

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma / Automaatio- ja prosessitekniikka

Antti Luhtaniemi

ASFALTTIASEMAN ENERGIATASE KIVIAINEKSEN LÄMMITYKSESSÄ

Opinnäytetyö 2014

## TIIVISTELMÄ

### KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

#### Energiatekniikan koulutusohjelma

LUHTANIEMI, ANTTI	Asfalttiaseman energiatase kiviaineksen lämmityksessä
Opinnäytetyö	47 sivua + 4 liitesivua
Työn ohjaaja	pt. tuntiopettaja Hannu Sarvelainen
Toimeksiantaja	NCC Roads Oy
Helmikuu 2014	
Avainsanat	asfalttiasema, kiviaines, raskas polttoöljy, energiatase

Asfaltin valmistuksessa suurimpia energian kuluttajia ovat kiviaineksen lämmittäminen ja kosteuden poistaminen. Lämmitysenergian tuottamiseen käytettiin opinnäytetyön tekohetkellä pääasiassa raskasta polttoöljyä yrityksessä, johon opinnäytetyön tein. Raskaan polttoöljyn korkean hintatason vuoksi taloudellisten säästöjen tarkastelu kiviaineksen lämmittämisessä on järkevää. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää asfalttiasema prosessina ja energiatase kiviaineksen lämmityksessä.

Työssä tutkittiin teoreettisesti kiviaineksen lämmittämisen energiatase. Energiatasetta varten täytyi mallintaa kiviaineksen kuivausrummussa tapahtuvat fysiikan ilmiöt. Näihin perustuen saatiin laskettua energian kulutuksen suuruus kulutuskohteittain. Lisäksi työssä tutkittiin savukaasujen ominaisuuksia sekä savukaasujen vertailussa ja raportoinnissa tarvittavia muunnoksia.

Työn tuloksena saatiin teoreettisia laskentamalleja energian ja polttoaineen kulutukseen asfalttiaseman kiviaineksen lämmityksestä kuivausrummussa. Laskentamalleja voidaan soveltaa likimääräisessä energiankulutuksen, lämpötilojen ja savukaasujen tutkimisessa. Laskujen tulokset on esitetty energian ja polttoaineen kulutus tonnia kohden, mikä on vertailukelpoinen yksikkö vertailtaessa eri tehoisia asfalttiasemia. Työssä tehtyjen laskujen tulokset kuvaavat käytännössä tapahtuvaa polttoaineen kuluusta asfalttiasemalla.

Laskujen tuloksina suurin energiankuluttaja oli kiviaineksen lämmitys alle viiden prosentin kiviaineskosteudella. Kiviaineksen kosteuden noustessa yli viiden prosentin suurin energiankuluttaja oli kosteuden haihduttaminen. Savukaasujen ja yli-ilman lämmittämisen lämpötilan laskeminen tuo vähäisiä säästöjä. Savukaasujen lämpötilan pudottamisessa ongelmaksi muodostuu kastepiste suodattimessa, joka vaihtelee lämpötilan ja ilman sisältämän kosteusprosentin mukaan.

Savukaasumittauksista työssä esitetään mittaustulosten redusointi eri happimäärille. Lisäksi on esitetty savukaasujen komponenttipäästöjen muuttaminen viranomaislupa-vaatimusten mukaiseen yksikköön.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Engineering

LUHTANIEMI, ANTTI

Bachelor's Thesis

Supervisor

Commissioned by

February 2014

Keywords

Energy Balance of Asphalt plant in Heating Aggregate

47 pages + 4 pages of appendices

Hannu Sarvelainen, Lecturer

NCC Roads Oy

asphalt plant, aggregate, heavy fuel, energy balance

In asphalt production the most energy is consumed to heating the aggregate and reducing the moisture. In the commissioner company, the heating energy is produced with the use of heavy fuel. The high market price of heavy fuel creates an incentive for investigating savings potential in the heating process. The aim for the thesis was to introduce the asphalt plant process and the energy balance in heating aggregate.

In order to illustrate the energy balance a modeling of physical phenomena for aggregate in dryer drum was required. The results of modeling enabled calculation of energy consumption per category. In addition, the thesis aimed to explore the qualifications of flue gases and the conversions required in comparisons and reporting of flue gases.

The thesis presents theoretical calculation models for energy and fuel consumption in the process for heating aggregate in dryer drum. The calculation models are applicable for exploring average energy consumption, temperatures and flue gases. The results, (which are) presented as energy and fuel consumption per ton, enable comparisons between asphalt plants of different capacities.

If the moisture of the aggregate is less than 5 %, the most energy is consumed to heating aggregate. In case the moisture of aggregate exceeds 5 %, the most energy is consumed in evaporating the moisture. Decreasing the heating temperature of flue gases and excess air only enables minor savings. Also, decreasing of heating temperature of flue gases raises issues with the condensation point in the filter which is variable to air temperature and the air moisture.

In reference to flue gases, the thesis provides an overview for measurement results with different oxygen quantities. In addition, the thesis presents the transformation of flue gases component emissions into a measure unit required for reporting to authorities.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

1	JOHDANTO	5
2	ASFALTTIASEMA PROSESSI JA KOMPONENTIT	6
	2.1 Syöttölaite	7
	2.2 Kuivausrumpu	7
	2.3 Suodatin	8
	2.4 Torni	9
	2.5 Varastosäiliöt ja -siilot	11
3	KOMPONENTIT KIVIAINEKSEN LÄMMITYKSESSÄ	11
	3.1 Kiviaines	12
	3.2 Poltin	13
	3.3 Kuivausrumpu	14
4	KIVIAINEKSEN LÄMMITYKSEN ENERGIATASEEN PERUSTEET	15
	4.1 Ominaislämpökapasiteetti	15
	4.2 Lämmön siirtyminen	15
	4.3 Palaminen	19
	4.4 Lämpöarvo	27
5	ENERGIATASE KIVIAINEKSEN LÄMMITYKSESSÄ	29
	5.1 Kiviaineksen lämmittäminen	29
	5.2 Kiviaineksen kosteuden haihdutus	31
	5.3 Lämpöhäviöt kuivausrummusta	34
	5.4 Palamisilma ja savukaasut	35
	5.5 Mitattujen savukaasujen muunnoksia	42
6	YHTEENVETO	45
	LÄHTEET	47
	LIITTEET	
	Liite 1. Kylläisen vesihöyryn paineen ja tiheyden riippuvuus lämpötilasta	
	Liite 2. Polttoaineen kulutuksen laskentataulukko	
	Liite 3. Kostean ilman Mollier-piirros	

## 1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksen on selvittää asfalttiaseman toimintaprosessi ja keskittyä erityisesti kiviaineksen lämmittämisen tapahtuviin ilmiöihin. Asfalttiaseman tehoa mitataan yleisesti tuntitehona (tn/h). Maksimituntiteho määräytyy annoskoitteisessa asfalttiasemassa sekoittimen koon mukaan. Sekoitin suunnitellaan yleensä jollekin tietylle kilomäärälle, jonka se pystyy sekoittamaan. Toinen tekijä sekoituksessa on sekoitusaika, joka vaihtelee asfalttimassan laadun mukaan. Parhaan mahdollisen tuntitehon saavuttamiseen vaikuttaa asfalttiaseman toimintaprosessissa monta tekijää, mutta yleisin tehonrajoittaja on kiviaineksen lämmitys.

Kiviaineksen lämmityksessä tärkeitä energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat kiviaineksen kosteus ja kiviaineksen tavoitelämpötila. Lisäksi tärkeä tekijä kiviaineksen lämmityksessä on poltin, jonka kautta kaikki lämmitysenergia tuodaan prosessiin. Polttimen palaessa huonosti se lämmittää kiviaineksen huonosti ja aiheuttaa palaessaan nopea. Nämä kaikki vaikuttavat suodattimen toimintaan, jonka avulla kiviaines-pöly erotetaan savukaasuvirrasta. Suodattimen suodatuskapasiteetin ylityttyä ei painero ulkoilman ja prosessin välillä ole riittävän suuri, mikä aiheuttaa pöly- ja savukaasupäästöjä vääristä paikoista. Tällaisessa tilanteessa auttaa yleensä tuntitehon vähentäminen. Opinnäytetyössä tutkitaan teoreettisesti kiviainesrummun ja sen ympärillä tapahtuvaa toimintaa.

Työ on tarkoitettu asfalttiasemanhoitajille, huoltohenkilökunnalle ja materiaalihankinnoista vastaaville henkilöille apuvälineeksi ymmärtämään erilaisia ilmiöitä, joita prosessissa tapahtuu. Työssä olen koonnut teoretietoa prosessissa tapahtuvista fysiikan ilmiöistä ja suorittanut niiden avulla teoreettisia laskelmia kiviaineksen lämmityksen energiankulutuksesta.

Prosessin toiminnan tarkkailussa lämpötila-erojen lisäksi tärkeä työkalu on savukaasujen pitoisuuksien tarkkaileminen. Savukaasujen pitoisuudet antavat tietoa palamiseen liittyvistä asioista ja niiden tarkkailusta on määrätty asfalttiasemien ympäristönsuojelumääräyksissä. Työssäni olen käynyt läpi yleisimpiä muunnoksia savukaasumittauksista lupavaatimusten raportointimuotoon.

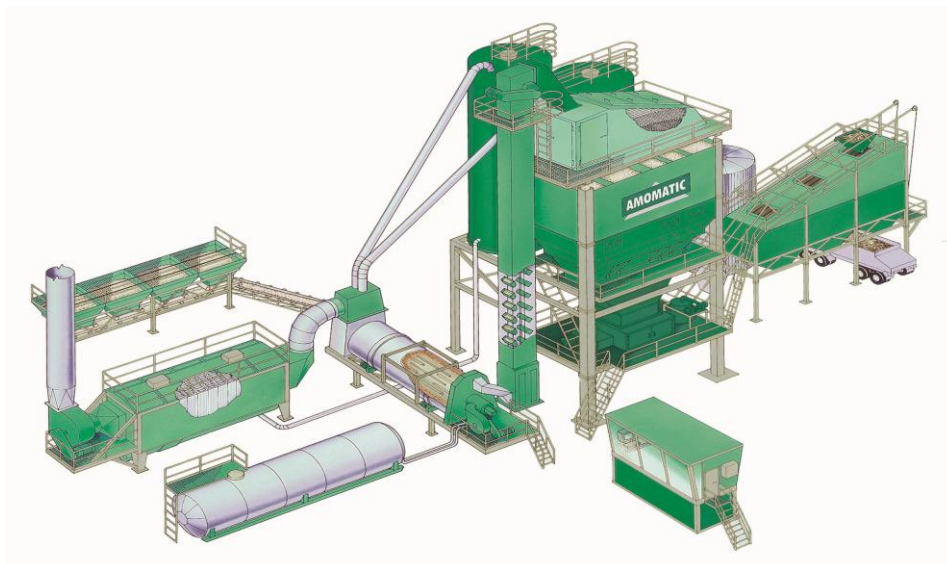
## 2 ASFALTTIASEMA PROSESSI JA KOMPONENTIT

Asfalttiasemalla voidaan valmistaa erilaisia asfalttityyppejä. Asfalttimassan koostumus määrittää asfalttimassan käyttökohteen mukaan. Asfalttimassa koostuu kiviaineksen ja bitumisen sideaineen seoksesta, joiden keskinäiset suhteet määritetään massan reseptissä. (1,31.)

Asfalttiasemat jaetaan kahteen pääryhmään: jatkuvasekoitteisiin ja annossekoitteisiin, ja lisäksi on näistä johdettuja muunnelmia. Asfalttiasemat koostuvat modulaarisista komponenteista, jotka voivat olla tarkoitettuja siirrettäviksi tai kiinteiksi. Komponentteja ovat syöttölaite, vinohihna, kuivausrumpu, suodatin, elevaattori, täytejauhe-, bitumi- ja polttoöljysäiliöt, asfalttimassan varastosiilot sekä torniosassa seula, kiviaineskuumasiilot, raaka-aineiden annostelu- ja sekoitusosa (Kuva 1). (1,40.)

Annossekoitteisessa asfalttiasemassa kiviaines syötetään lajikkeittain pyöräkuormajalla syöttölaitteen siiloihin. Siiloista kivilajikkeet suhteutetaan siilokohtaisilla syöttöhihnoilla kokoojahihnalle reseptin mukaisesti. Kokoojahihna kuljettaa kiviaineksen vinohihnalle, joka siirtää kiviaineksen kuivausrumpuun. Kuivausrummussa kiviaines lämmitetään ja kiviaineksen mukana tullut kosteus haihdutetaan. Kiviaineskuivausrummusta poistokaasut siirtyvät suodattimeen savukaasuimurin aiheuttaman paineeron vaikutuksesta. Ilmavirran mukana kulkeutuva kivipöly erotetaan suodattimessa suodatinpussien avulla poistokaasuvirrasta. Poistokaasut puhalletaan savukaasuimurin kautta taivaalle. Eroteltu kivipöly kerätään suodattimen pohjalta kierukkakuljettimella ja puhalletaan varastosiiloon odottamaan käyttöä asfalttimassan täytejauheena. Kuivausrummusta kiviaines kuljetetaan elevaattorilla seulalle, joka seuloa kiviaineksen raekoon mukaan kuumasiiloihin. (1,41.)

Kuumasiilojen jälkeen alkaa varsinainen asfaltin valmistus, jossa eri asfaltin komponentit punnitaan ja sekoitetaan valmistettavan asfalttimassa reseptin mukaisesti. Asfalttimassan komponentteja ovat raekoon mukaan seulottu kiviaines, täytejauheena käytettävät prosessipöly, kalkkijauhe tai vaihtoehtoisesti lentotuhka sekä bitumi. Kiviainekset punnitaan vuorotellen kiviaineesvaa'alle ja samaan aikaan täytejauheet punnitaan vuorotellen täytejauhevaa'alle, sekä bitumi omalle vaa'alle. Punnitusten jälkeen komponentit tyhjennetään sekoittimeen, joka sekoittaa komponentit homogeeniseksi asfalttimassaksi. Sekoitustapahtuman valmistuttua asfalttimassa siirretään massasiiloon odottamaan kuorma-autokuljetusta lopulliseen käyttökohteeseen. (1,49.)



Kuva 1. Annoskeoitteinen kiinteä asfalttiasema (2.)

## 2.1 Syöttölaite

Syöttölaite koostuu kiviainessiiloista, joiden alla on hihnakujujettimet. Hihnakujujettimien kierrosnopeuksia voidaan säätää taajuusmuuttajilla. Kierrosnopeussäädöllä saadaan säädettyä kiviaineksien suhteutusta ja syöttöä. Kiviaineksen syöttötehoa voidaan säätää yhteissäädöllä, jolloin siilojen välinen syöttösuhde säilyy syöttötehon lisääntyessä tai vähentyessä. Yksittäisen siilon syöttötehoa voidaan säätää kierrosnopeuden säädöllä tai mekaanisesti siilon purkausaukon kokoa muuttamalla. (1,43.)

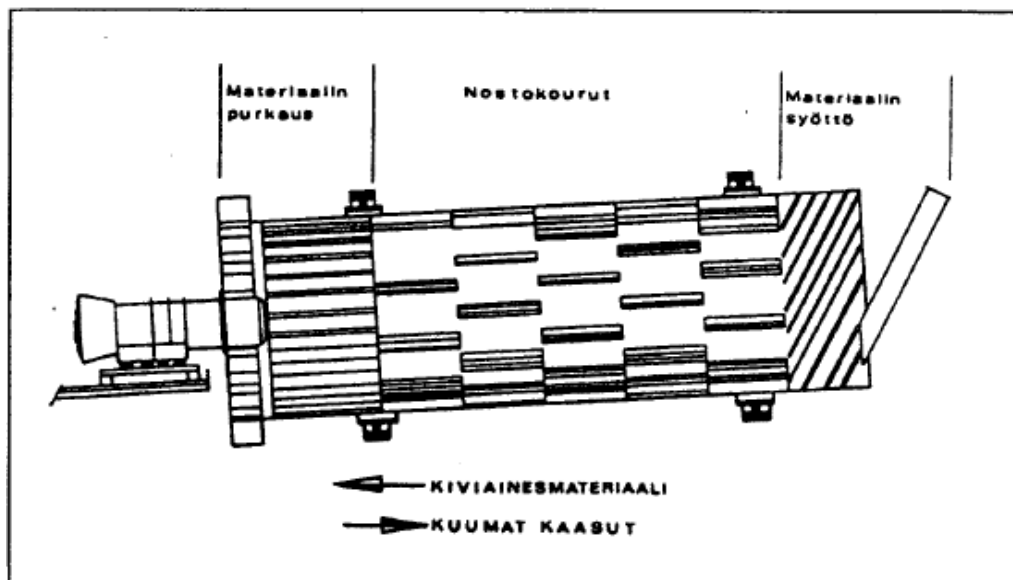
Syöttölaitteessa hienojakoisempien materiaalisiilojen seinämät ovat varustettu täryillä seinämiin kiinnijääneen kiviaineksen irrottamiseksi. Kiviainessiilojen syöttöaukot on varustettu välillä, jotka estävät ylisuurten kivien ja hiekkapaakkujen pääsyn siiloihin. Hihnakujujettimet tiputtavat kiviaineksen kokoojahihnalle, joka kuljettaa sen vinohihnalle. Vinohihna kuljettaa kiviaineksen kuivausrumpuun. (1,43.)

## 2.2 Kuivausrumpu

Kuivausrumpu muodostuu rumpulieriöstä, polttimesta ja rumpulieriön pyöritys- ja kannatuslaitteistosta (Kuva 2). Kuivausrummun ollessa noin  $3,5 - 5^\circ$ :n kulmassa kiviaines siirtyy jokaisella kierroksella rummun purkupäätä ja öljypoltinta kohti vastavirtaan savukaasuja. Rumpulieriön pyöriessä sen sisällä olevat nostokourut nostavat kiviaineksen rummun yläosaan ja kiviaineksen pudotessa alas eri kohdissa muodostuu rummun sisälle kiviverho. Nostokouruilla on suuri merkitys kiviaineksen lämpenemi-

seen tasaisesti. Kourut vaikuttavat myös poistokaasujen lämpötilaan. Suodattimeen kulkeutuvan savukaasuvirran lämpötila pyritään pitämään kastepisteen yläpuolella suodattimen toiminnan varmistamiseksi. Suurin osa prosessin kosteudesta tulee kiviaineksen mukana. (2,16.)

Kiviaines lämmitetään ja kuivatetaan polttimen liekin säteilylämmöllä sekä savukaasuista konvektion avulla tapahtuvalla lämmönsiirrolla. Moduloivaa poltinta ajetaan yli-ilmalla, jotta kiviaineksen mukana tullut kosteus saadaan siirrettyä poistoilman mukana suodattimeen. Suodattimen savukaasuimurilla kuivausrumpuun tuotetaan noin 10 Pa:n alipaine, jolloin savukaasut ja kosteus pysyvät kuivausrummun sisäpuolella niiden siirtyessä suodattimeen. Suodattimesta pölynerottelun jälkeen savukaasut ja kosteus puhalletaan savupiippua pitkin taivaalle. Poltin voi asfalttiasemassa käyttää energialähteenään polttoöljyä, raskaspolttoöljyä, maakaasua tai polttoöljy-pelletti seosta. Kuivausrummusta kuumennettu ja kuivattu kiviaines nostetaan elevaattorin avulla seuralle. (1,43.)



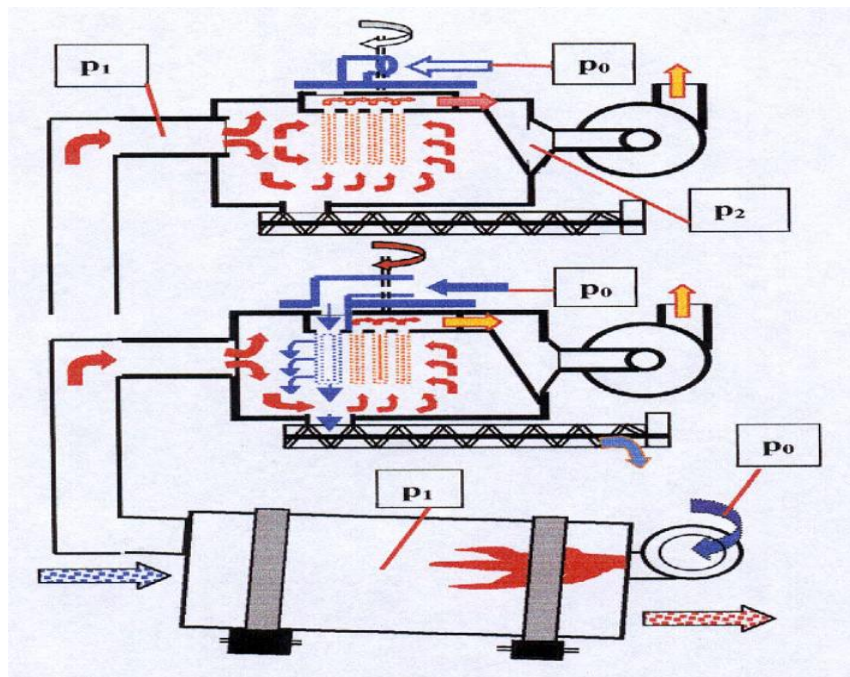
Kuva 2. Kuivausrumpu (3.)

### 2.3 Suodatin

Suodatin toimii pölyn poistajana kuivausrummusta tulevista savukaasuista. Savukaasujen mukana kulkeutuu kiviainespölyä kuivausrummun rauhoituskammioista ja karkearottimesta huolimatta. Savukaasuimuri on taajuusmuuttajasäätöisellä oikosulkumootorilla toimiva keskipakoispuhallin. Savukaasuimurilla tuotetaan kuivausrumpuun ja suodattimeen alipaine, joka ohjaa ilmavirran suodatinpussien läpi. Suodatin-

pussit on valmistettu lämpöä kestävästä erikoiskankaasta ja ne riippuvat suodattimen yläosassa alumiinisten tukien kannattelemina. Suodatin pussien avoimet yläpäätt on jaoteltu eri osastoihin, joita puhdistetaan ilmanjakolaitteen avulla yksi kerrallaan.

Paine-eron vaikutuksesta poistokaasut kulkeutuvat suodatinpussien ulkopinnalta pussien sisäkautta niin sanotulle puhtaalle puolelle. Kivipöly jää suodatinpussin ulkopinnalle, josta se poistetaan osasto kerrallaan kiertävän ilmanjakolaitteen avulla. Ilmanjakolaite kääntää ilman virtaussuunnan pussin sisältä ulospäin paine-eron vaikutuksesta, jolloin kivipöly putoaa pussin pinnalta suodattimen pohjalle (Kuva 3). Kivipöly kerätään suodattimen pohjalta kierukoiden avulla poistokierukalle. Kierukan purkupäystä kivipöly puhalletaan kiertomäntäkompressorilla varastosiiloon odottamaan käyttöä asfalttimassan täytejauheena. (2,73.)

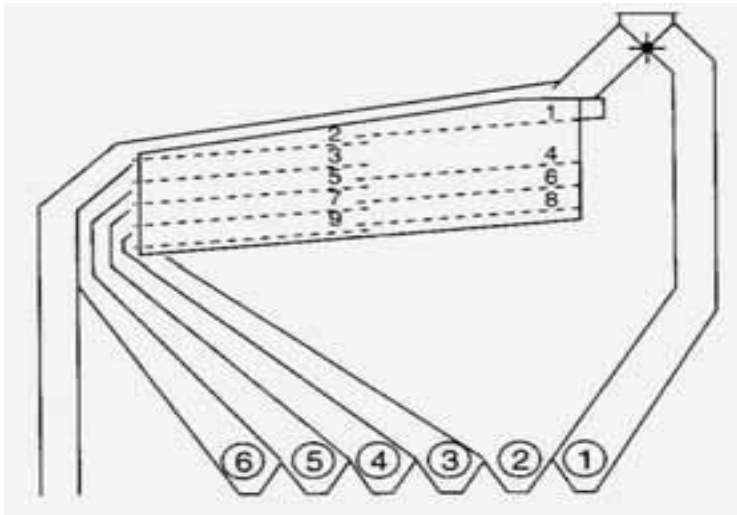


Kuva 3. Suodattimen puhdistimen toiminta (2.)

## 2.4 Tornit

Torniosa muodostuu useammasta päällekkäin kasatusta moduulista. Osia tornissa ovat seulontalaite, kiviaineksenkuumasiilot sekä raaka-aineiden annostelu- ja sekoitinosa. Asfalttiaseman torniosassa tapahtuu asfalttimassan valmistus, joka on valmista käytettäväksi pihan- tai tienpäällysteenä. (1,45.)

Seulontalaitte on yleensä monitasoinen täryseula, joka lajittelee kiviaineksen kuumasiiloihin (Kuva 4). Seulaverkkojen aukkokoot valitaan kattamaan valmistuksessa olevien asfalttimassojen vaatimat kiviaineksen raekoot. Asfalttiaseman seulalaitte ei ole niin suuri ja tehokas, että sen seulonta teho olisi täydellinen. Tästä syystä kiviaineksen esisuhteutus tehdään syöttölaitteella. Seulan seulontakapasiteetti mitoitetaan asfalttiaseman maksimituntitehon mukaisesti, koska seulontateho riippuu syötettävän kiviaineksen määrästä ja rakeisuuskäyrästä. Vaihtoehtoisesti kiviaines voidaan suhteuttaa ainoastaan syöttölaitteella, jolloin se ajetaan ohi seulojen. Tällaisessa tapauksessa on varmistuttava erityisesti rakeisuuskäyrän pysymisestä sallituissa rajoissa. (1,46.)



Kuva 4. Seulalaitteisto ja kuumasiilot (1.)

Raaka-aineiden annostelu tapahtuu vaakojen kautta. Torniosassa kuumasiilojen alla on kiviainesvaaka, johon kiviaines annostellaan kuumasiilokohtaisten luukkujen avulla vuorotellen kiviainesvaa'alle. Kivivaa'an läheisyydessä on täytejauhevaaka, johon annostellaan täytejauhosiiloista prosessipöly ja kalkkijauhe. Täytejauhevaa'an annostelu tapahtuu kierukoiden välityksellä täytejauhosiiloista. Sideaine eli bitumi annostellaan omalle vaa'alle jatkuvasti kierrättävästä bitumilinjasta venttiilin avulla. Sideainetta voi olla käytössä useampaa lajia, jolloin ne annostellaan peräkkäin. (1,48.)

Sekoitus tapahtuu annosperiaatteella jatkuvana, kunnes tilattumäärä on valmistettu. Sekoittimeen vaa'at tyhjäntyvät automaation ohjaamassa järjestyksessä, jonka jälkeen alkaa uusi punnituskierros. Sekoittimessa ainekset sekoittuvat asfalttimassaksi reseptissä määritetyn ajan. Sekoituksen valmistuttua asfalttimassa pudotetaan massavauvuun, joka kuljettaa sen varastosiiloon odottamaan kuljetusta työmaalle. (1,49.)

## 2.5 Varastosäiliöt ja -siilot

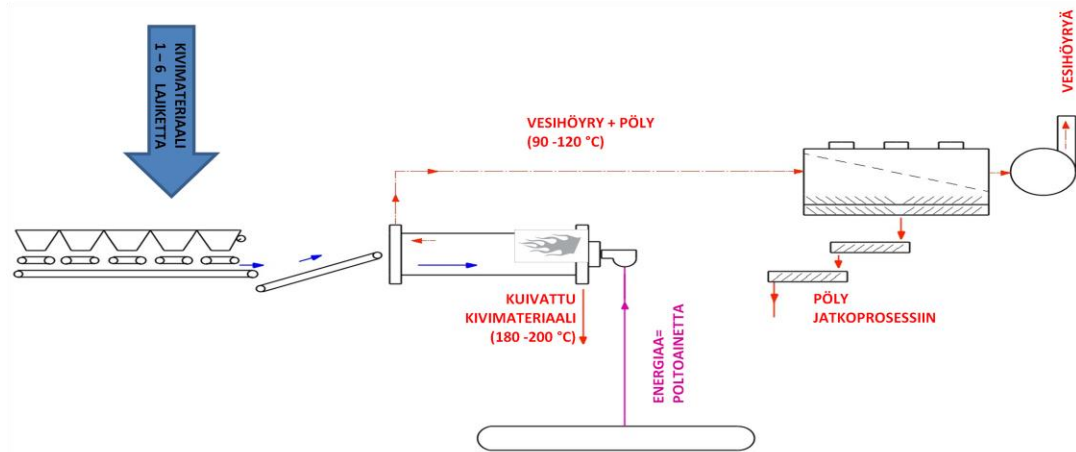
Asfalttiasemassa nestemäisten aineiden säiliöitä ovat yksi tai useampi sideaine- eli bitumisäiliö ja raskaspolttoöljysäiliö. Säiliöt ovat pystyyn tai vaaka-asentoon sijoitettuja lämpöeristettyjä lieriöitä. Nesteiden pumpattavuuden vuoksi niitä täytyy lämmittää. Tämän takia säiliöt on varustettu lämmityslaitteistoilla. Lämmöntuottamiseen käytetään sähkövastuksia ja lisäksi joissakin sideainesäiliöissä on käytössä tuliputket, jotka on varustettu öljy- tai kaasupolttimella. Säiliöt on varustettu siirtopumpuilla ja putkistolla, jonka avulla säiliössä oleva ainetta voidaan kierrättää ja se voidaan siirtää toiseen säiliöön. (1,47.)

Täytejauheet varastoidaan pystymallisiin lieriöihin, joiden alaosassa on annosteluun tarvittava kierukkakuljetin. Täytejauhesiiloihin varastoidaan prosessipöly ja kalkkijauhe, jonka takia siiloja on oltava vähintään kaksi kappaletta. (1,48.)

Valmiin asfalttimassan varostosiiloja on yleensä kaksi tai useampia. Asfalttimassa kuljetetaan sekoittimen alta vaijerivetoisella massavaunulla haluttuun varostosiiloon. Varostosiilon pohjaluukusta kuorma-auton kuljettaja laskee asfalttimassan kuorma-auton lavalle työmaalle kuljetusta varten. Varostosiiloihin voidaan valmistaa useampaa eri asfalttimassaa odottamaan kuljetusta. Toinen siilojen etu on, että voidaan tasoittaa menekin vaihteluiden aiheuttamaa tarvetta pysäyttää asfalttiasema. (1,51.)

## 3 KOMPONENTIT KIVIAINEKSEN LÄMMITYKSESSÄ

Asfaltin valmistuksessa suurimmat energiankuluttajat ovat kiviaineksen lämmittäminen ja kuivatus kiviainesrummussa (Kuva 5). Kiviaineksen lämmittämiseen käytettävän polttimen teho vaihtelee 10 - 20 MW:n välillä riippuen asfalttiaseman tuotantotehosta (tn/h). Suuresta energiankulutuksesta johtuen energiatehottoman kiviaineksen lämmityksen käyttökustannukset nousevat korkeiksi. Huonosti toimiva kuivausrumpu vaikuttaa myös asfalttimassan laatuun ja kestävyYTEEN. Heikosti lämmitettyyn kiviainekseen jää kosteutta ja bitumi tarttuu huonosti. Tällöin asfalttimassaan jäänyt tai pääsevä kosteus voi aiheuttaa jäätymistä, jolloin asfaltin kiinteä rakenne hajoaa. (3,2.)



Kuva 5. Kiviaineksen lämmitys- ja kuivausprosessi (2.)

### 3.1 Kiviaines

Kiviaineksen ominaisuuksista tärkeimpiä lämmittämisen energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat kiviaineksen kosteusprosentti ja tavoitelämpötila. Kosteuden poistaminen kiviaineksestä nostaa energiankulutusta ja lisää kuivausrummun läpi ajettavan ilman määrää. Ilman määrän täytyy olla riittävän suuri pystyäksään kuljettamaan kiviaineksen mukana tulevan kosteuden suodattimeen ja sieltä savupiipun kautta taivaalle. Kiviaines voi jäädä kosteaksi, vaikka lämpötila on yli veden haihtumislämpötilan.

Tämä ilmiö voi tapahtua, jos ilmalla ei ole kykyä ottaa kosteutta vastaan enempää valitsevassa lämpötilassa. Tällaisessa tilanteessa kosteus synnyttää kiven pinnalle vesikalvon, vaikka kiven lämpötila olisi korkeampi kuin haihtumislämpötilan. Kiven pinnan ollessa kostea prosessin edetessä alkaa sen pintaan kertyä pölyä, joka aiheuttaa bitumin tartunnassa ongelmia. Bitumin tarttuessa huonosti kiviainekseen on mahdollista, että asfaltin rakenteesta ei tule kiinteää.

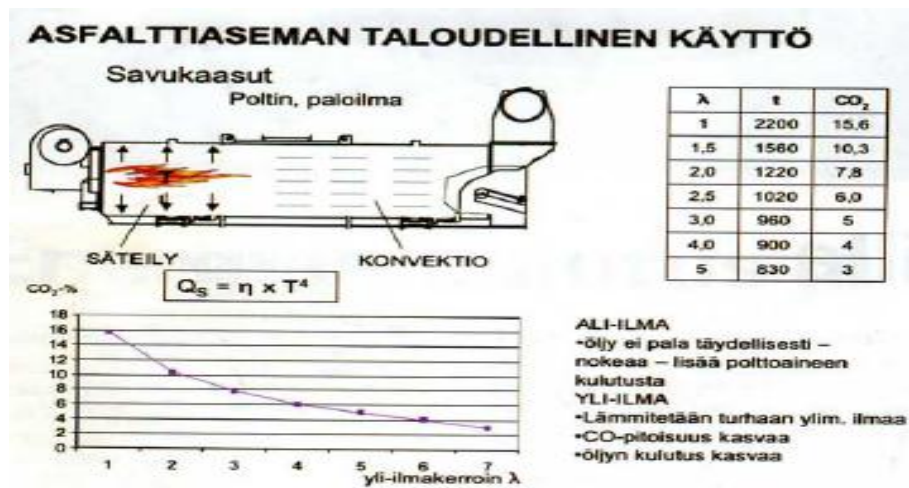
Kiviaineksen liiallinen kuumentaminen voi taas vaikuttaa negatiivisesti kiven kestävyysominaisuuksiin ja se lisää tarpeettomasti energiankulutusta. Alhaisesta lämpötilasta ongelmaksi muodostuu kiviainekseen jäävä kosteus. Asfalttimassan alhainen lämpötila aiheuttaa puolestaan ongelmia asfaltinlevityksessä bitumin viskositeetin ollessa voimakkaasti lämpötilariippuvainen. Asfalttimassan työstettävyys on tämän seurauksena heikompi.

Kuumennettavan kiviaineksen lämpötilan mittaamisessa tulee ottaa huomioon kiviainesrummista tulevan materiaalin rakeisuus. Lämpötilaerot voivat olla suuria hienon ja karkean kiviaineksen välillä, joka aiheuttaa suuriakin lämpötilaeroja. Tarkkailtaessa lämpötiloja on hyvä mitata materiaalin lämpötilaa useammasta kohdasta prosessia. (3,3.)

### 3.2 Poltin

Polttimen tehtävä on sekoittaa käytettävä polttoaine palamiseen tarvittavan ilman kanssa. Polttimen puhdas palaminen vähentää päästöjä ympäristöön ja auttaa suodatinpussien puhdistumisessa. Polttoaineen ja ilman sekoittuminen tapahtuu polttimen palopään rakenteissa. Raskasta polttoöljyä käyttävä paineöljyhajotteinen poltin sumuttaa polttoaineen suuttimessa. Öljy syötetään tyypillisesti 20 - 30 baarin paineella suuttimessa sijaitseviin tangentiuriin, jotka saavat öljyn voimakkaaseen pyörimisliikkeeseen urien jälkeisessä pyörrekammiossa. (4,60.) Täydellisen palamisen edellytyksenä on oikea pisarakoko (alle 0,05 mm), koska pisaran palamisaika kasvaa suhteessa pisaran halkaisijan toiseen potenssiin. Tämän vuoksi öljyn sumuttaminen on tärkeää. (5,130.)

Öljyn pisarakoon ollessa liian suuri palaminen ei ole täydellistä. Palamisen ollessa epätäydellistä näkyy se nokena ja palamattomana polttoaineena. Polttoaineen sumuuntuessa liian pieniksi pisaroiksi on vaarana, että polttoaine höyrystyy tullessaan ulos suuttimesta. Höyrystynyt polttoaine saattaa irrota palopäästä ilmapirran mukana, mikä aiheuttaa epätäydellistä palamista. Polttoaineen höyrystymistä aiheuttaa myös liian korkea polttoaineen lämpötila. Huono palaminen kiviainesrummussa aiheuttaa suodatimen puhdistusprosessiin ongelmia. Asfalttiasemassa ihanteelliseksi CO<sub>2</sub>-arvoksi on osoittautunut 5- 7 %, jolloin ilmaylimäärä on riittävä kosteuden kuljettamiseen (Kuva 6). Polttimen palotapahtuman ollessa hyvä on polttimen säädöllä aikaansaattavat energiasäästöt melko rajalliset. (6,20.)



Kuva 6. CO<sub>2</sub> pitoisuus ja ilmaylimäärä (6.)

### 3.3 Kuivausrumpu

Kiviaineksen lämmittäminen on lämmönsiirtoa. Kiviaineksen lämpenemiseen ja savukaasujen lämpötilaan vaikuttaa erittäin paljon kuivausrummun sisällä olevat nostokourut. Oikeanlaisilla nostokouruilla saadaan pienennettyä energian kulutusta, parannettua asfalttimassan laatua ja pienennettyä käyttökustannuksia. Kuivausrummun pyöriessä syntyy rummun sisälle virtaavasta kiviaineksesta ns. heittoverho, jolloin kiviaines putoaa kuuman savukaasuvirran läpi. Heittoverhon ollessa harva poistokaasujen lämpötila nousee ja lämpöenergiaa virtaa suodattimeen (Kuva 7). Verhon ollessa tiheä poistokaasujen lämpötila laskee ja vaarana on kastepisteen lähellä toimiva suodatin. Varmuustekijöiden vuoksi on poistokaasujen lämpötilan hyvä olla 30 - 40 °C kastepisteen yläpuolella. Kuivausrummussa tapahtuu lämpöhäviöitä lämpösäteilyn ja konvektion muodossa. Lämpöhäviöiden poistaminen eristämällä tai suojaamalla tuulenvaikutukselta on energiatalouden ja melupäästöjen vuoksi kannattavaa. (3,11.)



Kuva 7. Kiviainesheittoverho (3.)

## 4 KIVIAINEKSEN LÄMMITYKSEN ENERGIATASEEN PERUSTEET

Kiviaineksen lämmityksen energiataseen tarkastelu keskittyy termodynamiikan toisen pääsäännön, entropian, ympärille. Toisessa pääsäännössä tietyt ilmiöt tapahtuva tiettyyn suuntaan tai itsestään: lämpötilaerot pyrkivät tasaantumaan, aineet reagoivat keskenään tai sekoittuvat toisiinsa. Nämä ilmiöt eivät palaudu itsestään ja tapahtuvat ilman ulkoisia vaikutteita. Systeemin tila ja entropia voivat muuttua energiansiirroista johtuen kolmella tavalla: yleisimpiä muutoksen aiheuttajia ovat lämmönsiirron ja työn avulla tapahtua muutos. Lisäksi muutos voi tapahtua systeemin sisäpuolella vallitsevan epätasapainon tasaantumisen vuoksi. (7,31.)

### 4.1 Ominaislämpökapasiteetti

Lämpökapasiteetilla kuvataan systeemiin tuodun lämpömäärän ja sen seurauksena aiheuttaman lämpötilannousun suhdetta. Lämpökapasiteetti määritetään kokeellisesti kalorimetrin avulla tuomalla tunnettu lämpömäärä ja mittaamalla systeemin lämpötilan nousu. Tulokset kokeesta vaihtelevat sen mukaan pidetäänkö paine vai tilavuus vakiona. Vakiotilavuudessa määritettävässä kalorimetrisessä prosessissa tuotu lämpömäärä tiedetään ja sitä vastaava lämpötilannousu mitataan. Tällä tavalla saadaan määritettyä ominaislämpö  $C_v$  (J/molK). Vakioaineessa määritettävässä prosessissa ympäristöön tehty työ on ainoastaan paisuntatyö. Tästä syystä ominaislämpö määritellään ominaisentalpian avulla  $C_p$  (J/molK). Ominaislämpö saadaan johdettua molaa-risuureesta yleisemmin laskennassa käytettyyn massayksikkömuotoon ominaislämpökapasiteetti  $c_p, c_v$  (J/kgK) kertomalla ominaislämpö aineen moolimassalla (kg / mol). (8,43.)

### 4.2 Lämmön siirtyminen

Lämpö on toinen termodynamiikassa tunnettu energiansiirtomuoto systeemin ja sen ympäristön välillä. Lämmönsiirtymisen edellytyksenä on, että on olemassa lämpötilaero. Sen vuoksi lämpöenergiaa tutkitaan yleensä lämpötilan tai lämpötilaeron avulla. Lämmön siirtyminen tapahtuu korkeammasta lämpötilasta alhaisempaan. Lämpöenergialle on ominaista, että se ei koskaan siirry itsestään alemmasta lämpötilasta korkeampaan ilman työn apua. Lämmönsiirtymistä tapahtuu pääasiassa kolmessa eri muodossa: johtamalla, konvektiona ja säteilemällä. (8,22.)

## Johtuminen

Lämmön johtuminen tapahtuu systeemistä toiseen suoraan molekyylien keskinäisten törmäysten välityksellä ilman aineensiirtoa tai systeemin sisällä. Lämmönjohtavuus on aineen fysikaalinen ominaisuus, jolla kuvataan aineen kykyä johtaa lämpöä. (7,255.) Johtumalla tapahtuvaa lämpövirtaa ( $\text{W/m}^2$ ) voidaan mallintaa Fourierin kaavalla.

$$q = -\lambda * \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

$q$  = lämpövirran tiheys ( $\text{W/m}^2$ )

$\lambda$  = lämmönjohtavuus ( $\text{W/mK}$ )

$\frac{dT}{dx}$  = lämpötilagradientti

Yksinkertaisessa kappaleessa, jossa lämmönjohtavuus vakio voidaan käyttää edellisestä johdettua kaavaa:

$$q = -\lambda * A * \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$q$  = lämpöteho (W)

$A$  = kappaleen pinta-ala ( $\text{m}^2$ )

$\Delta T$  = lämpötilaero korkeamman ja alemman lämpötila pintojen välillä

$\Delta x$  = kappaleen paksuus (m)

## Konvektio

Konvektioksi kutsutaan tapahtumaa, jossa pinnan ja sitä ympäröivän kaasun tai nesteen välillä on lämpötilaero ja lämpöenergiansiirtoa tapahtuu rajakerrosvirtauksen avulla. (8.) Konvektio voi olla vapaata tai pakotettua. Vapaassa konvektiossa nesteen tai kaasun virtaus tapahtuu tiheyseroista voimakentässä (painovoima tai keskipakovoimakenttä). Pakotetussa konvektiossa nesteen tai kaasun virtaus aiheutuu jostakin

ulkoisesta tekijästä. Konvektiivisen lämmönsiirtokerroimen  $\alpha$  ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ) riippuu pinnan päällä virtaavasta aineesta ja sen virtauskentästä. Suuruusluokkina eri ainemuodoille voidaan virtausnopeuksista riippuen pitää seuraavia arvoja: kaasuvirtaus  $\alpha = 5 - 100 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ , nesteille  $\alpha = 1000 - 5000 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  ja kiehuvalle vedelle ja lauhtuvalle höyrylle  $\alpha = 5000 - 10000 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ . Konvektion kautta tapahtuva lämpövirta lasketaan seuraavalla kaavalla. (7,257.)

$$q = \alpha * (T_p - T_y) \quad (2)$$

$q$  = lämpövirran tiheys ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$\alpha$  = lämmönsiirtokerroin ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

$T_p$  = pinnan lämpötila (K)

$T_y$  = ympäröivän nesteen tai kaasun lämpötila (K)

### Lämpöhäviö

Lämpöhäviöitä laskettaessa tarvitaan molemmat lämmön siirtomuodot, johtuminen ja konvektio. Esimerkkinä on seinärakenteen läpi tapahtuvan lämpöhäviön laskeminen. Seinärakenne koostuu erilaisista ja eripaksuisista materiaaleista. Jokaisella materiaalilla on erilainen lämmönjohtavuus. Lisäksi laskennassa vaikuttaa sisä- ja ulkopinnan lämmönsiirtokerroin. Seinän kokonaislämmönläpäisyyluku saadaan seuraavalla kaavalla. (8,23.)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_s} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_u}} \quad (3)$$

$k$  = kokonaislämmönläpäisyyluku ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

$\alpha_s$  = sisäpinnan lämmönsiirtokerroin ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

$\alpha_u$  = ulkopinnan lämmönsiirtokerroin ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

$s_1 - s_3$  = eri materiaalien paksuudet (m)

$\lambda_1 - \lambda_3$  = eri materiaalien lämmönjohtavuudet (W/mK)

Lämpöteho seinälle voidaan laskea kaavalla:

$$Q = k * A * (T_s - T_u) \quad (4)$$

$Q$  = lämpöteho (W)

$A$  = seinän pinta-ala (m<sup>2</sup>)

$T_s$  = lämpötila sisällä (K)

$T_u$  = lämpötila ulkona (K)

### Lämpösäteily

Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jota kaikki kappaleet lähettävät lämpötilansa perusteella. Säteilyn osuessa kappaleeseen osa energiasta absorboituu, osa heijastuu ja osa menee läpi. Säteilyenergian ollessa tasapainotilassa on tuleva ja lähtevä energia yhtä suuria. Kappaleen pinnan ollessa kiiltävä ja sileä heijastuu lämpösäteily kuten valonkin. Karkeat pinnat heijastavat diffuusisti, eli kaikkiin suuntiin. Musta kappale absorboi teoriassa kaiken säteilyn itseensä eikä heijasta mitään. Käytännössä täysin mustaa kappaletta ei ole, esimerkkinä noki heijastaa noin 5 %. (7,258.) Säteilytehoa mallinnetaan mustan kappaleen säteilytehonkaavalla. Säteilytehonkaavaa muutetaan muuttamalla emissiokerrointa muuttamalla vastaamaan kappaleen pinnan kerrointa. Säteilyteho voidaan määrittää kappaleenpinnasta, kun tiedetään sen lämpötila. (8,24.)

Säteilytehon kaava:

$$q_s = \varepsilon * \sigma * T_s^4 \quad (5)$$

$q_s$  = säteilyteho (W/m<sup>2</sup>)

$\varepsilon$  = emissiokerroin (dimensioton)

$\sigma = \text{ns. Boltzmannin vakio } 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$

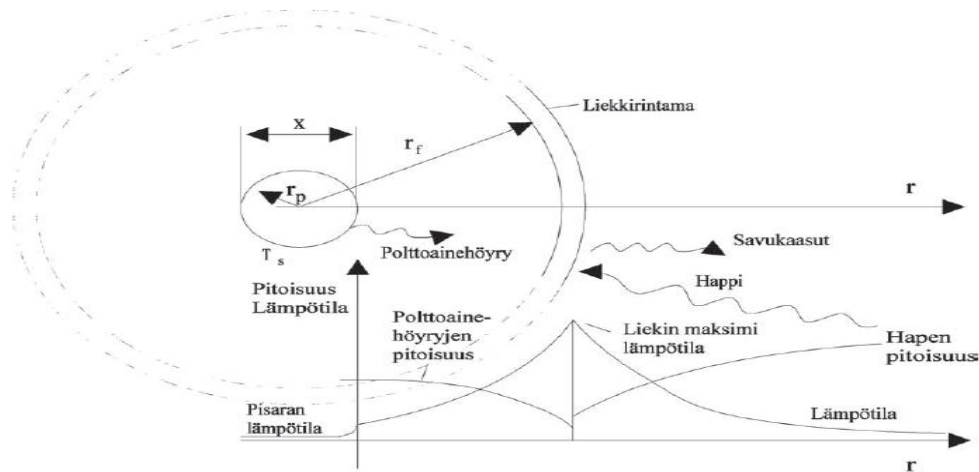
$T_s = \text{kappaleen pintalämpötila (K)}$

### 4.3 Palaminen

Palaminen tarkoittaa aineen kemiallista yhtymistä hapen kanssa. Polttoaineessa hapen kanssa reagoivia aineita ovat hiili (C), vety (H), rikki (S) ja typpi (N). Palamisreaktiossa vapautuu kullekin aineelle ominainen energia lämpönä, jota kutsutaan eksotermiseksi reaktioksi. Poikkeuksena kuitenkin typen ja hapen välinen reaktio, joka kuluttaa lämpöä. Tällaista ilmiötä kutsutaan endotermiseksi eli lämpöä kuluttavaksi. (5,79.)

#### **Nestemäisen polttoaineen palaminen**

Nestemäiset polttoaineet höyrystyvät ympäröivän lämmön vaikutuksesta ja reagoivat tämän jälkeen hapen kanssa. Nestemäisillä polttoaineilla syttymis- ja palamislämpötila on korkeampi kuin höyrystymislämpötila. Polttoaineen nestepisara lämpenee tulipesän säteilyn, savukaasujen paluuvirtauksen vaikutuksesta, jonka seurauksena hiilivedyistä kevyimmät alkava haihtua. Höyrystyessään polttoainekaasu muodostaa pilven nestepisaran ympärille. Höyrystynyt polttoaine kulkeutuu diffuusion vaikutuksesta pois päin nestepisarasta kunnes se kohtaa vastakkaisesta suunnasta diffundoituvaa happea ja reagoi sen kanssa. Nestepisaran ympärille muodostuu palamisreaktorintama, joka on palon muotoinen ja halkaisijaltaan 4 - 10 kertaa nestepisaran halkaisija. Kaasun pitoisuus on nolla reaktiovyöhykkeessä ja sen ulkopuolella. Happea ei esiinny palamisvyöhykkeen sisäpuolella ja sen pitoisuus pienenee ulkoapäin tultaessa palamisvyöhykkeelle. Lämpötila on korkeimmillaan palamisrintaman kohdalla (Kuva 8). (4,52.)



Kuva 8. Nestepisaran palamisen periaate (4.)

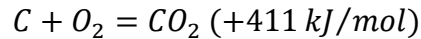
Nestemäinen polttoaine tulisi pystyä hajottamaan polttimessa mahdollisimman pieniksi pisaroiksi. Pieni pisarakoko suurentaa lämmönsiirtopinta-alaa, jolloin polttoainemassa saadaan höyrystettyä ja poltettua nopeammin. Palamisen suurin hidastaja on nesteen höyrystymisnopeus. (5,82.)

Raskaan polttoöljyn palaessa ei kaikki polttoaineesta höyrysty. Höyrystymisen jälkeen jäljelle jää niin kutsuttu koxinappi. Kaasuuntuneiden komponenttien palaminen lämmittää koxipartikkelin syttymislämpötilaan. Palamisreaktio koxipartikkelin ja hapen välillä tapahtuu koxipartikkelin pinnalla pintareaktiona. Alemmissa palolämpötiloissa happi absorboituu koxinpinnalle ympäröivistä kaasuista aiheuttaen hiilimonoksidia ja hiilidioksidia reagoidessaan hiilen kanssa. Korkeammassa palamislämpötiloissa hapen osuus hiilen pinnassa pienenee synnyttäen hiilen pinnalla hiilimonoksidia. Hiilimonoksidin siirryttyä pois partikkelin läheisyydestä happirikkaaseen kaasuun se oksidoituu hapen vaikutuksesta hiilidioksidiksi. (4,52.)

### Palamisreaktiot

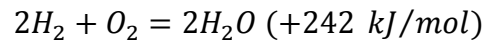
Palamisilman ja savukaasujen määrä voidaan laskea, kun tunnetaan polttoaineen koostumus ja palamisreaktiot. Savukaasuja analysoimalla voidaan päätellä palamisen täydellisyys ja polttoaineilmasuhde. Polttoaineet sisältävät palavina aineina hiiltä, vetyä ja rikkiä. Näiden aineiden reaktiot hapen kanssa on tunnettava palamisilma- ja savukaasulaskuissa. Teoriassa on helpompi esittää palamisreaktiot nettoreaktioina eli kaavoista selviävät lähtöaineet ja lopputuotteet. Käytännössä reaktiot tapahtuvat monimutkaisten, eri välivaiheita sisältävien reaktioketjujen kautta. (5,82.)

Hiilen palamisen nettoreaktiokaava on:



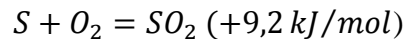
Hiilen nettoreaktiokaavassa yksi mooli reagoi yhden moolin kanssa happea tuottaen yhden moolin hiilidioksidia. Reaktion tapahtuessa vapautuu lämpöä  $411 \text{ kJ/mol}$ . Hiilen palaessa epätäydellisesti syntyy haitallista hiilimonoksidia CO. (4,53.)

Vedyn palamisen nettoreaktiokaava on:



Vedyn nettoreaktiokaavassa kaksi moolia vetyä tarvitsee palaakseen yhden moolin happea. Tuloksena syntyy kaksi moolia vettä ja lämpöä vapautuu  $242 \text{ kJ/mol}$ . Vedyn palaessa syntyy vesihöyryä. Tämän vuoksi paljon vetyä sisältäviä polttoaineita pidetään ympäristöystävällisinä. (5,84.)

Rikin palamisen nettoreaktiokaava on:



Rikin nettoreaktiokaavassa yksi mooli rikkiä reagoi yhden moolin kanssa happea, jolloin syntyy yksi mooli rikkidioksidia. Lämpöä vapautuu  $9,2 \text{ kJ/mol}$ .

Lisäksi polttoaineissa on komponentteja, jotka vaikuttavat palamistapahtumaan, mutta eivät pala. Tällaisia komponentteja ovat happi, typpi, kosteus ja tuhka. Happi polttoaineessa pienentää palamisilman tarvetta. Typestä osa muodostaa ympäristölle haitallisia typenoksideja. Kosteus polttoaineessa pienentää polttoaineen lämpöarvoa. Polttoaineen palamaton tuhka lisää savukaasujen pölypitoisuutta ja puhdistuksen tarvetta. Jotkin tuhkan sisältämät komponentit (Na, V) kiihdyttävät katalyytteinä palamisnopeutta moninkertaisesti. Laskettaessa savukaasumääriä ja ilman tarvetta voidaan olettaa, että typpi, kosteus ja tuhka siirtyvät sellaisinaan savukaasuihin. (4,53.)

## Palamisilmantarve

Palamisilman tarve esitetään yleensä kg ilmaa / kg polttoainetta kohti ( $kg_i / kg_{pa}$ ). Palamisilmantarve saadaan laskettua polttoaineen koostumuksesta ja polttoaineen komponenttien sekä hapen välisistä reaktioyhtälöistä. Polttoaineen komponentit ilmoitetaan yleensä polttoaineen painoprosenteina, joista saadaan laskettua komponentit grammoina tai kilogrammoina (Taulukko 1). Polttoaineen palamisreaktioihin osallistuvien komponenttien määrää kuvataan mooleina, jolloin painoyksikkö on muutettava mooleiksi jakamalla painoyksikkö ( $W$ ) komponentin molekyylipainolla. (5,84.)

Taulukko 1. palamislaskujen polttoaineen lähtötiedot

Komponentti	Komponentin määrä g / $kg_{pa}$	Molekyylipaino g / mol	Komponenttien ainemäärä mol / $kg_{pa}$
C (hiili)	$W_c$	12,01	$n_c = W_c / 12,01$
H <sub>2</sub> (vety)	$W_{H_2}$	2,016	$n_{H_2} = W_{H_2} / 2,016$
S (rikki)	$W_S$	32,06	$n_S = W_S / 32,06$
O <sub>2</sub> (happi)	$W_{O_2}$	32,00	$n_{O_2} = W_{O_2} / 32,00$

Polttoaineen palamiseen tarvittava happimäärä saadaan laskettua reaktioyhtälöiden avulla. Hiilen palaessa täydellisesti tarvitsee se saman moolimäärän happea. Rikin palaessa tarvitaan sama moolimäärä happea. Vedyn palaminen tarvitsee happea puolet vedyn moolimäärästä. Yhteenlaskettuna eri komponenttien hapen tarve ja siitä vähennettynä polttoaineessa olevan hapen määrä saadaan selville palamiseen tarvittavan hapen määrä teoreettisella ilmakertoimella  $\lambda = 1$ . Hapen määrä saadaan seuraavalla kaavalla. (4,54)

$$\frac{N_{O_2(teor.)}}{m_{pa}} = n_c + 0,5 * n_{H_2} + n_S - n_{O_2} \quad (6)$$

$$\frac{N_{O_2(teor.)}}{m_{pa}} = \text{hapen ainemäärä (mol / } kg_{pa})$$

Palamiseen tarvittavan hapen määrä saadaan ilmasta, joka sisältää happea 21 % ja typpeä 79 %. Ilma sisältää muitakin komponentteja kuten argonia. Muut komponentit

sisällytetään yleensä typen osuuteen ilmassa. Teoreettinen kuiva ilmamäärä saadaan laskettua seuraavalla kaavalla. (5,85.)

$$\frac{N_{i(teor)}}{m_{pa}} = \frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} * \frac{1}{m_{pa}} = \frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} * 4,76 \quad (7)$$

Laskun tulos mol / kg<sub>pa</sub> voidaan muuttaa grammoiksi (g / kg<sub>pa</sub>) kertomalla se ilman molekyyli painolla 28,96 g / mol. Mikäli ilmamäärä halutaan ilmoittaa tilavuusyksiköissä, moolimäärä kerrotaan ilman moolitilavuudella 22,40 l/mol.

Laskuissa käytetty ilmamäärä on kuivailmamassa. Todellisuudessa ilma sisältää kosteutta, joten se on kuivan ilman ja vesihöyryn seos. Ilman ollessa kylläistä sen suhteellinen kosteus on 100 %. Suhteellinen kosteus ilmoitetaan vesimääränä kuivaa ilmaki- loa kohti (kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub> / kg<sub>ki</sub>). Palamisilma ei yleensä ole kylläistä, vaan sen suhteellinen kosteus on 40 - 60 %. Esimerkiksi ilmankosteuden ollessa 40 % kylläisen ilman sisältämästä kosteudesta, lisää kosteus palamisilman määrää 0,1 - 1 %. Käytännön lasken- nassa tämä voidaan jättää huomioimatta, mutta tarkoissa laskuissa se on luonnollisesti otettava huomioon. (5,86.)

Teoreettisella ilmamäärällä polttoaine ei käytännössä saavuta täydellistä palamista. Palamiseen käytettävän todellisen ilmamäärän ja teoreettisen ilmamäärän suhdetta ni- mitetään ilmakertoimeksi ( $\lambda$ ). Nestemäisten ja kaasumaisten polttoaineiden ilmaker- roin on kattilakäytössä yleensä luokkaa 1,05 - 1,3. Ilmakertoimen ja teoreettisen il- mamäärän avulla saadaan laskettua todellinen ilmamäärä. (5,86.)

$$\frac{N_{i(tod)}}{m_{pa}} = \frac{N_{i(teor)}}{m_{pa}} * \lambda \quad (8)$$

### Savukaasut

Savukaasujen koostumus ja määrä määritellään polttoaineen koostumuksen ja pala- misreaktioiden avulla. Savukaasuja syntyy reaktioyhtälöiden mukaisesti yhtä monta moolia kuin polttoaineessa on palavaa komponenttia. Lisäksi savukaasuihin tulee il- man mukana tullut typpi ja mahdolliset palamattomat komponentit sellaisenaan. Typ- peä tulee 3,76-kertaisesti palamisessa tarvittavan hapen verran. Komponenttien määri- en ollessa tiedossa mooleina saadaan savukaasujen koostumus ja määrä laskettua seu- raavalla kaavalla. (5,86.)

$$\frac{N_{sk(teor)}}{m_{pa}} = n_c + n_{h_2} + n_s + 3,76 * \frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} + n_n + n_{H_2O} \quad (9)$$

Savukaasut saadaan muutettua kiloiksi kertomalla komponenttien moolimäärät niiden molekyylipainolla. Mikäli savukaasut halutaan muuttaa tilavuusyksiköiksi, kerrotaan moolit moolitilavuuksilla. Useimmilla kaasuilla moolitilavuuden tarkkuudeksi riittää 22,40 l / mol. (4,55.)

Savukaasuista puhuttaessa tulee esiin kuivat ja kosteat savukaasut. Kuiviin savukaasuihin ei lasketa mukaan vesihöyryä. Kosteisiin savukaasuihin lasketaan mukaan vesihöyry. (4,55.) Kun tunnetaan syntyvien savukaasujen määrä teoreettisessa palamisessa ilmakertoimella yksi ( $\lambda=1$ ) ja polttoaineen palamisilmantarve, saadaan muilla ilmakertoimilla syntyvien savukaasujen määrä. Ilmakertoimen suurentuessa polttoaineen palamisessa syntyvä savukaasuvirta pysyy samana ja teoreettista suurempi ilmamäärä siirtyy savukaasuihin sellaisenaan. Savukaasumäärä suuremmalla ilmakertoimella voidaan laskea seuraavalla kaavalla. (5,87.)

$$\frac{N_{sk(tod)}}{m_{pa}} = \frac{N_{sk(teor)}}{m_{pa}} + (\lambda - 1) * \frac{N_{i(teor)}}{m_{pa}} \quad (10)$$

Ilmakerrointa voidaan määritellä myös mitatun happipitoisuuden tai hiilidioksidipitoisuuden mukaan. Happipitoisuudella määritettävä ilmakerroin on siitä helppo, ettei se riipu käytettävästä polttoaineesta. Mitatun happipitoisuuden mukaan määritelty ilmakerroin perustuu siihen, että teoreettisessa poltossa ilmakerroin on yksi ( $\lambda=1$ ) ja savukaasujen happipitoisuus on nolla. Lisättäessä palamisilmaa alkaa savukaasujen happipitoisuus suureta. Ilmakerroin saadaan mitatusta happipitoisuudesta seuraavalla kaavalla.

$$\lambda = 1 + \frac{V_{kuivask(teor)}}{V_{i(teor)}} * \left( \frac{X_{O_2(mit)}}{21 - X_{O_2(mit)}} \right) \quad (11)$$

Polttoaineiden teoreettisen savukaasuvirran ja ilmavirran suhde on lähellä toisiaan, minkä seurauksena voidaan hyvällä tarkkuudella käyttää likikaavaa.

$$\lambda = \frac{21}{21 - X_{O_2(mit)}} \quad (12)$$

Ilmakerroin voidaan määrittää myös savukaasujen hiilidioksidipitoisuuteen perustuen. Hiilidioksidipitoisuuden perustuvassa määrittämisessä on tunnettava polttoaineen teoreettisessa palamisessa syntyvien hiilidioksidikaasujen määrä. Teoreettisessa palamisessa savukaasujen hiilidioksidipitoisuus on suurin ja se käy vähenemään ilmamäärän lisääntyessä savukaasuissa. Hiilidioksidipitoisuuden avulla määritettävä ilmakerroin saadaan seuraavalla kaavalla. (4,55.)

$$\lambda = 1 + \frac{V_{kuivask(teor)}}{V_{i(teor)}} * \left( \frac{X_{CO_2(maks)}}{21 - X_{CO_2(mit)}} - 1 \right) \quad (13)$$

Polttoaineiden teoreettisen savukaasuvirran ja ilmavirran suhde on lähellä toisiaan, jonka seurauksena voidaan hyvällä tarkkuudella käyttää likikaavaa.

$$\lambda = \frac{X_{CO_2(maks)}}{X_{CO_2(mit)}} \quad (14)$$

### Savukaasujen vesi- ja happokastepiste

Savukaasujen vesikastepiste on riippuvainen savukaasuissa olevan veden määrästä eli veden osapaineesta savukaasuissa. Vesi pyrkii tiivistymään, kun vesihöyryn osapaine (mooliosuus) on suurempi kuin kylläisen veden höyrynpaine kyseisessä lämpötilassa. Esimerkkinä puupolttoaine, jonka kosteus on 50 %. Puun palaessa teoreettisella ilmakerroinella ( $\lambda=1$ ) vesihöyryn mooliosuus on 0,3 eli osapaine on 0,3 bar kokonaispaineen ollessa 1 bar. Höyrytaulukon (liite 1.) mukaan 0,3 baarin paineinen vesihöyry lauhtuu noin 70 °C:n lämpötilassa. Ilmaylimäärä laskee savukaasujen vesikastepistettä, koska suurempi ilmamäärä pienentää vesihöyryn osapainetta savukaasussa. (5,99.) Kastepiste voidaan määrittää myös kostean ilman diagrammilla kun tiedossa on ilman sisältämä vesimäärä  $kg_{H_2O}/kg_{kuivassa\ ilmassa}$ .

Happokastepisteellä tarkoitetaan lämpötilaa, jolloin ensimmäiset happopisarot tiivistyvät lämpöpinnoille. Polttoaineissa, joissa on rikkiä, muodostuu palamisesta rikkidioksidia ( $SO_2$ ) ja osa hapettuu edelleen rikkitrioksidiksi ( $SO_3$ ). Savukaasujen kosteuden kanssa rikkitrioksidi muodostaa edelleen rikkihappoa. Rikkidioksidin määrää, joka hapettuu rikkitrioksidiksi, on vaikea arvioida savukaasuissa. Rikkitrioksidi muodostuu suureksi osaksi seuraavista tekijöistä: polttoaineen rikkiä sisältävyydestä, savukaasujen viipymäajasta tulipesässä, tulipesän ja seinämien lämpötilasta, ylimääräisestä ja ka-

talyyttien määrästä. Happokastepiste nousee korkeammalle, mitä enemmän savukaasuissa on vesihöyryä tai rikkiatrioksidia. (4,81.)

### Savukaasujen mittaustulokset ja niiden muunnokset

Savukaasuanalysointilaitteilla mitatut kaasujen pitoisuudet ilmoitetaan yleensä tilavuusosuutena yksikkönä ppm (parts per million). Lupa vaatimuksissa yksikkönä usein käytetään polttoainetehoa kohti laskettua ominaispäästöä mg / MJ. (5,292) Usein savukaasujen mittaustulokset täytyy muokata vertailukelpoisiksi aikaisempien mittausten tai lupavaatimusten kanssa. Savukaasupitoisuudet voidaan muokata vastaamaan tiettyä savukaasun happipitoisuutta redusoimalla. Todellinen pitoisuus saadaan reduoituun tilaan seuraavalla kaavalla. (4,130.)

$$c_{red} = c_{dn} * (20,9 - X_{O2red}) / (20,9 - X_{O2mit}) \quad (15)$$

$c_{red}$  = pitoisuus redusoidulla happipitoisuudella

$c_{dn}$  = mitattu pitoisuus

$X_{O2red}$  = happipitoisuus, johon pitoisuus halutaan redusoida (esim. 17 %)

$X_{O2mit}$  = mitattu happipitoisuus

Ominaispäästöt saadaan laskettua savukaasujen mittaustuloksista yksikössä mg / MJ. Ilmakerroin määritetään mitatusta happipitoisuudesta. Polttoaineen kosteuden kerroin  $k$  määritellään kuivan ja kostean polttoaineen lämpöarvojen suhteenä. Ominaispäästöt komponenteittain lasketaan standardin SFS 5624 mukaisesti seuraavalla kaavalla. (4,130.)

$$q = c_{dn} * \lambda * k * Q \quad (16)$$

$q$  = komponentin ominaispäästö (mg / MJ)

$c_{dn}$  = mitattu pitoisuus yksikössä mg / m<sup>3</sup> (saadaan mittaustuloksista ppm = ml / m<sup>3</sup>) kertomalla ne mitatun kaasun tiheydellä.

$\lambda$  = ilmakerroin

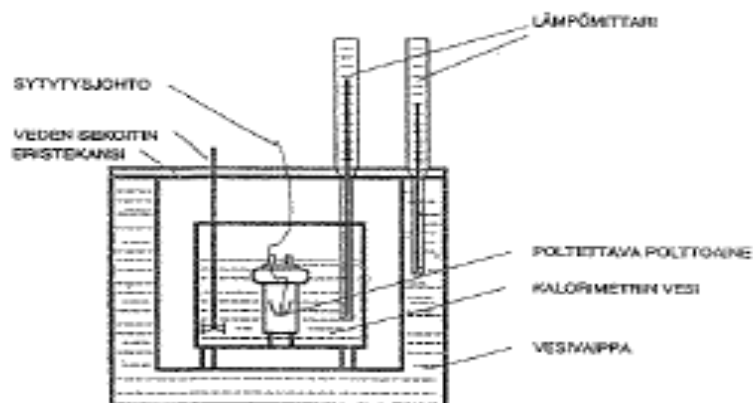
$k$  = polttoaineen kosteudesta johtuva kerroin (raskaalla polttoöljyllä  $k = 1$ )

$Q$  = kuivan polttoaineen palaessa syntyvä kuiva savukaasuvirta energiayksikköä kohti (raskaalle polttoöljylle  $Q = 0,246 \text{ m}^3 / \text{MJ}$ )

#### 4.4 Lämpöarvo

Eri energiamuotoja vertaillessa ja energiankulutusta laskettaessa yksi tärkeimmistä polttoaineen ominaisuuksista on lämpöarvo. Lämpöarvo ilmaisee polttoainemäärää kohti saatavan energian määrän palamisen ollessa täydellistä. Kaasumaisilla polttoaineilla lämpöarvo ilmoitetaan  $\text{MJ/m}^3$  n NTP-olosuhteissa  $t = 0 \text{ °C}$  tai  $273,15 \text{ K}$  ja  $p = 1,01 \text{ bar}$  tai  $101325 \text{ Pa}$ . Muiden polttoaineiden lämpöarvo ilmoitetaan  $\text{MJ/kg}$ . (5,44.)

Polttoaineen lämpöarvoja vertaillessa voidaan käyttää kalorimetristä eli ylempää lämpöarvoa tai tehollista eli alempaa lämpöarvoa. Kalorimetrinen lämpöarvo saadaan polttamalla vähäinen punnittu polttoainemäärä puhtaalla hapella paineistetun astian sisällä. Palamisessa vapautuva lämpö siirtyy vesivaippaan kalorimetrin sisällä ja mittaamalla vesivaipan lämmön nousu saadaan laskettua vapautuva energiamäärä (Kuva 9). Kalorimetrin lämpötilan ollessa lähellä huoneenlämpötilaa tiivistyy polttoaineen palaessa polttoaineen kosteus kalorimetrin sisälle lämmittäen sitä. Tämän vuoksi kalorimetristä lämpöarvoa kutsutaan yleemmäksi lämpöarvoksi. (5,44.)



Kuva 9. Kalorimetri (5.)

Alempi eli tehollinen lämpöarvo kuvaa paremmin polttoaineen käyttöolosuhteita. Tehollinen lämpöarvo lasketaan vähentämällä kalorimetrisestä lämpöarvosta veden lauh-

tumislämpö, joka on 25 °C:ssa 2443 kJ/kg. (7.)Normaalisti käyttöolosuhteissa polttoaineen vesihöyryn lämpösisältöä ei pystytä hyödyntämään, koska palamisessa syntynyt vesihöyry kulkeutuu savukaasujen mukana höyrynä taivaalle. Lämpöarvo voidaan määrittää kokeellisten tutkimusten lisäksi laskennallisesti. (4,14.)

Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo saadaan laskemalla kaavalla kuiva-aineen kalorimetrisestä lämpöarvosta. (5,44.)

$$H_{u(kuiva)} = H_{0(kuiva)} - 8,939 * l_{25} * m_{vety} \quad (17)$$

$H_{u(kuiva)}$  = kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo (kJ/kg)

$H_{0(kuiva)}$  = kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo (kJ/kg)

$l_{25}$  = veden höyrystymislämpö (2443 kJ/kg kun  $t = 25^{\circ}\text{C}$ )

$m_{vety}$  = vedyn määrä kuivassa polttoaineessa (kg H<sub>2</sub>/kg pa)

Polttoaineen sisältäessä merkittävästi kosteutta voidaan lämpöarvo määrittää käyttökosteudessa. Kosteanpolttoaineen lämpöarvon määrittämisessä lähtökohtana käytetään kuivanpolttoaineen tehollista lämpöarvoa. Lisäksi täytyy tietää polttoaineen kosteus. (5,44.)

Tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa saadaan kaavalla:

$$H_{u(kostea)} = H_{u(kuiva)} * (1 - m_{vesi}) - l_{25} * m_{vesi} \quad (18)$$

$H_{u(kostea)}$  = kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo

$m_{vesi}$  = veden määrä kosteassa polttoaineessa (kg H<sub>2</sub>O/kg pa)

Polttoaineiden lämpöarvot voidaan määrittää palavien komponenttien ja hapen välisten reaktioiden reaktiolämmöistä johdettujen kaavojen avulla. Tarkkuus lämpöarvoille on tarkka virheen ollessa alle 2 %. Lähtötietoina täytyy tuntea polttoaineen koostumus eli polttoaineen eri komponenttien paino-osuudet (kg/kg pa). (5,44.)

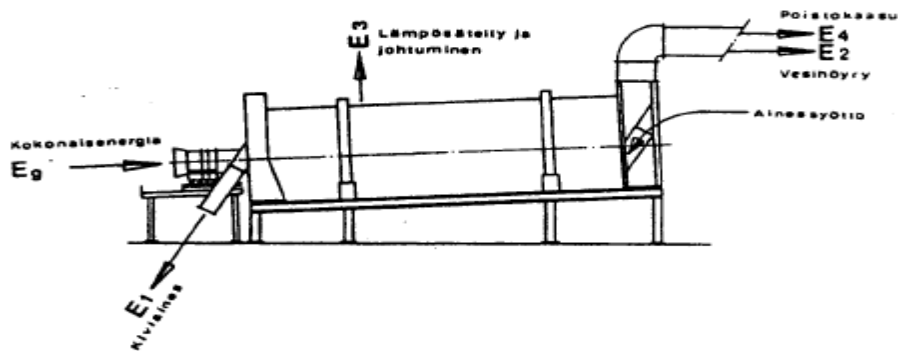
Kiinteisiin ja nestemäisiin polttoaineisiin sovelletaan kaava:

$$H_{u(kostea)} = 34,8 * m_{hiili} + 93,8 * m_{vety} + 10,5 * m_{rikki} + 6,3 * m_{typpi} - 10,8 * m_{happi} - l_{25} * m_{vesi} \quad (19)$$

## 5 ENERGIATASE KIVIAINEKSEN LÄMMITYKSESSÄ

Teoreettinen energiankulutus voidaan laskea likimääräisesti kuivausrummun energiataseen avulla. Öljystä tulevasta ja öljyn mukana tulleesta lämpöenergiasta vähennetään kiviaineksen lämmittämiseen kuluva energia, kiviaineksen kosteuden haihduttamiseen kuluva energia, kuivausrummun lämpöhäviöt ja savukaasuhäviöt (Kuva 10). (3,9.)

Polttoaineen energia ( $E_g$ ) - kiviaineksen kuumennusenergia ( $E_1$ ) + kiviaineksen kosteuden haihdutus energia ( $E_2$ ) + lämpöhäviöt ( $E_3$ ) + savukaasut häviöt ( $E_4$ ) = 0



Kuva 10. Kiviainesrummun energiatase (3.)

### 5.1 Kiviaineksen lämmittäminen

Kiviaineksen lämmittämisenergia ( $Q_1$ ) kuivausrummussa lasketaan kuivan kiviaineksen massasta, kiviaineksen ominaislämpökapasiteetista ja kiviaineksen alku- ja loppulämpötilan erotuksesta. (9,107.)

$$Q_1 = m_{kivi} * c_{p\ kivi} * (T_{kivi2} - T_{kivi1}) \quad (20)$$

$Q_1$  = kiviaineksen lämmittämisenergia (kJ/kg)

$m_{kivi}$  = kuivattavan kiviaineksen massa (kg)

$c_{p\text{ kivi}}$  = kiviaineksen ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg°C)

$T_{\text{kivi } 1}$  = kiviaineksen alkulämpötila (°C)

$T_{\text{kivi } 2}$  = kiviaineksen loppulämpötila (°C)

Vaadittavan energiamäärän tuottamiseen tarvittava raskaan polttoöljyn määrä ( $m_{\text{pa}}$ ) saadaan laskettua, kun tiedetään kuluva energiamäärä ( $Q$ ), polttoaineen lämpöarvo ( $H_u$ ) ja palamisen hyötysuhde ( $\eta$ ). Palamisprosessissa palamatonta polttoainetta kulkeutuu prosessin kiviaineksen mukana eteenpäin. Työssä on oletettu, ettei kaikkea polttoaineen energiaa saada hyötykäytettyä.

$$m_{\text{pa}} = \frac{Q}{H_u * \eta} \quad (21)$$

Kiviaineksen lämmittämiseen tarvittava energiamäärä ( $Q_1$ ) kuivaa kiviainesta kohden voidaan laskea kaavalla 20, kun tiedossa on seuraavat lähtötiedot: lämmitettävä kiviainemäärä ( $m_{\text{kivi}}$ ) on 1000 kg, kiviaineksen ominaislämpökapasiteetti ( $c_{p\text{ kivi}}$ ) on 0,87 kJ/kg°C, kiviaineksen alkulämpötila ( $T_{\text{kivi}1}$ ) on 15 °C ja loppulämpötila ( $T_{\text{kivi}2}$ ) on 180 °C.

$$Q_1 = 1000 \text{ kg} * 0,87 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (180 - 15)^\circ\text{C} = 143550 \text{ kJ}$$

Kiviaineksen lämmittämiseen tarvittavasta energiamäärästä voidaan laskea polttoaineenkulutus esimerkiksi kilogrammaa polttoainetta kuivattua kiviainestonnia kohti (kg<sub>pa</sub>/tn). Kilogramma polttoainetta kuivaa kiviainestonnia kohti on vertailukelpoinen yksikkö vertailtaessa eri tehoisia asfalttiasemia tonnia kohti tunti (tn/h). Kun raskaan polttoöljyn tehollinen lämpöarvo ( $H_u$ ) on 40700 kJ/ kg<sub>pa</sub>, eikä siinä ole huomioitu polttoaineen mukana tulevaa lämpöä, ja kun polttimen palamisen hyötysuhde ( $\eta$ ) on 0,95, polttoaineenkulutus saadaan laskettua kaavalla 21.

$$m_{\text{pa}1} = \frac{Q_1}{H_u * \eta} = \frac{143550 \text{ kJ}}{(40700 \text{ kJ/ kg}_{\text{pa}} * 0,95)} = 3,7 \text{ kg}$$

Laskentakaavan tuloksena saadaan, että kuivattua kiviainestonnia kohden raskasta polttoöljyä kuluu 3,7 kg / tn. Kiviaineksen loppulämpötilan nostaminen 10 °C:lla nos-

taa polttoaineen kulutusta noin 0,25 kg / tn. Tämä tulos saadaan kokeilemalla eri loppulämpötila-arvoja (liite 2) laskentataulukossa. Vertailuna voidaan käyttää kevyen polttoöljyn kulutusta, joka olisi pienempi, koska kevyen polttoöljyn lämpöarvo on korkeampi.

## 5.2 Kiviaineksen kosteuden haihdutus

Kiviaineksen kosteuden haihdutusenergia ( $Q_2$ ) lasketaan kuivan kiviaineksen lisänä olleesta kosteudesta. Veden määrä voidaan laskea kuivausrumpuun syötetyn kiviaineksen määrästä, kun tiedossa on sen kosteusprosentti.

Haihdutettavan veden määrä:

$$m_{vesi} = \frac{m_{kivi}}{\frac{100-M}{100}} - m_{kivi} \quad (22)$$

$m_{vesi}$  = haihdutettava veden määrä (kg)

$m_{kivi}$  = kuivattavan kiviaineksen massa (kg)

$M$  = syötettävän kiviaineksen kosteus (%)

Asfalttiasemaan syötettävä kiviaines sisältää kosteutta. Kosteus on kuitenkin prosessia haittaava tekijä ja se haihdutetaan pois kiviaineksestä kuivausrummussa. Kuivausrumpuun mennessä kiviaineksen kosteus vaihtelee. Esimerkki laskuissa kiviaineksen kosteus on viisi prosenttia. Kuivausrummun jälkeen kiviaines on niin sanottua kuivaa kiviainesta, joka punnitusvaiheessa ajetaan kivivaa'an kautta ja se näkyy asfalttiaseman raportoinnissa. Haihdutettavan veden määrä haluttua kuivaa kiviainemäärää kohden saadaan kaavalla 22.

$$m_{vesi} = \frac{1000 \text{ kg}}{\frac{100 - 5 \%}{100}} - 1000 \text{ kg} = 52,6 \text{ kg}_{vettä}$$

Kiviaineksen kosteuden ollessa 5 % kuivausrumpuun tulee syöttää kiviainesta 1052,6 kg, jotta kuivattua kiviainesta saadaan kuivausrummusta ulos tuhat kilogrammaa. Haihdutettavan veden määrä on näin 52,6 kg.

Kiviaineksen kosteuden haihdutusenergia ( $Q_2$ ) muodostuu veden lämmittämisestä saadaan celsiusasteeseen, veden höyrystämisestä ja höyryn lämmittämisestä. Höyryn lämmittämisen osuus lasketaan mukaan, jos lämpötila on yli sata celsiusastetta. Haihdutusenergia lasketaan haihdutettavan veden massasta ( $m_{vesi}$ ), veden ominaislämpökapasiteetista ( $C_{p\ vesi}$ ), veden haihtumislämpötilan ( $T_h$ ) ja alkulämpötilan ( $T_a$ ) erotuksesta, veden höyrystymislämmöstä sekä lisäksi höyryn ominaislämpökapasiteetista ( $C_{p\ höyry}$ ), höyryn alkulämpötilan ( $T_h$ ) ja loppulämpötilan ( $T_l$ ) erotuksesta. (9,107.)

$$Q_2 = m_{vesi} * (c_{p\ vesi} * (T_h - T_a) + r + c_{p\ höyry} * (T_l - T_h)) \quad (23)$$

$Q_2$  = kiviaineksen kosteuden haihdutusenergia (kJ/kg)

$m_{vesi}$  = haihdutettava veden määrä (kg)

$c_{p\ vesi}$  = haihdutettavan veden ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg°C)

$T_h$  = veden haihtumislämpötila (°C)

$T_a$  = veden alkulämpötila (°C)

$r$  = veden höyrystymislämpö (kJ/kg)

$c_{p\ höyry}$  = vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg°C)

$T_l$  = höyryn loppulämpötila (°C)

Kiviaineksen veden lämmitysenergia voidaan laskea erikseen seuraavilla lähtötiedoilla: lämmitettävän veden massa ( $m_{vesi}$ ) 52,6 kg, veden ominaislämpökapasiteetti ( $c_{p\ vesi}$ ) 4,19 kJ/kg°C, alkulämpötila ( $T_a$ ) 15 °C ja haihtumislämpötila ( $T_h$ ) 100 °C tulos saadaan ottamalla käyttöön osa kaavasta 23. Lisäksi alla on laskettuna veden lämmittämiseen kuluva polttoainemäärä kaavalla 21.

$$Q_{vesi} = 52,6 \text{ kg} * 4,19 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (100 - 15)^\circ\text{C} = 18734 \text{ kJ}$$

$$m_{pa(vesi)} = \frac{Q_{vesi}}{H_u * \eta} = \frac{18734 \text{ kJ}}{(40700 \text{ kJ/kg}_{pa} * 0,95)} = 0,5 \text{ kg}_{pa}/\text{tn}$$

Veden höyrystäminen 100 °C:n lämpötilasta vaatii energiaa  $Q_{\text{höyrystymisen}}$  verran lähtötiedoilla: veden massa ( $m_{\text{vesi}}$ ) 52,6 kg ja veden höyrystymislämpö 2260 kJ/kg, joka on laskettu kaavan 23 höyrystymisosiolla. Lisäksi alla on laskettuna veden höyrystämiseen kuluva polttoainemäärä kaavalla 21.

$$Q_{\text{höyrystyminen}} = 52,6 \text{ kg} * 2260 \text{ kJ/kg} = 118876 \text{ kJ}$$

$$m_{pa(\text{höyrystyminen})} = \frac{Q_{\text{höyrystyminen}}}{H_u * \eta} = \frac{118876 \text{ kJ}}{(40700 \text{ kJ/kg}_{pa} * 0,95)} = 3,1 \text{ kg}_{pa}/\text{tn}$$

Höyryn lämmittämistä ei tarvitse ottaa huomioon, koska loppulämpötila on sata celsiusastetta. Veden haihduttamiseen kuluva energia ( $Q_2$ ) saadaan laskemalla yhteen veden lämpenemisen ja höyrystymisen vaatimat energiat.

$$Q_2 = Q_{\text{vesi}} + Q_{\text{höyrystyminen}} = 18734 \text{ kJ} + 118876 \text{ kJ} = 137610 \text{ kJ}$$

$$m_{pa2} = \frac{Q_2}{H_u * \eta} = \frac{137610 \text{ kJ}}{(40700 \text{ kJ/kg}_{pa} * 0,95)} = 3,6 \text{ kg}_{pa}/\text{tn}$$

Kiviaineksen kuivattaminen kosteudesta 5 % höyryksi poistokaasujen ollessa 100 °C:tta vaatii energiaa 137610 kJ / tn. Raskasta polttoöljyä tämän energian tuottamiseen kuluu 3,6 kg / tn. Polttoaineen kulutuksia kiviaineksen eri kosteusprosentteilla voidaan laskea aikaisemmin esitetyillä lähtötiedoilla ja kaavoilla (Taulukko 2). Taulukosta voidaan todeta, että kiviaineksen kosteuden noustessa prosentilla polttoaineen kulutus kasvaa 0,7 kg / tn.

Taulukko 2. kiviaineksen kosteuden vaikutus polttoaineen kulutukseen

kiviaineksen kosteus %	kg <sub>pa</sub> / tn
1	0,7
2	1,4
3	2,1
4	2,8
5	3,6
6	4,3

### 5.3 Lämpöhäviöt kuivausrummusta

Kiviaineksen kuivausrummun pyöriessä ja kiviaineksen virratessa sen sisällä tapahtuu lämpöhäviötä liekin säteilylämmöstä ja konvektiolla eli johtumalla savukaasuista sekä kiviaineksesta. Siirtynyt lämpö vapautuu kuivausrummun ulkovaipasta ulkoilmaan. Kiviainesrumpu on teräksestä valmistettu lieriö, jonka seinämän paksuutena ( $s_1$ ) laskennassa on käytetty 0,02 m, sisäpinnan lämmönsiirtymiskertoimenä ( $\alpha_s$ ) 20 W/m<sup>2</sup>°C ja teräksen lämmönjohtavuutena ( $\lambda_1$ ) 58 W/m°C. Lisäksi rumpulieriö on eristetty mineraalivillalla, jonka paksuus ( $s_2$ ) on 0,05 m ja lämmönjohtavuus ( $\lambda_2$ ) 0,05 W/m°C. Ulkopinnan lämmönsiirtokerroin on ( $\alpha_u$ ) 6 W/m<sup>2</sup>°C. Näillä lähtötiedoilla saadaan laskettua lämmönläpäisykerroin ( $k$ ) kaavalla 3.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_s} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_u}} = \frac{1}{\frac{1}{20 \text{ W/m}^2\text{°C}} + \frac{0,02 \text{ m}}{58 \text{ W/m}^\circ\text{C}} + \frac{0,05 \text{ m}}{0,05 \text{ W/m}^\circ\text{C}} + \frac{1}{6 \text{ W/m}^2\text{°C}}} = 0,82 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Lämmönläpäisykerroimen selvittämisen jälkeen voidaan laskea kuivausrummun vaipan läpi siirtyvä lämpöteho ( $P_3$ ), kun kuivausrummun sisälämpötila on arviolta keskimäärin ( $T_s$ ) 300 °C ja ulkolämpötila ( $T_u$ ) 15 °C. Kuivausrummun lieriön pinta-alana laskussa käytetään ( $A$ ) 80 m<sup>2</sup>. Lämpöhäviön energia saadaan laskettua kaavalla 4.

$$P_3 = k * A * (T_s - T_u) = 0,82 \text{ W/m}^2\text{°C} * 80 \text{ m}^2 * (300 - 15)\text{°C} = 18696 \text{ W}$$

Kuivausrummun vaipan läpi johtuu 18,7 kW:n lämpöteho, joka voidaan ilmoittaa myös muodossa 18,7 kJ/s. Lämpöteho ( $P_3$ ) saadaan muutettua energiaksi ( $Q_3$ ) tonnia kohden muuttamalla kuivankiviaineksen syöttöteho ( $m_{\text{kuivakivi}}$ ) 228 tn / h muotoon tonnia sekunnissa, minkä jälkeen lämpöteho jaetaan kuivan kiviaineksen syöttöteholla.

$$Q_3 = \frac{P_3}{m_{\text{kuivakivi}}/3600} = \frac{18,7 \text{ kJ/s}}{(228,2 \text{ tn/h}/3600)} = 294 \text{ kJ/tn}$$

Lämpöhäviöihin kuluva raskaan polttoöljyn määrä saadaan laskettua kaavalla 21.

$$m_{pa3} = \frac{Q_3}{H_u * \eta} = \frac{294 \text{ kJ/tn}}{(40700 \text{ kJ/kg}_{pa} * 0,95)} = 0,0076 \text{ kg}_{pa}/\text{tn}$$

Kiviaineksen lämmittämiseen ja kuivattamiseen kuluva energiamäärä ennen savukaasujen laskemista on muodostunut lämmittamisestä ( $Q_1$ ), kuivattamisesta ( $Q_2$ ) ja lämpöhäviöistä ( $Q_3$ ). Laskemalla muodostuneet energiamäärät yhteen voidaan raskaan polttoöljyn kulutus laskea kaavalla 21. Tämän jälkeen polttoainemäärästä syntyvät savukaasut saadaan laskettua alla olevasta:

$$Q_{123} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 143550 \text{ kJ} + 137610 \text{ kJ} + 294 \text{ kJ/tn} = 281454 \text{ kJ/tn}$$

$$m_{pa123} = \frac{Q_{123}}{H_u * \eta} = \frac{281454 \text{ kJ/tn}}{(40700 \text{ kJ/kg}_{pa} * 0,95)} = 7,3 \text{ kg}_{pa}/\text{tn}$$

#### 5.4 Palamisilma ja savukaasut

Kuivausrummussa lämmitettävän kiviaineksen vaatiman polttoaineen määrän ollessa tiedossa voidaan laskea palamiseen tarvittava ilmamäärä ( $\text{kg}_i / \text{kg}_{pa}$ ). Lähtötietoina on tiedettävä polttoaineen koostumus, joka yleensä ilmoitetaan painoprosentteina. Lisäksi on tunnettava polttoaineen ja hapen väliset reaktioyhtälöt. (5,84)

Palamisilman ja savukaasujen muodostumisen laskennassa on polttoaineena käytetty Neste Oil:n Mastera LS 180 raskasta polttoöljyä. Polttoaineen massaprosenteista saadaan laskettua yhden polttoainekilon sisältämät komponentit kilogrammoina ( $\text{kg} / \text{kg}_{pa}$ ). Polttoaineen komponenttiosuudet saadaan muutettua mooleiksi polttoainekiloa kohti ( $\text{kmol} / \text{kg}_{pa}$ ) jakamalla polttoaineen komponentit kilogrammoina komponentin molekyylipainolla ( $\text{kg} / \text{kmol}$ ). Polttoaineen massaprosenttien muutos mooleiksi kohden kilogrammaa polttoainetta esitetään taulukossa 3.

Taulukko 3. polttoaineen lähtötiedot

	%	kg/kmol	kg/kg <sub>pa</sub>	kmol/kg <sub>pa</sub>
C	88,33	12,01	0,8833	0,073547
H <sub>2</sub>	10,10	2,016	0,1010	0,050099
S	0,95	32,06	0,0095	0,000296
O <sub>2</sub>	0,20	32	0,0020	0,000063
N <sub>2</sub>	0,40	28	0,0040	0,000143
H <sub>2</sub> O	0,15	18,02	0,0015	0,000083
	100		1	

### Palamisilma

Polttoaineen palamiseen tarvittava happimäärä saadaan laskettua palamisreaktioyhtälöistä kaavalla 6, jonka tuloksena saadaan tarvittava happimäärä (kmol / kg<sub>pa</sub>) teoreettisella palamisilmakertoimella  $\lambda=1$ .

$$N_{O_2(\text{teor.})}/m_{pa} = n_C + 0,5 * n_{H_2} + n_S - n_{O_2} = 0,073547 + 0,5 * 0,050099 + 0,000296 - 0,000063 = 0,099 \text{ kmol/kg}_{pa}$$

Kun polttoaineen palamisessa tarvittava hapen määrä (kmol / kg<sub>pa</sub>) tiedetään, voidaan siitä laskea tarvittava teoreettinen kuiva ilmamäärä. Ilma sisältää happea 21 % ja typpeä 79 %. Ilman sisältämät muut komponentit, kuten argon, sisällytetään yleensä typen osuuteen. Teoreettinen kuiva ilmamäärä saadaan kaavalla 7.

$$N_{i(\text{teor.})}/m_{pa} = 0,099 \text{ kmol}/m_{pa} * 4,76 = 0,471 \text{ kmol/kg}_{pa}$$

Teoreettinen kuiva ilmamäärä saadaan muutettua mooliyksiköstä kmol / kg<sub>pa</sub> massayksikön muotoon kg<sub>ilma</sub> / kg<sub>pa</sub> kertomalla luku ilman molekyylipainolla 28,96 kg / kmol. Mikäli ilmamäärä halutaan ilmoittaa tilavuusyksikössä m<sup>3</sup><sub>ilma</sub> / kg<sub>pa</sub>, kerrotaan luku ilman moolitilavuudella 22,40 m<sup>3</sup> / kmol.

$$m_{i(\text{teor.})}/m_{pa} = N_{i(\text{teor.})}/m_{pa} * 28,96 \text{ kg/kmol} = 0,471 \text{ kmol/kg}_{pa} * 28,96 \text{ kg/kmol} = 13,6 \text{ kg}_{ilma}/\text{kg}_{pa}$$

$$V_{i(teor)}/m_{pa} = N_{i(teor)}/m_{pa} * 22,40 \text{ m}^3/\text{kmol} = 0,471 \text{ kmol}/\text{kg}_{pa} * 22,40 \text{ m}^3/\text{kmol} = 10,6 \text{ m}^3_{ilma}/\text{kg}_{pa}$$

Edellisissä hapen ja ilmamäärän laskuissa käytettiin kuivan ilman koostumusta. Teoriasta poiketen ilma on kosteaa tai paremmin kuvattuna kuivan ilman ja vesihöyryn seos. Ilman ollessa kylläistä sen suhteellinen kosteus on 100 %. Normaalisti palamisilma ei ole kylläistä, vaan sen suhteellinen kosteus on 40 - 60 % välillä. Esimerkiksi 40 %:n suhteellinen kosteus tarkoittaa, että ilma sisältää vettä 40 % kylläisen ilman sisältämästä kosteudesta. Tähän perustuen ilman kosteus lisää palamisilmaa noin 0,1 - 1 %, jolloin käytännön laskelmissa se voidaan usein jättää huomioimatta. (5,86.)

Teoreettisella ilmakertoimella palaminen ei käytännössä ole täydellistä. Palamisilmaa syötetään polttimeen yleensä jonkin verran enemmän. Kattilakäytössä ilmakerroin ( $\lambda$ ) on yleensä polttoaineesta riippuen 1,03 - 1,50. Asfalttiaseman poltinkäytössä ilmakerroin on yleensä välillä 2 - 5, jolloin kiviaineksen mukana tullut kosteus saadaan kuljettua kuivausrummista suodattimeen ja sieltä savupiippua pitkin taivaalle.

Ilmakertoimen ja teoreettisen ilmamäärän avulla saadaan määritettyä todellinen ilmamäärä kaavalla 8. Ilmamäärä voidaan esittää mooliosuutena polttoainetta, massayksikköä polttoainetta kohden tai tilavuusyksikköä polttoainetta kohden.

$$N_{i(tod)}/m_{pa} = N_{i(teor)}/m_{pa} * \lambda = 0,471 \text{ kmol}/\text{kg}_{pa} * 3 = 1,41 \text{ kmol}/\text{kg}_{pa}$$

$$m_{i(tod)}/m_{pa} = m_{i(teor)}/m_{pa} * \lambda = 13,6 \text{ kg}/\text{kg}_{pa} * 3 = 40,8 \text{ kg}_{ilma}/\text{kg}_{pa}$$

$$V_{i(tod)}/m_{pa} = V_{i(teor)}/m_{pa} * \lambda = 10,6 \text{ m}^3/\text{kg}_{pa} * 3 = 31,8 \text{ m}^3_{ilma}/\text{kg}_{pa}$$

Asfalttiaseman raskasöljypolttimen läpi kulkee palamisilmaa ilmakertoimella  $\lambda=3$  tilavuus yksikössä  $31,8 \text{ m}^3 / \text{kg}_{pa}$ . Teoreettiseen palamiseen riittäisi ilmakerroin  $\lambda=1$ , joka on  $10,6 \text{ m}^3 / \text{kg}_{pa}$ . Jokaista polttoainekilogrammaa kohden ajetaan näillä lähtötiedoilla ylimääräistä ilmaa  $21,2 \text{ m}^3 / \text{kg}_{pa}$ . Tätä ilmamäärää käytetään kosteuden poiskuljettamiseen.

## Savukaasut

Savukaasujen koostumus ja määrä saadaan määritettyä kuten palamisilmamääräkin eli polttoaineen koostumuksesta ja palamisreaktioiden yhtälöistä. Polttoaineen palaessa syntyy yhtä monta moolia savukaasua kuin on palavia komponenttia. Lisäksi savukaasuihin siirtyy ilman mukana tullut typpi, jota tulee palamiseen tarvittavan hapen lisäksi 3,76-kertainen määrä. Typen lisäksi kaikki palamattomat komponentit siirtyvät sellaisenaan savukaasuihin.(5,86.) Teoreettinen savukaasujen määrä saadaan laskettua kaavalla 9.

$$N_{sk(teor)}/m_{pa} = n_c + n_{h2} + n_s + 3,76 * N_{O2(teor)}/m_{pa} + n_n + n_{H2O} = 0,073547 + 0,050099 + 0,000296 + 3,76 * 0,099 + 0,000143 + 0,000083 = 0,496 \text{ kmol/kg}_{pa}$$

Savukaasut saadaan muutettua massayksiköiksi kertomalla moolimäärät niiden molekyylipainoilla. Jos tulos halutaan esittää tilavuusyksiköissä, kerrotaan moolimäärät niiden moolitilavuuksilla. Moolitilavuuksien tarkkuudeksi riittää useimmilla kaasuilla 22,40 l/mol. (5,87.)

$$m_{sk(teor)}/m_{pa} = n_c * m_c + n_{h2} * m_{h2} + n_s * m_s + 3,76 * m_{O2(teor)}/m_{pa} * n_{o2} + n_n * m_n + n_{H2O} * m_{H2O} = 0,073547 * 44,01 + 0,050099 * 18,02 + 0,000296 * 64,06 + 3,76 * 0,099 * 28,02 + 0,000143 * 28,02 + 0,000083 * 18,02 = 14,4 \text{ kg/kg}_{pa}$$

$$V_{sk(teor)}/m_{pa} = N_{sk(teor)}/m_{pa} * 22,40 \text{ m}^3/\text{kmol} = 0,496 \text{ kmol/kg}_{pa} * 22,40 \text{ m}^3/\text{kmol} = 11,1 \text{ m}^3/\text{kg}_{pa}$$

Asfalttiasemassa savukaasujen ilmakerroin on melko suuri. Esimerkkilaskussa on käytetty tavallisesti esiintyvää ilmakerrointa  $\lambda=3$ . Savukaasun määrä muilla ilmakertoimilla kuin  $\lambda=1$  voidaan laskea, kun tiedetään polttoaineen ilman tarve ja teoreettisten savukaasujen määrä. Syntyvät savukaasut voidaan määrittää mooli- ja massamäärinä sekä tilavuusyksikössä eri ilmakertoimilla kaavalla 10.

$$N_{sk(tod)}/m_{pa} = N_{sk(teor)}/m_{pa} + (\lambda - 1) * N_{i(teor)}/m_{pa} = 0,496 \text{ kmol/kg}_{pa} + (3 - 1) * 0,471 \text{ kmol/kg}_{pa} = 1,44 \text{ kmol/kg}_{pa}$$

$$\frac{m_{sk(tod)}}{m_{pa}} = \frac{m_{sk(teor)}}{m_{pa}} + (\lambda - 1) * \frac{m_{i(teor)}}{m_{pa}} = 14,4 \text{ kg/kg}_{pa} + (3 - 1) * 13,6 \text{ kg/kg}_{pa} = 41,6 \text{ kg/kg}_{pa}$$

$$\frac{V_{sk}}{m_{pa}} = \frac{V_{sk(teor)}}{m_{pa}} + (\lambda - 1) * \frac{V_{i(teor)}}{m_{pa}} = 11,1 \text{ m}^3/\text{kg}_{pa} + (3 - 1) * 10,6 \text{ m}^3/\text{kg}_{pa} = 32,3 \text{ m}^3/\text{kg}_{pa}$$

Savukaasujen vaatiman energiamäärän laskeminen voidaan aloittaa muuttamalla il-  
mamäärä yksikköön  $\text{kg}_{sk} / \text{tn}$ . Lähtötietoina ovat kiviaineksen kuumennukseen ja kos-  
teuden haihdutukseen sekä lämpöhäviöihin kuluva polttoainemäärä ( $m_{pa123}$ ) ja todelli-  
nen savukaasumäärä massayksikössä ( $m_{sktod} / m_{pa}$ ).

$$m_{sk/tn} = m_{sk(tod)}/m_{pa} * m_{pa123} = 41,6 \text{ kg}_{sk}/\text{kg}_{pa} * 7,3 \text{ kg}_{pa}/\text{tn} = 303,7 \text{ kg}_{sk}/\text{tn}$$

Kun savukaasumäärä tonnia kohden on tiedossa, savukaasujen energiamäärä tonnia  
kohden kiviainesta  $Q_4$  voidaan laskea. Lähtötietoina laskentaan tarvitaan savukaasujen  
ominaislämpökapasiteetti  $c_{psk}$   $1,0 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  ja savukaasun lämpötilaero, joka on savu-  
kaasun loppulämpötilan ( $T_l$ ) ja ulkolämpötilan ( $T_u$ ) erotus.

$$Q_4 = m_{sk/tn} * c_{psk} * (T_l - T_u) = 303,7 \text{ kg}_{sk}/\text{tn} * 1,0 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (100 - 15)^\circ\text{C} = 25815 \text{ kJ}/\text{tn}$$

Savukaasujen lämmittämiseen kuluva polttoainemäärä tonnia kohden saadaan seuraavalla kaavalla 21.

$$m_{pa4} = \frac{Q_4}{H_u * \eta} = \frac{25815 \text{ kJ}/\text{tn}}{(40700 \text{ kJ}/\text{kg}_{pa} * 0,95)} = 0,7 \text{ kg}_{pa}/\text{tn}$$

Savukaasujen liian korkea lämpötila kuluttaa energiaa turhaan, mikäli lämpötila on  
kastepistettä korkeampi. Savukaasuissa  $10^\circ\text{C}$ :n lämpötilannousu lisää polttoaineen  
kulutusta  $0,1 \text{ kg} / \text{tn}$ . Tämä tulos saadaan kokeilemalla eri arvoja liitteen 2 taulukossa.

### Kiviaineksen kuumennuksen energiatase

Kiviaineksen kuumentamiseen kuluva energia jakautuu kiviaineksen lämmittämiseen ( $Q_1$ ), kosteuden poistoon kiviaineksestä ( $Q_2$ ), lämpöhäviöihin ( $Q_3$ ), sekä savukaasujen ja yli-ilmamäärän lämmittämiseen ( $Q_4$ ). Energian kulutus on laskettu kJ / tn ja kg<sub>pa</sub> / tn yksiköissä, jolloin voidaan vertailla eri tehoisia asfalttiasemia (tn / h). Laskennassa on käytetty lähtötietoina 240 tn / h tuntitehoa kiviaineksen kosteuden ollessa 5 %. Laskennassa oletuksena on, että kiviaineksen lähtölämpötila 15 °C on sama kuin ympäristön lämpötila. Kiviaineksen loppulämpötila on 180 °C:ta. Kiviainesrummista tulevan savukaasun lämpötila laskennassa on 100 °C:ta. Kiviaineksen kuumentamiseen tarvittava energia saadaan laskettua edellä mainitut kulutuskohteet yhteen.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 143550 \text{ kJ} + 137610 \text{ kJ} + 294 \text{ kJ/tn} + 25815 \text{ kJ/tn} = 307269 \text{ kJ/tn}$$

Energiamäärän tuottamiseen tarvittava raskaan polttoöljyn määrä voidaan laskea kaavalla 21.

$$m_{pa/tn} = \frac{Q}{H_u * \eta} = \frac{307269 \text{ kJ/tn}}{(40700 \text{ kJ/ kg}_{pa} * 0,95)} = 8,0 \text{ kg}_{pa}/\text{tn}$$

Raskaan polttoöljyn mukana lämpöenergiana kiviainesrumpuun tuleva energiamäärä voidaan laskea polttoöljyn lämmittämiseen kuluvan energian kaavalla. Lähtötietona on lämmitettävän polttoaineen määrä, polttoöljyn ominaislämpökapasiteetti, joka on noin 1,77 kJ / kg°C, sekä öljyn alku- ja loppulämpötila.

$$Q_l = m_{pa} * c_{p(\text{öljy})} * (T_a - T_l) = 8,0 \text{ kg}_{pa}/\text{tn} * 1,77 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} * (110 - 15)^\circ\text{C} \\ = 1345 \text{ kJ/tn}$$

$$m_{pa(l)} = \frac{Q}{H_u * \eta} = \frac{1345 \text{ kJ/tn}}{(40700 \text{ kJ/ kg}_{pa} * 0,95)} = 0,04 \text{ kg}_{pa}/\text{tn}$$

Polttoaineen mukana tuleva lämpöenergia on laskettavaa yksikköä kohden pieni, jolloin se voidaan jättää huomioimatta laskentatarkkuuden kärsimättä.

Polttoaineen kulutusta kiviaineksen lämmitysprosessissa on mahdollista pienentää muutamasta eri kohteesta ilman suurempia investointeja. Suurimman säästön polttoaineen kulutuksessa tuo kiviaineksen kosteusprosentin pitäminen mahdollisimman alhaisena. Kiviaineksen kosteuden lisääntyessä prosentilla kuluu polttoainetta  $0,7 \text{ kg}_{\text{pa}} / \text{tn}$  enemmän. Asfalttiaseman operaattorin vaikutusmahdollisuudet kiviaineksen kosteusprosenttiin on melko rajalliset asfaltin valmistusvaiheessa. Tämän vuoksi kiviaineksen kosteuteen tulisi kiinnittää huomiota jo hankintavaiheessa, jolloin on mahdollista vaikuttaa esimerkiksi kiviaineksen murskausajankohtaan. Seuraavaksi suurin säästökohte on kuivatun kiviaineksen loppulämpötila. Kiviaineksen lämmittäminen  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  kuluttaa polttoainetta  $0,25 \text{ kg}_{\text{pa}} / \text{tn}$ . Tämän vuoksi on tärkeää, että asfalttimassan valmistuslämpötila on oikea, eikä ainakaan liian korkea. Savukaasujen lämpötilan noustessa  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  polttoaineen kulutus nousee  $0,1 \text{ kg} / \text{tn}$ . Savukaasujen lämpötilan säädössä on huomioitava kastepiste, jonka yläpuolella on toimittava.

### **Taloudelliset vaikutukset**

Kiviaineksen lämmittämisen ollessa yksi suurimmista kustannuksista asfaltin valmistuksessa voidaan aikaisempien laskelmien perusteella laskea taloudellisia hyötyjä. Alla on esitetty esimerkkinä asfalttiasema, jolla kuivataan kiviainesta tuotantokaudella  $50000 \text{ tn} / \text{a}$ . Jos kiviaineksen kosteusprosenttia saataisiin tiputettua yhdellä prosentilla koko kauden ajalta, polttoainesäästö olisi  $0,7 \text{ kg} / \text{tn}$ . Mikäli kiviaineksen loppulämpötilaa saataisiin lisäksi pudotettua kaksikymmentä astetta, se toisi polttoainesäästöä  $0,5 \text{ kg} / \text{tn}$ . Tuotantokaudessa saatava taloudellinen säästö voidaan laskea seuraavalla kaavalla.

$$50000 \text{ tn/a} * (0,7 \text{ kg}_{\text{pa}}/\text{tn} + 0,5 \text{ kg}_{\text{pa}}/\text{tn}) * 0,8 \text{ €/kg}_{\text{pa}} = 48000 \text{ €/a}$$

Taloudelliset hyödyt olisivat  $48000 \text{ €/a}$ , joka on näillä toimenpiteillä suhteellisen helposti tavoitettavissa ilman lisäinvestointeja.

### **Kastepiste**

Kastepiste kuivausrummusta poistettavalle ilmalle voidaan määrittää teoreettisesti. Kastepisteen määrittämisessä teoreettisesti on tiedettävä kuivaa kiviainestonnia kohden kuivausrumpuun tulevan veden määrä ( $\text{kg}_{\text{vettä}} / \text{tn}$ ), savukaasujen määrä ( $\text{kg}_{\text{sk}} / \text{kg}_{\text{pa}}$ ) ja

kiviaineksen kuumentamiseen tarvittava polttoainemäärä ( $\text{kg}_{\text{pa}} / \text{tn}$ ). Savukaasujen sisältämä vesimäärä saadaan laskettua seuraavilla kaavoilla.

$$m_{sk/tn} = m_{sk(tod)}/m_{pa} * m_{pa/tn} = 41,6 \text{ kg}_{sk}/\text{kg}_{pa} * 8 \text{ kg}_{pa}/\text{tn} = 332,8 \text{ kg}_{sk}/\text{tn}$$

$$m_{vesi/sk} = m_{vesi} * m_{sk/tn} = 52,6 \text{ kg}_{vettä}/\text{tn}/332,8 \text{ kg}_{sk}/\text{tn} = 0,16 \text{ kg}_{vettä}/\text{kg}_{sk}$$

Kastepiste ilmalle saadaan määritettyä kostean ilman diagrammista (liite 3.). Savukaasujen sisältämän vesimäärän ollessa  $0,16 \text{ kg}_{vettä} / \text{kg}_{sk}$  saadaan diagrammista kastepisteeksi  $62 \text{ }^\circ\text{C}$ :ta. Kastepisteessä ilman suhteellinen kosteus on 100 %. Savukaasujen suhteelliseksi kosteudeksi  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilassa saadaan diagrammista noin 20 %. Kostean ilman diagrammi osoittaa, että  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötila on turvallisesti kastepisteen yläpuolella. Vaikka veden määrä savukaasuissa kasvaisi puolella eli noin  $0,3 \text{ kg}_{vettä} / \text{kg}_{sk}$ , kastepiste olisi noin  $72 \text{ }^\circ\text{C}$ :ta. Savukaasujen lämpötila asfalttiasemassa voidaan käytännössä pitää noin  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ :ssa savupiipusta mitattuna, jolloin ei ole vaaraa kosteuden tiivistymisestä suodattimessa.

## 5.5 Mitattujen savukaasujen muunnoksia

Asfalttiaseman savukaasuja koskevia vaatimuksia on esitetty asfalttiasemien ympäristönsuojeluväitöissä. *Kiinteän asfalttiaseman poistokaasujen hiukkas- ja  $\text{NO}_2$ -päästöt on mitattava rekisteröintiä seuraavana toimintavuotena ja sen jälkeen mittaus suoritetaan kolmen vuoden välein aseman toimiessa normaalisti. Päästöt on aina mitattava asfaltinvalmistuslaitteiston vaihtumista seuraavan toimintavuoden aikana. Mittausraportissa on esitettävä mittaustulokset yksikössä  $\text{mg}/\text{m}^3(\text{n})$  kuivaa kaasua reductoituna 17 %:n happipitoisuuteen, arvio mittaustulosten edustavuudesta sekä ilmoittajan arvio tunti- ja vuosipäästöistä.* (10).

Asfalttiaseman savukaasupäästöistä mitattavia komponentteja ovat hiilimonoksidi, rikkidioksidi, typenoksidit, kiintoainepäästöt ja lisäksi ilmakertoimen määrittämiseksi happi- tai hiilidioksidipitoisuus. Savukaasujen mittaus voi olla suoritettu kosteista tai kuivista savukaasuista. Normaalisti savupiipusta tulevat savukaasut ovat kosteita. Jos kaasut halutaan mitata tai laskea kuivina savukaasuina, mittalaitteessa on oltava kosteuden poistaja. Kosteuden poistamiseksi näytekaasu jäädytetään, jolloin kosteus tiivistyy ja sen määrä voidaan mitata. (4,127.)

Asfalttiaseman savukaasupäästöjä mitatessa omat haasteensa aiheuttavat lyhyet käyntiajat, jonka vuoksi polttimen teho vaihtelee ja on haastavaa saada luotettavia mittaustuloksia. Esimerkki laskujen mittaustulokset on mitattu Amocems jatkuvatoimisella savukaasuanalysointorilla ja mitatut pitoisuudet ovat kuivia savukaasuja (11.). Mittaustulokset ovat noin puolentoista tunnin käyntiajan keskiarvoja (Taulukko 4), eikä tuloksissa ei ole mitattu kiintoainepäästöjä.

Taulukko 4. mitatut savukaasupitoisuudet

mitattu	arvo	yksikkö
CO	902	ppm
CO <sub>2</sub>	5,0	%
Lämpötila	86	°C
NO	82	ppm
NO <sub>2</sub>	8	ppm
O <sub>2</sub>	14,4	%
SO <sub>2</sub>	189	ppm

Ilmakerroin  $\lambda$  saadaan mittaustuloksien happimäärästä selville käyttämällä likikaavaa 12.

$$\lambda = 20,9 / (20,9 - X_{O_2(mit)}) = 20,9 / (20,9 - 14,4) = 3,2$$

Mitatut savukaasupitoisuudet (ppm) saadaan muutettua yksikköön (mg / m<sup>3</sup>) seuraavalla kaavalla, jossa kaasun tiheys on moolimassa jaettuna moolitilavuudella. (12.)

$$c_m = c_{ppm} * \frac{M}{22,4} \quad (24)$$

$c_m$  = yhdisteen pitoisuus (mg / m<sup>3</sup>)

$c_{ppm}$  = yhdisteen pitoisuus (ppm = ml / m<sup>3</sup>)

M = yhdisteen moolimassa (g / mol)

22,4 = ideaalikaasun moolitilavuus ntp-olosuhteissa (m<sup>3</sup> / kmol)

Mitatut kuivien savukaasujen pitoisuudet muutetaan yksikköön (mg / m<sup>3</sup>) kaavalla 24.

$$CO_m = 902 \text{ ml/m}^3 * \frac{12 \text{ kg/kmol} + 16 \text{ kg/kmol}}{22,4 \text{ m}^3/\text{kmol}} = 1127,5 \text{ mg/m}^3$$

$$NO_m = 82 \text{ ml/m}^3 * \frac{14 \text{ kg/kmol} + 16 \text{ kg/kmol}}{22,4 \text{ m}^3/\text{kmol}} = 109,8 \text{ mg/m}^3$$

$$NO_{2m} = 8 \text{ ml/m}^3 * \frac{14 \text{ kg/kmol} + 16 \text{ kg/kmol} * 2}{22,4 \text{ m}^3/\text{kmol}} = 16,4 \text{ mg/m}^3$$

$$SO_{2m} = 189 \text{ ml/m}^3 * \frac{32 \text{ kg/kmol} + 16 \text{ kg/kmol} * 2}{22,4 \text{ m}^3/\text{kmol}} = 540 \text{ mg/m}^3$$

Muunnetut pitoisuudet saadaan muokattua vaaditulle happimäärälle redusoimalla kaavalla 15.

$$CO_{red} = 1127,5 \text{ mg/m}^3 * \frac{20,9-17}{20,9-14,4} = 676,5 \text{ mg/m}^3$$

$$NO_{red} = 109,8 \text{ mg/m}^3 * \frac{20,9-17}{20,9-14,4} = 65,9 \text{ mg/m}^3$$

$$NO_{2red} = 16,4 \text{ mg/m}^3 * \frac{20,9-17}{20,9-14,4} = 9,8 \text{ mg/m}^3$$

$$SO_{2red} = 540 \text{ mg/m}^3 * \frac{20,9-17}{20,9-14,4} = 324 \text{ mg/m}^3$$

Kuivien savukaasujen komponenttikohtaiset ominaispäästöt saadaan laskettua kaavalla 16.

$$q_{CO} = 676,5 \text{ mg/m}^3 * 3,2 * 1 * 0,246 \text{ m}^3/\text{MJ} = 532,2 \text{ mg/MJ}$$

$$q_{NO} = 65,9 \text{ mg/m}^3 * 3,2 * 1 * 0,246 \text{ m}^3/\text{MJ} = 51,9 \text{ mg/MJ}$$

$$q_{NO_2} = 9,8 \text{ mg/m}^3 * 3,2 * 1 * 0,246 \text{ m}^3/\text{MJ} = 7,7 \text{ mg/MJ}$$

$$q_{SO_2} = 324 \text{ mg/m}^3 * 3,2 * 1 * 0,246 \text{ m}^3/\text{MJ} = 255 \text{ mg/MJ}$$

Päästöt komponenteittain tietylle ajanjaksolle voidaan laskea, kun tiedossa on savukaasuvirta, käyntiaika ja savukaasujen sisältämä pitoisuus ( $c_m$ ). Päästöt voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$c_{\text{päästö}} = c_m * V_{sk} * 3600 * t \quad (28)$$

$c_{\text{päästö}}$  = komponentti päästöt ajanjaksolle esim. (tn / a)

$c_m$  = yhdisteen pitoisuus (mg / m<sup>3</sup>)

$V_{sk}$  = savukaasu virtaus (m<sup>3</sup> / s)

t = käyntiaika

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tutkittiin kiviainesrummun energiatasetta kiviaineksen lämmityksessä sekä savukaasuista mitattujen pitoisuuksien muunnoksia. Energiatase pystyttiin esittämään työssä olleilla lähtöarvoilla käytännön kokemuksiin perustuen lopputuloksen osalta luotettavasti. Epävarmin tekijä energiataseen määrittämisessä on lämpöhäviö, jonka arvio perustuu yleensä kokemuseräiseen laskemiseen. Lopputulokseen vaikuttaa monta määriteltävää parametria, joiden avulla tuloksista saadaan hyvinkin erilaisia. Kiviaineksen lämmitys ja veden poistaminen kiviaineksestä ovat yksinkertaisia laskettavia, mutta ominaislämpökapasiteettia on tulkinnanvarainen suure. Savukaasujen laskenta on työssä käyty läpi tarkasti, koska savukaasujen avulla tarkkaillaan asfalttiaseman toimintaa kiviaineksen lämmityksessä. Toinen kiviaineksen lämmitystehtävien tarkkailuväline on lämpötilaerot. Mitattujen savukaasujen pitoisuuksia käsiteltiin työssä pintapuoleisesti. Savukaasuista on esitetty viranomaisten lupavaatimuksiin tarvittavat asiat ja näiden muunnokset työn loppuosassa.

Opinnäytetyön tulokset herättävät toivottavasti keskustelua mahdollisista taloudellisista säästöistä. Työssä esitetyt tulokset osoittavat, että prosessissa on mahdollista saada kustannussäästöjä ilman suuria investointeja. Suurin haaste kustannussäästöjen hakemisessa on asenteiden muutos esimerkiksi kiviaineksen hankkimisessa. Kiviaineksen kosteusprosentin ollessa suurin potentiaalinen säästökohde huomiota on kiinnitettävä kiviaineksen hankinta-ajankohtaan siten, että kasojen säilyttäminen sateessa jäisi mahdollisimman lyhytaikaiseksi. Kiviaineksen kosteuden hallintaa olisi mahdollista tehostaa säilömällä kiviaines katettuun tilaan suoraan murskauksen jälkeen. Valmiiksi murskattujen kiviaineskasojen kosteusprosentin tutkiminen voisi olla järkevää, koska

ostettaessa kosteus lisää kiviaineksen painoa ja se haittaa suuresti asfaltin valmistusprosessia.

Asfalttiasemaan syötettävän kiviaineksen kosteuden osalta olisi järkevää tehdä seuranta kokeellisesti tai automaation keinoilla. Kiinnostava tutkimuskohde olisi myös sateen vaikutus kiviainekasaan. Tästä voitaisiin tutkia esimerkiksi kuinka syväälle kosteus tunkeutuu ja millaisella sademäärällä. Asfaltin lämpötilan ja savukaasujen seuranta voimme kehittää automaation keinoilla helposti. Energiataseen laskemisen helpottamiseksi työn tilaajalle on toimitettu Excel-taulukko, jossa arvoja voidaan muuttaa vastaamaan eri tilanteita ja olosuhteita.

## LÄHTEET

1. Infra ry. 2006. Asfalttialan oppimateriaali. Saatavissa:  
[http://www.infrary.fi/files/2520\\_ASKOpieni.pdf](http://www.infrary.fi/files/2520_ASKOpieni.pdf) [Viitattu 16.12.2013]
2. Amomatic. 2002. Käyttö- ja huolto-ohjeet VS01044. NCC Roads arkisto.
3. Kiraly, F. 1991. FKE engineering. Kuivausrummun lämpötalous. NCC Roads koulutusmateriaali.
4. Neste Oil. 2006. Raskaan polttoöljyn käyttöopas, Saatavissa:  
<http://www.nesteoil.com/binary.asp?GUID=7704C1C1-3784-48F1-B8E9-13F2C4DF03EA>. [Viitattu 5.1.2014]
5. Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P., Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. Edita, Helsinki.
6. Tikka, K. 2005. Asfaltti, Asfaltti lehti kesäkuu 2005 nro75, NCC Roads arkisto.
7. Fagerholm, N. 1986. Termodynamiikka 479. Otakustantamo, Jyväskylä.
8. Lampinen, M. 2010. Termodynamiikan perusteet 582. Otatieto, Helsinki.
9. Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2012. Tekniikan kaavasto. Tammertekniikka / Amk-kustannus Oy.
10. Finlex. 2010. Valtioneuvoston asetus asfalttiasemien ympäristönsuojeluvaatimuksesta, Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20100448>. [Viitattu 27.1.2014]
11. Amomatic. 2013. Amocems esite. NCC Roads arkisto.
12. Nykänen, M. Piispa, M. 2012. Päästömittauskurssi opiskelumateriaali.

## Kylläisen vesihöyryn paineen ja tiheyden riippuvuus lämpötilasta

Lämpötila °C	Paine mbar	Tiheys g/m <sup>3</sup>	Lämpötila °C	Paine mbar	Tiheys g/m <sup>3</sup>
-15	1,91		40	73,74	51,14
-14	2,08		45	95,81	65,43
-13	2,25		50	123,3	82,98
-12	2,44		55	157,4	104,3
-11	2,65		60	199,2	130,2
-10	2,87		65	250,0	161,2
-9	3,10		70	311,6	198,1
-8	3,35		75	382,8	261,5
-7	3,62		80	473,4	293,3
-6	3,91		85	578,1	353,3
-5	4,22		90	701,0	423,5
-4	4,55		95	845,1	504,5
-3	4,90		100	1 013,25	597,8
-2	5,27				
-1	5,68		110	1 433	826,7
0	6,105	4,85	120	1 985	1 122
1	6,57	5,19	130	2 701	1 497
2	7,06	5,56	140	3 614	1 967
3	7,58	5,95	150	4 760	2 548
4	8,13	6,36			
5	8,72	6,80	160	6 181	3 260
6	9,35	7,26	170	7 920	4 122
7	10,02	7,75	180	10 027	5 158
8	10,73	8,27	190	12 550	6 393
9	11,48	8,82	200	15 550	7 858
10	12,28	9,41	220	23 200	11 610
11	13,12	10,01	240	33 480	16 760
12	14,02	10,66	260	46 940	23 760
13	14,97	11,34	280	64 190	33 280
14	15,98	12,07	300	85 920	46 300
15	17,04	12,83			
16	18,17	13,63	320	112 900	64 550
17	19,36	14,47	360	186 740	143 500
18	20,63	15,37	374,15	221 290	315 000
19	21,96	16,30			
20	23,37	17,29			
21	24,86	18,33			
22	26,43	19,42			
23	28,08	20,57			
24	29,82	21,77			
25	31,66	23,04			
26	33,60	24,36			
27	35,64	25,76			
28	37,78	27,22			
29	40,04	28,75			
30	42,41	30,36			
35	56,21	39,60			

## Polttoaineen kulutuksen laskentataulukko

Lähtötiedot:	Määritettävät			
Aseman teho	240,0 tn/h	kevyt polttoöljy lämpöarvo	42700,0 kJ/kg	11861,1 kWh/kg
Ruummista ulostuleva teho	228,0 tn/h	Raskaspolttoöljy lämpöarvo	40700,0 kJ/kg	11305,6 kWh/kg
Kivialneksen loppulämpö	180,0 °C	kcal =	4,2 kJ	
Kivialneksen alkulämpötila	15,0 °C	Polttimen palamisen hyötysuhde	0,95	
Kivialneksen kosteus	5,0 %			
Kivialneksen jäännöskosteus	0,0 %			
Savukaasun lämpötila	100,0 °C			
ulkoämpötila	15,0 °C			

Kiven lämmitys:	Kivialneksen ominaislämpö kapasiteetti	0,87 kJ/kg°C
	Lämmitettävä kivialneksen massa	1000,0 kg
	lämpötila ero	165,0 °C
kulua energia:	kevyt	3,5 kg/tn
	raskas	3,7 kg/tn

Veden lämmitys:	Veden ominaislämpö kapasiteetti	4,19 kJ/kg°C
	lämpötilaero	85,0 °C
	Kosteuden määrä	52,6 kg/tn
kulua energia:	kevyt	0,5 kg/tn
	raskas	0,5 kg/tn
Veden haihdutukseen kulua energia:	Halhtumislämpö:	2260,0 kJ/kg
kulua energia:	kevyt	2,9 kg/tn
	raskas	3,1 kg/tn
	Höyryn lämpötilaero	0,0 °C
Höyryn lämmitys:	Höyryn ominaislämpö kapasiteetti:	1,9 kJ/kg°C
	kevyt	0,000 kg/tn
	raskas	0,000 kg/tn
vesi ->höyryksi	kevyt	3,4 kg/tn
	raskas	3,6 kg/tn

Lämpöhäviöt:	Sisäpinta lämmönsiirtymiskerroin	20,0 W/m <sup>2</sup> °C
	Ulkopinta lämmönsiirtymiskerroin	6,0 W/m <sup>2</sup> °C
Lämmönvälityskerroin:	Materiaali 1 lämmönjohtavuus (teräs)	58,0 W/m°C
$k_{(sisä-ulka)}$	Materiaali 2 lämmönjohtavuus (mineraalivilla)	0,05 W/m°C
$k_{(sisä-tila)}$	Materiaali 1 paksuus (teräs)	0,02 m
	Materiaali 2 paksuus (mineraalivilla)	0,05 m
	Sisälämpötila	300,00 °C
lämpövirta / nelö	lämpötilaero	285,0 °C
$Q_{(sisä-tila)}$	Halhtumis pinta-ala	80,0 m <sup>2</sup>
$Q_{(sisä-tila)}$		
Lämpövirta		
$Q_{(sisä-tila)}$	18734,4 W=kJ/s	18,73 kJ/s
$Q_{(sisä-tila)}$	227216,5 W	227,22 kJ/s
Polttoaineen kulutus:		
$m_{(kevyt)}$	295,807 kJ/tn	kevyt 0,007292 kg/tn
$m_{(raskas)}$	3587,629 kJ/tn	kevyt 0,088441 kg/tn
		raskas 0,007650 kg/tn
		raskas 0,092788 kg/tn

Polttoaineen kulutus ennen savukaasuja	kevyt	6,9 kg <sub>ku</sub> /tn
	raskas	7,3 kg <sub>ku</sub> /tn

Savukaasut:	todellinen savukaasumäärä	41,97 kg <sub>ku</sub> /kg <sub>ku</sub>
todell.	ilmakerroin	3,0
	ilma ominaislämpökapasiteetti	1,0 kJ/kg°C
kevyt	lämpötilaero	85,0 °C
0,64 kg <sub>ku</sub> /tn		
raskas		
0,67 kg <sub>ku</sub> /tn		

Polttoaineen kulutus:	kevyt	7,6 kg <sub>ku</sub> /tn
	raskas	8,0 kg <sub>ku</sub> /tn

Polttoaine lähtötiedot:			Määritettävät solut	Kylläisen ilman sisältämä vesi kuvaaa ilmakiloa kohti:	
	%	kg/kmol		ilma °C	vesi kgH <sub>2</sub> O/kgki
C	88,33	12,01	Olosuhteet Lämpötila 20 °C ilman kosteus 50 % ilmanpaine 101 kPa yli ilma kerroin 3,0	-20	0,0015
H <sub>2</sub>	10,10	2,016		-10	0,0025
S	0,95	32,06		0	0,0035
O <sub>2</sub>	0,20	32		10	0,0075
N <sub>2</sub>	0,40	28,02		20	0,015
tuhka	0,20				
H <sub>2</sub> O	0,15	18,02			

	kuiva polttoaine %	kosteus %	kosteaa polttoaine %	ilma °C	kmol/kgpa
C	88,33		88,197505	-20	0,000564364
H <sub>2</sub>	10,10		10,08485	-10	0,000940606
S	0,95		0,948575	0	0,001316849
O <sub>2</sub>	0,20		0,1997	10	0,002821819
N <sub>2</sub>	0,40		0,3994	20	0,005643639
tuhka	0,20		0,1997		
H <sub>2</sub> O		0,15	0,2		
Yhteensä	100		100		

polttoaine komponentit	määrä kg/kgpa	molekyyli paino kg/kmol	polttoaine määrä kmol/kgpa	happi teoreettinen palaminen kmol/kgpa
C	0,88197505		12,01	0,073437 C+O <sub>2</sub> ->CO <sub>2</sub>
H <sub>2</sub>	0,1008485		2,016	0,025012 H <sub>2</sub> +WO <sub>2</sub> ->H <sub>2</sub> O
S	0,00948575		32,06	0,000296 S+O <sub>2</sub> ->SO <sub>2</sub>
O <sub>2</sub>	0,001997		32	-0,000062
N <sub>2</sub>	0,003994		28,02	
tuhka	0,001997		0	
H <sub>2</sub> O	0,0015		18,02	
Yhteensä	1,00			0,099

Kuivan ilman koostumus				
Aine	pitoisuus tš %	molek. g/mol	Paino g/mol	moollitavuus l/mol
N <sub>2</sub> tyyppi	78,08		28,02	22,40
O <sub>2</sub> happi	20,99		32,00	22,39
Ar, argon	0,94		39,94	22,39
CO <sub>2</sub> hiilidioksidi	0,03		44,01	22,26
H <sub>2</sub> vety	0,01		2,02	22,43
Yhteensä	100			22,40

Teoreettinen ilma			yli ilma määrä		todellinen ilma	
happi typpi	kuiva %	kosteaa %	kmol/kgpa	kmol/kgpa	kmol/kgpa	kmol/kgpa
happi	0,099	21	20,8	0,19736		0,29605
typpi	0,371	79	78,1	0,74247		1,11370
yht.kuiva	0,470	100		0,93983		1,40975
H <sub>2</sub> O	0,00564		1,2	0,01129		0,01693
Yht.kosteaa	0,47559		100	0,95112		1,42668
	m <sup>3</sup> /kgpa			m <sup>3</sup> /kgpa		m <sup>3</sup> /kgpa
kuiva	10,526			21,052		31,578
kosteaa	10,653			21,305		31,958
	kg/kgpa			kg/kgpa		kg/kgpa
happi	3,158			6,316		9,473
typpi	10,402			20,804		31,206
yht.kuiva	13,560			27,120		40,679
H <sub>2</sub> O	0,102			0,203		0,305
Yht.kosteaa	13,661			27,323		40,984

savukaasut		määrä kmol/kgpa	mol.paino kg/kmol	määrä kg <sub>aa</sub> /kg <sub>aa</sub>	m <sup>3</sup> /kmol	määrä m <sup>3</sup> /kgpa	kuivat %	kosteat %
palanut hiili	CO <sub>2</sub>	0,07344	44,01	3,232	22,26	1,635	5,3	5,1
palanut vety	H <sub>2</sub> O	0,05002	18,016	0,901	22,43	1,122		3,4
palanut rikki	SO <sub>2</sub>	0,00030	64,06	0,019	21,98	0,007	0,021	0,020
polttoaine kosteus	H <sub>2</sub> O	0,00008	18,016	0,001	22,4	0,002		0,0
ilman kosteus	H <sub>2</sub> O	0,00564	18,016	0,102	22,4	0,126		0,4
polttoaine tyyppi	N <sub>2</sub>	0,00014	28,02	0,004	22,4	0,003	0,0	0,0
palamisilma tyyppi	N <sub>2</sub>	0,37123	28,02	10,402	22,4	8,316	26,7	25,6
ylimäärä happi	O <sub>2</sub>	0,19736	32,00	6,316	22,4	4,421	14,2	13,6
ylimäärä tyyppi	N <sub>2</sub>	0,74247	28,00	20,789	22,4	16,631	53,4	51,1
ylimäärä kosteus	H <sub>2</sub> O	0,01129	18,00	0,203	22,4	0,253		0,8
Yhteensä		1,45198		41,969		32,515	100	100
Kosteat savukaasut:		1,45198		41,96915		32,51538		
Kuivat savukaasut:		1,39067		40,86474		31,14051		

Kostean ilman Mollier-piirros

