa. Paperinäytteiden paksuus oli 50 μm . Kokeen aikana näytteet pidettiin 5 cm:n levyisessä pidikkeessä, jolla pyrittiin välttämään reunapalamisen vaikutus. Kokeissa mitattiin paperin lämpötilaa 50 μm :n paksuisilla termopareilla. Termoparien lukemat korjattiin arvioituilla säteilylämpöhäviöillä.

Kokeissa liekkirintaman etenemisnopeuden havaittiin kasvavan lähes lineaarisesti muuttujan $(1 + \nu)^{-1}$ kasvun mukana lähelle sammumisrajaa. ν on stökiometrinen hapettimen ja kaasumaisen polttoaineen massojen suhde. Palamisen etenemisnopeus on lineaarisesti riippuvainen myös kerroksen pinta-alasta polttoaineen massayksikköä kohti. Nämä tulokset olivat saman suuntaisia kuin aikaisempien tutkijoiden tulokset. /56/

Tutkimuksessa tarkastellaan hapen osapaineen ja laimentimen ominaisuuksien vaikutusta liekkirintaman etenemisnopeuteen, mikä vastaa Lewisin luvun, Le , muutoksen vaikutusta. Lewisin luku on kaasuseoksen termisen diffusiviteetin ja seokseen diffundoituvan hapen massan diffuusiokertoimen suhde. Kuvasta 21 nähdään, että hiilidioksidi hapen laimentimena aiheuttaa suuremman syttymisrintaman etenemisnopeuden kuin typpi. Heliumin käyttö typen sijasta puolestaan hidastaa palamisen etenemistä. Kokonaispaineella ei ole merkittävää vaikutusta palamisen etenemiseen. /56/



Kuva 21. Palamisrintaman etenemisnopeus termin $(1 + \nu)^{-1}$ funktiona kun parametreina ovat ympäristön paine ja hapen laimenninkaasu. Laimentimen N_2 arvoja on siirretty 0,05:llä oikealle, jotta pisteet eivät menisi päällekkäin CO_2 -pisteiden kanssa./56/

Zhangin tutkimuksen tulokset tukevat Alvaresin ja Martinin syttymisajan mittaustuloksia. Artikkelissa päätellään, että syttymisrintaman etenemisnopeus kasvaa, kun Le pienenee. Tämä tuntuu loogiselta johtopäätökseltä, kun muistaa Lewisin luvun määritelmän. Kun lämpötilan johtavuus pienenee, lämmön varastoituminen kasvaa, mikä nopeuttaa kaasun lämpenemistä. Palamisedellytykset ovat luonnollisesti sitä paremmat mitä paremmin happi diffundoituu pyrolyysikaasuun. Nämä johtopäätökset koskevat pääasiassa pinnan rajakerrosta, jossa virtaus on laminaarista ja sekoittuminen ilman diffuusiota siten vähäistä.

Pienten hiilikerrosten syttymiskokeissa, aiemminkin viitatussa lähteessä /53/, havaittiin myöskin hapen osapaineen kasvun pienentävän syttymisaikaa ja syttymislämpötilaa. Kokonaispaineen merkitys oli näissäkin kokeissa pieni.

3.3.4 Näytteen asento

Paloturvallisuuskysymyksissä on olennaista tietää, mitä eroa on pystysuoran ja vaakasuoran pinnan syttymisessä. Tämän vuoksi on tehty useita tutkimuksia, joissa on vertailtu vertikaalisen ja horisontaalisen näytepinnan syttymistä, kuten aiemmista kappaleistakin on jo käynyt ilmi.

Kashiwagin tutkimuksessa syttymisviive ja syttymiseen tarvittava lämpövirta ovat olleet pienempiä horisontaaliselle pinnalle kuin vertikaaliselle pinnalle ainakin sellaisissa tapauksissa, joissa pinnalle on tullut lämpöä vain säteilyllä. Pystysuoralla pinnalla pyrolyysikaasut alkavat nousta luonnollisella konvektiolla ylöspäin, jolloin ympäriltä virtaa pinnan läheisyyteen ilmaa. Ilma laimentaa pyrolyysikaasuja ja jäähdyttää polttoaineen pintaa. Laimennuksen seurauksena pinnan lähellä olevan pyrolyysikaasun konsentraatio pysyy pidempään alemmaa syttymisrajaa pienempänä. Kuvassa 14 nähdään myös Quintieren koetulosten osoittavan, että horisontaalisessa asennossa oleva näyte syttyy hieman nopeammin (janat ja neliöt). /20/,/4/

Atreyan kahdella puulajilla tekemässä tutkimuksessa ei havaittu merkittävää eroa horisontaaliseen ja vertikaaliseen asetettujen näytekappaleiden syttymisen välillä. Babaurkas ja Parker eivät myöskään saaneet todellista eroa eri asennoissa olevien puupintojen syttymiselle muilla kuin yhdellä puulajilla. Valkomänty syttyi horisontaalisessa asennossa hieman lyhyemmässä ajassa kuin vertikaalisessa asennossa. /20/

3.3.5 Pilotliekin koko ja sijainti

Pakotetun syttymisen kokeellisissa tutkimuksissa säteilylämpövirran lisäksi sytytyksessä käytetään usein näytteen pinnan lähelle asetettua pientä pilot liekkiä tai esimerkiksi kuumaa pintaa, jonka välittömästä läheisyydestä syttyminen käynnistyy. Näissä tutkimuksissa liekki aiheuttama lisälämpövirta on yleensä lähes merkityksetön varsinaisen ulkopuolisen säteilylähteen aiheuttamaan lämpövirtaan verrattuna. Pilot liekki toimii vain reaktioiden käynnistäjänä sillä alueella, jolle pyrolyysikaasut vapautuvat ja muodostavat ilman kanssa syttyvän seoksen. Pilot liekki pyritään sijoittamaan pinnan ohi kulkevan virtauksen rajakerroksen sisäpuolelle. Kokeellisissa tutkimuksissa vain Simms ja Tseng ovat saaneet tuloksia, joiden mukaan pilot liekin etäisyyden kasvattaminen pinnasta vaikuttaisi syttymisaikaa pidentävästi. Moseyn ja Muirin sekä Robertsonin tutkimuksissa ei havaittu vaikutusta syttymiseen. Kaikissa tutkimuksissa liekki oli kuitenkin sijoitettuna hyvin

lähelle pintaa (6...20 mm). Myös liekkien pituudet vaihtelivat 10...50 mm:iin. Liekin koolla ei havaittu olevan suurta merkitystä syttymisaikaan./20/

Syttymisrintaman etenemistapauksissa liekistä tuleva säteily ja liekin konvektiivinen lämmitysvaikutus sitä vastoin ovat pääasialliset lämmönsiirtotavat. Tällöin liekin koolla on selvä merkitys syttymiseen ja liekkirintaman etenemiseen. Näissä tapauksissa liekki onkin enemmän kuin pilotliekki.

3.3.6 Säteilylähteen spektrin jakauma

Säteilylähteen säteilyspektrin jakauman vaikutusta on sivuttu jo syttyvän pinnan säteilyominaisuuksia käsittelevässä kappaleessa. Säteilylähteen spektri vaikuttaa syttymiseen, koska pintojen absorptio- ja heijastusominaisuudet ovat erilaisia eri suuruisille säteilyn aallonpituuksille. Säteilylähteet puolestaan voivat lähettää säteilyä, jonka voimakkuus on suurimmillaan vain tietyillä aallonpituuksilla. Jos pinta absorboi säteilyä huonosti niillä aallonpituuksilla, joilla säteilylähde tuottaa suurimmat intensiteetit, menee suuri osa säteilystä jonnekin muualle kuin pinnan lämmittämiseen. Jos siis halutaan, että pintaa lämmitetään tehokkaasti säteilylämmönsiirrolla, pitää valita säteilylähde, jonka säteilyn parhaat aallonpituudet absorboituvat tehokkaasti pintaan. Pitää siis tietää sekä säteilijän emissiivisyys- että pinnan absorptiivisuusominaisuudet.

3.3.7 Palamisilman esilämmitys

Polttolaitteiden suunnittelussa ja käytössä on pitkään tiedetty, että ilman esilämmitys edistää palamista varsinkin kosteita polttoaineita poltettaessa. Polttoaineen palamisesta tulevalle lämmöllä tarvitsee lämmittää ilmaa tulipesässä vähemmän kun se on valmiiksi lämmintä. Lämmin ilma lämmittää polttoainekerrosta tehokkaasti sen läpi kulkiessaan, mikä nopeuttaa kuivumista ja siten lyhentää syttymisaikaa.

Gort, /16/, on tehnyt kokeita, joissa vertaillaan syttymisrintaman etenemistä esilämmitetyn ja lämmittämättömän ilman tapauksissa. Kokeet tehtiin

polttoaineilla, joista toinen oli kuivattu ja toisen kosteus oli 10 % käyttötilassa olevasta massasta. Kokeissa käytettiin keskimääräisiä ilman virtausnopeuksia 0,1 ja 0,2 m s⁻¹ laskettuna normalisoiduissa olosuhteissa. Esilämmitetyn ilman tapauksissa ilman lämpötila ennen kerrosta oli 100 °C ja lämmitetyn ilman lämpötila 15 °C. Kostean polttoaineen reaktorintaman etenemisnopeus kasvoi 0,1 m s⁻¹ virtausnopeudella n. 0,08:sta n. 0,11 kg m⁻² s⁻¹:aan esilämmityksen seurauksena ja suurinpiirtein yhtä paljon 0,2 m s⁻¹ virtausnopeudella. Kuivan polttoaineen reaktorintaman etenemisnopeus kasvoi n. 0,13:sta n. 0,3 kg m⁻² s⁻¹:aan eli huomattavasti enemmän. Kokeiden lukumäärä oli pieni, joten niistä ei voida tehdä kovin pitkälle meneviä kvantitatiivisia päätelmiä. Näissä kokeissa polttoaineen kuivattaminen suurensi syttymisnopeutta enemmän kuin ilman esilämmitys, vaikka polttoaineen kosteus oli melko pieni. Esilämmityksen vaikutus kuivatetun polttoaineen syttymisrintaman etenemiseen oli sitävastoin yllättävän suuri. Tuloksissa pitää kuitenkin huomata, että kuivatus vaikutti myös palamisen stökiömetriaan. Kuivan polttoaineen tapauksessa syttymisnopeuden ja palamisnopeuden ero oli suurempi kuin kostean polttoaineen tapauksessa. Syttymisrintaman kulkemisen jälkeen tietylle kohdalle jäi siis kuivassa kerroksessa enemmän palamatonta polttoainetta kuin kosteassa kerroksessa.

3.3.8 Muita syttymiseen ja palamisen etenemiseen vaikuttavia tekijöitä

Hiilen jäännöskoksin syttymistä tutkittaessa, esimerkiksi lähteessä /53/, on havaittu, että hiilletylämpötila ja aika vaikuttavat syttymisaikaan. Pyrolysointilämpötilan suurentaminen suurentaa koksin syttymislämpötilaa. Nopeasti pyrolysoitu koksi syttyy korkeammassa lämpötilassa kuin hitaasti pyrolysoitu jäännöshiili. Molemmat näistä vaikutuksista voivat johtua koksiin jäävien haihtuvien aineiden erilaisista määristä eri hiilletystavoilla. Nopeasti ja suuremmissa lämpötilassa tapahtuvassa pyrolyysissä poistuu hiilestä suurempi osuus haihtuvista aineista kuin hitaassa ja matalammassa lämpötilassa tapahtuvassa hiiltymisessä /36/.

Hiilen syttymislämpötilaa on onnistuttu pienentämään Wenin tutkimuksessa, /53/, käyttämällä lisäaineena natriumkarbonaattia ja kaliumkarbonaattia.

Kaliumkarbonaatin vaikutus oli suurempi. Noin 1 millimoolin lisäys 1 grammaan hiiltä pienensi syttymislämpötilaa n. 20...80 °C. Suuremmilla lisäainemäärillä ei voitu vaikuttaa enempää syttymislämpötilaan.

Koelaitteella ja koeolosuhteilla on huomattu olevan vaikutusta syttymiseen ja palamisen etenemiseen. Eri tutkijoiden tekemissä kokeissa on joskus päädytty erilaisiin tuloksiin, vaikka polttoaineiden mitatut ominaisuudet ja mitatut koeolosuhteet ovat olleet samanlaiset. Tästä voidaan päätellä, että kaikkia vaikuttavia tekijöitä ei ole osattu ottaa huomioon tai niitä ei ole voitu mitata. Paloturvallisuuteen liittyvistä syttymiskokeista on tämän vuoksi tehty standardeja koeolosuhteista ja -laitteista. Standardit kyllä saavat aikaan melko samanlaisia koetuloksia yhtenevillä polttoaineilla ja olosuhteilla, mutta niissä määritellyillä kokeilla ei välttämättä saada kaikkein oikeinta tietoa syttymisestä ja palamisen etenemisestä. Standardikokeiden sovellettavuus erilaisiin tapauksiin on yleensä myös melkoisen rajoitettu.

3.4 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSIÄ SYTTYMISEEN JA PALAMISEN ETENEMISEEN VAIKUTTAVISTA TEKIJÖISTÄ

Kokeellisten tutkimusten ja kokemuksen perusteella syttymiseen ja palamisen etenemiseen näyttävät vaikuttavan eniten polttoaineen kosteus, haihtuvien aineiden osuus polttoaineessa, ilmavirtauksen suuruus ja suunta, kerrokseen kohdistuva säteilylämpövirran tiheys, polttoainekerroksen huokoisuus, partikkelikoko, partikkelimuoto ja palamisilman lämpötila. Vaikutusten osuuksien suuruutta eri tilanteissa ei voida suoraan määritellä. Monet edellisessä kappaleessa esitellyistä tekijöistä vaikuttavat toisiinsa, joten niiden kokonaisvaikutusta on vaikea mitata. Lisäksi pitää muistaa, että energian tuotantoon tähtäävässä palamistapahtumassa syttyminen ja syttymisrintaman eteneminen ei kerro läheskään kaikkea palamisen tehokkuudesta. Syttymisen jälkeinen pyrolyysikaasujen ja hiilijäännöksen loppuun palaminen vievät suuren osan palamisajasta ja tuottavat vastaavasti koko prosessissa kuluvan ja siitä hyödyksi saatavan lämmön. Pesään tulevan polttoaineen riittävän nopea syttyminen on kuitenkin kriittinen tekijä polttolaitteen toiminnalle, koska liian pitkä syttymisaika johtaa polttoaineesta vapautuvan lämpövirran

pienenemiseen ja pahimmillaan pesän täyttymiseen ja tulen sammumiseen. Polttolaitteiden kehittämistä ja suunnittelua varten tarvitaan kokeellisen tutkimustiedon lisäksi laskennallisia työkaluja. Näitä ovat erilaiset mallit ja mallinnusohjelmat, joiden käyttötarkoitus ja laajuus vaihtelevat hyvin paljon.

4 SYTTYMISEN JA LIEKKIRINTAMAN ETENEMISEN MALLINTAMINEN

4.1 MALLINTAMISEN PERUSTEITA

Mallintaminen on tullut viimevuosikymmeninä yhä yleisemmäksi ja tärkeämmäksi apukeinoksi erilaisten prosessien, niiden osien ja niihin kuuluvien laitteiden kehittämisessä ja suunnittelussa. Tähän ovat johtaneet prosessien käytettävyyden parantamistarve, energian ja materiaalien kulutuksen vähentämistarve ja ympäristövaikutusten pienentämistarve sekä mallinnustyökalujen, lähinnä tietokoneiden laskentakapasiteetin, nopea kehittyminen. Mallintamisella on mahdollista vähentää yrityksen ja erehdyksen kautta tutkimista ja sitä kautta kokeelliseen tutkimukseen ja kehitykseen käytettävää aikaa ja rahaa.

Mallintaminen perustuu prosessin käyttäytymisen teoreettiseen ja käytännölliseen tuntemiseen. Hyvästäkin tiedosta huolimatta joudutaan malleissa aina yksinkertaistamaan laskentaa. Kaikkia vaikuttavia fysikaalisia ja kemiallisia tekijöitä ei voida ottaa huomioon ja laitteiden geometriaa joudutaan tekemään yksinkertaisemmaksi kuin se on käytännössä. Yksinkertaistuksia pitää tehdä, jotta laskentakapasiteetti riittäisi ja laskenta-ajat eivät tulisi liian pitkiä. Yleensä prosessien kaikkia vaikuttavia tekijöitä ei edes tunneta tai niitä ei osata mallintaa laskennallisesti ainakaan kaikissa olosuhteissa. Geometriat voivat olla käytännön tapauksissa niin monimutkaisia, että niiden täydellinen kuvaaminen mallinnusohjelmaan vaatii kohtuuttomasti työtä tai on jopa mahdotonta.

Mallissa kuvataan matemaattisilla yhtälöillä systeemin tasetilojen sisään menevät ja ulos tulevat massa-, yhdiste-, energia- ja liikemäärävirrat sekä taseiden sisällä syntyvät ja varastoituvat virrat. Taseita kuvataan niin sanotuilla primaariyhtälöillä eli säilymisyhtälöillä (conservation equations). Näiden virtojen ja muutostilojen nopeuden kuvaamiseen käytetään niin sanottuja sekundaariyhtälöitä eli siirtoyhtälöitä (transport equations). Primaari- ja sekundaariyhtälöt muodostavat yhdessä perusyhtälöt (governing equations), jotka ratkaisemalla voidaan kuvata matemaattisesti systeemin toiminta ajan ja paikan funktiona.

Syttymismallilla voidaan määritellä ehdot, joilla tietty polttoaine syttyy tai ehdot polttoaineelle, että se syttyisi tietyissä olosuhteissa. Mallin avulla voidaan laskea syttymiseen kuluva aika ja energia sekä syttymispaikka. Kehittyneillä malleilla voidaan laskea myös lämpötilajakaumat paikan ja ajan funktiona.

Liekkirintaman etenemismalleissa on usein ensisijaisena tavoitteena laskea syttymisrintaman etenemisnopeus tietyllä polttoaineella ja tietyissä ympäristöolosuhteissa. Etenemisnopeus voidaan laskea esimerkiksi syttyneenä kerrospaksuutena sekunnissa (m s^{-1}) tai syttyneenä kerrosmassana pinta-ala- ja aikayksikköä kohti ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Monimutkaisemmilla syttymisrintaman etenemismalleilla saadaan myös lämpötilajakauma kerroksessa.

Syttymismalleja ja syttymisrintaman etenemismalleja on tehty enimmäkseen tulipalojen syttymisen ja etenemisen tutkimustarkoituksiin. Mallien ja kokeellisen tutkimuksen avulla voidaan päätellä millaisissa olosuhteissa tulipalo voi syttyä ja millaisilla ennakkotoimenpiteillä syttyminen voidaan estää. Mallien avulla on tutkittu myös tulipalon leviämistä eri pinnoille ja leviämisenopeutta erilaisissa materiaaleissa ja ympäristöolosuhteissa.

Kiinteiden polttoaineiden polttamista kerroksessa voidaan tutkia samantapaisilla malleilla kuin tulipaloja. Mallien käytön tavoite on luonnollisesti lähes päinvastainen kuin tulipalomallien käytön tavoite, mutta mallinnettavat ilmiöt ovat samoja. Polttolaitteita mallinnettaessa pyritään

löytämään polttolaittekonstruktioita ja ympäristöolosuhteita, joilla polttoaine palaa mahdollisimman tehokkaasti. Tehokkuudella tarkoitetaan täydellistä loppuunpalamista, suurta tehoa tilavuus- ja pinta-alayksikköä kohti ja pieniä haitallisten aineiden päästöjä. Syttymisen ja palamisen etenemisen kannalta tämä tarkoittaa mahdollisimman nopeaa polttoaineen kuivumista ja lämpenemistä syttymispisteeseen. Syttyminen ja palamisen eteneminen ovat osatekijöinä polttolaitteen mitoituksessa halutuille tehoille ja polttoaineille. Kehitystyössä ja suunnittelussa on tavoitteena hyvin toimiva polttolaitte, jolla voidaan polttaa haluttuja polttoaineita ja päästään tavoitetehtoihin ja päästöihin. Lisäksi sen pitää kestää käytössä ja olla edullinen valmistaa ja huoltaa. Mallintamisen avulla näihin tavoitteisiin voidaan päästä nopeammin ja edullisemmin kuin pelkästään kokemukseen ja kokeisiin perustuvalla tutkimuksella. Polttolaitteissa joidenkin mittausten tekeminen on hankalaa tai jopa mahdotonta. Hyvällä mallilla voidaan saada ainakin jotain tietoa tällaisista kohdista.

Mallien pitää toimia niin, että ne kuvaavat mallinnettavaa prosessia riittävällä tarkkuudella erilaisissa tilanteissa. Nykyisin osataan mallintaa kaasufaasisissa tapahtuvaa palamista melko hyvin, mutta kerrospolton mallinnuksessa on suuria vaikeuksia. Tämän vuoksi tehdään teoreettista ja kokeellista tutkimusta, joiden avulla palamisprosessia ja sen osia opitaan mallintamaan paremmin. Tavoitteena mallintamisen tutkimisessa ja kehittämisessä on saada aikaan sellainen malli, jota voidaan käyttää polttolaitteiden jokapäiväisessä kehittämis- ja suunnittelutyössä sekä laitteissa ja prosesseissa ilmenevien ongelmien ratkaisemisessa. Malleja kehitetään ja käytetään teollisuudessa ja eri tutkimuslaitoksissa.

4.2 SYTTYMISEN JA PALAMISEN ETENEMISEN MALLIEN LUOKITTELU

4.2.1 Mallien luokittelun perusteista

Syttymistä ja palamisen etenemistä mallinnetaan usein erikseen. Puhtaasti syttymistä tutkittaessa syttymisellä tarkoitetaan yleensä tutkittavan materiaalin

ensimmäistä syttymistä. Koko materiaali on siis syttymättä ennen kuin siihen aletaan tuoda lämpöä. Palamisen etenemismalleissa ei taas yleensä kiinnitetä niin paljon huomiota siihen, miten materiaali on saatu jostakin kohtaa ensimmäiseksi palamaan, vaan niissä tutkitaan sitä, kuinka nopeasti liekkirintama etenee, millainen on liekkirintaman muoto ja miten lämpötilat jakautuvat palamisen etenemissuunnassa. Palamisen etenemisessäkin on kysymys syttymisestä. Tietyn partikkelin tai partikkeliryhmän pinta lämpenee, kuivuu ja alkaa pyrolysoitua ennen syttymisen tapahtumista. Syttymisrintaman etenemisnopeus riippuu näihin vaiheisiin kuluva ajasta. Näin ollen syttyminen ja liekkirintaman eteneminen kytkeytyvät kiinteästi toisiinsa. Syttymisrintaman etenemistutkimuksissa ei yleensä tarkastella ainakaan perusteellisesti syttymisen jälkeistä partikkelin loppuunpalamista.

Kiinteän polttoaineen syttymistä on mallinnettu erikseen pinnoilla, yksittäisissä partikkeleissa ja partikkelikerroksissa. Tässä työssä käydään läpi partikkelikerrosten syttymistutkimusten lisäksi pinnan syttymisen mallintamistapoja, koska näistä malleista löytyy paljon esimerkkejä ja tämä tutkimusalue on sekä teoreettisesti että kokeellisesti pitkälle kehittyntä. Myös liekkirintaman etenemismalleja löytyy sekä partikkelikerroksille että pinnoille. Tällä alueella kerroksia koskevia tutkimuksia löytyy niin paljon, ettei palamisen etenemistä pinnoilla tarvitse juuri tarkastella.

Syttymisen ja palamisen etenemisen mallit voidaan jakaa luokkiin myös mallin muodostamisen perusteiden ja keinojen perusteella. Weberin katsauksessa, /52/, polttoainekerrosten palamisen etenemisen mallit on jaettu kolmeen luokkaan. Tilastollisessa mallissa on muodostettu koetulosten perusteella tilastollisilla menetelmillä yhtälö, joka kuvaa mitattujen muuttujien vaikutusta mallinnettavaan ilmiöön. Tunnettuja luonnonlakeja ei oteta huomioon muuten kuin tilastollisesti. Empiirisessä mallissa koetulosten perusteella on tehty korrelaatio, jossa otetaan huomioon fysikaalisia ja kemiallisia lainalaisuuksia, mutta ei niiden eri osatekijöitä kuten lämmönsiirron johtuminen, konvektio ja säteily. Fysikaalinen malli on tehty säilyvyysyhtälöiden perusteella. Se ottaa huomioon fysikaalisten ilmiöiden eri osatekijät. Fysikaalisessa mallissa joudutaan yleensä voimakkaasti yksinkertaistamaan tapausta (dimensiot, faasit,

aineominaisuudet, partikkeliominaisuudet jne.). Weber käyttää tosin omaa luokitteluaan hieman sekoitettuna varsinkin empiirisen ja fysikaalisen mallin osalta. Seuraavissa kappaleissa luokitellaan tutkimuksia lähinnä niiden aiheiden perusteella.

4.2.2 Puhtaat syttymistutkimukset

Puhtaasti syttymiseen keskittyvät tutkimukset perustuvat usein suoraan säilymisyyhtälöihin. Syttymiseen tarvittavaa lämpövirran tiheyttä, aikaa ja muita tekijöitä aletaan selvittää jatkuvuusyyhtälön ja energiayhtälön sekä joissakin tapauksissa myös liikemääräyhtälön ja yhdisteiden säilymisyyhtälön perusteella. Näissä tutkimuksissa määritellään yleensä syttymiskriteeri eli ehto, jonka täyttymisen perusteella polttoaineen päätellään syttyneen. Puhtaissa syttymistutkimuksissa malli on yleensä ajasta riippuva.

4.2.2.1 Pinnan syttyminen

Pintojen syttymisestä löytyy paljon tutkimusjulkaisuja. Tutkimukset liittyvät usein paloturvallisuuteen. Niinpä niissä on paljon myös puupintojen ja muiden selluloosapitoisten pintojen tutkimuksia. Monet näistä tutkimuksista ovat hyvinkin teoreettisia. Syttymiselle on kehitetty sekä analyyttisiä että numeerisia malleja. Pintojen syttymistapauksia voidaan luokitella esimerkiksi seuraavilla tavoilla:

- pinta on termisesti paksu tai ohut;
- pintaan siirtyy lämpövirta säteilyllä tai/ja konvektiolla;
- kyseessä on pakotettu tai itsesyttyminen ja
- pintaa lämmitetään yhdeltä tai kahdelta puolelta.

Yksi tutkimus voi olla jokin yhdistelmä ylläolevista luokitteluista. Termisesti paksun kappaleen keskikohdan tai lämmittämättömän reunan lämpötila oletetaan syttymisprosessin aikana vakioksi. Termisesti ohuen kappaleen lämpötilan oletetaan pysyvän koko kappaleessa tasaisena, kun lämpötila

muuttuu ajan kuluessa. Tällöin kiinteässä aineessa tapahtuvaa lämmönjohtumista ei tarvitse ottaa huomioon. Termisillä välipaksuuksilla joudutaan johtuminen ja lämpötilan muutos koko kappaleessa ottamaan huomioon.

Pintojen syttymisen tutkimisesta saatuja tietoja ei voida sellaisenaan soveltaa partikkelikerroksiin, mutta esimerkiksi aineominaisuuksien ja kosteuden vaikutuksesta syttymiseen saadaan arvokasta pohjatietoa. Pintojen syttymistutkimuksissa on usein otettu huomioon useampia fysikaalisia ja kemiallisia muuttujia kuin esimerkiksi partikkelikerrosten liekkirintaman etenemistutkimuksissa. Pintaa voidaan käsitellä huomattavasti yksinkertaisemmin kuin kerrosta, jolloin pintaa on helpompi mallintaa tarkemmin. Pintojen syttymisen kokeellisesta ja teoreettisesta tutkimuksesta voidaan saada siis lisää syttymiseen vaikuttavia tekijöitä ja niiden vaikutussuuntien arvioita myös partikkelikerrosten tutkimusta varten. Taulukossa 2 on luokiteltu lähdeluettelon lähteitä eri tapauksiin.

Taulukko 2. Pinnan syttymistutkimuksia luokiteltuna aiheen mukaan.

Lähde	Pinta		Läm- mitys			Sytty- minen		
	paksu	ohut	säteily	kon- vektio	yksi- puol.	kaksi- puol.	pako- tettu	itse- sytt.
/33/	x		x		x			x
/4/	x		x		x		x	
/27/	x	x	x		x			x
/43/	x		x		x		x	x
/3/	x		x		x			x
/50/	x	x		x	x	x	x	x
/14/	x		x		x		x	

4.2.2.2 Yksittäisen partikkelin syttyminen

Yksittäisen partikkelin syttymistutkimuksia on tehty melko runsaasti. Näistä ainakin hiilipartikkelien syttymistutkimukset liittyvät usein hiilen pölypoltoon tai pölyräjähdysiin. Yksittäisen partikkelin syttymistä mallinnetaan usein samaan tapaan kuin polttoainepisaran syttymistä. Mallit voivat olla melko tarkkoja teoreettiselta käsittelyltään. Niissä voidaan ottaa huomioon mm.

partikkelin huokoisuuden vaikutus, tiheyden muuttuminen, yhtäaikainen kuivuminen ja pyrolyysi ja partikkelin koon muuttuminen ajan funktiona. Partikkelin syttymismallit ovat kuitenkin usein 1-dimensionaalisia, jolloin partikkeli oletetaan palloksi. Partikkelitutkimuksetkin voidaan luokitella esimerkiksi seuraavasti:

- pienet tai suuret partikkelit;
- lämmönsiirto lämmönlähteestä säteilyllä tai/ja konvektiolla ja
- partikkeli sisältää tai ei sisällä haihtuvia aineita.

Partikkeli luokitellaan pieneksi, jos lämpötilaa voidaan pitää samana koko partikkelissa. Tällöin lämmönjohtumista partikkelin sisällä ei tarvitse ottaa huomioon. Partikkeli on suuri, jos sen keskustan lämpötila ei muutu syttymisprosessin aikana. Partikkeli voidaan sytyttää säteilylämmityksellä, kuumalla kaasuvirtauksella tai näiden yhdistelmällä. Haihtuvia aineita sisältävän partikkelin syttymisen mallintamisessa on otettava huomioon pyrolysoituminen. Yksittäisen partikkelin syttymistä on tutkittu esimerkiksi lähteissä /9/ ja /23/.

4.2.2.3 Partikkelikerroksen syttyminen

Partikkelikerroksen syttymistutkimukset ovat hyvin lähellä palamisen etenemistutkimuksia. Erona liekkirintaman etenemistutkimuksiin voi olla suurempi huomio syttymiskriteeriin. Syttymistutkimuksissa tuloksena on yleensä syttymisaika ja -lämpötila tai sytyttämiseen tarvittava kriittinen lämpövirta. Sellaisia tutkimuksia, joissa partikkelikerroksen syttymistä olisi lähdetty tutkimaan kylmästä tilasta, on yllättävän vähän. Nämä tutkimukset voidaan vielä luokitella esimerkiksi seuraavien tekijöiden perusteella:

- lämmitystapa: säteily, konvektio, kuuma pinta kosketuksessa;
- partikkelikoko: termisesti pienet tai suuret partikkelit;
- partikkelisijoittelu: järjestyneet tai satunnaiset kerrokset ja
- partikkelikokojakauma: homogeeniset tai epähomogeeniset partikkelit.

Partikkelit ovat useimmissa tutkimuksissa satunnaisesti järjestäytyneinä. Partikkelikoko oletetaan yleisimmin vakioksi. Usein partikkelit oletetaan

pallon muotoisiksi. Yleisimpiä partikkelikerroksen syttymistutkimuksia ovat tutkimukset, joilla pyritään selvittämään tulipalon syttymisolosuhteita erilaisissa partikkelikasoissa ja kuumille pinnoille kertyneissä kerroksissa.

Partikkelikerrosten syttymistutkimusten esimerkkeinä voidaan pitää lähdeluettelon julkaisuja /8/, /17/, /25/, /26/, /28/, /38/, /53/ ja /55/. Kaikissa näistä ei tosin ole mallinnettu kerroksen syttymistä, vaan jotkut niistä ovat kokeellisia tutkimuksia.

4.2.3 Liekkirintaman eteneminen

Näitäkin tutkimuksia on sekä partikkelikerroksille että pinnoille. Tässä keskitytään liekkirintaman etenemiseen partikkelikerroksessa. Kuten aiemminkin on kerrottu, monet tämän alan tutkimuksista liittyvät tulipalojen ehkäisemiseen ja sammuttamiseen. Partikkelikerrosten liekkirintamatutkimusta on tehty erityisesti metsämateriaaleille. Kokeellisia tutkimuksia ja niihin tukeutuvia malleja on tehty eri puiden neulaskerroksille, latvuksille, metsäpohjan karikekerroksille, pensaikoille jne. Tulipaloihin liittyviä tutkimuksia on tehty lisäksi pölykerroksille ja kerroksen omaisille tekstiilimateriaaleille. Näitä tutkimuksia voidaan luokitella esimerkiksi seuraavilla tavoilla:

- hapettimen syöttösuunta suhteessa polttoaineen syöttösuuntaan tai reaktorintaman etenemissuuntaan: vastavirta, myötävirta ja ristivirta;
- lämmitystapa (säteily, konvektio, kuuma pinta kosketuksessa);
- termisesti pienet tai suuret partikkelit;
- järjestyneet tai satunnaiset kerrokset ja
- homogeeniset tai epähomogeeniset partikkelit.

Syttymisrintaman etenemismalleissa kerros on useimmiten paikallaan pysyvä. Tulipalon etenemismalleissa syttymisrintama etenee yleensä ilman virtaussuuntaan, jos tuuli otetaan huomioon. Polttolaitteiden mallinnuksessa reaktorintama voi edetä ilmavirtauksen mukana (myötävirta), ilmavirtausta vastaan (vastavirta) tai kohtisuorasti tai vinosti ilman virtaukseen nähden

(ristivirta). Partikkelikerroksen syttymisrintaman etenemistä tutkitaan esimerkiksi lähteissä /1/, /2/, /7/, /10/, /11/, /16/, /32/, /34/, /52/ ja /56/.

4.3 PRIMAARIYHTÄLÖT

4.3.1 Primaariyhtälöt käsitteenä

Primaariyhtälöillä kuvataan määriteltyjen tilojen massa-, energia-, liikemäärä- ja alkuainetaseita. Yleinen primaariyhtälö on jollekin tasetilalle muotoa

$$\textit{sisään menevä} + \textit{sisällä syntyvä} = \textit{ulos tuleva} + \textit{sisällä häviävä} + \textit{sisälle varastoituva}.$$

Jos tase ajatellaan nettosaantona tasetilaan, jolloin sisälle menevä voi olla positiivinen tai negatiivinen samoin kuin syntyvä, voidaan yleinen tase kirjoittaa muotoon

$$\textit{sisään menevä} + \textit{sisällä syntyvä} = \textit{sisälle varastoituva}.$$

Primaariyhtälöt voidaan määritellä koko kerrokselle, tietylle kontrollitilavuudelle, differentiaaliselle kerroksen osalle tai vaikka yhdelle partikkelille.

4.3.2 Jatkuvuusyhtälö

Jatkuvuusyhtälöllä kuvataan laskettavan tilan massataseet. Jatkuvuusyhtälö on

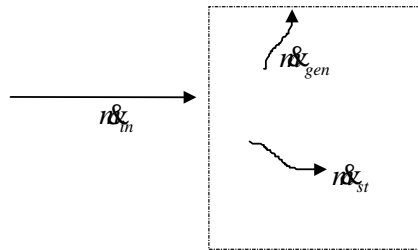
$$m_m + m_{gen} = m_{st}, \quad (11)$$

jossa

\dot{m}_m on nettomassavirta tasetilaan, kg s^{-1} ,

\dot{m}_{gen} on tasetilassa syntyvä massa aikayksikössä, kg s^{-1} ,

\dot{m}_{st} on tasetilaan varastoituva massa aikayksikössä, kg s^{-1} .



Kuva 22. Yleinen massatase.

Näistä voidaan kiinteän polttoaineen palamistapauksessa lisämääriä antaa seuraaville:

$$\dot{m}_{gen} = \dot{m}_{vol} + \dot{m}_{vap} \quad (12)$$

$$\dot{m}_{st} = \frac{\partial m}{\partial t} \quad (13)$$

Näissä \dot{m}_{vol} on polttoaineesta pyrolysoituvien haihtuvien aineiden massavirta, kg s^{-1} ja

\dot{m}_{vap} on polttoaineesta höyrystyvän veden massavirta kerroksen, kg s^{-1} .

Kaasufaasin tekijöiden määrittelyssä voidaan käyttää apuna ideaalikaasun tilanyhtälöä. Kiinteässä faasissa voidaan jatkuvuusyhtälö kirjoittaa erikseen. Kiinteää ainetta voi siirtyä tasetilaan ja tasetilasta pois, syntyä ja hävitä sekä varastoitua samalla tavalla kuin kaasuakin. Useimmiten partikkelikerrosten tutkimuksissa kiinteän faasin oletetaan pysyvän paikallaan eli sen ei oleteta tempautuvan virtauksen mukaan. Näin ollen taseen sisäinen muuntuminen

kiinteän faasin ja kaasufaasin välillä jää mallinnettavaksi. Partikkelien sisältämä vesi ja haihtuvat aineet lasketaan yleensä molemmat jatkuvuusyhtälössä kiinteään faasiin. Partikkelien kuivuminen ja pyrolysoituminen toimivat siis ns. nielutermeinä kiinteän aineen massataseessa. Vastaavasti kaasufaasille ne ovat lähdetermejä. Kiinteän aineen massataseessa olisi mahdollista ottaa huomioon myös kuumalla vyöhykkeellä pyrolysoituneiden aineiden lauhtuminen kylmän alueen partikkeleiden pinnalle, jolloin partikkelien pinnalle voisi muodostua tervamainen kerros. Tämä toimisi kiinteään faasiin tulevana virtana, jolle olisi voimassa tiettyjä lämpötila- ja osapaine-ehtoja. Tällaista massataseen osatekijää ei ole ollut yhdessäkään lähteessä, mikä varmasti johtuu mallien yksinkertaistamistarpeesta.

4.3.3 Energiayhtälö

Energiayhtälö perustuu termodynamiikan ensimmäiseen pääsääntöön, jonka mukaan

$$\textit{systemin kokonaisenergian muutos} = \textit{systemiin tuotu lämpö} + \textit{systemiin tehty työ}.$$

Tämä voidaan esittää differentiaalisena yhtälönä, jossa symbolit vastaavat edellä olevaa sanallista muotoa:

$$dE = dQ + dW . \tag{14}$$

Kokonaisenergia E on yleensä systeemin sisäenergian, kineettisen energian ja potentiaalienergian summa eli

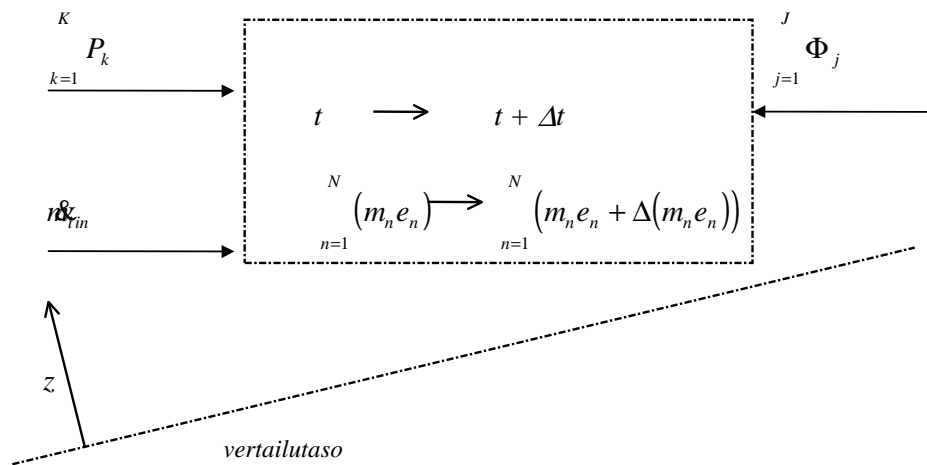
$$E = U + \frac{1}{2}mv^2 + mgz , \tag{15}$$

jossa U on sisäenergia, J,
 m on systeemin massa, kg,
 v on systeemin nopeus, $m\ s^{-1}$,

- g on maan vetovoiman kiihtyvyys, $m\ s^{-2}$ ja
 z on korkeuskoordinaatti vertailutasoon nähden, m.

Sisäenergia koostuu muodostumissisäenergiasta ja niin sanotusta tuntuvasta sisäenergiasta, joka on tilasuureiden avulla määritettävä energia verrattuna johonkin vertailutasoon. Yhdisteen muodostumissisäenergia on laskennallinen tai todellinen energia, joka tarvitaan yhdisteen muodostamiseksi stabiilissa tilassa olevista alkuaineistaan ja saattamaan yhdiste vertailutilaansa. Vertailutila voi olla määritelty esimerkiksi tietyssä lämpötilana ja paineena.

Kuvassa 23 on esitetty tasetilan yleinen energiatase, jossa on otettu huomioon useampia energiavirtoja kuin edellä esitetyssä yleisemmin tunnetussa energiayhtälössä. Tase ja sitä kuvaavat yhtälöt termeineen on mukailtu Sarkomaan esityksestä, /41/. Energiavirrat ovat nettovirtauksia taseeseen. Taseeseen tulee energiaa massavirtojen mukana, mekaanisena työnä ja lämpönä. Taseen sisäpuolella on sisäenergia, jossa voi tapahtua muutoksia varastoitumisen ja reaktioiden seurauksena kun aika muuttuu hetkestä t hetkeen $t + \Delta t$.



Kuva 23. Yleinen energiatase /41/.

Kuvan 23 energiatase voidaan esittää yhtälön avulla muodossa

$$\sum_{i=1}^I (\dot{m}_i e_i) + \sum_{j=1}^J \Phi_j + \sum_{k=1}^K P_k = \frac{d}{dt} \left| \sum_{n=1}^N (m_n e_n) \right|. \quad (16)$$

Yhtälössä

- \dot{m}_{ri} on yhdisteen i ($i = 1 \dots I$) massavirta tasetilaan, kg s^{-1} ,
 e_i on yhdisteen i ($i = 1 \dots I$) kokonaisominaisenergia, J kg^{-1} ,
 Φ_j on tasetilaan tuleva lämpövirta j ($j = 1 \dots J$), J s^{-1} ,
 P_k on tasetilaan tuleva mekaaninen teho k ($k = 1 \dots K$), J s^{-1} ,
 m_n on yhdisteen n ($n = 1 \dots N$) massa tasetilassa, kg ja
 e_n on yhdisteen n ($n = 1 \dots N$) kokonaisominaisenergia, J kg^{-1} .

Kokonaisominaisenergiat voidaan esittää yhtälöillä

$$e_i = u_{fri} + h_{ti} + e_{kni} + gz_i + \frac{\mathcal{G}_i}{q_{mi}} \sigma_i \quad \text{ja} \quad (17)$$

$$e_n = u_{frn} + u_{tn} + e_{knn} + gz_n + \frac{S_i}{m_i} \sigma_i, \quad (18)$$

- joissa u_{fr} on muodostumisominaissisäenergia, J kg^{-1} ,
 h_t on tuntuva ominaisentalpia, J kg^{-1} ,
 e_{kn} on kineettinen ominaisenergia, J kg^{-1} ,
 \mathcal{G} on massavirran pinta-alavirtaus aikayksikössä, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$,
 σ on virtaavan aineen pintajännitys, N m^{-1} ,
 u_t on tuntuva ominaissisäenergia, J kg^{-1}
 S_i on taseen sisällä olevan massan pinta-ala, m^2 .

Yhtälön viimeinen termi tarkoittaa aineen pintajännitykseen sitoutuvaa energiaa, jolla voi olla merkitystä esimerkiksi tarkoissa pisaran palamisen laskelmissa. Kineettiessä energiassa voidaan ottaa huomioon myös mahdollinen massan pyöriminen jonkin akselinsa ympäri, jolloin kineettinen energia voidaan esittää yhtälöllä

$$e_{kn} = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}i^2\omega^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{16}d_m^2\omega^2, \quad (19)$$

jossa i on pyörimisliikkeen hitaussäde, m,
 ω on pyörimisliikkeen kulmanopeus, s^{-1} ja
 d_m on pyörivän massan karakteristinen säde, m.

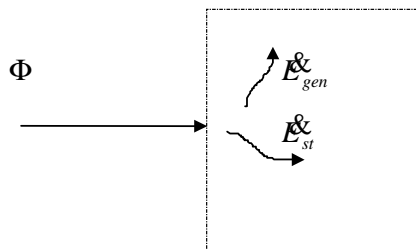
Edellä esitetystä yhtälöstä esiintyvää pyörimisenergiaa voidaan soveltaa esimerkiksi pölypolttimen tai öljypolttimen polttoainesuihkun energiataseen laskennassa, jos polttoaine tuodaan pesään polttimen ympäri pyörivänä virtauksena eli drallina. Yleensä partikkelikerrosten palamistapauksissa kiinteän tai kaasumaisen faasin kineettinen energia, potentiaalienergia ja pintajännitykseen sitoutunut energia ovat merkityksettömän pieniä verrattuna sisäenergian muutokseen, jolloin niitä ei tarvitse ottaa huomioon. Systeemiin tehty työ voi olla esimerkiksi tilavuuden muutostyötä. Useimmiten työ on partikkelikerroksen palamistapauksissa merkityksettömän pieni. Energiayhtälöön jää siten sisäenergian muutoksen ja tuodun nettolämmön muutoksen yhtäsuuruus. Tämä voidaan kirjoittaa yksinkertaisessa muodossa, samaan tapaan kuin jatkuvuusyhtälö, seuraavasti

$$\Phi + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{st}. \quad (20)$$

Yhtälössä

Φ on nettolämpövirta tasetilaan, W,
 \dot{E}_{st} on tasetilaan varastoituva energiavirta, W ja
 \dot{E}_{gen} on tasetilassa syntyvä energiavirta, W.

Yhtälössä muodostunut ja varastoitunut lämpövirta vastaavat sisäenergian muutosta. Yhtälö voidaan esittää myös seuraavan kuvan avulla.



Kuva 24. Yksinkertainen partikkelikerroksen tasetilan energiatase.

Partikkelikerroksen palamistapauksessa energiayhtälön termeille voidaan kirjoittaa massataseen kaltaisesti lisämääritysyhtälöt

$$\dot{E}_{gen} = \dot{E}_{cmb} - \dot{E}_{pyr} - \dot{E}_{vap} \text{ ja} \quad (21)$$

$$\dot{E}_{st} = \frac{d(mu_t)}{dt}. \quad (22)$$

Yhtälöissä

\dot{E}_{cmb} on palamisessa vapautuva reaktioenergiavirta, W,

\dot{E}_{pyr} on pyrolyysiin sitoutuva reaktioenergiavirta, W,

\dot{E}_{vap} on höyrystymiseen sitoutuva energiavirta, W,

u_t on tasetilan tuntuva ominaissäenergia, J kg⁻¹.

Energiayhtälö muodostetaan yleensä kiinteälle faasille ja kaasufaasille erikseen. Kuivuminen ja pyrolyysi ovat lämpönieluja. Näihin faasimuutoksiin kuuluu palamisesta konvektiolla ja säteilemällä tulevaa lämpöä, ulkopuolisesta energianlähteestä säteilevää tai johtuvaa lämpöä, lämpimästä kaasusta konvektoituvaa lämpöä ja/tai ympäröivistä tulipesän ja partikkelien pinnoista säteilemällä tai johtamalla tulevaa lämpöä. Kiinteässä partikkelissa lämpöä voi syntyä jäännöshiilen palamisesta. Kaasufaasissa lämpöä syntyy pyrolyysikaasujen palamisesta. Kaasut voivat myös absorboida lämpösäteilyä, jota tulee partikkelien pinnoilta, liekistä ja tulipesän seinästä. Lämpöä varastoituu sekä kiinteässä että kaasumaisessa faasissa aineen lämpötilan nostamiseen.

4.3.4 Alkuaineiden säilymisyyhtälö

Alkuaineiden säilymisyyhtälöitä tarvitaan sellaisten systeemien tarkastelussa, joissa tapahtuu useita erilaisia reaktioita. Reaktiotuotteiden yhdisteet sisältävät samat alkuaineet kuin lähtöaineetkin eli alkuaineet säilyvät. Systeemiin tulee ja

siitä lähtee alkuaineita taserajojen yli massavirtojen mukana. Näistä virtauksista pitää tietää yhdistekoostumukset alkuainetaseiden laskemiseksi. Aineen varastoitumisen mukana varastoituu luonnollisesti yhdisteitä, jotka sisältävät tiettyjä alkuaineita. Reaktioissa yhdisteet muuttuvat toisiksi, mutta alkuainemäärät säilyvät. Alkuainetaseissakin tapahtuu faasitasolla syntymistä ja häviämistä, kun esimerkiksi kiinteä aine reagoi siten, että lopputuote on kaasua. Alkuainetaseilla pidetään huolta siitä, että kaikkiin laskennassa huomioon otettuihin reaktioihin ja niissä syntyviin tuotteisiin riittää lähtöaineita. Lopputuoteyhdisteiden suhteelliset osuudet voidaan ratkaista väärin pelkkien massataseiden laskennan perusteella. Kullekin reaktiolle voidaan kirjoittaa kunkin alkuaineen, Y_1, Y_2, \dots, Y_i , atomien lukumäärän, y_1, y_2, \dots, y_i , tase muodossa (alkuaineen Y_1 tase esimerkkinä)

$$\sum_{j=1}^J (v'_j y_{1j}) = \sum_{j=1}^J (v''_j y_{1j}). \quad (23)$$

Yhtälössä

v'_j on yhdisteen j stökiometrinen kerroin reaktion lähtöaineissa,
 y_{1j} on alkuaineen Y_1 atomien lukumäärä yhdisteessä j ja
 v''_j on yhdisteen j stökiometrinen kerroin reaktion lopputuotteissa,
 kun reaktion lähtöaine- ja lopputuoteyhdisteitä on yhteensä J kappaletta.

Kun tunnetaan reagoivien lähtöaineiden yhdisteosuudet ja samojen lähtöaineiden erilaisten reaktioiden osuudet tai reaktionopeudet, säilyvät alkuaineet reaktioissa. Suurin vaikeus alkuainetaseissa on eri reaktioiden osuuksien arviointi. Kaikkia reaktioita ei koskaan voida ottaa huomioon, koska pyrolyysissä ja palamisessa tapahtuu hyvin monia erilaisia reaktioita. Suuri osa reaktioista tuottaa niin sanottuja välituotteita, jotka reagoivat nopeasti edelleen lähtöaineiden, lopputuotteiden tai toisten välituotteiden kanssa. Näitä välivaihereaktioita voi olla useita ennen varsinaisen pysyvemmän lopputuotteen muodostumista. Alkuainetaseilla voidaankin kuvata yleensä vain muutamien tärkeimpien lopputuotteiden muodostumista. Varsinkin

pyrolyysivaiheessa näiden tärkeimpienkin lopputuotteiden osuuksiin vaikuttavat monet eri tekijät.

Alkuainetaseiden laskennassa tarvitaan tietoa reaktiokinetiikasta. Reagoimisnopeus määrää osittain sen, minkä verran eri yhdisteitä muodostuu tasetilassa. Toinen yhdistekoostumukseen vaikuttava tekijä on systeemin kemiallinen tasapainokoostumus. Kemialliseen tasapainokoostumukseen vaikuttavat ainakin systeemin lämpötila ja sen sisällä olevien alkuaineiden määrien suhteet. Systemi hakeutuu kohti kemiallista tasapainoaan. Aineiden viipymäaika ja reaktioiden nopeudet systeemissä vaikuttavat siihen, kuinka lähelle kemiallista tasapainoa systemi päättyy.

Alkuainetaseet jätetään usein syttymistutkimuksissa ja liekkiirintaman etenemistutkimuksissa laskematta, jolloin reaktiot kuvataan yhdellä näennäisreaktiolla. Tällaisten reaktioiden kineettisiä parametreja on määritelty kokeellisesti.

4.3.5 Liikemääräyhtälö

Liikemääräyhtälön perusta on Newtonin toisessa pääsäännössä, jonka mukaan systeemiin kohdistuvien voimien summa on yhtä suuri kuin systeemin massan ja nopeusvektorin tulon differentiaali ajan suhteen eli yhtälönä

$$\overset{p}{F} = \frac{d(m\overset{v}{v})}{dt}, \quad (24)$$

jossa $\overset{p}{F}$ on systeemiin kohdistuva voimavektori, N,
 $\overset{v}{v}$ on nopeusvektori, m s⁻¹ ja
 $m\overset{v}{v}$ on systeemin liikemäärä, kg m s⁻¹.

Tämän yhtälön avulla voidaan suoraan ratkaista esimerkiksi virtausnopeuksia, joita tarvitaan partikkelien leijuttamiseen tai kuljettamiseen kaasuvirtauksessa.

Kontrollitilan liikemääräyhtälö voidaan esittää jatkuvalle faasille muodossa

$$\frac{d(m\bar{v})}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \bar{v} dV + \int_A \rho \bar{v} \cdot \bar{v} \cdot dA. \quad (25)$$

Yhtälössä

- V on tasetilan tilavuus, m^3 ,
- ρ on tarkasteltavan faasin tiheys, $kg\ m^{-3}$ ja
- A on tasetilan ulkopinnan ala, m^2 .

Yhtälön vasen puoli tarkoittaa liikemäärän varastoitumista tasetilaan. Oikean puolen ensimmäinen termi edustaa massan tai nopeuden muutoksesta johtuvaa liikemäärän syntymistä tai häviämistä tasetilassa. Oikean puolen toinen tekijä kuvaa tasepinnan läpi tasetilaan virtaavaa liikemäärää. Liikemääräyhtälön ratkaisuna saadaan yleensä paineita ja nopeusjakaumia.

Tulipesäymprärissä liikemääriin vaikuttavat lämpövirrat, jotka aiheuttavat kaasuihin tiheuseroja. Partikkelikerroksessa kaasuvirtausten liikemäärää vähentää kitka, mikä havaitaan selkeimmin virtauksen painehäviönä. Kaasun massa kasvaa pyrolysoitumisen ja palamisen seurauksena, mikä toimii liikemäärää kasvattavana tekijänä. Kitkan ja palamisen vaikutuksesta virtaukset partikkelikerroksissa ovat yleensä turbulenttisia, mikä tekee liikemääräyhtälöiden kattavan käsittelyn huomattavan vaikeaksi.

Partikkelikerroksen virtauksien mallinnuksessa voidaan joskus olettaa, että kaasuvirtauksessa ei kulje mukana partikkeleita. Tällöin jatkuvan faasin virtaus voidaan laskea erikseen ennen kerrosta, kerroksen sisällä ja kerroksen jälkeen. Kerroksen sisällä partikkelien välisissä kanavissa kulkeva virtaus voidaan mallintaa huokoisen materiaalin virtausyhtälöillä. Partikkelit mallinnetaan erikseen, jolloin otetaan huomioon kosteuden ja pyrolyysituotteiden diffuusio pinnalle sekä yhdisteiden siirtyminen faasirajan yli kaasuvirtaukseen.

Toinen tapa liikemääräyhtälöiden määrittämisessä on ottaa huomioon kaasuvirtauksen mukaan tempautuvat polttoainepartikkelit, noki ja mahdollisesti nestemäiset pisarat. Partikkelien leijuminen ja kulkeutuminen virtauksen mukana riippuu kaasun ja partikkelin välisistä kitkavoimista, gravitaatiosta ja

nosteesta. Virtauksen mukana kulkevat partikkelit törmäilevät toisiinsa ja paikallaan oleviin partikkeleihin. Törmäyksissä partikkelit voivat jauhautua tai agglomeroitua, joka tarkoittaa kahden sulaa tai muuten tahmeaa ainetta sisältävän partikkelin liittymistä yhteen, jolloin muodostuu suurempi partikkeli. Monifaasivirtauksen mallintamisessa ratkaistavia yhtälöitä tulee paljon enemmän kuin kiinteän partikkelikerroksen läpi virtaavan kaasuvirtauksen yksifaasitapauksessa. Tällaisessa mallissa luonnollisesti muutkin primaariyhtälöt on ratkaistava kaikissa faaseissa

Liikemääräyhtälö on jätetty yleisimmin kiinteiden polttoaineiden syttymistä ja syttymisrintaman etenemistä käsittelevistä malleista pois. Tämä johtunee siitä, että liikemäärien ei katsota vaikuttavan itse syttymisilmiöön ja liekkirintaman etenemisnopeuteen tai suuntaan kovin merkittävästi, kun kysymyksessä on pinta tai kerros, jonka partikkelit eivät merkittävässä määrin lähde kaasuvirtauksen mukaan. Laskentaa on voitu siten yksinkertaistaa ja numeerisissa ratkaisumenetelmissä laskentakapasiteetin tarvetta on voitu pienentää jättämällä liikemääräyhtälöt käsittelemättä.

4.4 SEKUNDAARIYHTÄLÖT

4.4.1 Yleistä

Sekundaariyhtälöillä kuvataan primaariyhtälöiden sisällä olevia virtaus-, siirto- ja muutosnopeuksia. Näitä ovat lämmönsiirto-, aineensiirto- ja reaktio-kinetiikkayhtälöt. Primaari- ja sekundaariyhtälöt muodostavat yhdessä systeemiä hallitsevat yhtälöt. Kiinteän polttoaineen palamiseen liittyvissä ongelmissa sekundaariyhtälöissä joudutaan usein tekemään suuriakin yksinkertaistuksia.

4.4.2 Lämmönsiirto

4.4.2.1 Yleistä lämmönsiirrosta partikkelikerroksessa

Lämpöä siirtyy tulipesässä olevassa partikkelikerroksessa johtumalla, konvektoitumalla ja säteilemällä. Johtumisella on suurin merkitys partikkelien sisällä. Konvektio vaikuttaa eniten partikkelien ja kaasuvirtauksen rajapinnalla. Lämpösäteilyä tulee pääasiassa liekistä, tulipesän seinämistä ja hehkuvista partikkeleista. Lämmönsiirto toimii usein partikkelin tai partikkelikerroksen kuivumisessa ja pyrolyysissä prosessin nopeutta kontrolloivana tekijänä. Tämä tarkoittaa sitä, että aineensiirron ja reaktiokinetiikan puolesta prosessi etenisi nopeammin eli lämmönsiirto on kuivumista tai pyrolyysiä hidastava tekijä. Lämmönsiirto kontrolloi yleensä suurten partikkeleiden pyrolyysiä /36/.

Seuraavien alakappaleiden yleisten lämmönsiirtoteorioiden kirjoittamisessa on käytetty apuna lähteitä /19/, /29/ ja /42/.

4.4.2.2 Lämmönjohtuminen

Lämmönjohtumiselle on yleinen Fourier'n laki, joka voidaan esittää yksiulotteisessa tapauksessa yhtälönä

$$\Phi''_{cd} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (26)$$

ja yleisesti yhtälönä

$$\Phi''_{cd} = -\lambda \nabla T. \quad (27)$$

Yhtälöissä

λ on lämmönjohtavuus, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Johtuva lämpövirta kasvaa, kun materiaalin lämmönjohtavuus kasvaa ja sisäosan ja pinnan välinen lämpötilaero suurenee. Johtuminen vähenee kun materiaalipaksuus kasvaa. Negatiivinen etumerkki kuvaa lämpövirran suuntaa pienenevän lämpötilan suuntaan. Lämmönjohtavuus riippuu yleisesti aineen koostumuksesta ja lämpötilasta sekä partikkeleilla erityisesti kosteudesta ja huokoisuudesta. Lämpöä johtuu partikkeleiden sisäosien lisäksi kaasussa ja

toisiaan koskettavien partikkeleiden välillä, mutta näiden lämmönsiirtovirtojen suuruus on yleensä partikkelikerroksen syttymisen ja liekkirintaman etenemisen tapauksissa merkityksettömän pieni verrattuna konvektiivisiin lämpövirtoihin kaasussa ja kaasun ja pintojen välillä sekä säteilylämpövirtoihin pintojen välillä.

Kirjallisuudessa esiintyvissä malleissa lämmönjohtumista partikkeleissa tai kiinteässä kappaleessa yksinkertaistetaan usein jollakin oletuksella. Partikkelit voidaan olettaa pieniksi, jolloin lämpötilan oletetaan olevan tasainen koko partikkelissa. Tällöin lämmönjohtumista ei siis lasketa ollenkaan. Toinen äärioletus on olettaa pinnan tai suuren kappaleen olevan puoliääretön kappale, jossa johtumista tapahtuu yksiulotteisesti ja kappaleen keskusta tai toinen puoli pysyy vakio­lämpötilassa. Normaaleissa kerrospolttosovelluksissa partikkelikoot ovat yleisimmin kuitenkin sellaisia, ettei näitä oletuksia voida käyttää. Lämmönjohtumisen laskentaa voidaan yksinkertaistaa tällöin olettamalla esimerkiksi pallosymmetrinen partikkeli, jonka ympäristön olosuhteet ovat samat joka puolella. Tällöin johtuminen voidaan mallintaa yksi-dimensionaalisesti. Lämmönjohtavuus oletetaan usein vakioksi.

Lämmönjohtumista on käytetty ainoana lämmönsiirtomekanismina koko partikkelikerroksessa lähteessä /8/, jossa on selvitetty sahanpurun syttymisen aktivaatioenergia ja taajuustekijä uudella kokeellisella menetelmällä. Kineettisten parametrien laskentaan koetulosten avulla tarvittiin kerroksen energiayhtälö, joka kirjoitettiin muotoon

$$c_{ps}\rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + q_{cmb} \rho_s A_s \exp\left| -\frac{E_s}{R_u T_s} \right|, \quad (28)$$

jossa c_{ps} on kiinteän aineen ominais­lämpö­kapasiteetti, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$,
 ρ_s on kiinteän aineen tiheys, kg m^{-3} ,
 T_s on kiinteän aineen lämpötila, K ,
 λ_s on kiinteän aineen lämmönjohtavuus, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$,
 q_{cmb} on polttoaineen palamislämpö, J kg^{-1} ,
 A_s on kokonaispalamisreaktion taajuustekijä, s^{-1} ,

R_u on yleinen kaasuvakio, $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$,

E_s on kokonaispalamisreaktion aktivaatioenergia, J mol^{-1} .

Yhtälön vasemman puolen termi kuvaa lämmön varastoitumista kiinteään aineeseen. Oikean puolen ensimmäinen termi mallintaa lämmön siirtymistä ja toinen termi palamisessa syntyvää reaktioenergiavirtaa kerroksessa. Partikkelikerroksen sisäisessä lämmönsiirrossa ei otettu huomioon lainkaan konvektiota eikä säteilyä. Tutkimuksessa oli kuitenkin kysymyksessä itsesyttymistapaus, jossa ei esiinny pakotettua konvektiota eikä ulkopuolista säteilyä, jolloin johtuminen lienee merkittävin lämmönsiirtotapa kerroksessa ennen syttymistä. Luonnollisella konvektiolla voi olla jotain vaikutusta lämmönsiirtoon.

Gortin väitöskirjassa, /16/, tutkitaan teoreettisesti ja kokeellisesti syttymisrintaman etenemistä partikkelikerroksissa, erityisesti arinapolttoon vastaavissa puupartikkeli, koksi- ja yhdyskuntajätekerroksissa. Tutkimuksessa mallinnetaan kerrosta, jossa ilma tulee alhaalta päin ja syttymisrintama etenee ylhäältä alas päin. Lämmön johtumista kerroksen aksiaalisessa suunnassa mallinnetaan ns. tehollisen lämmönjohtavuuden avulla. Tämä tehollinen lämmönjohtavuus lasketaan alunperin Schündlerin kokeellisesti määrittämällä yhtälöllä

$$\lambda_{eff} = \lambda_{stg} + 0,8v_{sf}(\rho_g c_{p,g})d_p, \quad (29)$$

jossa λ_{stg} on lämmönsiirtokerroin kerroksessa, jossa ei ole virtausta,

$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ja

v_{sf} keskimääräinen (superficial) virtausnopeus tyhjässä koelaitteessa laskettuna (ei partikkeleita), m s^{-1} .

Stagnaatiotilan lämmönsiirtokerroin λ_{stg} voidaan määrittellä Zehnerin (1973) ja Bauerin (1977) kokeellisen tutkimuksen avulla saamalla yhtälöillä. Niissä tekijöinä ovat kaasun ja partikkelin lämmönjohtavuus, kerroksen huokoisuus, partikkelin emissiivisyys, partikkelin halkaisija, partikkelin muotokerroin ja lämpötila. Yhtälöiden avulla otetaan siis huomioon johtuminen partikkeleissa

ja kaasussa sekä säteily partikkeleiden välillä. Gortin tutkimuksessa λ_{stg} oletetaan kuitenkin vakioksi, koska virtauksesta johtuva lämmönsiirto on tämän tutkimuksen mukaan merkittävästi suurempi kuin lämmönsiirto virtauksettomassa pedissä. Kaasuvirtauksesta aiheutuva lämmönsiirron lisäys ei kuitenkaan aiheudu konvektiosta, koska ilma ja syttymisrintama etenevät vastakkaisiin suuntiin. Säteilylämmönsiirto partikkeleiden välillä on varmasti merkittävä lämmönsiirtymistapa. Virtauksen kasvu nopeuttaa liekkirintaman etenemistä, koska hapen konsentraatio reaktiovyöhykkeellä kasvaa ilman massavirran kasvaessa. Reaktiovyöhykkeen etenemisnopeus kasvaa ilmapvirran kasvaessa kunnes ylitetään optimaalinen happipitoisuus palamisalueella. Tätä suuremmat ilmapvirtaukset jäädyttävät reaktiovyöhykettä, mikä pienentää liekkirintaman etenemisnopeutta.

4.4.2.3 Konvektiivinen lämmönsiirto

Konvektiivinen lämmönsiirto eli lämmön kuljettuminen on merkittävintä partikkelikerroksen ja ilman sekä partikkelikerroksen ja savukaasun tai pyrolyysikaasujen välillä. Kylmänä syötetty ilma jäädyttää partikkeleita. Esilämmitetty ilma voi tehostaa kerroksen lämpiämistä. Pyrolyysikaasut ja palamiskaasut lämmittävät partikkeleita siinä osassa kerrosta, jonka läpi ne kulkevat. Konvektiivisena lämmönsiirtona voidaan pitää myös höyrystyneen veden ja pyrolyysikaasujen mukana partikkelista kulkeutuvaa lämpöä. Joissakin lähteissä esitetään vielä erillisenä käsitteenä lämmönsiirto suorasta liekkikontaktista, joka sisältää säteilylämmönsiirtoa ja konvektiivista lämmönsiirtoa. Konvektiivinen lämpövirta kaasusta pinnalle pinta-alayksikköä kohti voidaan esittää Newtonin jäähtymislain mukaan yhtälöllä

$$\Phi''_{cv} = \alpha(T_g - T_s), \quad (30)$$

jossa α on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$,

T_g on kaasun lämpötila, K ja

T_s on pinnan lämpötila, K.

Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen suuruus riippuu virtauksen nopeudesta ja turbulentsisuudesta sekä virtaavan aineen ja pinnan ominaisuuksista. Pakotetun konvektion lämmönsiirtokerroin määritellään usein Nusseltin luvun, Nu , funktiona seuraavasti:

$$\alpha = \frac{NuL}{\lambda_f} \quad (31)$$

Yhtälössä

L on pinnan karakteristinen pituus virtaussuunnassa, m ja
 λ_f on pinnan yli virtaavan kaasun lämmönjohtavuus filmilämpötilassa, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$.

Filmilämpötila tarkoittaa pinnan ja kaukana pinnasta kulkevan virtauksen keskimääräistä lämpötilaa. Nusseltin luku voidaan laskea erilaisissa virtaustapauksissa eri yhtälöillä, jotka on määritelty analyttisesti tai empiirisesti. Nusseltin luvun muuttujina ovat yleensä Reynoldsin luku, Re , ja Prandtlin luku, Pr . Reynoldsin luku kuvaa virtauksen hitausvoimien suhdetta viskoosivoimiin ja sen määritelmä on

$$Re = \frac{vL\rho}{\eta}. \quad (32)$$

Yhtälössä

v on virtaavan aineen virtausnopeus, $m\ s^{-1}$,
 ρ on virtaavan aineen tiheys, $kg\ m^{-3}$ ja
 η on virtaavan aineen dynaaminen viskositeetti, $kg\ m^{-1}\ s^{-1}$.

Prandtlin luku riippuu ainoastaan virtaavan aineen ominaisuuksista. Se on määritelty yhtälöllä

$$\text{Pr} = \frac{\eta c_p}{\lambda}, \quad (33)$$

jossa c_p on virtaavan aineen ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Nusseltin luku on määritelty Reynoldsin ja Prandtlin lukujen funktiona useille eri virtaustapauksille ja eri Reynoldsin ja Prandtlin luvun alueille. Nusseltin luvun yhtälö esitetään usein muodossa

$$Nu = k_{Nu} \text{Re}^k \text{Pr}^j, \quad (34)$$

jossa kyseiselle tapaukselle

k_{Nu} on Nusseltin luvun korrelaation vakiokerroin,

k on Reynoldsin luvun vakioeksponentti ja

j on Prandtlin luvun vakioeksponentti.

Nusseltin luvun laskennassa kaikki aineominaisuudet määritellään yleensä filmilämpötilassa tai virtauksen keskimääräisessä lämpötilassa. Tämä on yksinkertaistus, koska todellisuudessa lämpötilan muuttuminen pinnan lämpötilasta kaukana virtaavan aineen lämpötilaan vaikuttaa lämmönsiirtoon. Nusseltin luku vaihtelee partikkelikerroksessa paikallisesti, koska virtausnopeus, lämpötila ja virtaavan aineen koostumus muuttuvat paikan mukana. Nusseltin luku voidaanakin määrittää paikallisena pienellä alueella tai vaihtoehtoisesti keskimääräisenä, jolloin se lasketaan integroimalla tietyn pituuden, pinnan tai tilavuuden yli.

Grafin tutkimuksessa, [17], on arvioitu konvektiivista lämmönsiirtokerrointa hiilipartikkelien arinapoltossa seuraavalla Nusseltin luvun korrelaatiolla

$$Nu = \frac{\alpha d_p}{\lambda_f} = 0,33 \left| \frac{d_p \rho_a \mu_a}{\eta_f} \right|. \quad (35)$$

Yhtälössä

d_p on pallomaiseksi oletetun hiilipartikkelin halkaisija, m ja

\dot{m}''_g on ilman massavirta partikkelikerroksen poikki-pinta-alaa kohti, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Konvektiivisen lämmönsiirron osuus on oletettu joissakin tutkimuksissa pieneksi ja jätetty ottamatta huomioon. Esimerkiksi monissa maastopalo-ovellutuksiin tehdyissä malleissa savukaasujen ei oleteta lämmittävän syttymätöntä kerrosta, jolloin konvektiivinen lämmönsiirto on mahdollista olettaa pieneksi. Dominoiva lämmönsiirtotapa on näissä malleissa säteilylämmönsiirto. Tällainen palamisen etenemismalli on esitetty mm. Weberin tutkimuksessa, /51/, ja Albinin julkaisussa /1/. Pinnan syttymistutkimuksista konvektiivinen lämmönsiirtokerroin on jätetty ottamatta huomioon esimerkiksi lähteessä /43/.

Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin voidaan joskus olettaa vakioksi. Tällaista oletusta on käytetty mm. joissakin pinnan syttymistutkimuksissa, joissa virtaus pinnan yli syntyy lämpötilaeron aiheuttamasta nosteesta. Tällöin konvektiivinen lämmönsiirto ei ole kovin suuri osatekijä. Weatherfordin ja Sheppardin tutkimuksessa, /50/, on käytetty konvektiiviselle lämmönsiirtokertoimelle kuivan selluloosapitoisen levyn pinnalla noin arvoa $18 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Moghtaderin ja hänen kumppaneidensa tutkimuksissa, lähteissä /30/ ja /31/, on käytetty kostean puulevyn pinnalle konvektiivisia lämmönsiirtokertoimia 15 ja $11 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Albini on ottanut konvektiivisen jäähtymisen huomioon lähteen /1/ tutkimusta täydentävässä tutkimuksessaan, /2/. Tässä tutkimuksessa Nusseltin luku havupuiden lehvästöissä ja ruohikossa oletetaan vakioksi, jonka arvona käytetään lukua $0,35$. Nusseltin luvun vakio-oletuksella saadaan eri suuruisia konvektiivisen lämmönsiirron kertoimia erisuuruisille partikkeleille. Tässä esimerkissä partikkelit oletetaan sylintereiksi, jolloin neulasten ja ruohonkorsien halkaisija vaikuttaa konvektiiviseen lämmönsiirtokertoimeen.

Lähteessä /10/ on oletettu vapaa konvektio partikkelikerroksessa liekin lähellä verrannolliseksi palamislämpöön. Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin esitetään tutkimuksessa yhtälöllä

$$\alpha = 4,4 \cdot 10^{-7} q_{cmb}^{1,08}, \quad (36)$$

jossa α saadaan yksikössä $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ja q_{cmb} esitetään yksikössä kJ kg^{-1} .

Useissa maastopalojen etenemistä koskevissa tutkimuksissa on käytetty Rothermelin, /34/, kehittämää mallinnustapaa. Sitä on käytetty mm. aiemmin mainitussa Catchpolen tutkimuksessa, /7/. Tässä mallissa syttymisrintaman nopeus lasketaan kerroksen pinta-alayksikköä kohti absorboituvan lämpövirran ja kerrostilavuusyksikön syttymiseen tarvittavan energian suhteena. Tämän ajatuksen lienee esittänyt alunperin Frandsen lähteessä /11/, jossa ei kuitenkaan otettu huomioon konvektiivista lämmönsiirtoa. Rothermelin mallissa ilmapirtauksen aiheuttama konvektiivinen jäähditys otetaan huomioon tuulen nopeuden huomioon ottavalla kertoimella. Tällä kertoimella, lisättyä yhdellä, kerrotaan tuulettomassa tilassa määritettyä palamisen etenemisvuon arvoa. Kerroin määritellään kokeellisesti. Rothermelin tutkimuksessa virtauskertoimeen vaikuttavia tekijöitä olivat ilman virtausnopeuden lisäksi partikkelien pinta-alan ja tilavuuden suhde sekä kerroksen kiinteän aineen tilavuuden suhde koko kerroksen tilavuuteen.

4.4.2.4 Säteilylämmönsiirto

Lämpösäteily on sähkömagneettista aaltoliikettä, jonka etenemiseen ei tarvita väliainetta. Lämpösäteily voidaan joissakin tapauksissa tai matemaattisissa käsittelyissä tulkita myös massattomien energiapakettien eli kvanttien etenemiseksi. Tätä kaksijakoista säteilyn tulkintaa sanotaan aalto-hiukkas-dualismiksi, jonka tarpeellisuus on osoitettu mm. Einsteinin suhteellisuusteorialla ja myöhemmin tehdyillä kokeellisilla tutkimuksilla, jotka liittyvät valon etenemiseen avaruudessa. Säteily käsitellään sähkömagneettisena aaltoliikkeenä yleensä silloin, kun lasketaan sen etenemistä ja tietyn säteilylähteen emittoiman säteilyn intensiteettiä jollekin pinnalle. Kvanttiteoriaa voidaan käyttää molekyylylasoisissa säteilyn absorboitumis-, emittoitumis- ja sirontatarkasteluissa. Lämmönsiirtoilmiöissä riittää yleensä sähkömagneettisen aaltoliikkeen teorioihin perustuva laskenta.

Lämpösäteilyn absorboituminen ja emittoituminen pinnoille ja väliaineisiin johtuu tosin kvanttimekaniikalla selitettävistä ilmiöistä, mutta niitäkin tarkastellaan säteilyn aallonpituuteen liittyvien materiaaliominaisuuksien sekä absorptio-, emissio- ja heijastumisspektrien avulla.

Kaikki aineet, jotka ovat äärellisessä lämpötilassa, emittoivat lämpösäteilyä ympäristöönsä. Kaikki kiinteät kappaleet ja pinnat emittoivat lämpösäteilyä, jonka voimakkuus on riippuvainen niiden lämpötilasta ja pinnan ominaisuuksista. Kaasuista ja nesteistä kaikki aineet eivät emittoi lämpösäteilyä merkittävästi. Lämpösäteily on säteilyä, jonka mukana siirtyy merkittävästi lämpöenergiaa. Säteily aiheutuu molekyylien energiatilojen muutoksista, joissa kemiallisiin sidoksiin vapautunutta energiaa vapautuu säteilykvantteina ympäristöön. Molekyyleillä on kemiallisiin sidoksiin sitoutuneen sisäenergian lisäksi kolmenlaista liike-energiaa: translaatioenergiaa, joka johtuu molekyylin kimpoilemisesta paikasta toiseen; rotaatioenergiaa, joka aiheutuu molekyylin pyörimisestä akselinsa suhteen eri suuntiin sekä värähtelyenergiaa, joka johtuu molekyylin eri atomien välisestä värähtelystä. Nämä energiat, lukuunottamatta translaatioenergiaa, ovat kvantittuneet eli porrastuneet tietyn suuruiseksi energiaeroiksi eri tilojen välillä. Molekyylien energiatilojen muutokset voivat olla kemiallisten sidosten energioiden muutoksia ionisoitumisen tai elektronien valenssin muuttumisen seurauksena sekä liike-energian muutoksia molekyylin rotaatiotilojen välillä, värähtelytilojen välillä tai rotaatio ja värähtelytilojen välillä. Suurimmat energiatilan muutokset tapahtuvat ionisoitumisessa ja elektronin siirtymisessä valenssivyöltä toiselle. Ionisoitumista tapahtuu yleensä vain hyvin korkeissa lämpötiloissa (tuhansia kelvineitä) ja elektronien siirtymisetkin ovat suhteellisen harvinaisia. Niinpä värähtely- ja rotaatiotilojen muutokset aiheuttavat suurimman osan lämpösäteilyn absorboitumisesta ja emittoitumisesta kaasuissa. Näiden tilojen väliset energiaerot ovat sitä suurempia, mitä suurempia ja epäsymmetrisempiä molekyylit ovat. Tämän vuoksi esimerkiksi typpi- ja happimolekyylit eivät emittoi tai absorboi merkittävästi lämpösäteilyä. On havaittu, että kolmiatomiset ja sitä suuremmat epäsymmetriset kaasu- ja nestemolekyylit emittoivat ja absorboivat lämpösäteilyä merkittävästi. Etenkin palamisolosuhteissa, joissa lämpötilat

ovat korkeita, tällaisten kaasujen absorptio- ja emissiovaikutus ovat melko suuria. Palamiskaasuista tärkeimmät lämpösäteilyyn vaikuttavat aineet ovat hiilidioksidi ja vesihöyry. Pyrolyysikaasut voivat sisältää hyvin monia erilaisia tervayhdisteitä ja muita suurimolekyylisiä kaasuja, joilla on merkitystä lämpösäteilyn absorptiossa ja emissiossa. Palamiskaasujen mukana kulkee yleensä myös kiinteitä noki- ja tuhahiukkasia, jotka lisäävät virtaavan aineen lämpösäteilyn absorptiota ja emissiota huomattavasti.

Idealisesti säteilevän aineen emittoima lämpövirran tiheys voidaan esittää Stefan-Boltzmannin lain mukaisesti yhtälöllä

$$\Phi''_{rad} = \sigma T^4, \quad (37)$$

jossa σ on Stefan-Boltzmannin vakio = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ja
 T on aineen lämpötila, K.

Tämä yhtälö kuvaa niin sanotun mustan kappaleen emittoimaa säteilyä, joka on suurin säteilylämpövirran tiheys, jonka kappale voi emittoida. Musta kappale tarkoittaa kappaletta, joka emittoi täydellisesti lämpösäteilyä ja absorboi kaiken siihen tulevan säteilyn riippumatta säteilyn aallonpituudesta tai tulosuunnasta. Mustan kappaleen emittoiman säteilyn intensiteetti riippuu lämpötilasta ja aallonpituudesta, mutta se on riippumaton emittointisuunnasta.

Useimmat aineet tai pinnat eivät ole säteilyominaisuuksiltaan mustia. Ne eivät absorboi kaikkea pinnalle tulevaa säteilyä. Osa säteilystä voi heijastua pinnasta tai kulkea aineen läpi. Tavallisten aineiden absorboiman säteilyn osuus tulevasta säteilystä voi riippua myös säteilyn tulokulmasta. Säteilyominaisuuksiltaan harmaa pinta absorboi vain osan siihen tulevasta säteilystä, mutta sen absorptiosuhde ei riipu säteilyn tulokulmasta. Samat oletukset koskevat harmaan pinnan emittoimaa säteilyä. Harmaan kappaleen emittoimaa säteilylämpövirran tiheyttä voidaan kuvata yhtälöllä

$$\Phi'' = \varepsilon \sigma T^4, \quad (38)$$

jossa ϵ on pinnan emissiivisyys, joka tarkoittaa pinnan emittoiman säteilylämpövirran suhdetta mustan kappaleen emittoimaan säteilylämpövirtaan.

Pinnat emittoivat säteilyä, mutta niille myös tulee säteilyä ympäristöstä, esimerkiksi suljetussa tilassa seinämiltä tai ulkotilassa avaruudesta. Harmaan pinnan ympäristöönsä emittoma nettosäteilylämpövirran tiheys voidaan laskea yhtälöllä

$$\Phi'' = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_0^4). \quad (39)$$

Yhtälössä

T_s on pinnan lämpötila, K ja

T_0 ympäristön tai ympäröivän pinnan lämpötila, K.

Pinnalta A_i pinnalle A_j tulevan lämpösäteilyn intensiteetti, eli säteilylämpövirta pinta-alayksikköä kohti, on harvoin yhtä suuri kuin säteilylähteen, eli pinnan A_i , emittoima säteilyn intensiteetti. Pinnalle tulee enintään emittoivalta pinnalta kohdepinnalle projisoitu osuus lähtevästä säteilystä, joten tulevan säteilyn intensiteetti voi olla huomattavasti pienempi kuin lähetetty säteilylämpövirran tiheys. Pinnalta S_i pinnalle S_j saapuvaa säteilyintensiteetin osuutta voidaan kuvata niin sanotulla näkyvyyskertoimella F_{ij} . Näkyvyyskertoimen suuruus riippuu pintojen asennosta toisiinsa nähden ja niiden välisestä etäisyydestä.

Säteilyn absorptiota ja emissiota kaasuisissa otetaan harvoissa syttymismalleissa tai syttymisrintaman etenemismalleissa huomioon. Varsinaisissa kaasufaasin palamismalleissa kaasusäteilyn laskenta on merkittävä osa mallia. Hiilidioksidin ja vesihöyryn oletetaan yleensä olevan ainoita kaasuja, jotka absorboivat ja emittoivat lämpösäteilyä merkittävästi. Emissiivisyyksien ja absorptiosuhteiden laskentaan käytetään näiden osakaasujen osapaineita ja kyseessä olevan laskentatilan säteilypituutta sekä kokonaispainetta. Partikkelikerroksen syttymistilanteessa säteilyä absorboivia ja emittoivia kaasuja voi olla paljon enemmän kuin normaalissa kattilasäteilyssä. Pyrolyysikaasuissa on hyvin monia molekyyliä, joissa on kolme tai useampia atomeja. Lämpötilatasot ovat tosin alhaisia, jolloin säteilylämmönsiirron

vaikutukset oletetaan yleensä pieniksi. Yksi esimerkki tutkimuksesta, jossa kaasun säteilyvaikutukset on otettu huomioon, on lähde /5/. Siinä on mallinnettu polymetyylimetakrylaattipinnan (PMMA) syttymistä. Tutkimus liittyy rakettipolttoaineisiin. Tutkimuksessa on kokeiltu erisuuria vakioemissiivisyyksiä pyrolysoituneille kaasuille. Emissiivisyyden kasvu lyhensi selvästi syttymisaikaa. Pyrolyysikaasun absorptiovakio laskettiin yhtälöllä

$$\psi_g = 3(\rho_f \cdot m)^{-1}, \quad (40)$$

jossa ψ_g on absorptiokerroin (kerroksen pinta-alamassaa kohti absorboitunut säteily pinnalle tulleesta säteilystä), $m^2 \text{ kg}^{-1}$,
 ρ_f on pyrolyysikaasun keskimääräinen tiheys kaasumaisella alueella kyseisenä hetkenä, kg m^{-3} ja
 m tarkoittaa yksikköä metri.

Frandsenin tutkimuksessa, /11/, on otettu säteilylämmönsiirto partikkelikerroksessa huomioon. Syttymisrintamasta palamattoman kerroksen osan tietyn kontrollitilavuuden pinnalle tuleva säteilylämpövirran tiheys lasketaan yhtälöllä

$$\Phi_r'' = \varepsilon \sigma T_{cmb}^4 \exp(\kappa l), \quad \text{kun } -\infty < l < 0. \quad (41)$$

Yhtälössä

ε on syttyneen pinnan emissiviteetti, -,
 T_{cmb} on syttymisrintaman lämpötila, K,
 κ on absorptiovakio (kerroksen pituusyksikköä kohti absorboitunut säteily tulleesta säteilystä), m^{-1} ja
 l on kontrollitilavuuden etäisyys syttymisrintamasta rintaman normaalin suunnassa, m.

Säteilyn vaikutus ei yllä kerroksessa pitkän matkan päähän. Tätä kuvataan eksponenttifunktiolla, jossa eksponentti on negatiivinen. Etäisyys on määritelty

negatiiviseksi palamattoman polttoainekerroksen suuntaan. Koordinaatisto on kiinnitetty syttymisrintamaan. Kun säteilyintensiteettiä tarvitsee tarkastella vain lähellä syttymisrintamaa, on rintamaa voitu olettaa tarkastelutilavuuteen nähden äärettömän laajaksi. Sen vuoksi näkyvyyskerrointa ei ole tarvinnut määrittää. Säteilyintensiteetin pieneneminen johtuu siis vain säteilyn absorboitumisesta kerrokseen.

Mayersin ja Landaun, /26/, alasyöttöisen polttoainekerroksen syttymismallissa lämmönsiirtoa kerroksessa kuvataan määrittämällä kerrokselle lämmönjohtavuutta vastaava ominaisuus, joka aiheutuu säteilylämmönsiirrosta partikkeleiden välillä ja konvektiosta partikkeleiden ja virtauksen välillä. Lämmönsiirtoa voidaan käsitellä tällöin matemaattisesti samalla tavalla kuin lämmönjohtumista. Sekä säteilyn että konvektion oletetaan olevan verrannollisia vain kerroksen läpi menevään kaasuvirtauksen tiheyteen. Virtauksen kasvu pienentää säteilyn osuutta kokonaislämmönsiirrosta. Lämmönsiirtoyhtälö on saatu kokeellisia tuloksia sovittamalla. Kokonaislämmönsiirtokerroin partikkelikerroksessa, α_{kok} [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$], lasketaan SI-yksiköihin muunnetulla yhtälöllä

$$\alpha_{kok} = \frac{2045}{1 - \frac{0,0773}{n\mathcal{L}'}} + 9760n\mathcal{L}'^{0,7}, \quad (42)$$

jossa oikean puolen ensimmäinen termi kuvaa säteilyn osuutta ja toinen termi konvektion osuutta lämmönsiirrosta. Matemaattisesti yhtälöä ei voida käyttää kuin $0,0773 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ suuremmilla massavirran tiheyksillä. Yhtälöstä saadaan käyrä, jossa lämmönsiirtokerroinkasvaa hyvin jyrkästi, kun $n\mathcal{L}' < 0,197 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Yhtälön mukaan säteilylämmönsiirto kasvaisi kohti ääretöntä virtauksen pienentyessä. Näin ollen $0,2 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ on käytännössä minimivirtaustiheys yhtälön käytölle.

Lähteessä /55/ on mallinnettu syttymis- ja sammumisilmiötä koksikerroksessa. Mallissa otetaan säteilylämmönsiirto huomioon vain kerroksen pinnalla. Kerroksen sisällä tapahtuu vain lämmön johtumista ja konvektiota. Gortin väitöskirjassa, /16/, liekkirintaman etenemisen malli on tehty käytännössä

kokonaan ilman säteilylämmönsiirron huomioon ottamista. Lämpöhäviö kerroksen palavalta pinnalta on laskettu analogisesti konvektiivisen lämmönsiirron tapaukselle, mutta lämmönsiirtokertoimessa on otettu jollakin tavalla huomioon säteilylämmönsiirto. Kerroksessa lämmönsiirto lasketaan tehollisen lämmönjohtavuuden avulla. Sitä määritettäessä on huomattu myös säteilylämmönsiirron vaikutus lämmönsiirtymiseen virtauksettomassa pedissä, mutta tämä osa lämmönjohtavuudesta on kuitenkin määritetty vakioksi.

Alvares ja Martin, /3/, ovat tutkineet kokeellisesti säteilylämmönsiirrolla lämmitetyn selluloosalevyn itsesyttymisaikaa ja syttymisen pintalämpötilaa. Koetuloksia verrataan idealisoidulla mallilla laskettuihin tuloksiin. Syttymistä mallinnetaan kaasufaasissa tapahtuvana termisenä itsesyttymisenä. Kokeissa ja mallissa muunneltavia tekijöitä ovat kokonaispaine, hapen konsentraatio ja eri laimentimien konsentraatiot (helium, hiilidioksidi, typpi). Mallissa lasketaan kaasu-kiinteä-rajapinnan lämpötila ajan, t , ja säteilyvuon, Φ'' , funktiona yhtälöllä

$$T(t) = T_0 + \left| \frac{2b}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{\Phi'' \sqrt{t}}{\sqrt{\lambda \rho c}} \right] \right|, \quad (43)$$

jossa b on vakio, joka valitaan siten, että kokeellinen syttymislämpötila ilmassa (600 °C) toteutuu. Lämpöhäviöt kuvataan yhtälöllä $\Phi_{los} = \alpha_a (T - T_0)$, jossa α_a on keinotekoinen lämmönsiirtokerroin, T pinnan lämpötila ja T_0 nähtävästi ympäristön lämpötila. α_a määritetään osakaasujen lämmönjohtavuuksien ja massaosuuksien avulla.

4.4.3 Yhdisteiden siirtyminen

4.4.3.1 Yleistä

Yhdisteiden siirtoyhtälöitä käytetään jatkuvus- ja alkuaineyhtälöissä kuvaamaan tasetilojen rajoilla tapahtuvia aineiden siirtymisnopeuksia. Yhdisteiden siirtymisellä ei tarkoiteta aineiden siirtymistä virtauksen mukana. Yhdisteiden siirtyminen johtuu konsentraatioeroista ja sitä tapahtuu diffuusion

ja konvektion seurauksena. Diffuusio on puhtaasti konsentraatioeroista johtuvaa yhdisteiden siirtymistä. Yhdisteet siirtyvät molekyylien lämpöliikkeen seurauksena siihen suuntaan, missä kyseisen yhdisteen konsentraatio on pienempi. Konvektiivinen yhdisteiden siirtyminen on aineen kulkeutumista virtauksen mukana. Diffuusion teoria on analoginen lämmönjohtumisen teorian kanssa. Vastaavasti konvektiivista aineensiirtoa käsitellään analogisesti konvektiivisen lämmönsiirron kanssa. Yhdisteiden siirtymiseen vaikuttavat konsentraatioeron lisäksi lämmönsiirto ja reaktiot, ja yhdisteiden siirto puolestaan vaikuttaa lämmönsiirtoon ja reaktioihin. Tämän kappaleen yleisten teorioiden esittelyssä on käytetty apuna lähteitä /6/, /19/ ja /54/.

4.4.3.2 Yhdisteiden siirto diffuusiolla

Yhdisteen A diffundoituvan ainemäärävirran tiheys yhdisteiden A ja B seoksessa voidaan esittää Fickin lailla

$$N_A'' = -\frac{C}{1-x_A} D_{AB} \nabla x_A. \quad (44)$$

Yhtälössä

N_A'' on yhdisteen A ainemäärävirran tiheys, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,

C on seoksen konsentraatio, mol m^{-3} ,

x_A yhdisteen A mooliosuus seoksessa, - ja

D_{AB} yhdisteen A binaarinen diffuusiokerroin A :n ja B :n seoksessa, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

Useissa reaktioitakin sisältävissä yhdisteiden siirtotapauksissa kokonaiskonsentraatio ei muutu merkittävästi diffundoituvan yhdisteen konsentraation muuttuessa, jolloin Fickin laki voidaan kirjoittaa yleisesti käytettyyn muotoon

$$N_A' = -D_{AB} \nabla C_A, \quad (45)$$

jossa C_A on yhdisteen A konsentraatio, mol m⁻³.

Edellinen yhtälö voidaan kirjoittaa kokonaiskonsentraation vakiotapauksessa muotoon

$$N_A' = -CD_{AB} \nabla x_A \quad (46)$$

ja diffundoituva massavirran tiheys voidaan kirjoittaa vakioitiheyden tapauksessa muotoon

$$m_{mA}' = -\rho D_{AB} \nabla w_A, \quad (47)$$

jossa w_A on yhdisteen A massaosuus seoksessa, - .

Edellä esitetyt yhtälöt pätevät kahden reagoimattoman yhdisteen perustapauksiin. Useiden komponenttien ja reagoivien virtausten diffuusioyhtälöt ovat monimutkaisempia, mutta niitä ei käydä tässä läpi. Diffuusion liittyy myös dispersio, joka ei aiheudu pelkästä diffuusiosta vaan se sisältää myös nopeuseroista ja pyörteilystä aiheutuvan sekoittumisen. Dispersioyhtälö on saman muotoinen kuin diffuusioyhtälö, mutta diffuusiovakion tilalla käytetään dispersiovakiota.

Partikkelikerroksen syttymisen ja liekkirintaman etenemisen mallinnuksessa käytetään diffuusiota useimmiten vain partikkelin sisällä sekä partikkelin ja virtauksen rajakerroksessa tapahtuvan yhdisteiden siirron kuvaamiseen. Tällöin diffuusion merkitys yhdisteiden siirtoon virtaavassa kaasussa oletetaan merkityksettömäksi verrattuna sekoittumiseen. Partikkelin sisällä diffundoituvat pääasiassa vesihöyry ja pyrolyysikaasut ulospäin sekä happi ja palamiskaasut sisäänpäin. Joissakin tutkimuksissa oletetaan, että aineensiirron vaikutus koko prosessin tai jonkun sen osan edistymisnopeuteen on

merkityksetön. Aineensiirto voi olla hyvin nopeaa, kun vesi ja pyrolyysikaasut purkautuvat partikkelin sisältä lämpötilan nopean kasvun aiheuttaman ylipaineen vuoksi. Tällöin pyrolyysin tai palamisen tai niiden molempien nopeus riippuu lämmönsiirrosta ja kemiallisesta kinetiikasta tai jommasta kummasta niistä. Kuivumisvaiheen nopeutta voi rajoittaa joko lämmönsiirto partikkeliin tai vesihöyryn diffundoituminen partikkelista ulos. Prosessin nopeuden riippumista yhdisteiden siirrosta tai lämmönsiirrosta voidaan tarkastella Lewisin luvun avulla. Lewisin luku kuvaa johtumalla ja yhdisteiden diffuusion mukana siirtyvien lämpövirtojen suhdetta ja se on määritelty yhtälöllä

$$Le = \frac{\lambda}{\rho c_p D_{AB}} = \frac{\alpha_{th}}{D_{AB}} = \frac{Sc}{Pr}, \quad (48)$$

jossa α_{th} on lämpötilan tasoittumiskerroin eli termien diffusiviteetti, $m^2 s^{-1}$ ja

Sc on Schmidtin luku, - .

Schmidtin luku kuvaa liikemäärän ja yhdisteiden diffuusion suhdetta ja se määritellään yhtälöllä

$$Sc = \frac{\eta}{\rho D_{AB}}. \quad (49)$$

Jos $Le \ll 1$, on energian siirtyminen diffundoituvien aineiden mukana huomattavasti nopeampaa kuin lämmönjohtuminen. Tällöin energian siirtyminen diffuusiiovirran mukana on dominoiva energiansiirtotapa. Vastaavasti, jos $Le \gg 1$, on lämmönjohtuminen dominoiva energiansiirtomuoto. Usein teoreettisissa palamistarkasteluissa oletetaan, että $Le = 1$, mikä pitää melko hyvin paikkansa monille kaasuille matalissa lämpötiloissa /21/.

Gortin reaktiorintaman etenemistä partikkelikerroksissa käsittelevässä väitöskirjassa, /16/, yhdisteiden siirtyminen diffuusiolla sisältyy

dispersiotermiin, jossa tehollinen aksiaalinen dispersiokerroin Δ lasketaan yhtälöllä

$$\Delta = \frac{v_{sf} d_p}{2}. \quad (50)$$

Yhtälössä

v_{sf} on virtausnopeus tyhjässä reaktorissa (superficial velocity),
m s⁻¹.

Tätä kerrointa käytetään jatkuvuusyhtälössä, kuten normaalisti käytetään diffuusiokerrointa. Yhdisteen A dispersiotermi jatkuvuusyhtälössä on

$$\frac{\partial}{\partial x} \left| \rho_g \Delta \frac{\partial w_A}{\partial x} \right|.$$

Frandsenin ja Rothermelin kehittämässä syttymisrintaman etenemisen mallintamistavassa ei oteta yhdisteiden siirtymistä huomioon lainkaan. Näissä malleissa lämmönsiirto oletetaan syttymisnopeutta rajoittavaksi tekijäksi. Lämmönsiirtoakin mallinnetaan usein hyvin empiirisillä termeillä ja kertoimilla. Tätä mallinnustapaa edustavat lähteet /1/, /2/, /7/, /11/, /24/, /34/ ja /51/.

Xien ja Liangin hiilipartikkelikerroksen syttymis- ja sammumismallissa, /55/, yhdisteiden säilymisyhtälö on määritetty kaasumaisille yhdisteille, joita mallissa ovat happi, hiilidioksidi ja häkä. Malli on kaksidimensionaalinen ja aksisymmetrinen. Yhdisteiden säilymisyhtälön diffuusiotermi on

$$\frac{\partial}{\partial y} \left| \varphi \rho_g D \frac{\partial w_i}{\partial y} \right| + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \varphi \rho_g D \frac{\partial w_i}{\partial r} \right).$$

Tässä φ on kaasun tilavuusosuus partikkelikerroksessa

r on radiaalinen koordinaatti, m.

Baekin ja Kimin pinnan syttymismallissa, /5/, mallinnetaan pyrolyysikaasujen ja hapen diffuusiota pyrolyysituotteiden ja hapen säilyvyysyhtälön termeillä

$$\rho_g D \frac{\partial^2 w_{vol}}{\partial x^2} \quad \text{ja} \quad \rho_g D \frac{\partial^2 w_o}{\partial x^2}.$$

Mallissa diffuusiokerroin oletetaan vakioksi ja yhtäsuureksi kaikille kaasumaisille yhdisteille.

4.4.3.3 Yhdisteiden siirto faasirajan yli

Faasirajalla, kuten partikkelin pinnalla, on yhdisteiden pitoisuudessa epäjatkuvuuskohta. Partikkelin sisällä yhdisteet siirtyvät diffuusiolla pintaan tai sisäosiin päin ja vastaavasti jatkuvassa faasissa yhdisteet siirtyvät diffuusiolla ja konvektiolla pintaa kohti tai siitä pois päin. Pintaan ei voi varastoitua yhdisteitä, joten pinnalle tuleva yhdisteiden nettovirtaus on aina yhtäsuuri kuin pinnalta lähtevä nettovirtaus. Kuva 25 havainnollistaa yhdisteen A siirtymistä faasista g faasirajapinnan b yli faasiin q sekä yhdisteen A moolitiheyttä N_A'' eri faaseissa ja faasirajalla.

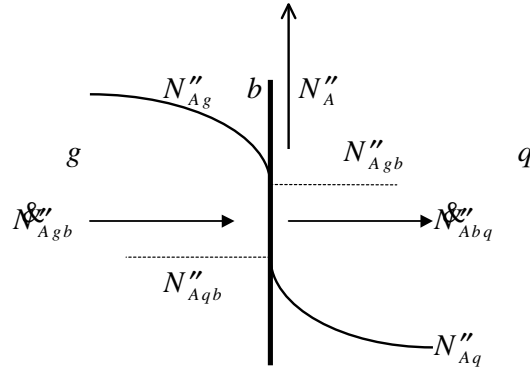
Kuvan ainemäärävirtaukset voidaan esittää yhtälöllä

$$N_{Agb}'' = N_{Agq}'' = N_{Abq}'' \quad (51)$$

jossa N_{Agb}'' on yhdisteen A moolivirta pinta-alayksikköä kohti faasissa g rajapinnalle b , $\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$,

N_{Agq}'' on yhdisteen A moolivirta pinta-alayksikköä kohti faasista g faasiin q , $\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ja

N_{Abq}'' on yhdisteen A moolivirta pinta-alayksikköä kohti rajapinnalta b faasiin q , $\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$.



Kuva 25. Yhdisteen A siirtyminen faasirajan yli.

Moolitiheydet faasirajalla riippuvat vain paikallisesta termodynaamisesta tilasta. Yhdisteen siirtonopeus faasista toiseen voidaan esittää myös moolitiheyksien avulla yhtälöllä

$$N''_{Agq} = N'''_{Ag} K_{Agq} - N'''_{Aq} K_{Aqg} = -N''_{Aqg}, \quad (52)$$

jossa N'''_{Ag} on yhdisteen A moolitiheys faasissa g, mol m⁻³,

K_{Agq} yhdisteen A yhdisteensiirtokerroin faasista g faasiin q faasirajalla b, m s⁻¹,

N'''_{Aq} yhdisteen A moolitiheys faasissa q, mol m⁻³,

K_{Aqg} yhdisteen A yhdisteensiirtokerroin faasista q faasiin g faasirajalla b, m s⁻¹ ja

N''_{Aqg} yhdisteen A moolivirran tiheys faasista q faasiin g, mol m⁻² s⁻¹.

Yhdisteiden siirtymiskertoimiin vaikuttavat aineiden termodynaamiset ominaisuudet, lämpötila, paine, virtaukset ja kemialliset reaktiot. Moolitiheydet ajautuvat kohti termodynaamista ja kemiallista tasapainoa. Yhdisteiden nettovirtaukset loppuvat, kun tasapainotila saavutetaan riippumatta yhdisteiden siirtonopeuteen vaikuttavista tekijöistä. Tasapainotilaan vaikuttavat tilan lämpötila, paine ja alkuainekoostumus./35/

4.4.3.4 Yhdisteiden siirto konvektiolla

Konvektiivista yhdisteiden siirtoa tapahtuu partikkelikerrosten tapauksessa partikkelien ja virtaavan kaasun rajapinnalla. Pintaan diffundoituva vesihöyry ja pyrolyysiyhdisteet lähtevät pinnan ohi virtaavan kaasun mukaan. Pyrolyysiyhdisteet voivat tosin reagoida heti partikkelin pinnalla, jolloin muodostuu palamiskaasuja. Huokoisissa partikkeleissa vesihöyryn ja pyrolyysikaasujen siirtoa partikkelista ulospäin voidaan mallintaa diffuusion lisäksi tai sijasta yhdisteiden konvektiolla huokoskanavien pinnalta.

Kuten edellä mainittiin, yhdisteiden konvektiota käsitellään teoreettisesti analogisesti konvektiivisen lämmönsiirron kanssa. Konvektiivinen ainemäärävirta lasketaan siten yhtälöllä

$$\dot{N}^{\“} = \alpha_m (C_{As} - C_{A\infty}), \quad (53)$$

jossa α_m on konvektiivinen aineensiirtokerroin, m s^{-1} ,
 C_{As} on yhdisteen A konsentraatio pinnalla, mol m^{-3} ja
 $C_{A\infty}$ on yhdisteen A keskimääräinen konsentraatio ohi virtaavassa kaasussa, mol m^{-3} .

Konvektiivinen aineensiirtokerroin voidaan määrittää Sherwoodin luvun avulla, kuten konvektiivinen lämmönsiirtokerroin määritettiin Nusseltin luvun avulla. Sherwoodin luvun määritelmä on

$$Sh_L = \frac{\alpha_m L}{D_{AB}}, \quad (54)$$

jossa L on pinnan karakteristinen mitta, m.

Pinnan karakteristinen mitta tarkoittaa levyypinnalla levyn pituutta virtauksen suunnassa ja pallolla sen halkaisijaa. Partikkelien Sherwoodin lukua laskettaessa voidaan käyttää partikkelien hydraulista halkaisijaa, joka voidaan määrittellä esimerkiksi yhtälöllä

$$d_h = \frac{6V_p}{A_p}, \quad (55)$$

jossa V_p on partikkelin tilavuus, m^3 ja

A_p on partikkelin pinnan ala, m^2 .

Sherwoodin luvulle on tehty useita enimmäkseen empiirisiä yhtälöitä Reynoldsin ja Schmidtin lukujen funktiona. Yhtälöt ovat usein muotoa

$$Sh = k_{sh} Sc^k Re^j, \quad (56)$$

jossa k_{sh} on vakiokerroin,- ja

Sc on Schmidtin luku,-

Yhdisteiden siirtotapauksessa Schmidtin luku vastaa lämmönsiirtotapauksen Prandtin lukua. Sherwoodin luvun yhtälön vakiokerroin ja vakioeksponentit ovat erisuuria erilaisille pintageometrioidille ja erilaisille Schmidtin ja Reynoldsin lukualueille.

Gortin tutkimuksessa, /16/, on määritetty konvektiivinen massansiirtokerroin Sherwoodin luvun avulla

$$\alpha_m = \frac{Sh_p D_g}{d_p} \quad (57)$$

jossa, Sh_p on Sherwoodin luku partikkelille partikkelikerroksessa,- ,

D_g on siirtyvän yhdisteen diffuusiokerroin kaasutilassa, $m^2 s^{-1}$ ja

d_p on partikkelin halkaisija, m.

Sherwoodin luku lasketaan tutkimuksessa alunperin Thoenesin ja Kramersin saamista yhtälöillä

$$Sh = \frac{0,81}{\sqrt{\phi}} Re_p^{1/2} Sc^{1/3}, \quad \text{kun } 5 < Re < 500 \text{ ja} \quad (58)$$

$$Sh = 0,6 \left| \frac{Re^p}{\varphi} \right|^{0,57} Sc^{1/3}, \quad \text{kun } 50 < Re < 2000 \quad (59)$$

Massansiirtokerrointa ei käytetä suoraan kuvaamaan yhdisteiden siirtymistä taserajan yli, vaan sitä käytetään reaktionopeuden määrittämisessä yhtälöllä

$$R = \frac{1}{\frac{1}{B} + \frac{1}{\alpha_m}} s_{b0} w_k^{2/3} \rho_g w_i, \quad (60)$$

jossa B on Arrheniuksen reaktionopeusvakio, $m \text{ s}^{-1}$,
 s_{b0} on reagoimattoman kerroksen partikkelien pinta-alan suhde koko kerroksen tilavuuteen, m^{-1} ,
 w_k on reaktion kiinteän avainyhdisteen (yleensä C) massaosuus ja
 w_i on kaasufaasin avainyhdisteen (palamisreaktioissa O_2) massaosuus.

Samassa tutkimuksessa, [16], Lewisin luku määritellään kaasumaisessa ja kiinteässä faasissa tehollisen lämmönjohtumisen suhteena teholliseen dispersioon. Molemmista näistä tekijöistä on mukana konvektiivista vaikutusta. Tutkimuksessa on päätelty konvektion olevan dominoiva massansiirtotapa, kun $Le \gg 1$ ja diffuusion dominoiva massansiirtomuoto, kun Lewisin luku on luokkaa 1. Kiinteälle ja kaasumaiselle faasille on määritelty omat teholliset Lewisin lukunsa. Kiinteän faasin Le on määritetty koko faasille eikä yksittäiselle partikkelille. Koska partikkelikerroksen oletetaan pysyvän kiinteänä (ei ala leijua), partikkelit eivät sekoitu. Tästä päätellään, että kiinteässä faasissa ei tapahdu diffuusiota vaan yhdisteiden siirto tapahtuu konvektiolla. Konvektio taas voidaan selittää sillä, että tapauksessa on valittu syttymisrintaman mukana etenevä koordinaatisto. Tällöin kiinteä materiaali liikkuu koordinaatiston suhteen.

Gortin tutkimuksesta huomataan, että Lewisin luvun ja yleensäkin dimensiottomien lukujen määrittämistavalla voidaan vaikuttaa niiden

suuruuksiin ja siihen millaisia johtopäätöksiä niiden suuruudesta voidaan tehdä. Kiinteän faasin partikkeleiden käsittely yhtenä kokonaisuutena aiheuttaa aineominaisuuksien ja siirtonopeuksien keskimääräistyksiä ja joidenkin tekijöiden huomiotta jättämisistä. Tutkimuksessa kaikki lämmönsiirtokomponentit on kuvattu yhdellä tehollisella lämmönjohtavuudella sekä yhdisteiden siirron osatekijät tehollisella dispersiokertoimella ja konvektiivisella aineensiirtokertoimella. Mallista on jätetty pois säteilylämmönsiirron osuus ja partikkelien sisäinen diffuusio. Tämä ei voi olla aiheuttamatta epätarkkuutta malliin. Mallilla on kuitenkin saatu kohtalaisen hyviä tuloksia syttymisrintaman nopeuden ja lämpötilan laskennassa varsinkin puupolttoaineen tapauksessa. Koksikerroksen mallintamisessa tulokset olivat huomattavasti huonompia.

4.4.4 Reaktiokinetiikka

Reaktioiden nopeudet vaikuttavat osaltaan syttymis- ja palamistapahtuman etenemiseen. Reaktiot voidaan jakaa karkeasti pyrolyysireaktioihin ja palamisreaktioihin, jotka vastaavat jotakuinkin jakoa endotermisiin ja eksotermisiin reaktioihin. Osa pyrolyysireaktioista on kylläkin eksotermisiä, mutta kokonaisuudessaan pyrolysoitumisvaihe sitoo lämpöä. Reaktioiden etenemisnopeuteen vaikuttavat lämpötila, jossa reaktiot tapahtuvat, reagoivien aineiden konsentraatiot sekä katalyyttien ja inhibiittoreiden konsentraatiot. Katalyytit ovat yhdisteitä, jotka nopeuttavat reaktioita ja inhibiittorit hidastavat niitä, mutta kumpienkaan konsentraatio ei muutu reaktioissa. Reaktionopeus muuttuu, jos reagoivien aineiden konsentraatiot muuttuvat. Reaktionopeus on siis ajan funktio panos-tyyppisissä prosesseissa, joissa reagoivia aineita ei syötetä prosessiin lisää sitä mukaa, kun ne kuluvat. Tässä kappaleessa esiintyvien yleisesti tunnettujen ja tunnustettujen yhtälöiden ja asioiden kirjoittamisessa on käytetty apuna lähteitä /21/, /15/, /39/ ja /46/.

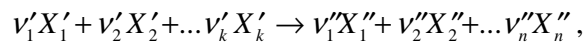
Reaktionopeus on verrannollinen reagointilämpötilaan niin sanotun reaktionopeusvakion kautta. Reaktionopeusvakio on Arrheniuksen lain mukaisesti

$$B = fAT^{n_A} \exp\left| -\frac{E}{R_u T} \right|, \quad (61)$$

- jossa B on reaktionopeusvakio, $(\text{mol m}^{-3})^{1-n} \text{ s}^{-1}$,
 f on reaktion ns. steerinen tekijä, -,
 A on reaktion taajuustekijä, $(\text{mol m}^{-3})^{1-n} \text{ s}^{-1}$,
 T on lämpötila, jossa reaktio tapahtuu, K,
 n_A on taajuustekijän lämpötilariippuvuuseksponentti, -,
 E on reaktion aktivaatioenergia, J mol^{-1} ,
 R_u on yleinen kaasuvakio $= 8,3143 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Reaktion taajuustekijä kuvaa reagoivien yhdisteiden törmäystodennäköisyyttä. Taajuustekijän yksikkö vaihtelee reaktion kertaluvusta riippuen siten, että reaktionopeuden yksiköksi tulee $\text{mol m}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Steerinen tekijä kuvaa sitä, millä todennäköisyydellä molekyylien törmäys tapahtuu sellaisessa molekyylien asennossa, jossa reaktio tapahtuu. Reaktiolämpötila korotettuna potenssiin n_A on määrittämässä taajuustekijän riippuvuutta lämpötilasta. Useimmissa malleissa taajuustekijän lämpötilariippuvuus oletetaan merkityksettömän pieneksi. Steerinen tekijä oletetaan useimmiten 1:ksi tai se sisällytetään suoraan taajuustekijään, joka on määritetty kokeellisesti. Reaktion aktivaatioenergia on kynnysenergia, jonka pitää törmäyksessä ylittyä reaktion tapahtumiseksi. Törmäävien molekyylien kineettisten energioiden pitää siis olla riittävän suuria, jotta aktivaatioenergia ylittyisi. Aktivaatioenergian ylittävät törmäykset ovat sitä todennäköisempiä mitä korkeammassa lämpötilassa reaktiot tapahtuvat. Eksponenttifunktiotermi kuvaa tätä todennäköisyyden kasvamista lämpötilan kasvaessa. Arrheniuksen yhtälön lämpötilariippuvuus on hyvin voimakas. Reaktionopeus tulee pieneksi pienissä lämpötiloissa, jolloin reaktiokinetiikka voi rajoittaa prosessin nopeutta. Juuri syttymishetkellä kemiallinen kinetiikka vaikuttaa ratkaisevasti prosessin nopeuteen, koska reagoivien aineiden lämpötila voi olla pieni. Myöhemmissä palamisen vaiheissa kemiallisen kinetiikan merkitys vähenee huomattavasti, koska reaktionopeus kasvaa suureksi lämpötilan kasvaessa. Pienillä partikkeleilla reaktiokinetiikka toimii usein palamisnopeutta rajoittavana tekijänä.

Reaktionopeusvakioiden ja taajuustekijän yksiköissä esiintyvä reaktion kertaluku on verrannollinen siihen, millaisella reagoivien aineiden konsentraatiosta riippuvalla laskennalla reaktionopeus voidaan määrittää kyseiselle reaktiolle. Reaktiot voidaan jakaa nollannen, ensimmäisen, toisen jne. kertaluvun reaktioihin sen mukaan, kuinka monen aineen konsentraatio vaikuttaa reaktionopeuteen. Reaktiossa



jossa v_i' ($i=1\dots k$) on reaktion lähtöaineyhdisteen stökiometrinen kerroin,
 X_i' ($i=1\dots k$) on reaktion lähtöaineyhdiste,
 v_j'' ($j=1\dots n$) on reaktion lopputuoteyhdisteen stökiometrinen kerroin,
 X_j'' ($j=1\dots n$) on reaktion lopputuoteyhdiste,

yhdisteen X_1' konsentraation muutosnopeus voidaan esittää yhtälöllä

$$r = -\frac{dC_{X_1'}}{dt} = B_X C_{X_1'}^{n_1} C_{X_2'}^{n_2} \dots C_{X_k'}^{n_k}, \quad (62)$$

jossa r on reaktionopeus, $\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$,
 B_X on kyseisen reaktion reaktionopeusvakio,
 $C_{X_1'} \dots C_{X_k'}$ ovat reaktion lähtöaineiden konsentraatioita, mol m^{-3} ja
 $n_1 \dots n_k$ ovat eksponentteja, joihin korotettuna konsentraatiot ovat verrannollisia reaktionopeuteen.

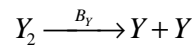
Konsentraatioiden eksponentit voivat olla teoreettisia tai kokeellisesti määritettyjä vakioita. Kutakin eksponenttia sanotaan reaktion kertaluvuksi kyseisen yhdisteen suhteen. Reaktioyhtälön kokonaiskertaluku on eksponenttien summa

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_k. \quad (63)$$

Nollannen kertaluvun reaktioksi sanotaan reaktiota, jonka nopeuteen reagoivien yhdisteiden konsentraatiot eivät vaikuta. Tällöin reaktionopeus on määritetty yhtälöllä

$$r = -\frac{dC_{X'}}{dt} = B_X. \quad (64)$$

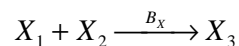
Ensimmäisen kertaluvun reaktiot voivat olla reaktioita, joissa yksi molekyyli hajoaa osiin esimerkiksi lämmön vaikutuksesta. Tällöin yleisimmin vain tämän hajoavan molekyylin konsentraatio vaikuttaa reaktionopeuteen. Useammankin yhdisteen välinen reaktio voi olla ensimmäistä kertalukua, jos vain yhden aineen konsentraatio vaikuttaa olennaisesti reaktionopeuteen. Tällainen käyttäytyminen voidaan havaita kokeellisesti. Toisen reagoivan yhdisteen konsentraatio voi joskus olla niin suuri, että voidaan päätellä sen muuttuvan merkityksettömän vähän reaktioiden aikana. Tällöin tämän yhdisteen konsentraatio voidaan sisällyttää reaktionopeusvakioon ja reaktiota voidaan pitää ensimmäisen kertaluvun reaktiona. Ensimmäisen kertaluvun reaktion reaktionopeus voidaan laskea hajoamisreaktiolle



yhtälöllä

$$r = \frac{dC_Y}{dt} = -2 \frac{dC_{Y_2}}{dt} = 2B_Y C_{Y_2}. \quad (65)$$

Vastaavasti, jos reaktioyhtälössä

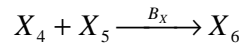


X_2 :n konsentraatio on paljon suurempi kuin X_1 :n konsentraatio, voidaan reaktionopeus laskea yhtälöllä

$$r = \frac{dC_{X_3}}{dt} = -\frac{dC_{X_1}}{dt} = B_X C_{X_1} C_{X_2} \cong B'_X C_{X_1}. \quad (66)$$

Yhtälössä B'_X on reaktionopeusvakio B_X kerrottuna vakiokonsentraatiolla C_{X_2} .

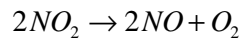
Toisen kertaluvun reaktioissa reaktionopeuteen vaikuttaa kaksi yhdistettä tai yksi yhdiste siten, että reaktionopeus on verrannollinen sen konsentraation toiseen potenssiin. Toisen kertaluvun reaktion



reaktionopeus voidaan esittää yhtälöllä

$$r = \frac{dC_{X_6}}{dt} = B_X C_{X_4} C_{X_5}. \quad (67)$$

Vastaavasti esimerkkinä voidaan esittää typpidioksidin hajoamisreaktion



reaktionopeus kokeellisesti havaitulla yhtälöllä

$$-\frac{dC_{NO_2}}{dt} = B_{NO_2} C_{NO_2}^2. \quad (68)$$

On olemassa kolmannen ja suuremmankin kertaluvun reaktioita, mutta ne ovat harvinaisia. Tämä johtuu siitä, että todennäköisyys törmäykseen useamman kuin kahden molekyylin kesken on pieni. Edellä esitetyt reaktionopeuden laskentayhtälöt on tehty reaktioyhtälöille, joiden oletetaan reagoivan vain yhteen suuntaan. Reaktionopeuden laskennassa voidaan ottaa huomioon myös pääreagointisuunnalle vastakkaiset reaktiot. Tällaista laskentaa ei kuitenkaan käsitellä tässä, koska yleensä syttymismalleissa ja liekkirintaman etenemismalleissa reaktionopeudet on laskettu olettaen reaktiot yksisuuntaisiksi.

Reaktionopeuksia on määritetty kokeellisesti yksittäisille elementaarireaktioille mutta myös kokonaisreaktioille. Kokonaisreaktioissa ei oteta huomioon, että reaktioiden pysyvät lopputuotteet muodostuvat yleensä useiden reaktioiden

kautta. Välivaihereaktioita voi olla hyvin paljon, jolloin niiden huomioon ottaminen laskennassa on työlästä ja vaikeaa. Tämän takia reaktionopeusvakioita on määritetty kokonaisreaktioille. Kokeellisia vakioita on määritetty jopa sellaisille reaktioille kuin puun, turpeen ja öljyn palaminen, joissa kokonaisreaktiotkin muodostuvat hyvin monien eri yhdisteiden palamisesta.

Pyrolyysin kinetiikka esitetään yleisimmin Arrhenius-tyyppisellä yhtälöllä, kuten edellä on esitetty. Pyrolysoituvan kiinteän aineen massanmuutos aikayksikössä tilavuusyksikköä kohti voidaan esittää yhtälöllä

$$-\frac{d\rho_s}{dt} = B_{pyr} (\rho_{s0} - \rho_{se})^n = A_{pyr} \exp\left[-\frac{E_{pyr}}{R_u T}\right] (\rho_{s0} - \rho_{se})^n, \quad (69)$$

jossa B_{pyr} on pyrolyysin Arrheniusvakio, $(\text{kg m}^{-3})^{1-n} \text{ s}^{-1}$,

ρ_{s0} pyrolysoituvan kiinteän aineen tiheys alkutilassa, kg m^{-3} ,

ρ_{se} jäännöshiilen tiheys pyrolyysin lopussa, kg m^{-3} ,

n pyrolyysireaktion kertaluku, -,

A_{pyr} pyrolyysin kokonaisreaktion kokeellisesti määritetty taajuustekijä, $(\text{kg m}^{-3})^{1-n} \text{ s}^{-1}$ ja

E_{pyr} pyrolyysin kokonaisreaktion kokeellisesti määritetty aktivaatioenergia, $\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Taajuustekijä ja aktivaatioenergia on yleensä määritetty kokeellisesti koko pyrolyysivaiheelle, vaikka se koostuu hyvin monista reaktioista, jotka tapahtuvat eri lämpötiloissa. Useimmissa tutkimuksissa kiinteän aineen tiheydet alku- ja lopputilassa on oletettu vakioiksi. Partikkelin oletetaan säilyttävän tilavuutensa, jolloin jäännöshiilen tiheys on suoraan verrannollinen pyrolysoituneiden haihtuvien aineiden määrään. Pyrolyysin aikana lämpötila muuttuu usein huomattavan paljon. Kiinteästä polttoaineesta pyrolysoituvien haihtuvien aineiden määrä kasvaa lämpötilan noustessa. Näin ollen jäännöshiilen odotettavissa oleva tiheys muuttuu lämpötilan muuttuessa. Jäännöshiilen tiheyden vakioksi oletettavan pyrolyysinopeuden mallin on

havaittu ennustavan reaktionopeuden liian suureksi korkeissa lämpötiloissa ja liian pieneksi matalissa lämpötiloissa. Tätä virhettä voidaan pienentää vaativammassa malleissa esittämällä kiinteän aineen lopputiheys pyrolyysin hetkellisen lämpötilan funktiona $\rho_{se} = \rho_{se}(T)$. Jäännöshiilen tiheys lämpötilan funktiona voidaan määrittellä kokeellisesti. /36/, /37/

Syttymismalleissa pyrolyysi on olennainen mallinnettava reaktioprosessi. Palamisreaktioiden osuus ennen lopullista syttymistä on havaittu pieneksi, minkä vuoksi palamista ei tarvitse ottaa huomioon ennen syttymistä. Syttymismalleissakin voidaan joutua laskemaan palamisreaktioiden nopeutta ja niistä tulevaa lämpövirtaa, jos syttymiseen tarvittava lämpö tulee liekistä. Palamisen etenemismalleissa tämä on normaalitilanne. Reaktionopeus voi toisaalta olla syttymistä rajoittava tekijä, jos ympäristön lämpötila on pieni tai partikkelit ovat pieniä. Pyrolyysiin kuluva lämpö on oletettu monissa malleissa merkityksettömän pieneksi. Tämä johtuu pyrolyysilämmön pienuudesta suhteessa palamislämpöön. Esimerkiksi lähteessä /50/ on käytetty puun pyrolyysilämpönä arvoa -360 kJ kg^{-1} . Puun kuiva-aineen alempi lämpöarvo on noin 19 MJ kg^{-1} , josta pyrolyysilämpö on alle 2 %. Puun pyrolyysin reaktiolämpö on veden höyrystymislämmöstä noin 16 %, joten sitä voidaan pitää melko pienenä. Esimerkiksi lähteissä /4/ ja /22/ pyrolyysilämpö on jätetty ottamatta huomioon.

Xien ja Liangin tutkimuksessa, /55/, on mallinnettu numeerisesti kiinteän hiilikerroksen syttymis- ja sammumiskäyttäytymistä. Tapaus mallinnetaan aksisymmetrisenä kaksidimensionaalisenä ja kaksifaasisena. Ilma virtaa kerroksen yläpinnalle kohtisuorasti pintaan nähden ja jakautuu siitä radiaalisesti pinnan suuntaiseksi virtaukseksi, eli kysymyksessä on niinsanottu patopistevirtaus. Virtaus ei siis tunkeudu kerroksen läpi. Kerroksessa voi olla happea, mutta se ei virtaa. Palaminen mallinnetaan neljällä kokonaisreaktiolla. Heterogeeniset kiinteän hiilen ja hapen sekä hiilidioksidin väliset reaktiot oletetaan seuraavanlaisiksi:





Homogeenisen kaasufaasissa tapahtuvan palamisen oletetaan tapahtuvan reaktiolla



Heterogeenisten reaktioiden I - III reaktionopeudet lasketaan yksisuuntaisen reaktioyhtälön ensimmäisen kertaluvun Arrhenius-tyyppisillä yhtälöillä

$$r_I = A_I \exp\left| -\frac{E_I}{R_u T} \right| \frac{\rho_g w_{O_2}}{M_{O_2}}, \quad (70)$$

$$r_{II} = A_{II} \exp\left| -\frac{E_{II}}{R_u T} \right| \frac{\rho_g w_{O_2}}{M_{O_2}} \text{ ja} \quad (71)$$

$$r_{III} = A_{III} \exp\left| -\frac{E_{III}}{R_u T} \right| \frac{\rho_g w_{CO_2}}{M_{CO_2}} \quad (72)$$

joissa alaindeksit I...III tarkoittavat kyseisellä luvulla numeroitua reaktiota,

r on reaktionopeus, mol m⁻³,

A on reaktion taajuustekijä,

E on reaktion aktivaatioenergia,

ρ_g on kaasun tiheys, kg m⁻³,

w_{O_2} on hapen massaosuus reagoivissa aineissa, -,

M_{O_2} on hapen moolimassa, kg mol⁻¹,

w_{CO_2} on hiilidioksidin massaosuus reagoivissa aineissa, - ja

M_{CO_2} on hiilidioksidin moolimassa, kg mol⁻¹.

Kaasufaasin reaktion reaktionopeus lasketaan mallissa Howardin (1973) esittämällä yhtälöllä

$$r_{IV} = A_{IV} \exp\left| -\frac{E_{IV}}{R_u T} \right| \left(\frac{\rho_g w_{O_2}}{M_{O_2}} \right)^{0,5} \left(\frac{\rho_g w_{CO}}{M_{CO}} \right) \left(\frac{\rho_g w_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right)^{0,5}, \quad (73)$$

jossa w_{CO} on hiilimonoksidin massaosuus hiilipartikkelin rajakerroksessa,
 M_{CO} on hiilimonoksidin moolimassa, kg mol^{-1} ,
 w_{H_2O} on vesihöyryn massaosuus rajakerroksessa, -, ja
 M_{H_2O} on vesihöyryn moolimassa, kg mol^{-1} .

Yhtälössä on käytetty yhtenä tekijänä vesihöyryn konsentraatiota, mikä johtuu vety- ja happiradikaalien vaikutuksesta reaktionopeuteen. Tällöin vesihöyryn konsentraatio vaikuttaa reaktionopeuteen.

Laskennassa käytetyt reaktiokineettiset vakioarvot, taajuustekijä, aktivaatioenergia ja molaarinen reaktioentalpia, esitetään taulukossa 3. Arvoina on käytetty Adomeitin (1985) käyttämiä vakioita, joita on vertailtu Matsuin (1975) kokeellisiin tuloksiin saaden hyviä vastaavuuksia.

Taulukko 3. Xien mallissa käytetyt reaktiokineettiset vakiot./55/

reaktio	A_j	E_j (J kmol^{-1})	$H_{fr,m}$ (kJ kmol^{-1})
I	$7,60 \cdot 10^3 \text{ m s}^{-1}$	$146,1 \cdot 10^6$	$3,94 \cdot 10^5$
II	$1,90 \cdot 10^7 \text{ m s}^{-1}$	$198,0 \cdot 10^6$	$2,21 \cdot 10^5$
III	$1,29 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}$	$189,3 \cdot 10^6$	$-1,73 \cdot 10^5$
IV	$1,30 \cdot 10^{11} \text{ m}^3 \text{ kmol}^{-1} \text{ s}^{-1}$	$125,5 \cdot 10^6$	$5,66 \cdot 10^5$

Alvaresin ja Martinin selluloosapitoisen pinnan syttymistutkimuksessa, /3/, hapettumisyhtälöiden reaktionopeudet on laskettu Arrheniustyyppisellä yhtälöllä

$$R = A \exp\left\{ \frac{E}{R_u T} \left[\left(\frac{w_F}{w_O} \right)^{n_F} \left(\frac{w_O P}{R_u T} \right)^n \right] \right\}, \quad (74)$$

jossa R on palamisnopeus, $\text{kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$,
 w_F on polttoaineen massaosuus, -,
 w_O hapen massaosuus, -,
 n kokonaisreaktion kertaluku, -
 n_F polttoainelähtöaineen kertaluku, - sekä

p kokonaispaine, Pa.

4.5 SYTTYMISKRITEERI

4.5.1 Syttymiskriteerin merkitys

Syttymismallissa on olennaisena osana syttymiskriteeri eli ehto, jonka perusteella mallin sisällä tai mallin antamista tuloksista päätellään syttymisen tapahtuneen. Semenovin syttymiskriteeri on periaatteessa yleisin syttymisehto. Sen mukaan kestävä syttyminen tapahtuu silloin, kun reaktioissa vapautuva nettolämpömäärä aikayksikössä on yhtä suuri kuin syttymistasetilasta poistuva nettolämpövirta. Reaktioissa vapautuvassa nettolämpömäärässä otetaan huomioon endotermisiin reaktioihin kuluva lämpömäärä. Tasetilasta poistuvassa nettolämpövirrassa otetaan huomioon tasetilaan tulevat lämpövirrat. Syttyminen ei johda välttämättä jatkuvaan palamiseen, jos tasetilaan tuodaan suuri sytytykseen tarkoitettu lämpövirta, joka poistetaan heti liekkihavainnon jälkeen. Jos tuli sammuu tällaisessa tapauksessa, ei ole kysymyksessä kestävä syttyminen. Syttymishetkellä tasetilaan varastoitava lämpömäärä aikayksikössä on nolla.

Syttyminen on hyvin nopea, käytännössä epäjatkua, tapahtuma. Ennen syttymishetkeä polttoainetta ja happea sisältävässä tilassa alkaa yhtäkkiä muodostua selvästi havaittavia määriä palamistuotteita ja samalla lämpötila nousee useita satoja asteita hyvin lyhyessä ajassa. Tällaista epäjatkuvuuskohtaa voi olla vaikea kuvata malleilla, joiden yhtälöt ovat jatkuvia. Tämän vuoksi syttymismalleihin tarvitaan jokin erityisehto, jonka täytyttyä mallin toiminta muuttuu lämpenemisen ja pyrolyysin mallintamisesta pyrolyysin ja palamisen mallintamiseksi. Vaativissa syttymisrintaman etenemismalleissa ja palamismalleissa syttymiskriteeri on myös tarpeen, jotta tiedetään millä hetkellä tai missä kohdassa syttyminen tapahtuu. Syttymiskriteerinä on lähteiden /13/ ja /20/ mukaan käytetty ainakin pinnan lämpötilaa, kiinteän aineen keskimääräistä lämpötilaa, pyrolysoituvaa massavirran tiheyttä, pintalämpötilan kasvunopeutta, jäännöshiikerroksen paksuutta, paikallista kaasun lämpötilan kasvunopeutta, kokonaisreaktion nopeutta rajakerroksessa,

kaasun lämpötilagradientin suunnan muutosta kiinteän ja kaasumaisen aineen rajapinnalla sekä absorboituneen säteilyintensiteetin ja ajan tuloa.

4.5.2 Kriittinen pintalämpötila

Kiinteiden polttoaineiden syttymisen ja palamisen malleissa yleisin syttymiskriteeri on tunnettu kriittinen pintalämpötila. Kokeellisissa tutkimuksissa on huomattu, että pintalämpötila syttymishetkellä vaihtelee suhteellisen vähän tietyllä polttoaineella. Syttymishetkellä kosteus on haihtunut pinnasta, joten on kyseessä kuivan polttoaineen syttyminen. Syvemmältä partikkelista pintaan diffundoituva kosteus voi kylläkin vaikuttaa pinnan lämpötilaan syttymishetkelläkin jonkinverran.

Lähteessä /3/ on tutkittu kokeellisesti alfaselluloosan itsesyttymistä ja havaittu hapen konsentraation vaikuttavan pinnan syttymislämpötilaan merkittävästi ainakin, kun hapen pitoisuudet ovat pieniä. Tämä nähdään kuvasta 20. Tavallisissa polttolaitteissa hapen konsentraatio partikkelien läheisyydessä on usein niin suuri, että konsentraatioeroilla ei ole vaikutusta syttymislämpötilaan. Sellaisissa tapauksissa, joissa syttymisvyöhykkeellä palamisilman joukossa on merkittäviä määriä palamiskaasuja, hapen konsentraatio voi vaikuttaa pinnan syttymislämpötilaan. Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi reaktorit, joissa palamisrintama etenee samaan suuntaan ilman kanssa. Tällöin osa hapesta kuluu palamisvyöhykkeellä ennen virtauksen tulemistä syttymisvyöhykkeelle. Samalla virtaavaan kaasuun tulee lisäksi palamiskaasuja. Nykyisin kehitetään myös sellaisia polttolaitteita, joissa palamisilman joukkoon sekoitetaan savukaasuja liian suurien happipitoisuuksien välttämiseksi pyrolyysivyöhykkeellä.

Pintalämpötila on helposti ymmärrettävä ja laskettavissa oleva suure, joten sitä käytetään paljon syttymiskriteerinä. Pinnan syttymislämpötilaan vaikuttaa polttoaineen kosteutta ja ympäristöolosuhteita enemmän se, onko kysymyksessä itsesytyminen vai pakotettu sytyminen. Pakotetun syttymisen pintalämpötila on selvästi alhaisempi kuin itsesyttymisen pintalämpötila. Pinnan läheisyydessä on pakotetussa syttymisessä jokin kuuma ja mahdollisesti reagoiva kohta,

esimerkiksi liekki, josta pyrolysoituva kaasu syttyy ensimmäisen kerran. Syttymisrintaman etenemistapauksissa syttymiseen vaikuttaa aina lähellä oleva kuuma partikkeli tai liekki, joten kysymyksessä on pakotettu syttyminen. Puupinnoilla itesyttymistapausten pintalämpötilat ovat vaihdelleet useimmissa kokeissa 500 ja 600 °C:n välillä ja pakotetun syttymisen tapauksissa 300 ja 400 °C:n välillä. Lähteessä /47/ on kokeellisesti saatu punatammen pinnan syttymislämpötilaksi 372 °C, kun pinnan läheisyydessä on ollut pilot-lieikki. Lähteessä /43/ on käytetty syttymisajan ja säteilytysintensiteetin mallintamisessa puupinnan pakotetun syttymisen kriittisenä lämpötilana arvoa 380 °C ja itesyttymisen kriittisenä lämpötilana arvoa 545 °C. Näillä arvoilla mallin antamat tulokset ovat korreloineet hyvin koetulosten kanssa.

4.5.3 Muut syttymiskriteerit

Joissakin tutkimuksissa on käytetty syttymiskriteerinä kriittistä haihtuvien aineiden massavirran tiheyttä pinnan läpi /50/. Palavan kaasun osuuden pitää ylittää lauha syttymisraja ennenkuin syttyminen on mahdollista. Pyrolyysikaasun virtauksen pitää siis olla niin suuri, että pinnan läheisyyteen syntyy syttyvä kaasuseos. Syttymisen edellytyksenä on lisäksi riittävän korkea lämpötila seoksessa. Joissakin tapauksissa syttymiskelpoinen seos ei syty lämpötilan alhaisuuden vuoksi. Niinpä tämä ehto soveltuu parhaiten pakotetun syttymisen tapaukseen, jossa pinnan läheisyydessä on paikallisesti varmistettu riittävän korkea lämpötila. Tästä esisyttymiskohdasta liekki leviää ympäristöön. Tietty pyrolyysikaasun massavirran tiheys ei kaikissa tilanteissa muodosta samanlaista seosta pinnan läheisyyteen, koska pinnan ohi kulkeva virtaus voi vaihdella. Virtaus laimentaa seosta ja vie palavaa kaasua mukanaan. Weatherfordin ja Sheppardin tutkimuksessa, /50/, on referoitu Bamfordin, Crankin ja Malanin tutkimusta, jonka mukaan puupinnan syttyminen tapahtuu noin pyrolyysikaasun massavirrantiheyden arvolla $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Weatherfordin tutkimuksessa tätä arvoa väitetään vääräksi, ja massavirran tiheyttä väitetään vääräksi syttymiskriteeriksi.

Atreayan ja Wichmanin puupintojen syttymistutkimuksessa, /4/, voidaan käyttää syttymiskriteerinä tunnettua kriittistä pintalämpötilaa, mutta pintalämpötila voidaan myös laskea. Pyrolyysikaasun massavuo ja syttymisen

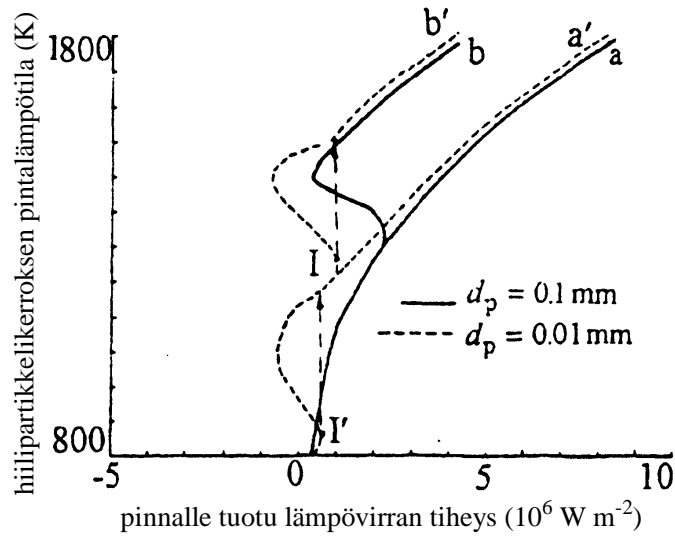
pintalämpötila voidaan laskea kahden yhtälön yhtälöryhmällä. Haihtuvien aineiden massavirta pinta-alayksikköä kohti lasketaan kahdella tavalla. Toinen yhtälö tulee energiataseesta ja toinen massataseesta, johon on liitetty lämpötilajakaumaa ennustava termi.

Syttymisrintaman etenemistutkimuksissa on harvemmin tarvittu varsinaista syttymiskriteeriä, koska niissä lasketaan reaktiovyöhykkeen etenemisnopeutta. Jonkinlaisena syttymiskriteerinä näissä tutkimuksissa käytetään energiatasetta, jolla selvitetään syttymistilaan lämpenevä polttoainemäärä aikayksikössä. Tällainen syttymisenergian käsite on käytössä esimerkiksi Rothermelin, /34/, Frandsenin, /11/, ja Catchpolen, /7/, tutkimuksissa. Frandsenin alunperin käyttämässä mallinnustavassa syttymisenergiaan sisältyy kuivan polttoaineen lämpeneminen syttymislämpötilaan, veden lämpeneminen 100 °C:een ja veden höyrystyminen.

Xien ja Liangin hiilipartikkelikerroksen syttymis- ja sammumistutkimuksessa, /55/, ei ole asetettu varsinaista syttymiskriteeriä, vaan säilyvyysyhtälöiden avulla numeerisesti ratkaistuihin stationaarisen tilan kerroksen pintalämpötilan arvoista päätellään syttymispiste kullekin tapaukselle. Mallinnettavana kohteena on hiilipartikkelikerros, jonka pinnalle virtaa ylhäältäpäin ilmaa. Ilma ei tunkeudu kerrokseen, mutta kerroksen huokosissa on ilmaa. Kerroksen pintaa lämmitetään säteilylämpövirralla. Mallissa pinnan lämpötila pidetään säteilylämpövirralla vakiona. Laskentatuloksista voidaan löytää säteilylämpövirran tiheys, jossa ratkaisuksi saadaan selvästi suurempi pinnan lämpötila kuin hieman pienemmällä säteilylämpövirralla. Kerroksen pinnan lämpötilalle saadaan lämpövirran tiheyden funktiona S-tyyppisiä käyriä, joissa alimmainen käyrän suunnanmuutospiste on syttymispiste.

Kuvasta 26 nähdään mallilla lasketut käyrät 0,1 mm ja 0,01 mm halkaisijan partikkeleille. a-käyrien tapauksissa mallissa on oletettu, että hiilidioksidin massaosuus pinnan rajakerroksessa on nolla. Tämä tarkoittaa sitä, että pyrolyysikaasujen palamista ei tapahdu. b-käyrien tapauksissa on oletettu, että kaasufaasin reaktiot tapahtuvat kokonaan rajakerroksessa. Käyristä nähdään,

että pelkän pyrolyysin tapauksessa pinnan lämpötila kasvaa säteilylämpövirran tiheyden kasvaessa ilman selvää syttymistä.



Kuva 26. Hiilipartikkelikerroksen pintalämpötila pinnalle tuodun lämpövirran tiheyden funktiona. /55/

Kaasufaasireaktioiden tapauksessa käyrät ovat S-tyyppisiä. Nuolikatkoviivat osoittavat syttymispisteen kohdan ja sen, että kyseisessä kohdassa hypätään toiselle lämpötilatasolle. S-käyrän ylemmässä käännpisteessä on kohta jossa sammuminen tapahtuu, kun lämpövirtaa pienennetään.

Salingerin ja hänen kumppaneidensa tutkimuksessa, /38/, mallinnetaan hiilikasan itsestyttymistä. Tässä tutkimuksessa syttymispiste on määritelty S-tyyppisen käyrän alamutkasta, kuten lähteen /55/ tutkimuksessakin. Käyrä on kuitenkin laskettu kerroksen suurimmalle lämpötilalle Damköhlerin luvun funktiona, ja parametrina on käytetty Rayleigh'n lukua. Damköhlerin luku on niin sanottu dimensioton reaktiivisuus, joka määritellään tässä tapauksessa yhtälöllä

$$Da = \frac{B\rho_{\infty}L^2 \exp\left| -\frac{E}{R_u T} \right|}{\eta_a}. \quad (75)$$

Yhtälössä

- B on reaktionopeusvakio, s^{-1} ,
 ρ_{∞} on ympäristön kaasun tiheys, $kg\ m^{-3}$,
 L on hiilikasan halkaisija, m ja
 η_a on ilman dynaaminen viskositeetti, $kg\ m^{-1}\ s^{-1}$.

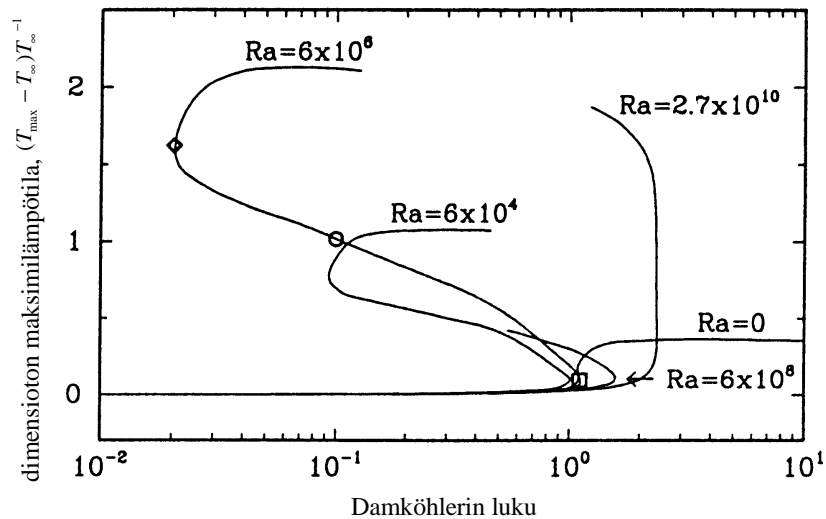
Rayleigh'n luku kuvaa luonnollisen konvektion voimakkuutta ja se määritellään tässä tutkimuksessa suhteessa adiabaattiseen lämpötilan nousuun yhtälöllä

$$Ra = \frac{\rho_{\infty}^2 L^3 \beta g \frac{x_o(-u_{mcb})}{M_a}}{\eta_a \lambda_b} \quad (76)$$

Yhtälössä

- β on lämpölaajenemisvakio, K^{-1} ,
 x_o hapen mooliosuus ympäristössä, -,
 u_{mcb} hiilen palamisen molaarinen reaktiolämpö, $J\ kmol^{-1}$,
 M_a ilman moolimassa, $kg\ kmol^{-1}$ ja
 λ_b hiilikerroksen tehollinen lämmönjohtavuus, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$.

Kuvassa 27 nähdään dimensioton maksimilämpötila Damköhlerin luvun funktiona eri suurilla Rayleigh'n luvun arvoilla. Kyseisessä tapauksessa syttyminen on tapahtunut useimmiten, kun $Da \cong 1$. Tapauksessa on oletettu, että kasan alla oleva maan pinta pysyy kylmässä vakiolämpötilassa.



Kuva 27. Hiilikerroksen dimensioton maksimilämpötila Damköhlerin luvun funktiona erilaisilla Rayleigh'n luvun arvoilla./38/

Kiinteän polttoaineen keskimääräisen lämpötilan kriittistä arvoa voidaan pitää syttymispisteenä, jos partikkelit ovat niin pieniä tai ohuita, että niiden lämpötilaa voidaan pitää vakiona tietyllä ajanhetkellä. Ympäristön lämpötilaa voidaan käyttää kriittisenä syttymislämpötilana, jos polttoaineominaisuudet ja muut ympäristöolosuhteet pysyvät vakioina.

Polttoaineen pinnan lämpötilagradientin nollakohdan saavuttamista on käytetty joissakin malleissa syttymiskriteerinä. Tämä kriteeri pätee tapauksiin, joissa lämpötilagradientin merkki on syttymisen jälkeen vastakkainen verrattuna syttymistä edeltävään tilanteeseen. Dominoivan säteilylämmönsiirron ja kylmän ilman tapauksissa tämä merkitsee sitä, että pinnan läheisyydessä oleva pyrolyysikaasun ja hapen seos syttyy. Tällöin pinnan lämpötila tulee pienemmäksi kuin lähellä olevan kaasun lämpötila, kun se on aiemmin ollut säteilyn absorption vuoksi korkeampi kuin kaasun lämpötila. Jos syttyminen aiheutuu konvektiivisesta lämmön tuonnista pinnalle, ilmiö on päinvastainen. Syttyminen on tapahtunut, kun pinnan lämpötila tulee kiinteän jäännöshiilen palamisreaktioiden tai pinnan läheltä säteilevän palavan kaasun vuoksi suuremmaksi kuin keskimääräinen lämpötila virtaavassa kaasussa. Gandhin ja Kanuryn tutkimuksessa, /13/, on käytetty lämpötilagradientin nollakohtaa syttymiskriteerinä. Tutkimuksessa on oletettu, että syttyminen tapahtuu kaasufaasissa pinnan läheisyydessä. Lämpötilaeron merkin muutosta on käytetty syttymiskriteerinä Chongin, Shawn ja Chenin tutkimuksessa, /8/, jossa

määritettiin sahanpurun reaktiokineettisiä parametrejä kokeellisesti. Tutkimuksessa sytytettiin pieni sahanpurunäyte ympäristön lämpötilaa suurentamalla, eli kysymyksessä oli itsestyminen. Näytteessä oli kolme lämpötila-anturia, joista yksi oli keskellä ja toiset asteittain lähempänä kerroksen reunaan. Syttymisen pääteltiin tapahtuneen, kun keskimäinen lämpötila tuli suuremmaksi kuin muut lämpötilat.

4.6 AINEOMINAISUUDET

Lämmön ja aineensiirron sekä reaktiokinetiikan mallinnuksessa tarvitaan tietoa aineominaisuuksista. Tärkeimpiä vaikuttavia aineominaisuuksia ovat tiheys, lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti, diffuusiokerroin, emissiivisyys, absorptiosuhde ja läpäisysuhde. Nämä ominaisuudet ovat erilaisia eri kaasuilla, eri nesteillä ja erilaisilla kiinteillä aineilla. Kaasuseoksissa ja varsinkin reagoivissa kaasuissa aineominaisuuksien määrittäminen ei ole eksaktia, vaan joudutaan käyttämään keskimääräistettyjä ja arvioituja arvoja. Kiinteiden aineiden aineominaisuudet vaihtelevat, paitsi eri materiaalien välillä, niin myös saman materiaalin erilaisten tyyppien ja erilaisissa olosuhteissa säilytettyjen kappaleiden kesken. Esimerkiksi puulajien tiheydet vaihtelevat useita satoja kilogrammoja kuutiometriä kohti. Tämä johtuu osittain lajien huokoisuudesta, mikä vaikuttaa tiheyden lisäksi ainakin lämmönjohtavuuteen ja diffuusiokertoimeen. Polttoainepartikkelin ominaisuuksiin vaikuttaa merkittävästi myös sen sisältämä kosteus.

Virtaavan kaasun ja partikkelien aineominaisuudet eivät pysy vakioina palamisprosessissa. Kaasun ominaisuudet muuttuvat, kun sen koostumus muuttuu. Partikkeleista tulee kaasufaasiin vesihöyryä, pyrolyysikaasuja ja hiilen palamiskaasuja. Pyrolyysikaasut taas palavat jossakin vaiheessa. Partikkelin aineominaisuudet muuttuvat samalla kun vesi höyrystyy ja haihtuvat aineet poistuvat kiinteästä tilasta. Palamisen seurauksena sekä kaasujen että partikkelien lämpötila suurenee. Aineominaisuudet muuttuvat kerroksessa paikallisesti ja epästationaarisisessa tilanteessa myös ajan funktiona.

Kaasun koostumuksen muuttuminen vaikuttaa virtaavan kaasun ominaislämpökapasiteettiin, lämmönjohtavuuteen ja viskositeettiin sekä yhdisteiden diffuusiokertoimiin. Lämpötilan muuttuminen vaikuttaa eniten kaasun tiheyteen. Lämpötila vaikuttaa lisäksi lämmönjohtavuuteen, ominaislämpökapasiteettiin, viskositeettiin ja diffuusiokertoimiin. Kiinteässä aineessa koostumuksen ja lämpötilan muutokset vaikuttavat myös tiheyteen, lämmönjohtavuuteen ja ominaislämpökapasiteettiin. Muutokset eivät johdu kuitenkaan pelkästään lämpötilan muutoksesta tai kemiallisen koostumuksen muutoksesta vaan myös fysikaalisen partikkelirakenteen muutoksista. Partikkelin huokoisuus muuttuu, mikä vaikuttaa tiheyden ja lämmönjohtavuuden lisäksi myös aineensiirto-ominaisuuksiin. Lisäksi partikkelin pinnan tummeneminen vaikuttaa lämpösäteilyn absorptioon ja emissioon pinnalla.

Aineominaisuuksien muuttumista ei voida yleensä ottaa huomioon kovin täydellisesti. Hyvin useissa malleissa suurin osa aineominaisuuksista pidetään vakiona sekä paikan että ajan suhteen. Kaasun tiheyden muutos lämpötilan funktiona otetaan useimmiten huomioon ideaalikaasun tilanyhtälön avulla. Tällöin kaasu kaikkine osakomponentteineen oletetaan ideaalikaasuksi. Joissakin malleissa kaasun lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti ja viskositeetti, tai jokin näistä ominaisuuksista, lasketaan lämpötilan funktiona. Kaasun koostumuksen muuttumisen huomioon ottaminen on harvinaista. Kiinteän faasin ominaisuudet oletetaan useimmiten vakioiksi. Joissakin malleissa otetaan huomioon partikkelin tiheyden muuttuminen.

Krausen ja Henselin, /25/, mallissa lämmönjohtavuus, kerroksen tiheys ja ominaislämpökapasiteetti lasketaan lämpötilan funktiona. Simmsin ja Lawn tutkimuksessa, /43/, materiaali oletetaan säteilyominaisuuksiltaan täydelliseksi absorboijaksi. Tässä syttymisen mallinnuksessa kosteus on otettu huomioon aineominaisuuksia määrittäessä. Simms on käyttänyt kostean puupinnan syttymisen kokeellisessa mallissaan termisille aineominaisuuksille seuraavia alunperin Fonsin vuonna 1946 esittämiä korrelaatioita:

$$\lambda_w = 0,0237 + \rho_{dry} (2 + 24,7 \cdot w_w) \cdot 10^{-4}, \quad (77)$$

$$c_w = c_{dry} + (h_{wet} + h_{vap} + 4,19 \cdot \theta_{100}) \cdot \frac{w_w}{\theta_{ig}} \quad \text{ja} \quad (78)$$

$$\rho_w = \rho_{dry} (1 + w_w) \quad (79)$$

Yhtälöissä

- w_w on puun kosteuspitoisuus (puun sis. veden massa / kuivan puun massa),
- λ_w on lämmönjohtavuus puun kosteudessa w , $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$,
- ρ_w on kostean puun tiheys, kg m^{-3} ,
- ρ_{dry} on kuivan puun tiheys, kg m^{-3} ,
- c_w on ominaislämpökapasiteetti kosteudessa w , $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$,
- c_{dry} on kuivan puun ominaislämpökapasiteetti, $1422 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$,
- h_{wet} on “kosteuden irrotuslämpö”, $66,9 \text{ kJ kg}^{-1}$,
- h_{vap} on veden höyrystymislämpö, 2175 kJ kg^{-1} ,
- θ_{100} on lämpötilaero ympäristön lämpötilasta $100 \text{ }^\circ\text{C}$:een, K ja
- θ_{ig} on $T_{ig} - T_\infty$ eli syttymislämpötilan ja ympäristön lämpötilan ero, K .

Simmsin artikkelissa ainakin lämmönjohtavuuden korrelaatio on esitetty nähtävästi väärin, mutta julkaisua referoinut Janssens /20/ on saanut jostakin oikeamman tuntuisia tuloksia antavan yhtälön, jota tässä on käytetty. “Kosteuden irrotuslämpö” , h_{wet} , tarkoittaa lämpömäärää, joka kuluu soluseinämiin adsorboituneen veden irrottamiseen seinämistä. Syttymisen mittaustuloksia on korreloitu samalla tavalla kuin kuivien näytteiden koetuloksia, mutta aineominaisuuksien määrittämisessä on otettu huomioon kosteus. Abu Zaidin tutkimusten mukaan kosteus vaikuttaa syttymisessä enemmän pinnan lämpötilaan kuin aineominaisuuksiin. /43/, /20/

4.7 ALKU- JA REUNAEHDOT

Alkuehdot tarkoittavat epästationaarisen mallin laskennan alkutilan tunnettuja tietoja. Reunaehdot ovat taas tasetilan reunoilla vakioina pysyviä tunnettuja tekijöitä. Alku- ja reunaehdot ovat apuna mallin ratkaisemisessa. Analyttisissä

malleissa ne ovat lisäyhtälöitä, joiden avulla tuntemattomia muuttujia ratkaistaan. Numeerisissa malleissa alku- ja reunaehdot ovat niitä yhtälöitä, joista laskenta aloitetaan tai niitä, jotka pitää saada toteutumaan. Alkuehdot sisällytetään usein reunaehtojen käsitteeseen.

Lämmönsiirron reunaehdot ovat esimerkiksi tunnettu lämpötila, lämpövirta ja -lämmönsiirto konvektiona ja säteilynä pintaan. Yleinen alkuehto epästationaarisissa malleissa on terminen tasapaino, jossa koko systeemi on samassa lämpötilassa. Syttymismalleissa alkutilan lämpövirrat ovat nollija. Partikkelikerroksen palamisen etenemistä mallinnetaan useimmiten stationaaritilassa. Partikkelikerroksen syttymisrintaman etenemistapauksissa on usein pidetty liekistä kerroksen pinnalle tuleva säteilylämpövirta vakiona. Lähteessä /55/ käytettiin hiilipartikkelikerroksen pinnalla vakiolämpötilaehdot. Paksun pinnan syttymismalleissa on yleensä oletettu lämmittämätön pinta eristetyksi tai kaksipuolisen lämmityksen tapauksessa kappaleen keskellä olevan tason lämpötilagradientti nolllaksi. Lähteen /22/ mallissa lämmittämättömän pinnan oletetaan pysyvän syttymiseen asti vakiolämpötilassa. Syttymisrintaman etenemismalleissa laskentakoordinaatisto sidotaan joskus syttymisrintamaan. Tällaisissa malleissa, kuten /16/, lämpötila kaukana rintaman etupuolella, eli syttymättömällä alueella, oletetaan samaksi kuin ympäristön lämpötila.

Lämmönsiirtoreunaehtojen lisäksi käytetään lisäksi massan siirtymiseen, yhdisteiden siirtoon ja liikemäärän siirtoon liittyviä reunaehtoja. Reagoimattomalla alueella ja syttymismallien alkutilassa massansiirron oletetaan tapahtuvan vain kaasutilassa hapettimen virtauksen seurauksena. Kiinteän ja kaasumaisen aineen rajapinnalla ei tapahdu reagoimattomalla alueella massan tai yhdisteiden siirtoa. Kun pinnalle kohdistuu lämpövirta, oletetaan höyrystyvän ja pyrolysoituvan massanmuutoksen summa aikayksikössä yleensä yhtä suureksi kuin pinnalle diffundoituvan ja sille konvektoituvan massavirran summa.

4.8 MALLIEN RATKAISEMISESTA

Mallin ratkaisemista voidaan pitää omana tieteenhaarana, jota tässä työssä ei esitellä kovin tarkasti. Malleja voidaan ratkaista analyyttisesti tai numeerisesti. Molemmilla tavoilla on omat hyvät ja huonot puolensa.

Analyttisessä ratkaisussa malli muotoillaan yksinkertaistuksien ja matemaattisten muunnosten avulla sellaiseksi, että yhtälö tai yhtälöryhmä voidaan ratkaista suoraan tunnettujen eksaktien ratkaisujen mukaisesti. Koska palamisen etenemisen ja syttymisen mallit ovat usean muuttujan epälineaarisia differentiaali- tai integro-differentiaaliyhtälöitä, on malleja aina yksinkertaistettava merkittävästi analyyttisen ratkaisun löytämiseksi. Mallin käsittely vaatii hyvää matematiikan ymmärrystä, jotta se saadaan analyyttisesti ratkaistavaan muotoon. Usein joudutaan tekemään sellaisia yksinkertaistuksia ja idealisointeja, jotka sulkevat osan sovellutuksista pois ja muuttavat ongelman todellista luonnetta. Analyttisissä ratkaisuisissa on kuitenkin hyvinä puolina tarkastelualueen laajuus, mahdollisuus kuvata suuriakin gradientteja sekä laskentakapasiteetin ja -ajan suhteellisen pieni tarve.

Numeerisia ratkaisumenetelmiä on alettu käyttää enenevässä määrin, kun tietokoneiden nopeus ja muistin määrä ovat kasvaneet hyvin nopeasti. Numeerisessa ratkaisussa differentiaaliyhtälöt diskretoidaan, mikä tarkoittaa jatkuvien differentiaaliyhtälöiden muuntamista algebrallisiksi yhtälöiksi, jotka ratkaistaan tietyissä pisteissä. Pisteiden tiheys määrittää sen, kuinka hyvin diskretoiduilla yhtälöillä voidaan arvioida jatkuvien funktioiden arvoja. Numeeristen mallien etuna on mahdollisuus monimutkaisten geometrioiden sekä polttoaineen ja ympäristöolosuhteiden kuvaamiseen. Numeerisissäkin malleissa joudutaan tekemään paljon yksinkertaistuksia, mutta niillä on ainakin periaatteessa mahdollista kuvata useita faaseja, eri kokoisia ja muotoisia partikkeleita, eri polttoaineita ja niin edelleen. Numeerisissä ratkaisumenetelmissä vaaditaan suurta laskentakapasiteettia. Erityisesti paikallisesti tai ajallisesti nopeiden muutostilojen mallintaminen vaatii tiheää laskentahilaa tai pientä aika-askelta, mikä tarkoittaa hyvin paljon laskentakapasiteettia ja pitkiä ratkaisuaikoja. Numeerisissä malleissa on olemassa mahdollisuus numeeriseen virheeseen, jolloin saadaan epätarkkoja tai väärä tuloksia menetelmän takia.

Mallien ratkaisemista varten muuttujat muunnetaan usein dimensiottomaan muotoon. Tällä tavalla voidaan vähentää ratkaistavien muuttujien tai parametrien lukumäärää. Dimensiottomien muuttujien käytöllä päästään myös eroon yksiköistä ja mallinnettavan kohteen kokoluokan rajoituksista. Dimensiottomien muuttujien avulla esitetyt tulokset ovat ainakin periaatteessa voimassa riippumatta sovelluskohteen koosta. Toisaalta tulosten esittäminen dimensiottomassa muodossa aiheuttaa monille vähemmän asiaan perehtyneille lukijoille vaikeuksia ymmärtää tulosten merkitystä.

5 JOHTOPÄÄTÖKSIÄ

Energiantuotannossa käytettävien polttoainekerrosten syttymiseen ja liekkirintaman etenemiseen liittyviä tutkimuksia näyttää olevan yllättävän vähän. Metsä-, pensaikko- ja kiinteistöpaloihin liittyvissä tutkimuksissa polttoaineet ja niiden muodostamat kerrokset poikkeavat melko merkittävästi varsinaisista energiantuotantotarkoituksessa poltettavista kerroksista. Polttoaineiden partikkelikoko ja -muoto sekä kerroksien huokoisuus, kosteus ja paksuus poikkeavat esimerkiksi hakkeen, sahanpurun ja kuoren arinapoltossa ja kaasutuksessa huomattavasti useimpien tähän asti tehtyjen tutkimusten vastaavista olosuhteista ja ominaisuuksista. Polttolaitteissa ilmapvirtauksen suunta polttoainekerrokseen ja sen liikkumissuuntaan verrattuna voi myös poiketa tulipalotapauksista.

Tulipesäolosuhteissa tapahtuvasta partikkelikerroksen syttymisestä ei löytynyt tutkimusjulkaisuja, jotka olisi tehty 1940-luvun jälkeen. Gort, /16/, on tutkinut palamisen etenemistä kerrospoltoa vastaavissa partikkelikerroksissa väitöskirjassaan, mutta muuten tulipesäolosuhteissa tapahtuvaan palamisen etenemiseen liittyviä tutkimuksia ei löytynyt. Tutkimuksia on varmasti tehty ainakin ennen 1980-lukua, mutta sellaisista tutkimuksista on vaikeampaa löytää kattavaa tietokantaa kuin 1980-luvulla ja sen jälkeen tehdyistä julkaisuista. Mallintaminen ja etenkin numeerinen laskenta ja sen käytössä oleva laskentakapasiteetti ovat kehittyneet kuitenkin 1980-luvulla ja sen jälkeen

erittäin paljon, mikä aiheuttaa täysin uuden tilanteen myöskin partikkelikerrosten palamisen mallintamisessa. Tietokoneiden laskentakapasiteetti on kasvanut niin paljon, että jonkinlaisia tutkimukseen, tuotekehitykseen, esisuunnitteluun ja ongelman ratkaisuun käytettäviä malleja voidaan käyttää jo pc-tietokoneissa. Näin ollen pienet ja keskisuuret yritykset ja pieniä laitoksia valmistavat yritykset voivat jatkossa käyttää esimerkiksi virtauslaskentaa apuvälineenään.

Kerrospolton mallintamiseen ei ole esiintynyt suurta kiinnostusta, koska suuria kerrospolttotekniikkaa käyttäviä voima- ja lämpölaitoskattiloita ei ole viime vuosikymmeninä tehty kovin paljon. 1990-luvulla kiinnostus kerrospoltoon on kasvanut teollisuuden ja yhdyskuntien jätteiden energiakäytön lisääntyessä. Ympäristövaikutusten tullessa yhä tärkeämmiksi on alettu kiinnittää enemmän huomiota myös pienten lämpölaitosten päästöihin ja energiataloudelliseen toimintaan. Hiilidioksidipäästöjä pyritään vähentämään kansainvälisten sopimusten mukaisesti kasvihuoneilmiön ja sen mahdollisten haitallisten seurausten vähentämiseksi. Tämä aiheuttaa uusiutuvien polttoaineiden ja erityisesti puuperäisten polttoaineiden käytön lisääntymistä. Koska puupolttoaineet ovat yleensä jakaantuneet laajalle alueelle, joudutaan niitä kuljetuskustannusten liiallisen kasvun estämiseksi käyttämään pienissäkin laitoksissa. Pienen mittakaavan polttolaitteissa kerrospolto on nykyisinkin edullisin vaihtoehto yksinkertaisimpien apulaiteratkaisujensa ansiosta. Kiinteäkerroskaasutus on myös yleistynyt tapa tuottaa biopolttoaineesta tai jätteestä polttoainetta kaasukattilaan. Kaikki nämä edellä mainitut seikat aiheuttavat sen, että nyt ja lähitulevaisuudessa kehitetään voimakkaasti kerrospolto- ja kerroskaasutustekniikoita. Kehitettävälle laitteille asetettavat päästö-, hyötysuhde-, polttoaineiden vaihtelu-, käytettävyys- ja luotettavuusvaatimukset aiheuttavat sen, että partikkelikerroksen palamisesta on tiedettävä yhä enemmän ja palamisilmiöitä on osattava mallintaa yhä paremmin.

Käytännön polttolaitteissa polttoainekerrokset koostuvat harvoin homogeenisista partikkeleista. Partikkelit ovat eri kokoisia ja muotoisia. Viime aikoina on lisääntynyt myös erilaisten kiinteiden polttoaineiden sekoittaminen

toisiinsa. Näiden tekijöiden vaikutusta syttymiseen ja syttymisrintaman etenemiseen ei ole tutkittu kokeellisesti. Rothermel, /34/, on esittänyt mallin palamisen etenemisestä maastopaloihin liittyvissä polttoaineseoksissa.

Palamisen etenemisessä on tähän asti mallinnettu yleensä vain syttymisrintaman etenemisnopeutta ja joissakin tapauksissa lämpötilaprofiileja. Polttoaine oletetaan yleensä homogeeniseksi. Käytännön polttoainekerroksissa partikkelikoon vaihtelu vaikuttaa erittäin paljon lämmön ja aineensiirtoon sekä virtausolosuhteisiin. Syttyminen voi tapahtua pienissä partikkeleissa paljon aikaisemmin kuin suurissa, minkä jälkeen kyseisen alueen lämmönsiirto-olosuhteet muuttuvat ratkaisevasti ja suurienkin partikkeleiden syttyminen nopeutuu huomattavasti verrattuna tasaisen partikkelikoon tapaukseen. Vaihtelevaa partikkelikokoja ei voida siis mallintaa keskimääräisellä partikkelikokoilla, jos mallin ennustavuus halutaan hyväksi. Partikkelikoon kokojakauman yksinkertaistettu huomio ottaminen esimerkiksi muutamalla partikkelikokoluokalla voisi tuoda merkittävän parannuksen mallinnuksen toimintaan todelliseen ilmiöön verrattuna. Tällaisessa mallissa tarvittaisiin tietoa partikkelikokojen jakautumisesta kerroksessa, jos ei tyydyttäisi tasaiseen ja täydelliseen sekoittumiseen.

Polttokokeiden kokemusten perusteella ilman kanavoituminen varsinkin pienistä partikkeleista koostuvissa kerroksissa aiheuttaa kerroksen syttymisen ja palamisen epätasaisuutta. Toisin paikoin palaminen on voimakasta, joistakin kohdista ilma pääsee läpi suureksi osaksi reagoimattomana suihkuna ja joissakin kohdissa polttoainekerros aiheuttaa niin suuren vastuksen virtaukselle, ettei ilmaa kulje kerroksen läpi juuri ollenkaan. Tämä epätasainen palaminen muuttuu vielä ajan mukana, kun polttoainekerros valuu, kaatuu ja putoaa eri kohtiin palamisen edetessä sekä polttoaineen koostumuksen ja syötön vaihdellessa. Virtaukset kanavoituvat ainakin pieniä partikkeleita sisältävissä kerroksissa koostuipa kerros sitten samaa kokoluokkaa olevista partikkeleista, kuten puru, tai useita eri kokoluokkia olevista partikkeleista, kuten hakkeen ja purun sekoitus.

Kanavoitumisen huomioon ottaminen malleissa voi osoittautua erityisen hankalaksi, koska kanavoituminen on epästationaarinen ilmiö. Polttoaineensyötön vuoksi kanavoitumiskohdat täyttyvät välillä polttoaineesta. Palamisen edistyessä ne avautuvat jossakin vaiheessa. Ilma kulkee siis näistä kohdista läpi usein suurelta osin reagoimatta polttoaineen kanssa. Ilman aiheuttama konvektiivinen jäähditys kasvaa pienellä alueella, mikä voi johtaa tämän alueen sammumiseen. Vastaavasti reaktioiden tuotekaasujen aiheuttama lämmitys kerroksessa vähenee samalla kun myös reagointipinta pienenee. Kanavoituminen pienentää luonnollisesti myös ilmavirtauksen painehäviötä. Kanavoitumisen mallintamista voidaan ehkä yksinkertaistaa määrittelemällä polttoaine-, kerros- ja virtausominaisuudet, joilla kanavoituminen alkaa. Silloin kun kanavoitumista esiintyy, voidaan kerroksen konvektiota, virtauksen painehäviötä ja kerroksen sisällä tapahtuvia reaktioita vähentää. Reaktiot siirtyvät siten kerroksen yläpuoliseen kaasufaasiin, jonka mallintaminen on huomattavasti paremmin hallinnassa kuin kerroksen mallintaminen. Kvantitatiivisesti tällainen yksinkertaistettukin kanavoitumisen huomioon ottaminen vaatii huomattavaa tutkimista.

6 YHTEENVETO

Syttyminen määritellään hetkeksi, jolloin polttoaineen ja hapen välisissä reaktioissa muodostuva nettolämpövirta on yhtäsuuri kuin ympäristöön siirtyvä nettolämpövirta. Syttyminen on epästationaarinen ilmiö, jonka tunteminen on tärkeää polttoprosessien ja -laitteiden kehittämisessä ja suunnittelussa. Syttymiseen vaikuttavien tekijöiden tunteminen on tärkeää paitsi syttymisen niin myös syttymisrintaman etenemisen mallintamisessa. Syttymisrintama etenee sitä nopeammin, mitä nopeammin syttyminen tapahtuu.

Polttoaineominaisuuksista tärkeimmät syttymiseen ja palamisen etenemiseen vaikuttavat tekijät ovat polttoaineen kosteus, haihtuvien aineiden osuus ja lämpöarvo, partikkelien koko ja muoto sekä kerroksen huokoisuus. Polttoaineen kosteuden kasvaminen pidentää syttymisaikaa, kasvattaa syttymiseen tarvittavaa energiaa ja syttymislämpötilaa. Polttoaine syttyä sitä

pienemmässä lämpötilassa mitä enemmän siinä on haihtuvia aineita. Syttyminen ja liekkirintaman eteneminen on sitä nopeampaa mitä suurempi on polttoaineen lämpöarvo. Polttoaineiden syttyminen nopeutuu ja syttymislämpötila laskee yleensä partikkelikoon pienentyessä. Tästä on tosin saatu päinvastaisiakin tuloksia. Syttymisrintaman eteneminen nopeutuu partikkelien pinta-ala - tilavuussuhteen kasvaessa. Polttoainekerroksen huokoisuuden kasvu suurentaa reaktiorintaman etenemisnopeutta. Lisäksi polttoaineen pinnan ja pyrolyysikaasujen absorptiosuhteen kasvu nopeuttaa syttymistä.

Tärkeimpiä partikkelikerroksen syttymiseen ja palamisen etenemiseen vaikuttavia ympäristöolosuhteita ovat polttoaineeseen tuleva säteilylämpövirran tiheys, ilman virtaus kerroksessa, palamisilman lämpötila ja pilot-liekin läsnäolo. Polttoaine syttyy nopeasti, kun siihen tuleva lämpövirran tiheys on suuri. Säteilylämmönsiirto on usein merkittävin energiansiirtymistapa polttoainekerrosten pinnalla ja niiden sisällä. Konvektiivinen lämmönsiirto on myös merkittävää, kun kerroksessa virtaa ilmaa, pyrolyysituotteita ja savukaasuja. Konvektio voi jäähdyttää tai lämmittää partikkeleita. Ilman virtaus kerroksessa vaikuttaa lämmönsiirron lisäksi hapen osapaineeseen syttymis- ja palamisalueella. Pieni hapen osapaine johtaa suuriin syttymislämpötiloihin ja pitkiin syttymisaikoihin. Tietyllä hapen raja-arvopitoisuudella ja sitä pienemmällä osuuksilla syttymistä ei tapahdu lainkaan. Palamisilman lämpötilan kasvu nopeuttaa reaktiorintaman etenemistä. Reagoivien aineiden lämpötila vaikuttaa merkittävästi reaktiokinetiikkaan, joka voi olla syttymishetkellä prosessin nopeutta rajoittava tekijä alhaisen lämpötilatason vuoksi. Pakotettu syttyminen, mikä tarkoittaa yleensä pilot-liekin läsnäoloa, tapahtuu pienemmässä lämpötilassa ja nopeammin kuin itsesytyminen. Tulipesäolosuhteissa pesään tulevan polttoaineen syttymiseen liittyy yleensä olemassa oleva liekki eli syttyminen on pakotettu.

Syttymisen ja liekkirintaman etenemisen mallinnus kehittyi koko ajan. Mallinnusta, kuten kokeellista tutkimustakin, tehdään eniten paloturvallisuuden lähtökohdista. Pinnan ja yksittäisen partikkelin mallinnus on teoreettisesti pidemmällä kuin partikkelikerrosten mallintaminen, koska pintojen mallintaminen on selvästi yksinkertaisempaa. Syttymismallit perustuvat

yleensä paremmin säilyvyysyhtälöihin kuin syttymisrintaman etenemismallit. Xien ja Liangin tutkimuksessa, /55/, on tässä työssä käsitellyistä julkaisuista teoreettisesti ehkä pisimmälle kehittynyt partikkelikerroksen syttymismalli. Malli on kaksidimensionaalinen kaksifaasimalli, ja se perustuu jatkuvuusyhtälöön sekä alkuaineiden, energian ja liikemäärän säilymisyhtälöihin. Pyrolyysi ja palaminen mallinnetaan tutkimuksessa neljän reaktioyhtälön avulla. Malli ei kuitenkaan sovellu sellaisenaan kerrospolton syttymismalliksi, koska ilma ei virtaa kerroksen läpi.

Liekkirintaman etenemistä mallinnetaan usein hyvin empiirisesti kokeellisten riippuvuuksien avulla. Esimerkkejä empiirisistä tutkimuksista ovat Frandsenin, /11/, malliin perustuvat tutkimukset, joita ovat mm. Rothermelin, /34/, ja Catchpolen, /7/, mallit. Niissä esimerkiksi kosteuden ja ilmavirtauksen vaikutusta ei lähdetä johtamaan säilyvyysyhtälöiden ja siirtonopeusteorioiden kautta vaan suoraan kokeellisista tuloksista, joista saadaan kertoimia ja termejä näille tekijöille. Gortin, /16/, kokeellinen tutkimus ja malli on tehty reaktorintaman etenemisestä kerrospoltossa. Hänen mallinsa on ehkä lähimpänä säilyvyysyhtälöihin perustuvaa liekkirintaman etenemismallia. Tässä mallissa jotkut siirtoyhtälöistä ja niiden tekijöistä on kuitenkin määritelty hieman kyseenalaisella tavalla.

Kerrospolttoon ja -kaasutukseen liittyvää syttymis- ja liekkirintaman etenemistutkimusta on tehty melko vähän. Muiden tutkimusten polttoaineet ja varsinkin kerrokset poikkeavat selvästi polttolaitteiden polttoaineista ja kerroksista. Syttymisen ja syttymisrintaman etenemisen tutkimusta tarvitaan siis jatkossakin varsinkin, kun muidenkin alojen tutkimukset ovat vielä kesken. Tutkimusta ei ole tehty erikokoisten polttoainepartikkelien ja eri polttoaineiden seospoltosta. Ilmavirtausten kanavoitumisen vaikutuksista ja syistä ei löytynyt myöskään tutkimuksia. Polttoainepartikkelien muodon vaikutusta syttymiseen ja palamisen etenemiseen on tutkittu myös melko vähän. Muodon mittarina on ollut pelkästään partikkelin pinta-alan ja tilavuuden suhde. Partikkelikerrosten syttymisen ja liekkirintaman etenemisen tunteminen tulevat tärkeämmiksi, koska biopolttoaineiden ja jätepoltoaineiden käyttö sekä pienten polttoyksiköiden määrä ja ympäristövaatimukset kasvavat lähitulevaisuudessa.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Albini F.A., A Model for Fire Spread in Wildland Fuels by Radiation. *Combustion Science and Technology*, vol. 42, pp. 229-258, 1985.
- /2/ Albini F.A., Wildland Fire Spread by Radiation - a Model Including Fuel Cooling by Natural Convection. *Combustion Science and Technology*, vol. 45, pp. 101-113, 1986.
- /3/ Alvares N.J., Martin S.B., Mechanisms of Ignition of Thermally Irradiated Cellulose. *13. International Symposium on Combustion, Salt Lake City, 1970*, Combustion Institute, p. 905-914.
- /4/ Atreya A., Wichman I.S., Heat and Mass Transfer During Piloted Ignition of Cellulosic Solids. *Journal of Heat Transfer*, Vol. 111, 1989, pp. 719-725.
- /5/ Baek S.W., Kim J.S., Ignition of a Pyrolyzing Solid with Radiatively Active Fuel Vapor. *Combustion Science and Technology*, Vol. 75, pp. 89-102, 1991.
- /6/ Bird, R.B., Stewart W.E., Lightwood E.N., *Transport Phenomena*. John Wiley & Sons, New York, 1960.
- /7/ Catchpole W.R., Catchpole E.A., Butler B.W., Rothermel R.C., Morris G.A., Latham D.J., Rate of Spread of Free-Burning Fires in Woody Fuels in a Wind Tunnel, *Combustion Science and Technology*, 1998, Vol. 131, pp. 1 - 37.
- /8/ Chong L. V., Shaw I. R., Chen X. D., Thermal Ignition Kinetics of Wood Sawdust Measured by Newly Devised Experimental Technique. *Process Safety Progress*, vol. 14, no. 4, October, 1995, pp. 266 - 270.
- /9/ Essenhigh R.H., Misra M.K., Shaw D.W., Ignition of Coal Particles: A Review. *Combustion and Flame*, vol. 77, pp. 3 - 30, 1989.
- /10/ Fangrat J., Wolanski P., *Analytical Model of Flame Propagation Over Solid Fuel Layer*. 1989
- /11/ Frandsen W.H., Fire Spread through Porous Fuels from the Conservation of Energy. *Combustion and Flame*, vol. 16, pp. 9-16, 1971.
- /12/ Faraday, M., Lyell, C., "Report to the Home Secretary on the Explosion at the Haswell Colliery on 28 Sept.1844" (Report of 1845); also *Phil. Mag.* 26,16 (1845).
- /13/ Gandhi P.D., Kanury A.M., Criterion for Spontaneous Ignition of Radiantly Heated Organic Solids. *Combustion Science and Technology*, Vol. 50, pp.233-254, 1986.

- /14/ Gardner W.D., Thomson C.R., Ignitability and Heat-release Properties of Forest Products. *Fire and Materials*, vol. 15, 1991, pp. 3 - 9.
- /15/ Glassman, I., *Combustion, Second Edition*. Academic Press, Inc., Orlando, Florida, 1987.
- /16/ Gort R. *On the Propagation of a Reaction Front in a Packed Bed, thermal conversion of municipal solid waste and biomass*. Doctoral Thesis, University of Twente, Enschede, Netherlands, 193 p., 1995.
- /17/ Graf E.G., Carman E.P., Corey R.C., Pure Crossfeed Ignition in Fuel Beds. *Combustion*, September 1954.
- /18/ Horttanainen M., Kiinteän polttoaineen syttyminen, Kirjallisuustutkimus. Tutkimusraportti En B-117, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan osasto, 1998.
- /19/ Incropera F.P., De Witt D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3rd edition*. John Wiley & Sons, Singapore, 1990.
- /20/ Janssens M., Piloted Ignition of Wood: A Review. *Fire and Materials*, Vol. 15, 151-167, 1991.
- /21/ Kanury, A.M., *Introduction to Combustion Phenomena*. Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1975.
- /22/ Kashiwagi T., A Radiative Ignition Model of a Solid Fuel. *Combustion Science and Technology*, Vol. 8, pp.225-236, 1974.
- /23/ Katalambula H., Hayashi J., Chiba T., Ikeda K., Kitano K., Mechanism of Single Coal Particle Ignition Under Microgravity Condition. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 30, no. 1, 1997, 146-153.
- /24/ Konev E.V., Sukhinin A.I., The Analysis of Flame Spread Through Forest Fuel. *Combustion and Flame*, vol. 28, 1977, pp. 217 - 223.
- /25/ Krause, U., Hensel, W., Zündkritische Bedingungen lagernder Staubshüttungen, *Staub - Reinhaltung der Luft*, vol. 54 (1994), pp. 331-336.
- /26/ Mayers M.A., Landau H.G., Ignition in Beds of Solid Fuel. *Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 32, no. 4, April 1940.
- /27/ Mikkola E., *Puupinnan syttyminen*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Tiedotteita 1057, VTT Offsetpaino, Espoo, 1989.
- /28/ Miron Y., Lazzarra C.P., Hot-Surface Ignition Temperatures of Dust Layers. *Fire and Materials*, vol. 12, pp. 115 - 126, 1988.

- /29/ Modest M.F., *Radiative Heat Transfer*. McGraw-Hill, Singapore, 1993.
- /30/ Moghtaderi B., Novozhilov V., Fletcher D.F., Kent J.H.,
A Mathematical Modelling of the Piloted Ignition of Wet Wood Using
the Heat-Balance Integral Method. *Journal of Applied Fire Science*,
Vol. 6 (2), pp. 91-107, 1996-1997.
- /31/ Moghtaderi B., Novozhilov V., Fletcher D.F., Kent J.H., A New
Correlation for Bench-scale Piloted Ignition Data of Wood. *Fire Safety
Journal*, Vol. 29, pp. 41-59, 1997.
- /32/ Nicholls P., *Underfeed Combustion, Effect of Preheat, and Distribution
of Ash in Fuel Beds*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines,
Bulletin 378, Washington, 1934.
- /33/ Park S.H., Tien C.L., Radiation Induced Ignition of Solid Fuels.
International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 33, no. 7, July
1990.
- /34/ Rorthermel R., *A Mathematical Model for Fire Spread in Wildland
Fuels*. USDA Forest Service Research Paper INT - 115, 40 p., 1972.
- /35/ Ruottu S.K., Sarkomaa P.J., Mathematical Modelling of CFB-reactors
Using a General Multiphase Approach. Proceedings of the International
Symposium on Energy Options for the Year 2000: Contemporary
Concepts in Technology and Policy Volume 2. Wilmington, DE (USA),
Sep 14-17, 1988. p. 2.141-2.148 of p. 2.2888.
- /36/ Saastamoinen J., Kiinteän polttoaineen palaminen ja kaasutus. kirjassa
Poltto ja Palaminen, toim. Raiko R., Kurki-Suonio I., Saastamoinen J.,
Hupa M., International Flame Research Foundation (IFRF) Suomen
kansallinen osasto, Teknillisten Tieteiden Akatemia, Jyväskylä, 1995.
- /37/ Saastamoinen J., Richard J.-R., Simultaneous Drying and Pyrolysis of
Solid Fuel Particles. *Combustion and Flame*, vol. 106, pp. 288 - 300,
1996.
- /38/ Salinger A.G., Rutherford A., Derby J.J., Modeling the Spontaneous
Ignition of Coal Stockpiles. *AiChE Journal*, vol. 40, no. 6, pp. 991-
1004, June 1994.
- /39/ Sarkomaa P.J., *Polttotekniikan luennot, syksy 1995*. Lappeenranta,
1995.
- /40/ Sarkomaa, P., Kolme kemiallisten reaktioiden teoriaa.
In *Polttotekniikan seminaari, kevät 1996*, eds. Sarkomaa, P.,
Horttanainen, M., Opetusmoniste En C-91, Lappeenrannan teknillinen
korkeakoulu, Energiatekniikan osasto, 1996.
- /41/ Sarkomaa P.J., *Tasetilan yleinen energiayhtälö*. yksityinen luento,
Lappeenranta, 1998.

- /42/ Siegel R., Howell J.R., *Thermal Radiation Heat Transfer*. McGraw-Hill, New York, 1972.
- /43/ Simms D.L., Law Margaret, The Ignition of Wet and Dry Wood by Radiation. *Combustion and Flame*, vol. 11, pp. 377-388, 1967.
- /44/ Smoot, L.D., Smith, P.J., *Coal Combustion and Gasification*. Plenum Press, New York, 1985.
- /45/ Solantausta Y., Asplund D., *Puun käyttö polttoaineena I, Kirjallisuuskatsaus*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Poltto- ja voiteluainelaboratorio, Tiedonanto 24, Espoo, 1979.
- /46/ Toong T.-Y., *Combustion Dynamics, The Dynamics of Chemically Reacting Fluids*. McGraw-Hill Book Company, U.S.A, 1983.
- /47/ Tseng L.S., Atreya A., Wichman I.S., A One-Dimensional Model of Piloted Ignition. *Combustion and Flame*, vol. 80, pp. 94-107, 1990.
- /48/ Vázquez-Espí C., Liñán A., The Effect of Square Corners on the Ignition of Solids. *Siam Journal of Applied Mathematics*, vol. 53, no. 6, December 1993, pp. 1567 - 1590.
- /49/ Vázquez-Espí C., Liñán A., Ignition of a Rectangular Solid by an External Heat Flux. *Siam Journal of Applied Mathematics*, vol. 54, no. 5, October 1994, pp. 1181 - 1202.
- /50/ Weatherford W.D. Jr, Sheppard D.M., *Basic Studies of the Mechanism of Ignition of Cellulosic Materials*. Tenth Symposium (International) on Combustion, pp. 897-910, The Combustion Institute, 1965.
- /51/ Weber R.O., Analytical Models for Fire Spread Due to Radiation. *Combustion and Flame*, vol. 78, pp. 398-408, 1989.
- /52/ Weber, R.O., Modelling of Fire Spread Through Fuel Beds, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 17, n. 1, 1991, pp. 67-82.
- /53/ Wen L., Xing-Zhong S, Hui, S., Jin-Sheng G., Investigation into the Ignition Property of Coal Under Pressure. *Fuel Science and Technology International*, 11 (10), 1441-1458, 1993.
- /54/ Westerterp K.R., Van Swaaij, W.P.M., Beenackers, A.A.C.M., *Chemical Reactor Design and Operation*. John Wiley & Sons, Chichester, 1983.
- /55/ Xie M., Liang X., Numerical Simulation of Combustion and Ignition-Quenching Behaviour of a Carbon Packed Bed. *Combustion Science and Technology*, vol. 125, pp. 1-24, 1997.

- /56/ Zhang Y., Ronney P.D., Roegner E.V., Greenberg J.B., Lewis Number Effects on Flame Spreading Over Thin Solid Fuels. *Combustion and Flame*, vol. 90, pp. 71 - 83, (1992).