

Opinnäytetyö (YAMK)

Kone- ja meriteknikka

2021

Matti Heinonen

ASFALTTIASSEMISSA KÄYTETTÄVIEN KUIVAUSRUMPUJEN ENERGIANKULUTUS

Matti Heinonen

ASFALTTIASEMISSA KÄYTETTÄVIEN KUIVAUSRUMPUJEN ENERGIANKULUTUS

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on antaa työkalu asfalttiasemissa käytettävien kuivausrumpujen energiankulutuksen ja hintojen laskemiseen. Laskentatyökalua varten selvitettiin kuivausrumpuun syötettävän energiamäärän jakautuminen kiviaineksen kuumennukseen, kiviaineksen haihdutukseen, lämpöhäviöihin ja savukaasuhäviöihin. Työssä käytettävät hinnat ovat suuntaa antavia vaihtuvista hinnoista johtuen

Asfalttiaseman suurin energiankulutus tapahtuu kuivausrummussa kiviaineksen lämmityksessä ja kuivatuksessa. Lämmitys ja kuivatus tapahtuu rummussa teollisuuspolttimen avulla. Polttimessa on mahdollisuus käyttää useita eri polttoaineita. Tähän työhön on valittu yleisimmin käytössä olevia polttoaineita, mutta laskentatyökaluun on myös mahdollista lisätä jälkikäteen haluttuja polttoaineita. Polttoaineiden hinnat vaihtelevat nopeastikin joten tässä työssä tehtävällä työkalulla voidaan jatkossa nopeasti tehdä uudet laskelmat vain päivittämällä polttoaineiden hinnat..

Tämä opinnäytetyö ei perustu mihinkään yhteen asfalttiasemaan tai tapahtumaan vaan tarkoitus on vertailla energiankulutusta ja hintaa eri polttoaineilla. Tässä työssä vertailu eri kuivausrumpujen kesken tehdään samoilla lähtöarvoilla jolloin vertailu on järkevää. Energiankulutuskalkelmat on tehty teoreettisesti.

Työn tulokset ovat teoreettisen laskennan tuloksia ja niitä voidaan hyödyntää likimääräisen energiankulutuksen ja hinnan arviointiin ja vertailuun eri polttoaineiden välillä. Laskentatyökalun avulla voidaan valita paras mahdollinen polttoaine uuteen asfalttiasemaan.

ASIASANAT:

Kuivausrumpu, asfaltti, kierrätysasfaltti,

BACHELOR'S / MASTER'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Master's Degree Programme in Mechanical and Marine Engineering

2021 | 53 pages, 3 appendices

Matti Heinonen

ENERGY CONSUMPTION OF DRUM DRYERS IN ASPHALT PLANTS

The purpose of this thesis is to provide a tool for calculating the energy consumption and prices of drum dryers used in asphalt plants. For the calculation tool, the distribution of the amount of energy input to the dryer for aggregate heating, aggregate evaporation, heat losses and fuel gas losses was determined. The prices used in the work are indicative due to variable prices.

The largest energy consumption in asphalt plant is in the heating and drying of the aggregate in the drying drum. Heating and drying in the drum is done with an industrial burner. There are several different fuels to be used in the burner. Most common fuels are selected for comparison for this work but it is possible to add new fuels to the calculation tool afterwards. Fuel prices are changing rapidly, so with the tool done in this work, new calculations can be made quickly in the future by updating fuel prices.

This thesis is not based on any specific asphalt plant or case, it is intended to compare energy consumption and price with different fuels. In this work the comparison is made with the same initial values and therefore are suitable for comparison. Energy consumption calculations have been made theoretically.

The results of the work are the results of a theoretical calculation and can be used to estimate and compare the approximate energy consumption and price between different fuels. The tool can be used to help choosing the right fuel for a new asphalt plant.

KEYWORDS:

Drying drum, asphalt, recycled asphalt

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	8
1 JOHDANTO	9
2 ASFALTTIASEMAN PROSESSI	10
2.1 Asfalttiasemien tyypit	10
2.2 Asfalttiaseman toiminta	11
3 KUIVAUSRUMMUT	13
3.1 Kuivausrummun toimintaperiaate	13
3.2 Kuivausrumputyypit	14
3.2.1 Normaali kuivausrumpu	15
3.2.2 Keskisyöttökuivausrumpu	15
3.2.3 LTA-kuivausrumpu	16
4 POLTIN JA POLTTOAINEET	18
4.1 Poltin	18
4.2 Polttoaineet	20
4.2.1 Polttoöljyt	20
4.2.2 Nesteytetyt kaasut	21
4.2.3 Maakaasu	22
4.2.4 Biokaasu	22
4.2.5 Bioöljy	22
4.3 Asfalttiasemissa käytettävät polttoaineet	22
5 KIVIAINEKSEN LÄMMITYKSEN TEORIAA	24
5.1 Kiviaines	24
5.2 Ominaislämpökapasiteetti	24
5.3 Lämmön siirtyminen	25
5.4 Palaminen	25
5.5 Lämpöarvo	26
6 KIVIAINEKSEN KUIVATUS	28
6.1 Kiviaineksen lämmittäminen	28
6.2 Kiviaineksen kosteuden haihdutus	30

6.3 Lämpöhäviöt	32
6.4 Palamisilma ja savukaasut	34
6.5 Kiviaineksen kuumennuksen energiatase	38
7 TALOUDELLISUUS	39
7.1 Energiatehokkuus	39
7.2 Polttoaineiden hintoja	39
8 ENERGIALASKELMAT KIVIAINEKSEN LÄMMITYKSESSÄ	41
8.1 Johdanto laskelmiin	41
8.2 Laskelmat	41
8.2.1 Kiviaineksen lämmittäminen	42
8.2.2 Kiviaineksen haihdutus	42
8.2.3 Lämpöhäviöt	43
8.2.4 Palamisilma ja savukaasut	45
8.2.5 Energiataseen lopputulokset	47
9 YHTEENVETO	53
10 LÄHDELUETTELO	54

LIITTEET

Liite 1. Laskentataulukon tulossivut

KAAVAT

Kaava 1. $Q_1 = m_{kivi} \cdot c_{kivi} \cdot (T_{kivi2} - T_{kivi1})$.	29
Kaava 2. $Q_1 = (((n_{kivi} \cdot m_{kivi}) \cdot c_{kivi}) + ((n_{bit} \cdot m_{kivi}) \cdot c_{bit})) \cdot (T_{kivi2} - T_{kivi1})$	29
Kaava 3. $m_{pa1} = Q_1 / H_u \cdot \eta$	29
Kaava 4. $m_{vesi} = (m_{kivi} / ((100 - M_{kivi}) / 100)) - m_{kivi}$	30
Kaava 5. $m_{vesi} = n_{kivi} \cdot m_{kok} / ((100 - M_{kivi}) / 100) + (n_{RC} \cdot m_{kok}) / ((100 - M_{RC}) / 100) - m_{kok}$	30
Kaava 6. $Q_2 = m_{vesi} \cdot (C_{vesi} \cdot (T_h - T_a) + Q_h + C_{höyry} \cdot (T_1 - T_h))$	31
Kaava 7. Q_2 (kJ) = $Q_{vesi} + Q_{höyrystäminen}$	32
Kaava 8. $k = 1 / (1 / \alpha_{sisä} + S_{lieriö} / \lambda_{teras} + S_{villa} / \lambda_{villa} + 1 / \alpha_{ulko})$	33
Kaava 9. $Q_{läpi} = k \cdot A \cdot (T_{sisä} - T_{ulko})$	33
Kaava 10. Q_3 (kJ/tn) = $Q_{läpi} / (m_{kuivakivi} / 3600)$	34
Kaava 11. Q_{123} (kJ/tn) = $Q_1 + Q_2 + Q_3$	34

Kaava 12. $L_{O_2(\text{teor})} = (c / 12 + (0,5 * (h / 2)) + s / 32 - o / 32$	35
Kaava 13. $L_{i(\text{teor})} = 4,76 * L_{O_2}$	35
Kaava 14. $\lambda = L / L_{i(\text{teor})}$	36
Kaava 15. $\lambda = 21 / (21 - X_{O_2(\text{mit})})$	36
Kaava 16. $G_0 = c / 12 + h / 2 + s / 32 + n / 28 + w / 18 + 3,76 * L_{O_2} \text{ (kmol/kg}_{pa})$	36
Kaava 17. $G_{0m^3} = 22,4 * G_0 \text{ (m}^3/\text{kg)}$	36
Kaava 18. $G_{0kg} = ((c / 12)*44) + ((h / 2)*18) + ((s / 32)*64) + ((n / 28)*28) + ((w / 18)*18) + 3,76 * (L_{O_2(\text{teor})} * 32) \text{ (kg/kg}_{pa})$	37
Kaava 19. $G = G_0 + (\lambda - 1) * L_{i(\text{teor})}$	37
Kaava 20. $V_{kg/tn} = m_{pa123} * G_{kg} \text{ (kg}_{sk}/\text{tn)}$	37
Kaava 21. $Q_4 = V_{kg/tn} * c_{psk} * (T_2 - T_u) \text{ (kJ/tn)}$	37
Kaava 22. $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \text{ (kJ/tn)}$	38

KUVAT

Kuva 1. Asfalttiaseman moduulit (Amomatic Oy 2021).	12
Kuva 2. Kuivausrummun toimintaperiaate. (Kiraly, 1991)	14
Kuva 3. Kiviainesverho kuivausrummussa. (Kiraly, 1991)	14
Kuva 4. Normaali kuivausrumpu (Amomatic Oy, 2021)	15
Kuva 5. Keskisyöttörumpu (Amomatic Oy, 2021)	16
Kuva 6. LTA-rumpu (Amomatic Oy, 2021)	17
Kuva 7. CO ₂ -taulukko. (Kiraly, 1991)	18
Kuva 8. Kuuma liekki. (Kiraly, 1991)	19
Kuva 9. Kylmä liekki. (Kiraly, 1991)	19
Kuva 10. Raakaöljyn tislaukolonni (Kosan Gas Finland Oy)	21
Kuva 11. Kuivausrummun energiavirrat. (Kiraly, 1991)	28

KAAVIOT

Kaavio 1. Energian jakautuminen normaalissa kuivausrummussa	48
Kaavio 1. Energian jakautuminen normaalissa keskisyöttörummussa	49
Kaavio 1. Energian jakautuminen normaalissa LTA-rummussa	49

TAULUKOT

Taulukko 1. Eri polttoaineiden alemman ja ylemmän lämpöarvojen eroja. (Riikonen, 1993)	26
Taulukko 2. Eri polttoaineiden alempia lämpöarvoja (Hu). (Riikonen, 1993)	27
Taulukko 3. Palavien aineiden kilomoolin ainemäärät. (Näretie, 1972)	35
Taulukko 4. Neste Mastera LS ominaisuudet. (Neste Oyj, 2006)	45
Taulukko 5. Savukaasujen energiamäärä Q ₄ eri polttoaineilla kuivausrummuilla.	47
Taulukko 6. Kuivausrumpujen energiankulutus eri polttoaineilla.	50
Taulukko 7. Kuivausrumpujen polttoaineenkulutus.	50
Taulukko 8. Polttoaineiden hinta-arviot.	50

Taulukko 9. Hinta per kuivatettava 1000kg.	50
Taulukko 10. Normaalin kuivausrummun polttoainekustannukset 10v aikana.	51
Taulukko 11. Keskisyöttörummun polttoainekustannukset 10v aikana.	51
Taulukko 12. LTA-rummun polttoainekustannukset 10v aikana.	52

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

Lyhenne	Lyhenteen selitys
LTA	Low Temperature Asphalt, Matalalämpö asfaltti
RC-asfaltti	Recycled asphalt, Kierrätysasfaltti
LPG	Liquefied petroleum gas, nestekaasu
LNG	Liquefied natural gas, nesteytetty maakaasu

1 JOHDANTO

Amomatic Oy on Paimiossa sijaitseva asfalttiasemia valmistava yritys. Yritys valmistaa kokonaisia asfalttiasemia. Yritys tarjoaa myös kunnossapitoa ja muita palveluja kaikkiin asfalttiasemiin. Amomatic Oy on perustettu vuonna 1919 nimellä Vähäsilta. Vuonna 1993 yrityksen nimi muutettiin Amomatic Oy:ksi. Alunperin yritys oli konepaja ja 1960-luvulta alkaen toiminta on keskittynyt asfalttiasemien valmistamiseen. Amomatic valmistaa itse omilla tiloissaan kuivausrummut ja polttimet joita tämä työ käsittelee.

Tämän työn tarkoituksena on suorittaa vertailulaskelmat energiankulutukselle asfalttiasemissa käytettäville kuivausrummuille joissa asfalttimassassa käytettävä kivimateriaali kuivataan. Asfalttiaseman kuivausrummun energiataseen laskennalle on olemassa aikaisempi opinnäytetyö jonka on tehnyt Antti Luhtaniemi (Luhtaniemi, 2014). Luhtanien työssä laskenta keskittyy yhteen, normaaliin, kuivausrumpuun ja yhteen käytettävään polttoaineeseen. Asfalttiasemissa käytettäviä rumputyyppejä ja polttoaineita on useita. Tämä työ vertailee eri rumputyyppien energiankulutusta. Lisäksi tässä työssä vertaillaan eri polttoaineiden kulutusta eri rumputyypeillä. Rumputyyppejä on myös eri tehoilla. Rumpujen teho ilmoitetaan tuntitehona. (tn/h). Eri tehoiset rummut on skaalattuja versioita toisistaan.

Asfaltin valmistuksessa suurin energia kuluu kiviainekseen lämmittämiseen. Kiviaineksen lämmityksessä tärkeitä energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat kiviaineksen kosteus ja tavoitelämpötila. Lisäksi ympäristön lämpötila, sekä poltin jolla tuodaan kaikki lämmitysenergia kiven lämmitys- ja kuivausprosessiin vaikuttaa energiatehokkuuteen.

Polttimelle on käytettävissä useita eri polttoaineita joilla voidaan vaikuttaa taloudellisuuteen. Tässä työssä on tarkoitus tehdä laskelmia elinkaarikustannuksille eri rumputyypeille ja polttoaineille. Tarkoituksena on saada laskelmat joiden perusteella voidaan todeta saavutettava taloudellinen hyöty taloudellisimmalla rumputyyppillä ja polttoaineella.

2 ASFALTTIASEMAN PROSESSI

2.1 Asfalttiasemien tyypit

Amomatic Oy:n valmistavat asfalttiasemat ovat modulaarisia ja annostyyppisiä. Modulaarisuus tarkoittaa Amomatic Oy:n asfalttiasemissa sitä, että ne voidaan liittää toisiinsa nopeasti. Asfalttiasema koostuu siis monesta irrallisesti modulista jotka voidaan nopeasti koota ja purkaa. Annostyyppisyys tarkoittaa sitä, että asfalttiasema valmistaa tietyn määrän asfalttia kerrallaan eikä jatkuvalla syötöllä.

Modulaarisuudelle on eri variaatioita ja Amomatic Oy valmistaa viittä eri tyyppistä asemaa:

- SM Semi-Mobile
- CM Container Model
- H High
- S Special
- M Mobile

Asematyypit kertovat niiden modulaarisuudesta ja liikuteltavuudesta.

Amomatic Oy:n asfalttiasemilla on eri teholuokkia:

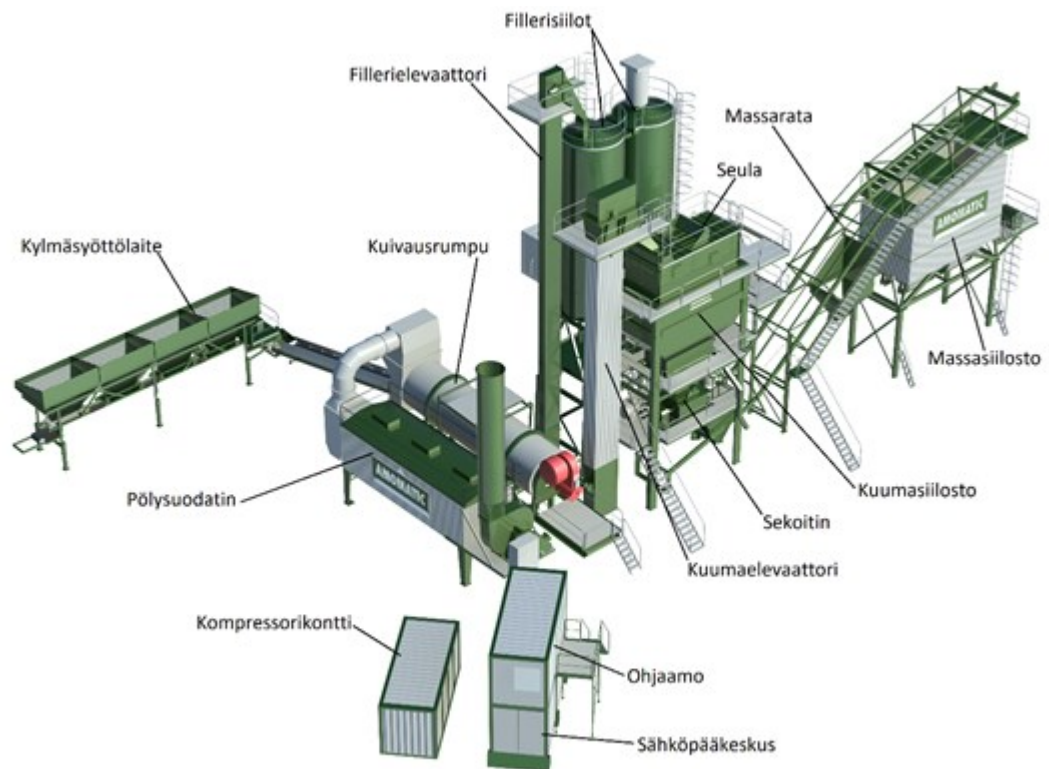
- 120 t/h
- 160 t/h
- 200 t/h
- 240 t/h
- 300 t/h

Teholuokat kertovat kuinka monta tuhatta kiloa valmistaa asfalttimassaa asema pystyy tuottamaan.

2.2 Asfalttiaseman toiminta

Asfalttimassan valmistusprosessi alkaa syöttämällä hiekkaa, soraa ja/tai kalliomursketta kylmäsyöttölaitteelta kuljetinhihnan kautta kuivausrumpuun. Kuivausrummussa kiviaines kuivataan ja kuumennetaan polttimen avulla valmiin massan lämpötilavaatimusten mukaiseen lämpötilaan. Kuivausrummusta kuuma kiviaines kuljetetaan kuumaelevaattorilla seulaan josta kuuma kiviaines lajitellaan rakeiden koon mukaan kuumalajiksi siloihin. Kuumasiilon alla on kivivaaka johon annostellaan reseptin mukainen kivilajike kuumasiilosta. Samalla annostellaan haluttu määrä täytejauhetta eli kiviä, kalkkijauhetta (ja/tai lentotuhkaa) omassa täytejauhesiilojen alla olevassa vaa'assa, sekä bitumia ja mahdollisia muita lisäaineita. Täytejauhetta saadaan siloihin prosessista pölysuodattimen kautta sekä täyttämällä siloja prosessin ulkopuolisella pölyllä. Prosessipöly saadaan, kun kylmäsyöttölaitteella syötetään kivimateriaali kuivausrumpuun ja kuivausrummusta imetään savukaasut ja savukaasujen mukana tullut kiviä pölyä suodattimen läpi ja kuljetetaan takaisin prosessiin. Kun kivilajike, täytejauhe ja bitumi on punnittu, ne syötetään sekoittimeen reseptin mukaisessa järjestyksessä. Sekoitin sekoittaa materiaalit keskenään minuutin ajan ja saa aikaan tasalaatuista asfalttimassaa. Valmis annos asfalttimassaa pudotetaan massavaunuun tai suoraan kuorma-auton lavalle. Mikäli käytetään massavaunua, kuljetetaan asfalttimassa massasiilostoon. (Suomi, 2009)

Amomaticin valmistavat asfalttiasemat ovat modulaarisia ja annossyötteisiä. Modulaarisuus



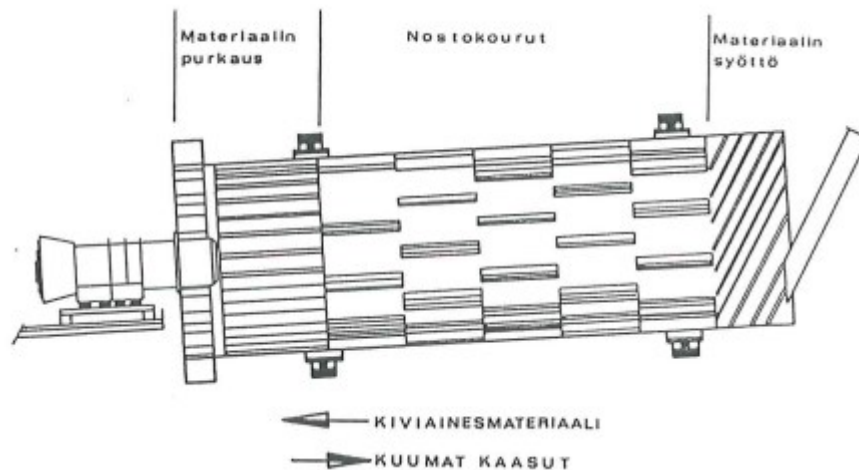
Kuva 1. Asfalttiaseman moduulit (Amomatic Oy 2021).

3 KUIVAUSRUMMUT

Asfaltin valmistuksessa kuluu paljon energiaa kiviaineksen lämmittämiseen ja kuivaamiseen. Kuivausrummussa vapautuu myös eniten savukaasuja asfaltin valmistusproses- sissa. Kuivausrumputyyppejä on useita: normaali kuivausrumpu, keskisyöttökuivaus- rumpu, LTA-kuivausrumpu, RC-rumpu ja rumpusekoitin. Tässä työssä keskitytään ja vertaillaan mainituista kolmea ensimmäistä koska ne ovat joko pitkään käytössä olleita kuivausrumputyyppejä tai uusia innovaatioita, jotka kilpailevat vanhojen kanssa. Ne ovat myös ns. normaaliin annosperiaatteella toimivaan asfalttiaseman prosessiin sopivia kui- vausrumpuja. RC-rumpua käytetään ainoastaan kierrätysrouheen kuivaamiseen eikä se voi olla asfalttiaseman ainoa kuivausrumpu. Rumpusekoittimia ei Suomessa hirveästi käytetä ja rumpusekoitinta käytettäessä asfalttiaseman rakenne on muihin rumpuihin verrattuna hyvin erilainen. Rumpusekoittimella varustettu asfalttiasema on jatkuvatoimi- nen eikä annosperiaatteella toimiva.

3.1 Kuivausrummun toimintaperiaate

Kuivausrumpu koostuu varsinaisesta rumpulieriöstä, kantopyöristä jotka kannattelee ja pyörittää rumpua ja polttimesta. Kuivausrumpuun syötetään kiviaines vastakkaisesta päästä missä poltin sijaitsee. Kyseessä on ns. vastavirtaperiaatteella toimiva rumpu. Kui- vausrummun lieriön sisäpinnalla on nostosiipiä jotka rummun pyöriessä nostavat kivima- teriaalin rumpulieriön yläosaan ja tiputtavat sen vapaasti kuuman savukaasun lävitse. Kuuma savukaasu ja polttimen lähellä liekin säteily haihduttavat kosteuden ja lämmittä- vät kivimateriaalin tavoitelämpötilaan. Tällä tavoin toimivalla kuivausmenetelmällä saa- daan kivimateriaalin tasainen kuumeneminen ja lämpötalous. Polttimen tehoa säätä- mällä saadaan pidettyä rummusta ulos tulevan kivimateriaalin lämpötila vakiona. Suo- dattimen toiminnan takaamiseksi täytyy rummusta ulos tulevien savukaasujen lämpötilan pysyä kastepisteen yläpuolella jotta kosteus ei tiivisty. (Suomi, 2009)



Kuva 2. Kuivausrummun toimintaperiaate. (Kiraly, 1991)



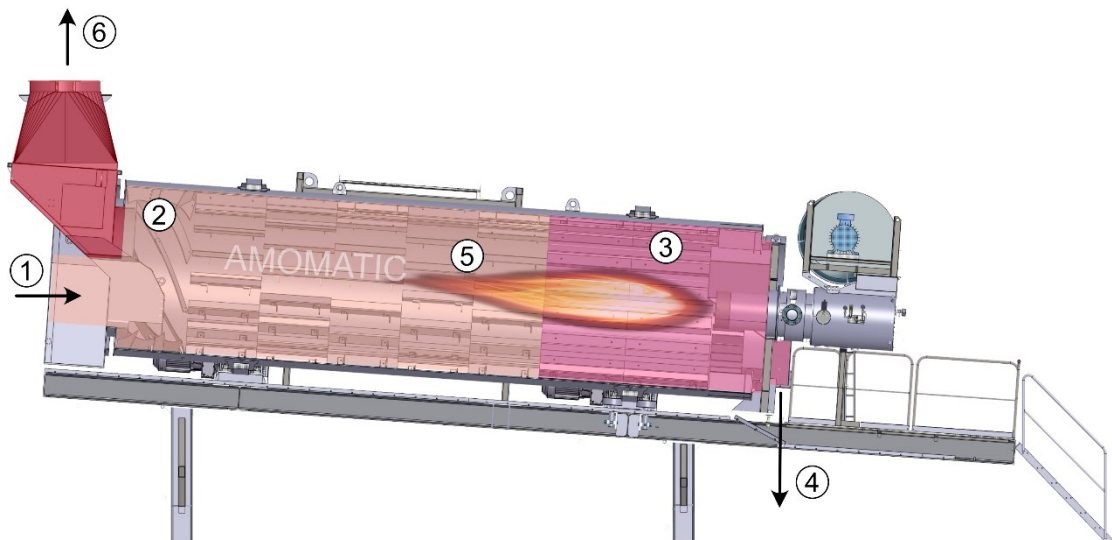
Kuva 3. Kiviainesverho kuivausrummussa. (Kiraly, 1991)

3.2 Kuivausrumputyypit

Amomatic Oy:llä käytössä olevat annoskoneissa käytettävät kuivausrummut ovat ulkoa päin erittäin saman näköisiä. Ulko päin nähtävissä oleva selkein ero on keskisyöttörensä, josta selviää käytetäänkö rummussa kierrätysasfalttia vai ei. Suurimmat erot kuivausrummuissa ovat lieriön sisäpuolella, jossa sekä sekoitinkauhat, että polttimen palopään pituus vaihtelee.

3.2.1 Normaali kuivausrumpu

Normaali kuivausrumpu on periaatteeltaan aikaisemmin mainitun kaltainen kuivausrumpu eli rumpu, johon kaikki kivimateriaali syötetään poltinta vastapäätä. Kuivattu sekä lämmitetty kivimateriaali poistuu polttimen päästä. Tämä kuivausrumputyyppi on rakenteeltaan vaihtoehtoista yksinkertaisin, mutta sen ero keskisyöttörumpuun ja LTA-rumpuun on, että siihen ei saada syötettyä kierrätysasfalttia. Kuivausrummussa kiviaines kuumennetaan 160-180 °C lämpötilaan. (Amomatic Oy, 2021)



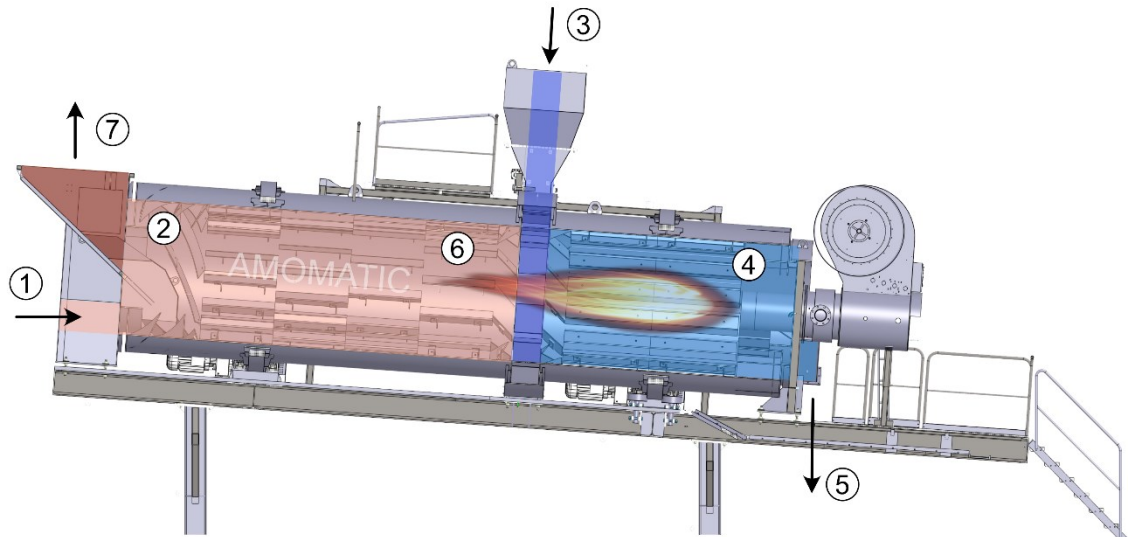
Kuva 4. Normaali kuivausrumpu (Amomatic Oy, 2021)

1. Kivimateriaalin syöttö
2. Kivimateriaalin kuivatus
3. Lämmin kivimateriaali
4. Kuivatun kivimateriaalin purku
5. Polttimen liekki suorassa kosketuksessa kivimateriaaliin
6. Savukaasujen kanava suodattimeen

3.2.2 Keskisyöttökuivausrumpu

Keskisyöttökuivausrumpu toimii lähes samalla tavalla kuin normaali kuivausrumpu. Keskisyöttörummussa on normaalin päästä syötettävän kivimateriaalin lisäksi mahdollista syöttää rumpuun kierrätysmateriaalia keskisyöttörengas avulla. Rummussa materiaali

kuumennetaan hellästi ja se sekoittuu uuteen kivimateriaaliin. Keskisyötön avulla voidaan käyttää parhaimmillaan jopa 30% kierrätysmateriaalia. Purku ja savukaasujen poisto tapahtuu keskisyöttörummusta samoin kuin normaalissa kuivausrummussa. (Amomatic Oy, 2021) Keskisyöttöisessä kuivausrummussa kiviaines kuumennetaan 160-180 °C kuten normaalissakin kuivausrummussa. (Király)



Kuva 5. Keskisyöttörumpu (Amomatic Oy, 2021)

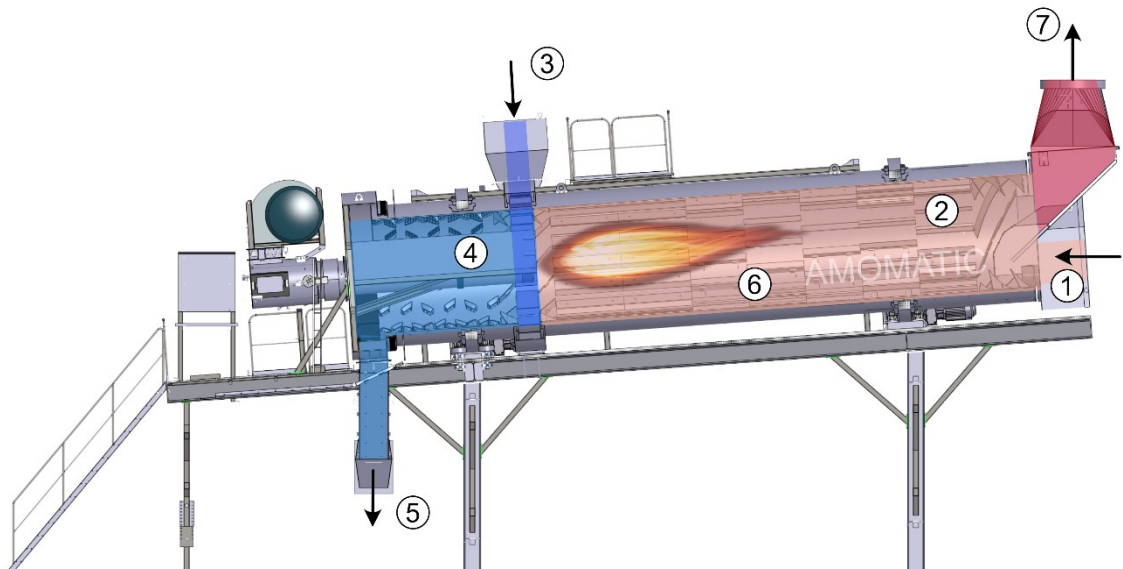
1. Kivimateriaalin syöttö
2. Kivimateriaalin kuivatus
3. Kylmän kierrätysmateriaalin syöttö
4. Lämpimän kivimateriaalin ja kierrätysmateriaalin sekoitus
5. Kuivatun kivimateriaalin ja kierrätysmateriaalin sekoituksen purku
6. Polttimen liekki suorassa kosketuksessa kierrätysmateriaaliin -> suora lämmitys
7. Savukaasujen kanava suodattimeen

3.2.3 LTA-kuivausrumpu

LTA-kuivausrumpu näyttää ulkoapäin samanlaiselta kuin keskisyöttökuivausrumpu. Siinä on vastaavanlainen keskisyöttörengas, josta syötetään kierrätysmateriaalia rumpuun ja sekoitetaan kuumaan kiviainekseen. Ero keskisyöttökuivausrumpuun on rumpun sisällä, jossa polttimen pää on tuotu pidemmälle keskisyöttörengaan kohdalle. LTA-rummussa alkupään kivimateriaali lämmitetään normaaliin lämpötilaan ja keskisyötöstä

syötetään kylmää kierrätysmateriaalia. LTA-rummussa polttimen liekki ei lämmitä suoraan sisään tulevaa kierrätysmateriaalia ja näin saadaan matalalämpöistä kiviaineksen ja kierrätysmateriaalin sekoitetta ulos rummun purkuaukosta. Tämän rakenteen ansiosta saadaan valmistettua matalampilämpöistä asfalttia, mutta samalla pystytään pitämään savukaasut normaaleina jotta suodattimen toiminta voidaan varmistaa.

Matalalämpöasfaltin lämpötila on 20-40 °C kuuma-asfalttia matalampi. (EAPA, 2014)



Kuva 6. LTA-rumpu (Amomatic Oy, 2021)

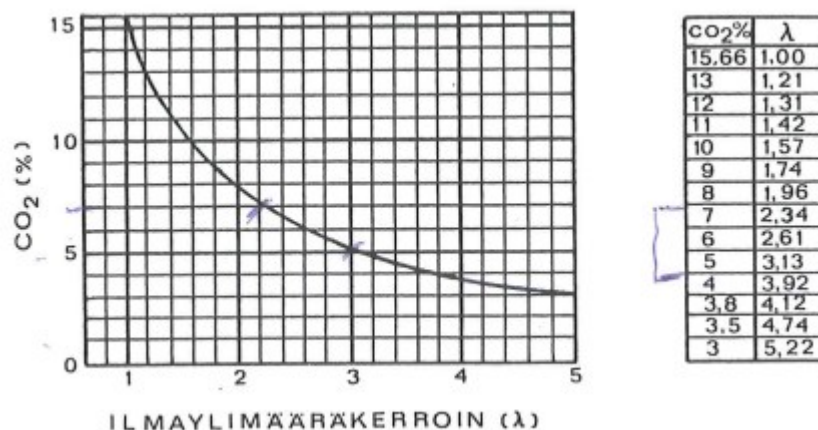
1. Kivimateriaalin syöttö
2. Kivimateriaalin kuivatus
3. Kylmän kierrätysmateriaalin syöttö
4. Lämpimän kivimateriaalin ja kierrätysmateriaalin sekoitus
5. Kuivatun kivimateriaalin ja kierrätysmateriaalin sekoituksen purku
6. Polttimen liekki epäsuorassa kosketuksessa kierrätysmateriaaliin -> epäsuora lämmitys
7. Savukaasujen kanava suodattimeen

4 POLTIN JA POLTTOAINEET

4.1 Poltin

Yksinkertaisesti ilmaistuna polttimen tehtävä on sekoittaa poltettava polttoaine tarvittavan ilman kanssa. Polttotapahtumassa täytyy pitää huoli, että polttimessa ei ole yli-ilmaa. Liika ilmansyöttö polttimelle maksaa energiaa, sillä jokainen happiatomi täytyy kuljettaa kuivausrummusta suodattimen läpi ulos.

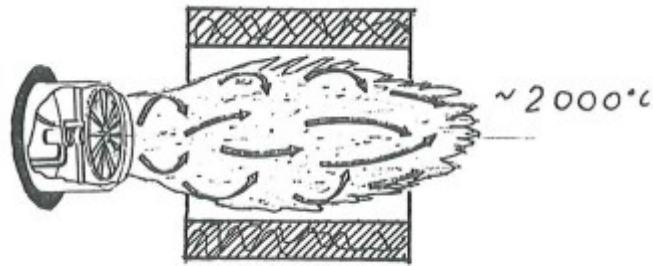
Yli-ilma voidaan mitata ja alla olevan taulukon avulla säätää sen määrä oikeaksi. Ohjearvona asfalttiasemille voidaan antaa 5-7 prosentin CO₂-arvo. Näin ollessa palaminen on hyvää ja jäljellä on tarpeeksi ilmaa, joka imee kuivausrummissa olevan kosteuden ja johtaa sen suodattimeen. (Kiraly, 1991)



Kuva 7. CO₂-taulukko. (Kiraly, 1991)

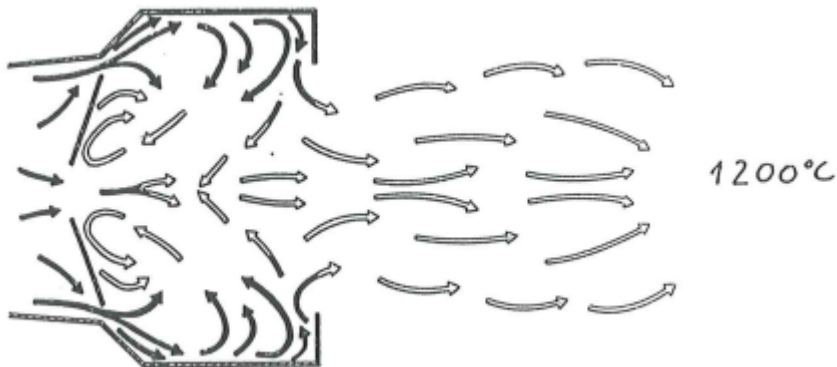
On olemassa kaksi erilaista tapaa polttaa polttimessa sinne syötettävää polttoainetta. Niin kutsutut kuuma liekki ja kylmä liekki.

Kuuman liekin haittana on myrkyllisten kaasujen määrä hiilivety päästöjen muodossa ja etuna tehokas palaminen. Poistokaasujen lämpötila kuumalla liekillä voi olla jopa 2000 °C. (Kiraly, 1991)



Kuva 8. Kuuma liekki. (Király, 1991)

Kylmän liekin haittoina on palamiseen tarvittava lisäenergia joka maksaa ja poistokaasujen lämpötilat ovat lähes puolet alhaisempia. Etuina kylmällä liekillä on hiilivetykaasujen palaminen hyvin. Kylmällä liekillä poistokaasujen lämpötila voi olla 1200 °C. (Király, 1991)



Kuva 9. Kylmä liekki. (Király, 1991)

Asfalttiaseman kuivausrummulle parempi palamistapa on kylmä liekki. Kylmällä liekillä voidaan varmistaa, että poistokaasuissa ei ole liian vähän ilmaa ja siten estää kosteuden muodostumisen suodattimeen. Kosteus tukkii suodattimen suodatinpussit ja kun kosteus voidaan pitää alhaalla, niin suodattimen puhdistaminen helpottuu. (Király, 1991)

4.2 Polttoaineet

Kaasumaisilla polttoaineilla korvataan monesti öljyä. Niillä on monia etuja verrattuna nestemäisiin polttoaineisiin. Kaasulla on parempi palamishyötysuhde kuin monilla vertailupolttoaineilla. Lisäksi kaasujen käyttö on helppoa ja palamisen valvonta ja hallinta polttoaineen tasalaatuisuuden vuoksi yksinkertaista. Kaasulaitteet soveltuvat hyvin automatisoitaviksi. Kaasun palamisen hyvän hyötysuhteen takaa palaminen pienelläkin ilmakertoimella. Etuna kaasuilla on myös puhtaat savukaasut jotka varmistavat hyvän lämmönsiirron mahdollistamisen. Kaasujen käytöstä syntyvät rikki-, typpioksidi- ja hiilidioksidipäästöt ovat vähäisiä verrattuna nestemäisiin polttoaineisiin. (Riikonen, 1997)

Nestemäisten polttoaineiden syttymis- ja palamislämpötila on suurempi kuin näiden aineiden höyrystymislämpötila. Se tarkoittaa, että nestemäinen polttoaine höyrystyy ympäröivän lämmön vaikutuksesta ja höyrystynyt polttoaine reagoi sen jälkeen hapen kanssa. (Fortum Oyj, 2002)

Öljyn lämpöarvo (MJ/kg) kiloa kohti osoittaa, kuinka paljon energiaa öljystä poltettaessa on mahdollista saada palamisen ollessa täydellistä. Polttotapahtumassa hiili palaa hiileksi, vety vedeksi ja lisäksi syntyy jonkin verran rikin ja typen oksideja. (Fortum Oyj, 2002)

4.2.1 Polttoöljyt

Polttoöljyt valmistetaan jalostamalla raakaöljyä. Jalostuksessa käytetään fysikaalisia ja kemiallisia menetelmiä, joista tyypillisin on fysikaalinen menetelmä tislaus. Jalostusprosessissa kuumennettu raakaöljy pumpataan välipohjilla varustettuun tislauskolonneihin. Raakaöljyn sisältämät hiilivedyt jakaantuvat eri osioihin. Kevyemmillä polttoöljyillä on alhaisempi kiehumispiste kuin raskailla. Kolonnissa on eri korkeuksilla ulosotot. (Riikonen, 1993)

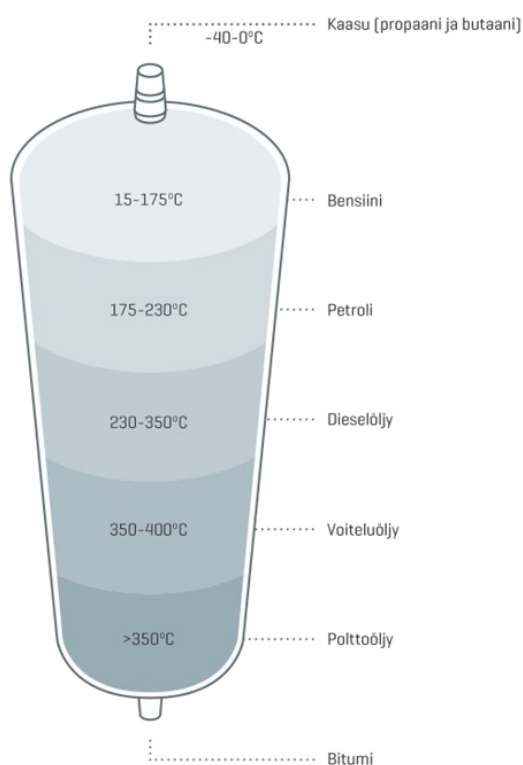
Kevyt polttoöljy valmistetaan edellä mainitulla raakaöljyn tislausmenetelmällä ja on nimensä mukaisesti kevyttä, kolonnin yläosassa olevaa öljyä. (Riikonen, 1993) Kevyen polttoöljyn lämpöarvo on noin 43 MJ/kg.

Raskaat polttoöljyt valmistetaan krakkausyksikön raskaasta pohjaöljystä raakaöljyn jalostusprosessissa. Raskaan öljyn korkean kiehumislämpötilan vuoksi se kerääntyy

tislauskolonnin alaosaan. (Riikonen, 1993) Raskasöljyn lämpöarvo on noin 41 MJ/kg. (Riikonen, 1993)

4.2.2 Nesteytetyt kaasut

LPG (liquefied petroleum gas) eli nestekaasua saadaan raakaöljyn jalostuksesta aivan kuten raskasöljyäkin. LPG saadaan edellä mainitulla raakaöljyn jalostuksella kolonnin huipulta. (Kosan Gas Finland Oy) Nestekaasu on yleisesti propaania ja butaania. Nestekaasun tehollinen (alempi) lämpöarvo on noin 46 MJ/kg. (Riikonen, 1993)



Kuva 10. Raakaöljyn tislauskolonni (Kosan Gas Finland Oy)

LNG (liquefied natural gas) eli nesteytetty maakaasu muodostuu kun maakaasua nesteytetään -162 asteiseksi. LNG on koostumukseltaan kirkasta, väritöntä ja myrkytöntä nestettä. Nesteytyksen ansiosta kaasun tilavuus pienenee 600 kertaisesti, jonka ansiosta sen varastointi ja kuljetus helpottuvat huomattavasti. LNG:n käytöstä ei synny lainkaan rikkidioksidipäästöjä ja se täyttää tiukimmat päästörajoitukset typenoksidi-, hiukkas- ja

hiilidioksidipäästöjen osalta. (Gasum Oy) LNG koostuu metaanista ja muista hiilivedyistä. (Riikonen, 1997) LNG:n lämpöarvo on noin 50 MJ/kg. (Riikonen, 1993)

4.2.3 Maakaasu

Maakaasu on luonnonkaasua ja sen koostumus riippuu siitä miltä alueelta se on peräisin. Maakaasu koostuu pääasiassa metaanista ja muista hiilivedyistä. Maakaasu saattaa sisältää myös tarpeettomia kaasuja kuten typpeä, hiilidioksidia tai jopa haitallisia aineita kuten rikkivetyjä. Jos maakaasu sisältää rikkiyhdisteitä, ne pitää erotella ennen kaasun johtamista siirtoputkistoihin. (Riikonen, 1997)

4.2.4 Biokaasu

Biokaasua syntyy erilaisten mikro-organismien hajottaessa orgaanista ainesta hapettomissa olosuhteissa. Seurauksena syntyy metaania sisältävää biokaasua. Biokaasuseos sisältää normaalisti 40-70% metaania, 30-60% hiilidioksidia ja lisäksi hieman mm. rikkiyhdisteitä. Biokaasua voidaan tuottaa mm. biokaasureaktoreilla tai biokaasua keräämällä kaatopaikoilta pumppaamalla. Biokaasua muodostuu jatkuvasti kosteikoissa, vesistöjen pohjakerroksissa ja eläinten suolistoissa. (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry)

4.2.5 Bioöljy

Bioöljy on nopealla pyrolyysillä valmistettu polttoaine jolla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita. Pikapyrolyysissä biomassasta valmistetaan öljyä kuumentamalla sitä hiekan avulla nopeasti (<2 sekuntia) noin 500 °C lämpötilaan jolloin se kaasuuntuu. Kaasuuntunut biomassa lauhdutetaan ja siitä syntyy öljyä. Biööljy sisältää pääosin hiiltä, vetyä, happea ja typpeä. Bioöljyn lämpöarvo on normaalisti noin 16-18 MJ/kg (Green Fuel Nordic Oy). Pitkälle jalostetun bioöljyn lämpöarvo voi olla 36 MJ/kg. (VEGOIL EP AB)

4.3 Asfalttiasemissa käytettävät polttoaineet

Asfalttiasemissa käytetään pääsääntöisesti seuraavia polttoaineita rumpujen polttimissa: raskasta polttoöljyä, LPG:tä, bioöljyä ja maakaasua. Kevyttä polttoöljyä käytetään myös,

mutta se on yleensä vain varapolttoaineena. Raskaan polttoöljyn käyttö on vähenemään päin. Bio-öljyn ja LPG:n käyttö on yleistymässä. Maakaasua käytetään laajalti. (Suutari, 2021)

5 KIVIAINEKSEN LÄMMITYKSEN TEORIAA

5.1 Kiviaines

Kiviaines täytyy asfaltin valmistuksessa lämmittää tiettyyn lämpötilaan, jotta saadaan tuotettua kiviaineksesta halutun lämpöistä. Yleinen sääntö on lämmittää kiviaines rummussa 10 °C kuumemmaksi kuin lopullinen asfalttimassa. Jos valmiin asfalttimassan halutaan olevan 170 °C niin kiviaines täytyy lämmittää kuivausrummussa lämpötilaan 180 °C .

Kiviaines on usein hyvin epätasaista. Kiviaineksen raekoot vaihtelevat. Tästä johtuen kiviaineksen rakeiden lämpötilaerot voivat olla jopa 100 °C . Hieno kiviaines voi olla 200 °C ja karkea vain 100 °C . Tästä syntyy ongelmia, kun karkea kiviaines ei ole tarpeeksi kuumaa eikä bitumi tartu siihen. (Király, 1991)

5.2 Ominaislämpökapasiteetti

Ominaislämpökapasiteetti ilmaisee lämpömäärää, minkä massayksikkö ainetta tarvitsee lämmitäkseen yhden asteen verran. Ominaislämpökapasiteetin yksikkö on kJ/kg °C tai kJ/(K kg) . Kiinteiden ja nestemäisten aineiden ominaislämpökapasiteetti on vakio. Kaasujen ja höyryjen ominaislämpökapasiteetti vaihtelee lämpötilasta riippuen. (Näretie & Arpalahi, 1972)

Toisin sanoen lämpökapasiteetti kuvaa systeemiin tuodun lämpömäärän ja sen seurauksena tapahtuvan lämpötilan suhdetta. Lämpökapasiteetin määrittäminen aineille tapahtuu kokeellisesti, kalorimetrisesti, tuomalla tunnettu lämpöenergia ja mittaamalla systeemissä tapahtuva lämpötilan nousu. Tulokset riippuvat siitä pidetäänkö tilavuus vai paine vakiona. Jos tilavuus pidetään vakiona, saadaan tuloksena lämpökapasiteetti vakiotilavuudessa. Ominaisenergian avulla saadaan määriteltyä ominaislämpö C_v (J/molK). Jos paine pidetään prosessin aikana vakiona, on tehty työ ainoastaan paisuntatyötä. Tästä syystä ominaislämpö täytyy määrittellä ominaisentalpian avulla. (Lampinen, 2010)

5.3 Lämmön siirtyminen

Lämpö on työn ohella toinen energian siirtomuoto systeemin ja sen ympäristön välillä. Termodynamiikassa ei muita energian siirtomuotoja esiinny. Lämpöenergia ei koskaan siirry ilman työn apua alemmasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan. (Näretie & Arpalahti, 1972)

Lämmön siirtyminen tapahtuu säteilemällä, johtumalla tai kulkeutumalla. Johtumalla ja kulkeutumalla lämmön siirtyminen aineeseen tapahtuu sitoutuneena. Säteilemällä lämpö voi siirtyä aineettomankin tilan läpi. (Näretie & Arpalahti, 1972)

Lämmön johtumisessa lämpöenergian siirtymisen edellytyksenä on lämpötilaero. Suunta on aina korkeammasta lämpötilasta alempaan. Lämpötilaero saa aikaan lämpövirran. Lämpövirta voidaan laskea, kun tiedetään lämpötilaero, tarkasteltavan pinnan pinta-ala ja aineen lämmönjohtavuus. Lämmönjohtavuus tarkoittaa lämpömäärää, joka kulkee aikayksikössä läpi kuution muotoisen kappaleen, jonka muut sivut ovat eristetty ja vastakkaisten pintojen välinen lämpötilaero on yksi aste. (Näretie & Arpalahti, 1972)

Lämmön siirtyminen kulkeutumalla tapahtuu, kun virtaava neste tai kaasu kuljettaa mukanaan lämpöä. Siirtyneen lämmön määrä riippuu virtausnopeudesta ja sen sisältämästä lämpömäärästä. (Näretie & Arpalahti, 1972)

Lämmönsäteet ovat sähkömagneettista aaltoliikettä. Lämmönsäteiden aallonpituus on suurempi kuin silmällä havaittavat valonsäteet. Lämmönsäteiden kohdatessa kappaleen, osa säteilyenergiasta imeytyy kappaleeseen ja osa heijastuu takaisin. Kappaleen kykyä imeä säteilevää energiavirtaa riippuu aineesta ja pinnan laadusta. Mitä enemmän kappaleen pinta säteilee lämpöä, sitä enemmän se myös imee lämpöä. (Näretie & Arpalahti, 1972)

5.4 Palaminen

Palaminen on kemiallinen prosessi, jossa polttoaineet yhtyvät hapen kanssa ja sen yhteydessä syntyy lämpöä. Polttoaineita ei kuitenkaan ole kaikki aineet jotka yhtyvät sopivissa olosuhteissa happeen. Vain sellaiset aineet jotka helposti yhtyvät happeen ja

luovuttavat lämpöä. Polttoaineissa palavia alkuaineita ovat hiili (C), vety (H), rikki (S) ja typpi (N). (Näretie & Arpalahti, 1972)

5.5 Lämpöarvo

Lämpöarvo H on polttoaineen tärkein ominaisuus. Lämpöarvolla tarkoitetaan sitä lämpömäärää mikä vapautuu, kun yksi massayksikkö polttoainetta palaa täydellisesti ja palamistulokset jäähtyvät alkulämpötilaansa. Polttoaineen sisältämä vety ja kosteus aiheuttavat vesihöyryn muodostumisen joka jäähtyessään voi tiivistyä nesteeksi. Useimmissa laitteissa savukaasut poistuvat korkeassa lämpötilassa, ettei vesihöyry ehdi tiivistymään. (Näretie & Arpalahti, 1972)

Polttoaineilla on kaksi lämpöarvokäsitettä. Ylempi – eli kalorimetrinen lämpöarvo, H_o (bruttolämpöarvo) ja alempi – eli tehollinen lämpöarvo, H_u (nettolämpöarvo). Alempi lämpöarvo ei ota huomioon savukaasujen sisältämää vesihöyryn lauhtumislämpöä. Paljon vettä sisältävillä savukaasuilla, kuten maa- ja nestekaasuilla, ero lämpöarvojen välillä on suurempi. (Riikonen, 1993)

	H_u	H_o	Ero %
Metaani	35,88 MJ/m ³ n	39,82 MJ/m ³ n	11,0
Propani	93,22 MJ/m ³ n	101,24 MJ/m ³ n	8,6
Butaani	123,81 MJ/m ³ n	134,06 MJ/m ³ n	8,3
Kevyt polttoöljy	42,7 MJ/kg	44,6 MJ/kg	4,4

Taulukko 1. Eri polttoaineiden alemman ja ylemmän lämpöarvojen eroja. (Riikonen, 1993)

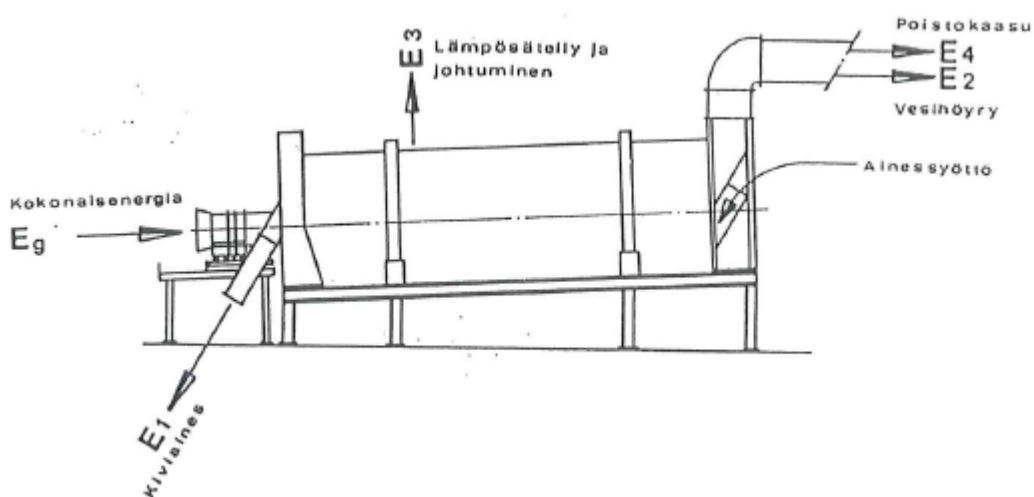
Polttoaine	Tehollinen, alempi lämpöarvo H_u	
Maakaasu (tiheys 0,73 kg/m ³)	36,0 MJ/m ³ (49,3 MJ/kg)	10,0 kWh/m ³ (13,7 kWh/kg)
Kaupunkikaasu (tiheys 0,67 kg/m ³)	16,9 MJ/m ³ (25,3 MJ/kg)	4,7 kWh/m ³ (7,0 kWh/kg)
Propaani (tiheys 2,01 kg/m ³)	93,0 MJ/m ³ (46,1 MJ/kg)	25,8 kWh/m ³ (12,80 kWh/kg)
Butaani (tiheys 2,71 kg/m ³)	123,0 MJ/m ³ (45,6 MJ/kg)	34,2 kWh/m ³ (12,65 kWh/kg)
Raskas polttoöljy (tiheys 0,96 kg/dm ³ ; 15 °C)	40,6 MJ/kg	11,28 kWh/kg
Kevyt polttoöljy (tiheys 0,85 kg/dm ³ ; 15 °C)	42,7 MJ/kg	11,85 kWh/kg
Kivihiili	25,5 MJ/kg	7,1 kWh/kg
Jyrsinturve (kosteus 40 - 55 %, tiheys 0,25 - 0,40 kg/dm ³)	7,1 - 12,5 MJ/kg	2,0 - 3,5 kWh/kg
Polttoturve (kosteus 30 - 45 %, tiheys 0,30 - 0,40 kg/dm ³)	11,0 - 15,0 MJ/kg	3,1 - 4,2 kWh/kg

Taulukko 2. Eri polttoaineiden alempia lämpöarvoja (Hu). (Riikonen, 1993)

6 KIVIAINEKSEN KUIVATUS

Kuivausrummun kiviaineen kuivatukseen kuluva energia voidaan laskea jakamalla teho eri haaroihin. Kuivausrumpuun syötetään energiaa sisään ja siitä energiamäärästä vähennetään energia joka kuluu kiviaineeseen lämmittämiseen, kiviaineeseen kosteuden ja haihduttamiseen. Lisäksi vähennetään kuivausrummun rakenteen läpi menevät lämpöhäviöt ja savukaasuhäviöt. (Király, 1991)

Energiataseesta voidaankin laskea energia (E_g) – kiviaineeseen kuumennusenergia (E_1) + kiviaineeseen kosteuden haihdutus energia (E_2) + lämpöhäviöt (E_3) + savukaasuhäviöt (E_4) = 0



Kuva 11. Kuivausrummun energiavirrat. (Király, 1991)

6.1 Kiviaineeseen lämmittäminen

Kiviaineeseen lämmitysenergia (Q_1) kuivausrummussa saadaan laskettua lämpöenergian kaavalla jossa kiviaineeseen massa kerrotaan kiviaineeseen ominaislämpökapasiteetilla ja kiviaineeseen alku- ja loppulämpötilan erotuksella. (Mäkelä, 2008)

Kiviaineeseen ominaislämpökapasiteetti on $0,879 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$. (Sharma, 2007)

Jos rummussa lämmitetään kierrätysasfalttia on seassa myös bitumia. Bitumin ominaislämpökapasiteetti on $1,78 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$. (Valtanen, 2013)

Kierrätysasfaltissa on bitumia ~4% ja vettä ~2%, kun kierrätysasfaltti on säilytetty katettuna. Useimmiten kierrätysasfalttia voidaan varastoida katoksessa. Kierrätysasfalttia voidaan käyttää uuden massan valmistuksessa 30-40%. (Suomi, 2021). Tässä työssä käytetään 40% kierrätysasfalttia laskennoissa.

Tästä johdettuna voidaan todeta esimerkkinä, että kuivausrumpuun voidaan syöttää keskisyöttörummulla ja LTA-rummulla 1000kg materiaalia kohti 600kg neitseellistä kiveä ja 400kg kierrätysasfalttia. Kierrätysasfaltista 4% on bitumia eli 16kg ja loput 384kg on kiveä. Eli kun 1000kg kiveä ja kierrätysasfalttia syötetään rumpuun kuivattavaksi, on 984kg materiaalista kiveä ja 16kg bitumia. Tämä tarkoittaa, että kokonaisuudessaan bitumin määrä on 1,6% kuivatettavasta aineesta rummussa.

$$\text{Kaava 1. } Q_1 = m_{\text{kivi}} * c_{\text{kivi}} * (T_{\text{kivi2}} - T_{\text{kivi1}}).$$

Q_1 = kiviaineksen lämmittämisenergia (kJ)

m_{kivi} = kuivattavan kiviaineksen massa (kg)

c_{kivi} = kiviaineksen ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg°C)

T_{kivi1} = kiviaineksen alkulämpötila (°C)

T_{kivi2} = kiviaineksen loppulämpötila (°C)

Ja kaava keskisyöttörumpua käytettäessä:

$$\text{Kaava 2. } Q_1 = ((n_{\text{kivi}} * m_{\text{kivi}}) * c_{\text{kivi}}) + ((n_{\text{bit}} * m_{\text{kivi}}) * c_{\text{bit}}) * (T_{\text{kivi2}} - T_{\text{kivi1}})$$

c_{bit} = bitumin ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg°C)

n_{kivi} = kiven osuus kokonaismäärästä(%)

n_{bit} = bitumin osuus kokonaismäärästä (%)

Kuluvan lämmitysenergian (Q_1) avulla voidaan laskea vaadittavan polttoaineen määrä (m_{pa}), kun tiedetään polttoaineen lämpöarvo (H_u) ja palamisen hyötysuhde (η)

$$\text{Kaava 3. } m_{\text{pa1}} = Q_1 / H_u * \eta$$

m_{pa1} = polttoaineen määrä (kg)

Q_1 = lämmitysenergian määrä (kJ)

H_u = polttoaineen lämpöarvo (kJ/kg)

η = polttoaineen palamisen hyötysuhde

6.2 Kiviaineksen kosteuden haihdutus

Haihdutusenergia (Q_2) laskentaa varten täytyy ensin laskea veden määrä kiviainek-
sessa. Se saadaan laskettua, kun tiedetään tai arvioidaan sen kosteusprosentti.

Kaava 4. $m_{\text{vesi}} = (m_{\text{kivi}} / ((100 - M_{\text{kivi}}) / 100)) - m_{\text{kivi}}$

m_{vesi} = haihdutettavan veden määrä (kg)

m_{kivi} = kuivattavan kiviaineksen massa (kg)

M_{kivi} = syötettävän kiviaineksen kosteus (%)

Kuivausrumpuun syötettävän kiviaineksen kosteus vaihtelee. Itse neitseellisen kivi-
aineksen kosteus vaihtelee ja mahdollisen kierrätysasfaltin kosteus vaihtelee. Kosteus täy-
tyy haihduttaa kiviaineksesta pois, sillä se haittaa prosessia.

Mikäli kiviaineksen pintaan jää kosteutta, se kerää ympärilleen pölyä joka ehtii kuivua
kiveen kiinni muodostaen kuoren sen ympärille ja siten estää bitumia tarttumasta kiveen
kunnolla. Todellisuudessa näin tapahtuu helposti, koska kuivausrummusta ulostulevan
kiven raekoko vaihtelee ja pienen ja suuren rakeen välinen lämpötilaero voi olla jopa 100
°C. Eli vaikka rummista ulostulevan kiven lämpötila olisi 180 °C niin osa kivistä voi olla
200 °C ja osa 100 °C. (Király)

Näissä laskennoissa käytetään kiville 4% kosteutta. Kosteus voi olla paljon enemmän-
kin. Toivottu kosteuden maksimimäärä on 4%. Kierrätysasfaltille käytetään kosteutta 2%
haastattelujen perusteella.

Kierrätysasfalttia käytettäessä voidaan johtaa kaava jonka avulla saadaan syötettävien
kiviainesten yhteinen kosteusprosentti. Kierrätysasfalttia voidaan käyttää massanvalmis-
tuksessa 40%. Siis 60% materiaalista on kiveä kosteudella 4% ja 40% materiaalista on
RC:tä kosteudella 2%.

Kaava 5. $m_{\text{vesi}} = n_{\text{kivi}} * m_{\text{kok}} / ((100 - M_{\text{kivi}}) / 100) + (n_{\text{RC}} * m_{\text{kok}}) / ((100 - M_{\text{rc}}) / 100) - m_{\text{kok}}$

m_{kok} = kokonaismäärä kuivattavalle materiaalille (kiviaines ja bitumi) (kg)

n_{kivi} = kivivaikeksen määrä kokonaismäärästä (%)

n_{RC} = kierrätysasfaltin määrä kokonaismäärästä (%)

M_{kivi} = kivivaikeksen kosteus (%)

M_{RC} = kierrätysasfaltin kosteus (%)

Kiviaineksessa olevan kosteuden haihdutusenergia (Q_2) muodostuu veden lämmittämisestä höyrystyslämpötilaan (100°C), veden höyrystämisestä sekä höyryn lämmittämisestä. Haihdutusenergia saadaan laskettua veden massasta (m_{vesi}), veden ominaislämpökapasiteetista (C_{vesi}), veden haihtumislämpötilan (T_h) ja alkulämpötilan (T_a) erotuksesta, veden höyrystyslämmöstä (Q_h), höyryn ominaislämpökapasiteetista ($C_{\text{höyry}}$) ja höyryn alkulämpötilan (T_h) ja loppulämpötilan (T_l) erotuksesta. (Mäkelä, 2008)

Kaava 6. $Q_2 = m_{\text{vesi}} * (C_{\text{vesi}} * (T_h - T_a) + Q_h + C_{\text{höyry}} * (T_l - T_h))$

Q_2 = kivivaikeksen kosteuden haihdutusenergia (kJ/kg)

m_{vesi} = haihdutettavan veden määrä (kg)

C_{vesi} = haihdutettavan veden ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg $^\circ\text{C}$) = 4,182 kJ/kg $^\circ\text{C}$ (Valtanen, 2013)

T_h = veden haihtumislämpötila ($^\circ\text{C}$)

T_a = Veden alkulämpötila ($^\circ\text{C}$)

Q_h = Veden höyrystyslämpö (kJ/kg) = 2257 kJ/kg (Valtanen, 2013)

$C_{\text{höyry}}$ = Vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg $^\circ\text{C}$)

T_l = höyryn loppulämpötila ($^\circ\text{C}$)

Veden lämmitys ja höyrystämisen energia voidaan laskea erikseen eriyttämällä kaava 6 kahteen osaan. Näin voidaan laskea veden lämmittämiseen ja höyrystämiseen kuluva energiamäärä ja polttoainemäärä erikseen.

Kun neste on saatettu kiehumispisteeseensä ja sen höyrystyminen alkaa, sen lämpötila ei enää nouse höyrystymisen aikana. (Näretie & Arpalahti, 1972) Täten voidaan todeta, että höyryn lämmittämistä ei tarvitse ottaa huomioon.

Kiviaineksen veden lämmitysenergia voidaan laskea kaavasta 6(alku osio) ja lämmittämiseen kuluva polttoainemäärä voidaan siis laskea kaavalla 3.

$$Q_{\text{vesi}} \text{ (kJ)} = m_{\text{vesi}} * C_{\text{vesi}} * (T_h - T_a)$$

$$m_{\text{pa(vesi)}} \text{ (kg}_{\text{pa}}/\text{tn)} = Q_{\text{vesi}} / H_u * \eta$$

Veden höyrystämisenenergia ($Q_{\text{höyrystäminen}}$) voidaan laskea kaavalla 6(loppu osio) ja höyrystämiseen kuluva polttoainemäärä voidaan laskea kaavalla 3.

$$Q_{\text{höyrystäminen}} \text{ (kJ)} = m_{\text{vesi}} * Q_h$$

$$m_{\text{pa(höyrystäminen)}} \text{ (kg}_{\text{pa}}/\text{tn)} = Q_{\text{höyrystäminen}} / H_u * \eta$$

Veden haihdutusenergia (Q_2) saadaan laskettua nyt edellä olevien laskujen avulla laskeamalla yhteen Q_{vesi} ja $Q_{\text{höyrystäminen}}$.

$$\text{Kaava 7. } Q_2 \text{ (kJ)} = Q_{\text{vesi}} + Q_{\text{höyrystäminen}}$$

Myös polttoaineen kulutus saadaan laskettua Q_2 avulla kaavalla 3.

$$m_{\text{pa2}} \text{ (kg}_{\text{pa}}/\text{tn)} = Q_2 / H_u * \eta$$

6.3 Lämpöhäviöt

Kuivausrummussa lämmön siirto tapahtuu johtumalla ja konvektiolla. Lämpöhäviöt vapautuu kuivausrummun vaippalierion läpi ulkoilmaan. Kuivausrummun vaippalieriö koostuu teräksestä valmistettuun lieriöön ($S_{\text{lieriö}}$), jonka paksuutena käytetään tässä työssä 0,01m, sekä eristysvillalla (s_{villa}) jonka paksuus on yleensä 0,05m. Laskentaa varten tarvitaan myös sisäpinnan lämmönsiirtokerroin ($\alpha_{\text{sisä}}$), teräksen lämmönjohtavuus (λ_{teras}), ulkopinnan lämmönsiirtokerroin (α_{ulko}) ja villan lämmönjohtavuus (λ_{villa}). (Lampinen, 2010)

Lämmönsiirtokertoimia on vaikea laskea, koska niihin vaikuttaa monet vaikeasti määritettävät asiat. Lämmönsiirtokertoimen suuruuteen vaikuttaa aineen olotila, paine, virtaus

ja seinän muoto, laatu ja asento virtaussuuntaan nähden. (Näretie & Arpalahki, 1972) Suuruusluokaltaan kaasuvirtauksille voidaan antaa arvioksi $\alpha = 5 - 100 \text{ W/m}^2\text{°C}$. (Lampinen, 2010) Tähän työhön on arvioitu tämän perusteella $\alpha_{\text{sisä}} = 30 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ja $\alpha_{\text{ulko}} = 10 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Eristevillana käytetään Paroc marine slab 40 kivivillaa jonka lämmönjohtavuus on $0,042 \text{ W/m}^2\text{°C}$ kun lämpötila 50°C . (Paroc Group Oy)

Seinän kokonaislämmönläpäisyyluku $k(\text{W/m}^2\text{°C})$ saadaan seuraavalla kaavalla. (Lampinen, 2010)

$$\text{Kaava 8. } k = 1 / (1 / \alpha_{\text{sisä}} + S_{\text{lieriö}} / \lambda_{\text{teräs}} + S_{\text{villa}} / \lambda_{\text{villa}} + 1 / \alpha_{\text{ulko}})$$

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

$\alpha_{\text{sisä}}$ = sisäpinnan lämmönsiirtokerroin ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

α_{ulko} = ulkopinnan lämmönsiirtokerroin ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

$S_{\text{lieriö}}$ ja S_{villa} = materiaalien paksuudet (m)

λ_{villa} = eristevillan lämmönjohtavuus $0,042 \text{ W/m}^2\text{°C}$

$\lambda_{\text{teräs}}$ = vaippalierion lämmönjohtavuus $43 \text{ W/m}^2\text{°C}$ (Lampinen, 2010)

Seinän, tässä tapauksessa kuivausrummun lieriön, lävitse menevä lämpöteho ($Q_{\text{läpi}}$) voidaan laskea seuraavalla kaavalla. (Lampinen, 2010)

$$\text{Kaava 9. } Q_{\text{läpi}} = k * A * (T_{\text{sisä}} - T_{\text{ulko}})$$

$Q_{\text{läpi}}$ = seinän läpi menevä lämpöteho (W)

A = kuivausrummun lieriön pinta-ala (m^2)

$T_{\text{sisä}}$ = kuivausrummun sisälämpötila (°C)

T_{ulko} = ulkolämpötila (°C)

Lämpömäärä Q_3 saadaan integroimalla lämpöteho $Q_{\text{läpi}}$ ajan suhteen. (Lampinen, 2010) Koska $Q_{\text{läpi}}$ on edellisen laskennan jälkeen yksiköltään W, muutetaan se ensin muotoon kW joka voidaan ilmoittaa muodossa kJ/s. Näin ollen lämpöenergia Q_3 saadaan jakamalla lämpöteho $Q_{\text{läpi}}$ kuivan kiviaineksen syöttöteholla ($m_{\text{kuivakivi}}$). Kuivan kiviaineksen syöttöteho muutetaan laskuun muotoon tn/s. Kivimateriaalista puhutaan yleensä muodossa tn/h joka muuttuu muotoon t/s jakamalla t/h luvulla 3600. Valmista asfalttimassaa valmistetaan asemalla 240 tn/h. Valmiin massan kiven, bitumin ja muiden lisäaineiden suhde voi hieman vaihdella reseptistä riippuen. Tässä työssä käytetään bitumin ja muiden lisäaineiden määrää 5% valmiista asfalttimassasta. Silloin kuivausrumpuun syötetään 228 tn/h kiviainesta jotta saadaan valmistettua valmista asfalttimassaa 240 tn/h.

$$\text{Kaava 10. } Q_3 \text{ (kJ/tn)} = Q_{\text{läpi}} / (m_{\text{kuivakivi}}/3600)$$

Ja jälleen voidaan kaavalla 3 laskea myös kuluvan polttoaineen määrä.

$$m_{\text{pa3}} \text{ (kg}_{\text{pa}}/\text{tn)} = Q_3 / H_u * \eta$$

Jotta saadaan laskettu polttoaineesta syntyvät savukaasut, täytyy laskea polttoaineen määrä joka kuluu kiviaineksen lämmittämiseen (Q_1), kuivattamiseen (Q_2) ja lämpöhäviöihin (Q_3). Polttoaineen määrä saadaan jälleen laskettua kaavalla 3, mutta ensin täytyy laskea yhteen muodostuneet energiamäärät.

$$\text{Kaava 11. } Q_{123} \text{ (kJ/tn)} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$m_{\text{pa123}} \text{ (kg}_{\text{pa}}/\text{tn)} = Q_{123} / H_u * \eta$$

6.4 Palamisilma ja savukaasut

Polttoaineen koostumus ilmaistaan painoprosentteina. Laskuissa tarvitaan kuitenkin ainemäärät kiloina. Polttoaineiden sisältämien aineiden kilomoolien massat tiedetään ja käytössä olevan polttoaineen koostumus voidaan selvittää. Laskenta tapahtuu jakamalla kukin polttoaineen sisältämä palava aineen prosenttiosuus kyseisen aineen kilomoolin massalla ja laskemalla nämä kaikki yhteen. Palavia aineita ovat hiili (C), vety (H) ja rikki S. Vedyn palaessa tarvitaan vain puoli kilo happea vetykilomoolia kohden. Koska

polttoaine sisältää happea jo valmiiksi, vähenee ulkoapäin tuotavan hapen tarve vastaavasti. Tämä tarkoittaa siis, että hapen osuus vähennetään yhtälöstä. (Näretie & Arpalahti, 1972)

$$\text{Kaava 12. } L_{O_2(\text{teor})} = (c / 12 + (0,5 * (h / 2)) + s / 32 - o / 32$$

$L_{O_2(\text{teor})}$ = Hapen tarpeen määrä (kmol/kg_{pa})

c = hiilen prosenttiosuus aineessa

h = vedyn prosenttiosuus aineessa

s = rikin prosenttiosuus aineessa

o = hapen prosenttiosuus aineessa

Kaavassa olevat jakajat tulevat palavien aineiden kilomoolien massasta.

Aine	Kilomoolin massa kmol/kg
Hiili C	12
Vety H ₂	2
Rikki S	32
Happi O ₂	32
Typpi H ₂	28
Vesi H ₂ O	18

Taulukko 3. Palavien aineiden kilomoolin ainemäärät. (Näretie & Arpalahti, 1972)

Koska polttamiseen tarvittava happi saadaan ilmasta, voidaan tarvittava ilmamäärä laskea kun tiedetään, että ilmassa on happea noin 21 tilavuusprosenttia ja 79 tilavuusprosenttia typpeä.

$$\text{Kaava 13. } L_{i(\text{teor})} = 4,76 * L_{O_2}$$

$L_{i(\text{teor})}$ = Tarvittava ilmamäärä (kmol / kg_{pa})

Ilmamäärä saadaan muutettua kmol / kg_{pa} yksikkömuotoon kg_{ilma} / kg_{pa} kun kerrotaan luku ilman molekyyliainolla 28,96 kg / kmol ja muotoon m³_{ilma} / kg_{pa} kertomalla luku moolitilavuudella 22,40 m³ / kmol.

Edellä olevilla kaavoilla saadaan teoreettinen hapen ja ilman määrä laskettua. Tälle ei todellisuudessa ole edellytyksiä milloinkaan. Todellisuudessa täytyy tarjolla olla paljon

enemmän happea kuin palamiseen todella kuluu. Sen vuoksi palamisprosessiin johdetaan enemmän ilmaa kuin teoreettinen ilmamäärä. Polttamiseen todella käytetyn ja teoreettisen ilmamäärän suhdetta sanotaan ilmakertoimeksi (merkitään kirjaimella λ). λ pysytään määrittämään, kun tiedetään todellinen käytetty ilmamäärä (L) ja teoreettinen ilmamäärä ($L_{i(\text{teor})}$). (Näretie & Arpalahti, 1972)

$$\text{Kaava 14. } \lambda = L / L_{i(\text{teor})}$$

Tiedossa on, että kuivausrummun savukaasuissa hapen määrä on yleensä 10-12 tilavuusprosenttia (Suutari, 2021). Tässä työssä käytetään tilavuusprosenttina 11. Ja tiedetään, että ilmassa on happea 21 tilavuusprosenttia. Näitä tietoja avuksi käyttäen voidaan kaavalla 14 laskea ilmakerroin λ , koska normaalissa ulkoilmassa happea on 21% ja palotapahtuma kuluttaa osan tästä hapestä. Mitä enemmän savukaasuissa on jäännöshappea, sitä suurempi tulee λ arvoksi.

$$\text{Kaava 15. } \lambda = 21 / (21 - X_{O_2(\text{mit})})$$

$X_{O_2(\text{mit})}$ = mitattu savukaasujen tilavuusprosentti

Savukaasut saadaan samanlaista ajattelutapaa käyttäen kuin happimääräkin lasketaan. Hiilestä syntyy $c/12$ kilomoolia hiilidioksidia, vedystä $h/2$ kilomoolia vettä ja rikistä $s/32$ kilomoolia rikkioksidia. Polttoaineen tyyppi vapautuu ja siitä tulee $n/28$ kilomoolia. Lisäksi vesi höyrystyy ja siitä tulee $w/18$ kilomoolia. Ilman mukana tuleva tyyppi saadaan jo lasketun happimäärän perusteella, sillä palamiseen on kulunut vain happi ja tyyppi on pysynyt muuttumattomana. Typen ja hapen suhde on jo aikaisemmin mainittu $79/21 = 3,76$ ilmassa. (Näretie & Arpalahti, 1972)

$$\text{Kaava 16. } G_0 = c / 12 + h / 2 + s / 32 + n / 28 + w / 18 + 3,76 * L_{O_2} \text{ (kmol/kg}_{pa}\text{)}$$

n = typen prosenttiosuus aineessa

w = veden prosenttiosuus aineessa

Koska kilomoolin suuruisen kaasumäärän tilavuus normaalitilassa on 22,4 m³, saadaan syntyvän kaasun tilavuudelle normitilassa lauseke (Näretie & Arpalahti, 1972):

$$\text{Kaava 17. } G_{0m^3} = 22,4 * G_0 \text{ (m}^3\text{/kg)}$$

Savukaasujen määrä saadaan muutettua kiloiksi kun kerrotaan komponenttien mooolimäärät niiden molekyylipainoilla. Esimerkiksi hiilen palaessa syntyy hiilen oksidia, hiilidioksidia (CO_2). Hiilidioksidin molekyylipaino on taulukon 3 mukaan $\text{C} + \text{O}_2 = 12 + 32 = 44$.

$$\text{Kaava 18. } G_{0\text{kg}} = ((c / 12) * 44) + ((h / 2) * 18) + ((s / 32) * 64) + ((n / 28) * 28) + ((w / 18) * 18) + 3,76 * (L_{\text{O}_2(\text{teor})} * 32) \text{ (kg/kg}_{\text{pa}})$$

Todellinen savukaasumäärä voidaan laskea, kun tiedossa on ilmakerroin. (Näretie & Arpalahti, 1972)

$$\text{Kaava 19. } G = G_0 + (\lambda - 1) * L_{i(\text{teor})}$$

Savukaasujen määrä muutetaan muotoon $\text{kg}_{\text{sk}}/\text{tn}$ kertomalla lämpöhäviöihin kuluva polttoainemäärä $m_{\text{pa}123}$ todellisella savukaasujen määrällä G_{kg} .

$$\text{Kaava 20. } V_{\text{kg}/\text{tn}} = m_{\text{pa}123} * G_{\text{kg}} \text{ (kg}_{\text{sk}}/\text{tn})$$

Q_4 voidaan nyt laskea, kun tiedetään savukaasujen määrä tonnia kohden. Lähtötietoina tarvitaan lisäksi savukaasujen ominaislämpökapasiteetti c_{psk} joka on $1,0 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ja savukaasujen lämpötilaero eli kaasujen loppulämpötilan T_2 ja ulkolämpötilan T_u erotus. Tähän työhön on tehty oletus ulkolämpötilasta 15°C ja savukaasujen lämpötilasta 100°C .

$$\text{Kaava 21. } Q_4 = V_{\text{kg}/\text{tn}} * c_{\text{psk}} * (T_2 - T_u) \text{ (kJ/tn)}$$

Q_4 = savukaasujen energiamäärä kJ/tn

c_{psk} = savukaasujen ominaislämpökapasiteetti $1,0 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

T_2 = savukaasujen loppulämpötila 100°C

T_u = ulkolämpötila 15°C

Tästä voidaan jälleen laskea savukaasujen lämmittämiseen kuluva polttoainemäärä tonnia kohden kaavalla 3.

$$m_{\text{pa}4} \text{ (kg}_{\text{pa}}/\text{tn}) = Q_4 / H_u * \eta$$

6.5 Kiviaineksen kuumennuksen energiatase

Edellä lasketuilla kaavoilla saadaan laskettua energian kulutus kiviaineksen lämmittämiseen (Q_1), kosteuden poistoon (Q_2), lämpöhäviöihin (Q_3) sekä savukaasujen ja ilman lämmittämiseen (Q_4). Nämä energiankulutukset yhteen laskemalla saadaan kokonaisenergiankulutus kuivausrummulle.

$$\text{Kaava 22. } Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \text{ (kJ/tn)}$$

Ja voidaan laskea myös polttoaineen määrä kaavalla 3.

$$m_{pa} = Q / H_u * \eta$$

7 TALOUDELLISUUS

7.1 Energiatehokkuus

Kuivausrummun energiatehokkuutta saadaan parannettua mm. eristeen paksuutta lisäämällä ja pienentämällä sisään syötettävän kivimateriaalin kosteusprosenttia. Tässä työssä ei kuitenkaan keskitytä niihin vaan tehdään vertailua eri olemassa olevien kuivausrumpujen välillä niiden olemassa olevien konstruktioiden mukaan.

7.2 Polttoaineiden hintoja

Polttoaineiden hintakehitystä ei voi kukaan täysin ennustaa. Fossiilisten polttoaineiden käyttöä ohjataan nykyisen trendin mukaisesti vaihdettavaksi uusiutuviin polttoaineisiin. Voidaan siis ennustaa, että ympäristöystävällisemmät polttoaineet tulevat suotuisammaksi erilaisilla kannustimilla kuten veroeduilla. On kuitenkin vaikea määrittää millä aikavälillä muutoksia käyttömäärissä ja hinnoissa saadaan poltiikan avulla toteutettua. Polttoaineiden hintahistoria toimii jonkinlaisena suunnannäyttäjänä hintakehitykselle, mutta sen varaan arviota ei voi liiaksi tukea.

Maakaasun hinta koostuu hankintahinnan lisäksi valmisteverosta, siirtohinnasta ja tukutariffista. Nämä hinnat on kaikkien saatavilla energiaviraston ja tilastokeskuksen sivuilta. Maakaasun kokonaishinta vuoden 2019 ensimmäisellä puoliskolla oli EU:n jäsenvaltioista korkein Suomessa. Hintaero toiseksi kalleimpaan maahan Ranskaan oli jopa 51%. Teollisuuden maakaasulle suurin verojen osuus on Suomessa. Maakaasun hinnasta 33,5% oli veroja vuonna 2019 (Eurostat, 2020). Maakaasun kokonaisverotus vuoden 2021 ensimmäisellä neljänneksellä oli 23,27 €/MWh (Tilastokeskus, 2021) ja maakaasun keskihinta asfalttiaseman kokoiselle tilaajalle 26,77 €/MWh sekä siirohinta 7,78 €/MWh (Energiavirasto). Yhteenlaskettuna maakaasun hinta oli siis 57,82 €/MWh. On siis tärkeä huomioida energiakustannuksia laskiessa, missä valtiossa kuivausrumpua käytetään. Tässä työssä käytetään Suomen hintoja.

Öljyn hintaan vaikuttaa moni tekijä ja sen hinnankehityksen arvioiminen onkin lähes mahdotonta. Yksi hintaan vaikuttava tekijä on öljyn tarjonta. Öljyn toimittajia on suhteellisen vähän ja ne voivat keskinäisillä sopimuksilla vaikuttaa hintojen kehitykseen mm. rajoittamalla tuotantoa. Myös erilaiset häiriöt öljyn pumppaamisessa ja öljyvarojen riittävyys tai

riittävyden arviointi vaikuttavat hintaan. Lisäksi hintaan saattaa vaikuttaa maakohtaisesti erilaiset verot. Yksi iso syy hintojen vaihteluun on sen hetkinen varastotilanne ja valuuttakurssien vaihtelut.

Raskaan polttoöljyn valmisteverot kokonaisuudessaan oli vuoden 2019 ensimmäisellä neljänneksellä 0,2723 €/kg. (Tilastokeskus, 2021). Raskaan polttoöljyn kuluttajahintaa voidaan arvioida Tilastokeskuksen kaaviosta raskaan polttoöljyn tuontihintojen kehityksestä. Sen mukaan raskaan polttoöljyn hinta vuonna 2019 alkupuolella oli 385 €/t eli 0,385 €/kg. (Tilastokeskus, 2021). Hintaan tulee lisäksi myyjän sen hetkinen hinta sekä kuljetuskulut. Kuluttajille hinta on kuitenkin eri kuin tuontihinta. Asfalttiasemien käyttäjiltä saamien tiedon perusteella heidän käyttämän raskaan polttoöljyn hinta on keskimäärin noin 0,55 €/kg (Nurminen, 2021). Hinta vaihtelee käytettävän öljyalaadun mukaan, mutta tässä työssä käytetään arvona asiakkaalta saatua hintaa.

Nestekaasun hinnan määrittäminen on hankalaa, sillä hinta vaihtelee kulutuksen, säiliön koon ja siirtokustannusten mukaan. Lisäksi nestekaasun hinta vaihtelee markkinoiden ja verotuksen mukaan. Nestekaasun hinta ns. kuluttajatuotteena olevissa kaasupulloissa on huomattavasti kalliimpaa kuin isompien määrien tilaajille. Nestekaasun valmistevero vuoden 2021 alussa oli 0,3138 €/kg (Tilastokeskus, 2021). Asfalttiaseman käyttäjiltä saadun tiedon perusteella nestekaasun hinta on kuluttajalle on noin 0,63 €/kg (Nurminen, 2021). Kokonaishinta nestekaasulle on siis 0,909 €/kg.

Bioöljyn etuna muihin vertailtaviin polttoaineiden hintoihin on se, että pyrolyysi -menetelmällä puusta valmistettu bioöljy ei ole energiaverotuksen alainen biopolttoaine. (Green Fuel Nordic Oy). Bioöljyn tarkkaa hintaa on vaikea saada. Hintaan vaikuttavat myös eri maissa olevat verohelpotukset. Suomessa bioöljyllä ei ole veroa lainkaan.

Bioöljyn hintahaitari on 0,3-1,0 €/kg. (Nyberg, 2014). Asfalttiaseman käyttäjiltä saadun tiedon mukaan hinta on noin 1 €/kg (Nurminen, 2021). Bioöljyn tarkempaa hintaa on vaikea toimittajilta saada ja hinta vaihtelee muiden polttoaineden tapaan mm. kulutuksen mukaan.

8 ENERGIALASKELMAT KIVIAINEKSEN LÄMMITYKSESSÄ

8.1 Johdanto laskelmiin

Energialaskelmien tekoa varten tehtiin excel-laskentaohjelma jonka avulla saadaan lähtöarvoja muuttamalla nopeasti tulokset eri polttoaineilla ja eri kuivausrumputyypeillä. Normaalilla kuivausrummulla muutettavia lähtötietoja ovat käytettävä polttoaine, kiviaineksen kosteus, kiviaineksen alkulämpötila, kiven loppulämpötila ja savukaasujen loppulämpötila. Lisäksi voidaan mitata savukaasujen määrää ja syöttää se ohjelmaan. Keskiyöttöruumulla ja LTA-ruumulla muutettavia lähtöarvoja ovat lisäksi kierrätysasfaltin määrä ja kosteusprosentti sekä bitumin määrä RC:ssä. Laskentaohjelman avulla saadaan tulokseksi energiankulutus per tuhat kiloa kivimateriaalia sekä polttoaineen määrä per tuhat kiloa kivimateriaalia. Lisäksi jokaiselle kuivausrummulle voidaan määrittää kuinka paljon kuivausrummulla kuivatetaan kivimateriaalia vuodessa ja saadaan vuotuisen energian- ja polttoaineenkulutus. Laskentaohjelma on rakennettu mahdollisimman helppokäyttöiseksi ja laskelmat ovat selkeästi esillä.

Energialaskelmien lisäksi laskentaohjelmassa on mahdollisuus syöttää polttoaineiden hinnat ja saada nopeasti laskettua kuinka paljon kuivatus maksaa per tuhat kiloa tai vuotuisella määrällä. Laskentaohjelmassa ei oteta hinnoissa huomioon siirtohintoja tai investointihintoja, koska niissä on niin suurta vaihtelua. Niiden huomioiminen tässä työssä ei ole ole järkevää.

Laskentaohjelman avulla voidaan jatkossa laskea energiankulutus ja energian hinnat kun kyseisen kohteen hinnat ovat selvillä. Laskennoissa täytyy tapauskohtaisesti ottaa huomioon muut vaihtuvat kulut, joita ei näissä laskennoissa oteta huomioon.

8.2 Laskelmat

Alla olevat laskelmat ovat suoritettu oletusarvoilla joiden perusteella saadaan suuntaa antavat tulokset kuivausrumpujen energiankulutusvertailuun. Lähtöarvot ovat samat kullekin kuivausrummulle jonka vuoksi tulokset ovat vertailukelpoisia.

8.2.1 Kiviaineksen lämmittäminen

Kaavalla 1 lasketaan kiviaineksen lämmittämisenergia Q_1 normaalille kuivausrummulle ja kaavalla 2 kiviaineksen lämmittämisenergia Q_1 keskisyöttörummulle.

Normaali kuivausrumpu:

$$Q_1 = 1000 \text{ kg} * 0,879 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (180 \text{ }^\circ\text{C} - 15 \text{ }^\circ\text{C}) = 145035 \text{ kJ}$$

Keskisyöttörumpu:

$$Q_1 = (((0,984 * 1000 \text{ kg}) * 0,879 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}) + ((0,016 * 1000 \text{ kg}) * 1,78 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C})) * (180 \text{ }^\circ\text{C} - 15 \text{ }^\circ\text{C}) = 147414 \text{ kJ}$$

LTA-rummussa polttimien liekillä lämmitetään ainoastaan kiviaines ja kierrätysasfaltti sekoitetaan kuumaan kiveen kylmänä. Tästä johtuen lasketaan kiviaineksen lämmitys vain siltä prosenttiosuudelta kuin kuivausrumpuun syötetään kiviainesta. Tässä tapauksessa 40% on RC:tä eli 60% on neitseellistä kiviainesta.

LTA-rumpu:

$$Q_1 = 600 \text{ kg} * 0,879 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (180 \text{ }^\circ\text{C} - 15 \text{ }^\circ\text{C}) = 87021 \text{ kJ}$$

8.2.2 Kiviaineksen haihdutus

Ensin lasketaan veden määrä kiviaineksessa normaalille kuivausrummulle ja LTA-rummulle kaavalla 4 ja keskisyöttörummulle kaavalla 5.

Normaali rumpu:

$$m_{\text{vesi}} = (1000 \text{ kg} / ((100-4)/100)) - 1000 \text{ kg} = 41,667 \text{ kg}$$

Keskisyöttörumpu:

$$m_{\text{vesi}} = 0,6 * 1000 \text{ kg} / ((100 - 4) / 100) + (0,4 * 1000 \text{ kg}) / ((100 - 2)/100) - 1000 \text{ kg} = 33,2 \text{ kg}$$

LTA-rumpu:

$$m_{\text{vesi}} = (600 \text{ kg} / ((100-4)/100)) - 600 \text{ kg} = 25 \text{ kg}$$

Kaavalla 7 lasketaan kiviaineksen kosteuden haihdutusenergia Q_2 . Kaava 2 voidaan jakaa kahteen osaa.

Normaali kuivausrumpu:

$$Q_{\text{vesi}} = 41,667 \text{ kg} * 4,182 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (100^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) = 14811 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{höyrystäminen}} = 41,667 \text{ kg} * 2257 \text{ kJ/kg} = 94042 \text{ kJ}$$

$$Q_2 = Q_{\text{vesi}} + Q_{\text{höyrystäminen}} = 14811 \text{ kJ} + 94042 \text{ kJ} = 108\,853 \text{ kJ}$$

Keskisyöttörumpu:

$$Q_{\text{vesi}} = 33,2 \text{ kg} * 4,182 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (100^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) = 11789 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{höyrystäminen}} = 33,2 \text{ kg} * 2257 \text{ kJ/kg} = 74849 \text{ kJ}$$

$$Q_2 = Q_{\text{vesi}} + Q_{\text{höyrystäminen}} = 11789 \text{ kJ} + 74849 \text{ kJ} = 86\,638 \text{ kJ}$$

LTA-rumpu:

$$Q_{\text{vesi}} = 25 \text{ kg} * 4,182 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (100^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) = 8887 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{höyrystäminen}} = 25 \text{ kg} * 2257 \text{ kJ/kg} = 56425 \text{ kJ}$$

$$Q_2 = Q_{\text{vesi}} + Q_{\text{höyrystäminen}} = 8887 \text{ kJ} + 56425 \text{ kJ} = 65312 \text{ kJ}$$

8.2.3 Lämpöhäviöt

Ensin lasketaan rumpulieriölle kokonaislämmönläpäisyyluku k kaavalla 8.

$$k = 1 / (1 / 30 \text{ W/m}^2\text{C} + 0,01 \text{ m} / 43 \text{ W/m}^\circ\text{C} + 0,05 \text{ m} / 0,042 \text{ W/m}^\circ\text{C} + 1 / 10 \text{ W/m}^2\text{C}) = 0,755 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Lämpömäärä Q_3 saadaan laskettua kaavalla 10, kun lasketaan ensin rumpun lieriön läpi menevä lämpöteho kaavalla 9.

Normaali kuivausrumpu ja keskisyöttörumpu:

$$Q_{\text{läpi}} = 0,755 \text{ W/m}^2\text{°C} * 70 \text{ m}^2 * (300 \text{ °C} - 15 \text{ °C}) = 15067 \text{ W} = 15,067 \text{ kW} = 15,067 \text{ kJ/s}$$

$$Q_3 = 15,067 \text{ kJ/s} / (228 \text{ tn/h} / 3600) = 237,9 \text{ kJ/tn}$$

LTA-rumpu:

LTA-rummun lämpöhäviötä laskiessa rumpulieriö täytyy jakaa kahteen osioon. Ensimmäisessä osiossa kivet kuumennetaan ja kuivatetaan liekillä ja toisessa osiossa kuuma kiviaines sekoitetaan kylmään RC-asfalttiin, mutta liekki ei enää lämmitä massaa sillä alueella. LTA-rummussa kulkee laskelmien esimerkkiarvoilla 60% neitseellistä kiviainesta ja 40% kierrätysasfalttia. Rumpuun syötetään siis 136,8 tn/h neitseellistä kivimateriaalia ja 91,2 tn/h RC:tä.

Alkupään lämpöhäviöt:

$$Q_{\text{läpi(alku)}} = 0,755 \text{ W/m}^2\text{°C} * 65 \text{ m}^2 * (300 \text{ °C} - 15 \text{ °C}) = 13991 \text{ W} = 13,991 \text{ kW} = 13,991 \text{ kJ/s}$$

$$Q_{3(\text{alku})} = 13,991 \text{ kJ/s} / (136,8 \text{ tn/h} / 3600) = 368,2 \text{ kJ/tn}$$

Loppupään lämpöhäviöt:

$$Q_{\text{läpi(loppu)}} = 0,755 \text{ W/m}^2\text{°C} * 25 \text{ m}^2 * (140 \text{ °C} - 15 \text{ °C}) = 2360 \text{ W} = 2,36 \text{ kW} = 2,36 \text{ kJ/s}$$

$$Q_{3(\text{loppu})} = 2,36 \text{ kJ/s} / (91,2 \text{ tn/h} / 3600) = 93,2 \text{ kJ/tn}$$

LTA-rummun lämpöhäviöt kokonaisuudessaan:

$$Q_3 = Q_{3(\text{alku})} + Q_{3(\text{loppu})} = 368,2 \text{ kJ/tn} + 93,2 \text{ kJ/tn} = 461,4 \text{ kJ/tn}$$

Savukaasujen laskentaa varten täytyy laskea polttoaineen määrä joka kuluu kiviaineksen lämmittämiseen (Q_1), kuivattamiseen (Q_2) ja lämpöhäviöihin (Q_3). Se saadaan laskettua kaavoilla 11 ja 3.

Normaali kuivausrumpu:

$$Q_{123} = 145035 \text{ kJ} + 108\,853 \text{ kJ} + 237,9 \text{ kJ/tn} = 254\,126 \text{ kJ/tn}$$

$$m_{\text{pa}123} = 254\,126 \text{ kJ/tn} / 40600 \text{ MJ/kg} * 0,99 = 6,3 \text{ kg}_{\text{pa}}/\text{tn}$$

Keskisyöttörumpu:

$$Q_{123} = 147414 \text{ kJ} + 86\,638 \text{ kJ} + 237,9 \text{ kJ/tn} = 234\,290 \text{ kJ/tn}$$

$$m_{pa123} = 234\,290 \text{ kJ/tn} / 40600 \text{ MJ/kg} * 0,99 = 5,8 \text{ kg}_{pa}/\text{tn}$$

LTA-rumpu:

$$Q_{123} = 87021 \text{ kJ} + 65\,312 \text{ kJ} + 461,4 \text{ kJ/tn} = 152\,794 \text{ kJ/tn}$$

$$m_{pa123} = 152\,794 \text{ kJ/tn} / 40600 \text{ MJ/kg} * 0,99 = 3,8 \text{ kg}_{pa}/\text{tn}$$

8.2.4 Palamisilma ja savukaasut

Savukaasujen energiamäärä Q_4 vaihtelee käytettävä polttoaineen mukaan. Savukaasujen energiamäärän osuus kuivausrummun kokonaisenergiankulutuksesta vaihtelee polttoaineesta riippuen 1-6 % välillä. Alla olevaan esimerkkilaskuun on käytetty raskaan polttoöljyn arvoja ja lopuksi ilmoitettu savukaasujen energiamäärä myös muille polttoaineille.

Ensin lasketaan hapen tarpeen määrä $Lo_{2(\text{teor})}$ kaavalla 12. Työssä on käytetty raskaalle polttoöljylle Nesteen Mastera LS 180 polttoöljyä.

Elementaarianalyysi, %	Mastera LS 180
Hiili	88,33
Vety	10,10
Rikki	0,95
Typpi	0,40
Happi	0,20

Taulukko 4. Neste Mastera LS ominaisuudet. (Neste Oyj, 2006)

$$Lo_{2(\text{teor})} = (0,8833 / 12 + (0,5 * (0,101 / 2))) + 0,0095 / 32 - 0,0020 / 32 = 0,099 \text{ kmol/kg}_{pa}$$

Ilmamäärä ilmamäärä lasketaan kaavalla 13.

$$L_{i(\text{teor})} = 4,76 * 0,099 \text{ kmol/ kg}_{pa} = 0,472 \text{ kmol/ kg}_{pa}$$

$$L_{m^3_{i(\text{teor})}} = 0,472 \text{ kmol/ kg}_{pa} * 28,96 \text{ kg}_{ilma}/\text{kmol} = 13,660 \text{ kg}_{ilma} / \text{kg}_{pa}$$

$$L_{Vi(\text{teor})} = 0,472 \text{ kmol/ kg}_{pa} * 22,40 \text{ m}^3/\text{kmol} = 10,566 \text{ m}^3_{ilma} / \text{kg}_{pa}$$

Kaavalla 15 lasketaan ilmakerroin λ . Tiedetään siis, että savukaasuissa on 11% happea ja ilmassa on happea 21%.

$$\lambda = 21 / (21 - 11) = 2,1$$

Todelliset ilmamäärät saadaan laskettua kertomalla teoreettinen ilmamäärä ilmakertomella.

$$L_{i(\text{tod})} = 0,472 \text{ kmol} / \text{kg}_{\text{pa}} * 2,1 = 0,991 \text{ kmol} / \text{kg}_{\text{pa}}$$

$$L_{m_i(\text{tod})} = 13,660 \text{ kg}_{\text{ilma}} / \text{kg}_{\text{pa}} * 2,1 = 28,686 \text{ kg}_{\text{ilma}} / \text{kg}_{\text{pa}}$$

$$L_{V_i(\text{tod})} = 10,566 \text{ m}^3_{\text{ilma}} / \text{kg}_{\text{pa}} * 2,1 = 22,188 \text{ m}^3_{\text{ilma}} / \text{kg}_{\text{pa}}$$

Savukaasujen määrä lasketaan kaavalla 16.

$$G_0 = 0,8333 / 12 + 0,101 / 2 + 0,0095 / 32 + 0,004 / 28 + 0,0015 / 18 + 3,76 * 0,099 \text{ kmol} / \text{kg}_{\text{pa}} = 0,49722 \text{ kmol} / \text{kg}_{\text{pa}}$$

Savukaasujen tilavuus saadaan kaavalla kaavalla 17.

$$G_{0m}^3 = 22,4 * 0,49722 \text{ kmol} / \text{kg}_{\text{pa}} = 11,13773 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Savukaasut saadaan muutettua kiloiksi kaavalla 18.

$$G_{0kg} = ((0,8333 / 12) * 44) + ((0,101 / 2) * 18) + ((0,0095 / 32) * 64) + ((0,004 / 28) * 28) + ((0,0015 / 18) * 18) + 3,76 * 0,099 \text{ kmol} / \text{kg}_{\text{pa}} * 32 = 16,0951 \text{ kg} / \text{kg}_{\text{pa}}$$

Todellinen savukaasujen määrä G lasketaan kaavalla 19.

$$G = 0,49722 + (2,1 - 1) * 0,472 \text{ kmol} / \text{kg}_{\text{pa}} = 1,016 \text{ kmol} / \text{kg}_{\text{pa}}$$

$$G_m^3 = 11,13773 \text{ m}^3 / \text{kg}_{\text{pa}} + (2,1 - 1) * 10,566 \text{ m}^3_{\text{ilma}} / \text{kg}_{\text{pa}} / \text{kg}_{\text{pa}} = 22,76 \text{ m}^3 / \text{kg}_{\text{pa}}$$

$$G_{kg} = 16,0951 \text{ kg} / \text{kg}_{\text{pa}} + (2,1 - 1) * 13,660 \text{ kg}_{\text{ilma}} / \text{kg}_{\text{pa}} = 31,12 \text{ kg} / \text{kg}_{\text{pa}}$$

Savukaasujen määrä muutetaan muotoon $\text{kg}_{\text{sk}} / \text{tn}$ kaavalla 20.

Normaali kuivausrumpu:

$$V_{\text{kg}/\text{tn}} = 6,3 \text{ kg}_{\text{pa}} / \text{tn} * 31,12 \text{ kg} / \text{kg}_{\text{pa}} = 196,76 \text{ kg}_{\text{sk}} / \text{tn}$$

Keskisyöttörumpu:

$$V_{\text{kg}/\text{tn}} = 5,8 \text{ kg}_{\text{pa}} / \text{tn} * 31,12 \text{ kg} / \text{kg}_{\text{pa}} = 181,40 \text{ kg}_{\text{sk}} / \text{tn}$$

LTA-rumpu:

$$V_{\text{kg/tn}} = 3,8 \text{ kg}_{\text{pa}}/\text{tn} \cdot 31,12 \text{ kg}/\text{kg}_{\text{pa}} = 118,30 \text{ kg}_{\text{sk}}/\text{tn}$$

Savukaasuihin kuluva energiamäärä Q_4 voidaan nyt laskea kaavalla 20.

Normaali kuivausrumpu:

$$Q_4 = 196,76 \text{ kg}_{\text{sk}}/\text{tn} \cdot 1,0 \text{ kJ}/\text{kg}^\circ\text{C} \cdot (100^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) = 16725 \text{ kJ}/\text{tn}$$

Keskisyöttörumpu:

$$Q_4 = 181,40 \text{ kg}_{\text{sk}}/\text{tn} \cdot 1,0 \text{ kJ}/\text{kg}^\circ\text{C} \cdot (100^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) = 15419 \text{ kJ}/\text{tn}$$

LTA-rumpu:

$$Q_4 = 118,30 \text{ kg}_{\text{sk}}/\text{tn} \cdot 1,0 \text{ kJ}/\text{kg}^\circ\text{C} \cdot (100^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) = 10056 \text{ kJ}/\text{tn}$$

Alla olevaan taulukkoon on laskettu työssä tehdyllä laskentaohjelmalla savukaasujen energiamäärä kaikille vertailussa oleville polttoaineille ja kuivausrummuille.

Polttoaine	Normaali kuivausrumpu	Keskisyöttörumpu	LTA-rumpu
Raskas polttoöljy	16725 kJ/tn	15419 kJ/tn	10056 kJ/tn
LPG	3173 kJ/tn	2925 kJ/tn	1908 kJ/tn
Maakaasu	8841 kJ/tn	8151 kJ/tn	5316 kJ/tn
Bioöljy	10911 kJ/tn	10059 kJ/tn	6560 kJ/tn

Taulukko 5. Savukaasujen energiamäärä Q_4 eri polttoaineilla kuivausrummuilla.

8.2.5 Energiataseen lopputulokset

Kuivausrummun energiatase saadaan laskemalla yhteen edellä lasketut energiataseen osat Q_1 , Q_2 , Q_3 ja Q_4 kaavalla 22 ja polttoaineen kulutus kaavalla 3.

Normaali kuivausrumpu:

$$Q = 145035 \text{ kJ} + 108\,853 \text{ kJ} + 237,9 \text{ kJ}/\text{tn} + 16725 \text{ kJ}/\text{tn}$$

$$= 270\,851 \text{ kJ}/\text{tn}$$

$$m_{\text{pa}123} = 270\,851 \text{ kJ}/\text{tn} / 40600 \text{ MJ}/\text{kg} \cdot 0,99 = 6,74 \text{ kg}_{\text{pa}}/\text{tn}$$

Keskisyöttörumpu:

$$Q = 147414 \text{ kJ} + 86\,638 \text{ kJ} + 237,9 \text{ kJ/tn} + 15419 \text{ kJ/tn} = 249\,471 \text{ kJ/tn}$$

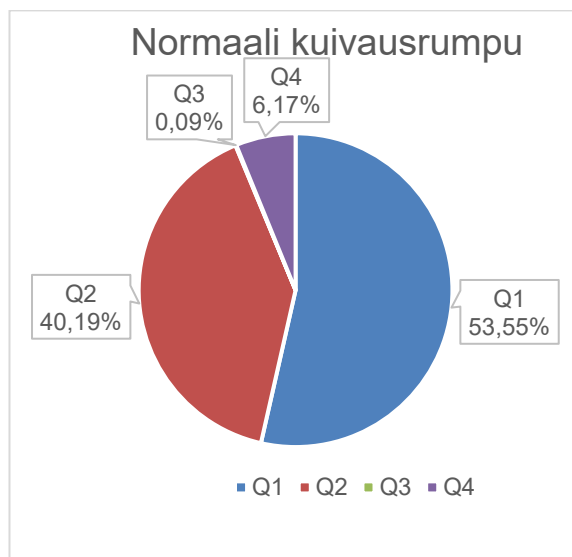
$$m_{\text{pa}123} = 249\,471 \text{ kJ/tn} / 40600 \text{ MJ/kg} * 0,99 = 6,21 \text{ kg}_{\text{pa}}/\text{tn}$$

LTA-rumpu:

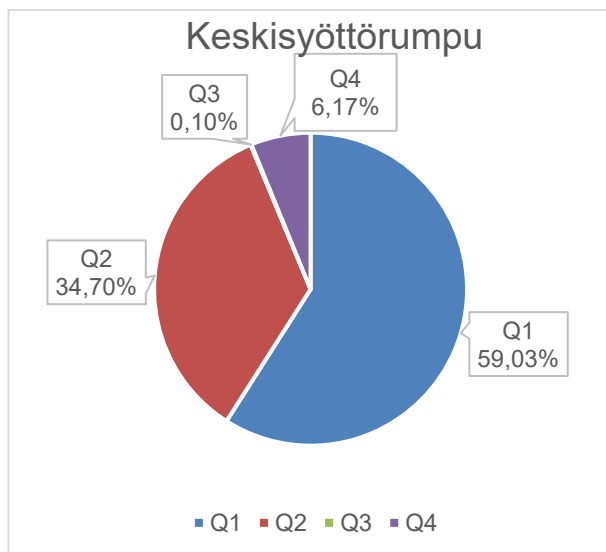
$$Q = 87021 \text{ kJ} + 65\,312 \text{ kJ} + 461,4 \text{ kJ/tn} + 15419 \text{ kJ/tn} = 162\,850 \text{ kJ/tn}$$

$$m_{\text{pa}123} = 162\,850 \text{ kJ/tn} / 40600 \text{ MJ/kg} * 0,99 = 4,05 \text{ kg}_{\text{pa}}/\text{tn}$$

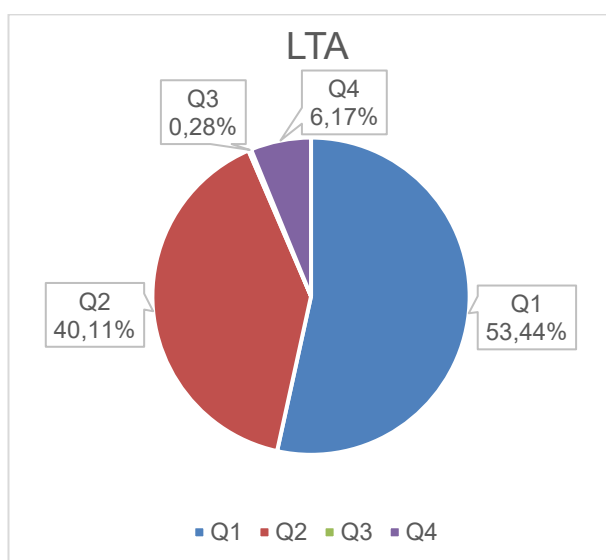
Alle on informatiivisuuden vuoksi tehty piirakkakaaviot joista selviää prosentiosuuksina mihin kuivausrumpujen energia kuluu. Kaaviot ovat esimerkkiarvoilla ja raskaalla polttoaineella saatujen arvojen mukaan tehtyjä. Savukaasujen energiamäärän (Q_4) osuus kuivausrummun kokonaisenergiankulutuksesta vaihtelee polttoaineesta riippuen 1-6 % välillä.



Kaavio 1. Energian jakautuminen normaalissa kuivausrummussa.



Kaavio 2. Energian jakautuminen keskisyöttörummussa.



Kaavio 3. Energian jakautuminen LTA-rummussa.

Kuten tuloksista ja kaavioista huomataan niin suurin osa käytettävästä energiasta kuluu kiviaineksen lämmittämiseen (Q₁). Toiseksi eniten energiaa kuluu kosteuden haihdutukseen (Q₂). Nämä kaksi vievät yhteensä suurimman osan energiankulutuksesta. Savukaasujen energiamäärä on pieni verrattuna Q₁ ja Q₂, mutta silti huomattavasti suurempi kuin lämpöhäviöt (Q₃). Lämpöhäviöiden määrä on rummuissa erittäin pieni.

Polttoaine	Normaali kuivausrumpu	Keskisyöttörumpu	LTA-rumpu
Raskas polttoöljy	270851 kJ/tn	249471 kJ/tn	162850 kJ/tn
LPG	257299 kJ/tn	236977 kJ/tn	154702 kJ/tn
Maakaasu	262967 kJ/tn	242203 kJ/tn	158110 kJ/tn
Bioöljy	265037 kJ/tn	244111 kJ/tn	159354 kJ/tn

Taulukko 6. Kuivausrumpujen energiankulutus eri polttoaineilla.

Polttoaine	Normaali kuivausrumpu	Keskisyöttörumpu	LTA-rumpu
Raskas polttoöljy	6,74 kg _{pa} /tn	6,21 kg _{pa} /tn	4,05 kg _{pa} /tn
LPG	5,65 kg _{pa} /tn	5,2 kg _{pa} /tn	3,4 kg _{pa} /tn
Maakaasu	0,073 MWh/tn	0,067 MWh/tn	0,044 MWh/tn
Bioöljy	7,44 kg _{pa} /tn	6,85 kg _{pa} /tn	4,47 kg _{pa} /tn

Taulukko 7. Kuivausrumpujen polttoaineenkulutus.

Polttoaine	Hinta	yksikkö
Raskas polttoöljy	0,8223	€/kg
LPG	0,909	€/kg
Maakaasu	57,82	€/MWh
Bioöljy	1,0	€/kg

Taulukko 8. Polttoaineiden hinta-arviot.

Kuivatettavalle kivimateriaalille saadaan laskettua hinta kertomalla polttoaineen hinta polttoaineen kulutuksella. Alla taulukoituna kullekin polttoaineelle ja kuivausrummulle hinta.

Polttoaine	Normaali kuivausrumpu	Keskisyöttörumpu	LTA-rumpu
Raskas polttoöljy	5,54 €/tn	5,10 €/tn	3,33 €/tn
LPG	5,14 €/tn	4,73 €/tn	3,09 €/tn
Maakaasu	4,23 €/tn	3,89 €/tn	2,54 €/tn
Bioöljy	7,44 €/tn	6,85 €/tn	4,47 €/tn

Taulukko 9. Hinta per kuivatettava 1000kg.

Kun vertaillaan pelkästään polttoaineeseen kuluvaan rahamäärää voidaan todeta, että LTA-rummulla asfaltin valmistukseen kuluu vähiten rahaa. Tämä on tietysti jo ilmiselvää asiaa ennen laskentojakin, koska LTA-rummussa vain osa ulostulevasta materiaalista kuumennetaan ja kuivatetaan ja ulostulevan materiaalin lämpötila on alhaisempi kuin normaalilla ja keskisyöttörummulla. Laskelmien perusteella voidaan kuitenkin nähdä

selvästi euromääräinen hyöty mikäli asfaltin valmistuksessa pystytään käyttämään LTA-rumpua muiden rumpuvaihtoehtojen sijasta. Vuosikohtainen erotus saadaan tapauskohtaisesti kunkin asfalttiaseman asfaltinvalmistusmäärien mukaan. Esimerkkilasku voidaan laskea tyypillisellä asfalttiaseman valmistusmäärällä 150 000 000 kg vuodessa. Otetaan esimerkkilaskuun polttoaineeksi raskas polttoöljy. Vertaillaan keskisyöttörumpua ja LTA-rumpua, koska molemmissa voidaan käyttää kierrätysasfalttia.

Keskisyöttörummun vuotuinen rahamäärä polttoaineeseen:

$$150\,000\text{ tkg} * 5,10\text{ €/tn} = 765\,000\text{€}$$

LTA-rumun vuotuinen rahamäärä polttoaineeseen:

$$150\,000\text{ tkg} * 3,33\text{ €/tn} = 499\,500\text{€}$$

Säästö LTA-rumpua käytettäessä on siis $765\,000\text{€} - 499\,500\text{€} = 265\,500\text{€}$ vuodessa. Säästö on siis todella merkittävä.

Koska LTA-rumpu vie käytössä selkeästi vähemmän energiaa kuin muut kuivausrummut, vertaillaan eri polttoaineiden kustannuksia jokaisella rumputyypillä käytettynä 10v aikana. Alla taulukoidut tulokset ovat saatu laskentaohjelman avulla.

Polttoaine	Hinta 10 vuodessa €	Erotus €
Raskas polttoöljy	8 311 704	-2 843 034
LPG	7 703 709	-3 451 029
Maakaasu	6 340 377	-4 814 361
Bioöljy	11 154 738	Korkein

Taulukko 10. Normaalin kuivausrummun polttoainekustannukset 10v aikana.

Polttoaine	Hinta 10 vuodessa €	Erotus €
Raskas polttoöljy	7 655 619	-2 618 403
LPG	7 095 259	-3 178 763
Maakaasu	5 839 731	-4 434 291
Bioöljy	10 274 022	Korkein

Taulukko 11. Keskisyöttörummun polttoainekustannukset 10v aikana.

Polttoaine	Hinta 10 vuodessa €	Erotus €
Raskas polttoöljy	4 997 443	-1 709 385
LPG	4 631 884	-2 074 944
Maakaasu	3 812 175	-2 894 653
Bioöljy	6 706 828	Korkein

Taulukko 12. LTA-rummun polttoaineskustannukset 10v aikana.

Yllä olevien hintojen perusteella voidaan päätellä ja laskea kaikkein järkevin polttoaine valittavaksi. Polttoaineiden hinnat, veroedut, rahdit ja muut valmistelukustannukset vaihtelevat vuosittain ja kohteittain. Tämän vuoksi tämän työ kustannuslaskelmat eivät ole täsmällisiä vaan suuntaa antavia. Työn kustannuslaskelmista voidaan kuitenkin selvästi nähdä itse polttoaineen ja rummun valinnan seuraukset kustannuksiin itse polttoaineen osalta. Laskentaohjelmaan voidaan tarpeen mukaan päivittää tapauskohtaiset hinnat ja sen jälkeen lisätä muut kustannukset laskelmiin. Siten saadaan laskettua tapauskohtaisesti kustannukset melko tarkasti.

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tutkittiin eri kuivausrumputyyppien energiankulutuksia teoreettisesti laskemalla. Lisäksi laskettiin polttoaineen kulutukset yleisesti käytössä olevilla polttoaineilla jokaiselle kuivausrumputyypille ja hintalaskelmat kaikilla polttoainevaihtoehdoilla ja rumputyypeillä.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä laskentaohjelma, jonka avulla voidaan nopeasti laskea eri kuivausrumputyyppin energiankulutus per 1000kg sekä itse määriteltävän vuotuisen määrän mukaan. Tavoitteena oli myös sisällyttää laskentaohjelmaan valittavaksi eri polttoaineita ja polttoaineiden hintatietoja. Opinnäytetyön tuloksena saatu laskentaohjelma ja työssä esitetyt tulokset antavat hyvän kuvan kuivausrummun energiankulutuksesta ja toimii apuna kuivausrumpua ja polttoainetta valittaessa. Laskentaohjelman avulla voidaan myös arvioida polttoaineeseen kuluva rahamäärä.

Energiankulutuslaskelmien perusteella voidaan todeta, että energiaa voidaan säästää pitämällä kuivausrumpuun syötettävä kivi- ja RC-materiaali mahdollisimman kuivana. Kiviaineksen lämmittäminen ja kuivattaminen vievät suurimman osan prosessin energiasta. Kiviaineksen kuivana pitämiseen voidaan harkita katettua säilytystilaa asfalttiaseamalla. Laskentaohjelmaan voidaan vaihtaa kiviaineksen ja kierrätysasfaltin kosteusprosentit ja nähdä nopeasti millainen säästö kosteuden vähentämisellä saadaan energiankulutuksessa ja myös rahassa. Säästöä saadaan aikaiseksi myös pitämällä savukaasujen hapen määrä oikeana. Polttimeen täytyy siis syöttää oikea määrä ilmaa ja välttää yli-ilman syöttämistä. Yli-ilma lisää energiankulutusta. Lämpöhäviöt ovat rummussa nykyisellä konstruktiolla niin pienet, että niitä vähentämällä ei saada merkittäviä säästöjä.

Opinnäytetyössä saavutettiin tavoitteet ja saatiin aikaan laskentaohjelma jolla saadaan laskettua halutut energialaskelmat, polttoaineenkulutukset ja hintalaskelmat. Hintalaskelmia varten saadut hintatiedot ovat suuntaa antavia ja siksi laskentaohjelmaa käyttäessä täytyy itse päivittää polttoaineiden hinnat. Työ antaa hyvän arvion, siitä mitä maksaa kiviaineksen kuivatus kuivausrummussa milläkin polttoaineella.

10 LÄHDELUETTELO

Amomatic Oy. 2021. *Amomatic Dryin Drums esite*. s.l. : Amomatic Oy, 2021.

—, 2021. Amomatic Recycling Ring. [Online] 2021. [Viitattu: 30. 7 2021.] <https://www.amomatic.com/en/technologies/recycling-equipment/recycling-ring>.

Asfalttiliitto ry, PANK ry, Rakennusliitto ry. 2001. ASKO Asfalttialan koulutusohjelma. 30. 12 2001.

EAPA. 2014. *The use of Warm Mix Asphalt*. Brysseli : European Asphalt Pavement Association, 2014.

Energiavirasto. energiavirasto.fi. *Maakaasun hintatilastot*. [Online] [Viitattu: 7. 9 2021.] <https://energiavirasto.fi/maakaasun-hintatilastot>.

Eurostat. 2020. ec.europa.eu. *Maakaasun hintatilastot*. [Online] Euroopan komissio, 10. 12 2020. [Viitattu: 7. 9 2017.] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Maakaasun_hintatilastot.

Fortum Oyj. 2002. Raskaan polttoöljyn käyttöopas. Espoo : Fortum Oyj, 2002.

Gasum Oy. 2017. Maakaasun käyttöturvallisuustiedote. *gasum.com*. [Online] 7. 2 2017. [Viitattu: 17. 8 2021.] <https://www.gasum.com/globalassets/pdf-files/maakaasu.pdf>.

—, Maakaasusta. *Gasum.com*. [Online] [Viitattu: 10. 8 2021.] <https://www.gasum.com/kaasusta/maakaasu/lng/>.

Green Fuel Nordic Oy. greenfuelnordic.fi. [Online] [Viitattu: 12. 8 2021.] <https://www.greenfuelnordic.fi/faq>.

Kiraly, F. *Asfalttiaseman energiansäästö*. s.l. : Amomatic Oy:n arkisto.

Kiraly, F. 1991. *Kuivausrummun lämpötalous*. s.l. : Amomatic Oy arkisto, 1991.

Kosan Gas Finland Oy. kosangas.fi. [Online] [Viitattu: 10. 8 2021.] <https://www.kosangas.fi/miksi-nestekaasu/miksi-kannattaa-valita-nestekaasu/mitae-on-nestekaasu/mitae-on-nestekaasu/> .

Lampinen, M. 2010. *Termodynamiikan perusteet*. Helsinki : Otatieto, 2010.

Luhtaniemi, Antti. 2014. Asfalttiaseman energiatase kiviaineksen lämmityksessä. [Online] 2014. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201402202492>.

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., Öistämö, J. 2008. *Tekniikan kaavasto*. s.l. : Amk-kustannus Oy, 2008.

Neste Oyj. 2006. *Raskaan polttoöljyn käyttöopas*. Espoo : Neste Oyj, 2006.

Nurminen, Pasi. 2021. *Haastattelu*. 19. 10 2021.

Nyberg, P. 2014. Metsäbiotalouden markkinalähtöiset liiketoimintamahdollisuudet. [Online] 2014. <https://docplayer.fi/4345556-Cv-petri-nyberg-uudet-metsabiotalouden-markkinalahtoiset-liiketoimintamahdollisuudet-22-5-2014-lieksan-puuakatemia-seminaari-20-21-5.html> .

Näretie & Arpalahti. 1972. *Höyrytekniikka, kattilat ja koneet*. Helsinki : Otava, 1972.

Oy Linde Gas Ab. 2020. [linde-gas.fi](https://www.linde-gas.fi). [Online] 24. 11 2020. [Viitattu: 17. 8 2021.] https://www.linde-gas.fi/fi/images/Nestekaasu_1.1_FI_tcm634-454474.pdf .

PANK ry. 2021. [pank.fi](https://www.pank.fi). *PANK RY*. [Online] 1 2021. <https://www.pank.fi/wp-content/uploads/2021/01/c4-asfalttimassan-valmistus.pdf>.

Paroc Group Oy. PAROC Marine Slab 40. [paroc.com](https://www.paroc.com). [Online] <https://www.paroc.com/parocom/products/marine-and-offshore/marine-slabs/paroc-marine-slab-40>.

Peab Oy. 2021. Parannuksia Hämeenlinnan asfalttiaseman toimintaan. *Peab Oy:n sivusto*. [Online] 11. 5 2021. <https://peabasfalt.fi/ajankohtaista/peab-asfaltilta-parannuksia-hameenlinnan-asfalttiaseman-toimintaan/>.

Riikonen, A. 1997. *Maakaasun ja nestekaasun palaminen*. s.l. : Gasum Oy, 1997.

—. 1993. *Maakaasun ja nestekaasun koostumus ja ominaisuudet*. s.l. : Gasum Oy, 1993.

Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D. 2007. *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. 2007.

Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. [Biokierto.fi](https://biokierto.fi). [Online] [Viitattu: 10. 8 2021.] <https://biokierto.fi/biokaasu/>.

Suomi, K. 2009. *Asfaltin valmistusprosessi annosperiaatteella*. s.l. : Amomatic Oy, 2009.

— **2021.** Haastattelu. Paimio : Amomatic Oy, 16. 8 2021.

Suutari, S. 2021. Haastattelu. Paimio : Amomatic Oy, 11. 8 2021.

Tilastokeskus. 2021. stat.fi. *Energian hinnat*. [Online] 10. 6 2021. [Viitattu: 6. 9 2021.] http://www.stat.fi/til/ehi/2021/01/ehi_2021_01_2021-06-10_tie_001_fi.html.

— **2021.** Tilasto: Energian hinnat. *ISSN=1799-7984. 2. Vuosineljännes 2021, Liitekuvio 1. Öljyn tuontihinnat*. [Online] 9. 9 2021. [Viitattu: 23. 9 2021.] http://www.stat.fi/til/ehi/2021/02/ehi_2021_02_2021-09-09_kuv_001_fi.html.

Valtanen, E. 2013. *Tekniikan taulukkokirja*. Mikkeli : St. michel Pring Oy, 2013.

VEGOIL EP AB. *BIO 25 Datasheet*.

Laskentataulukon tulossivut

Normaali rumpu:		Valitse ↓		
Käytettävä polttoaine:		Raskas polttoöljy		
Kuivattavan kivinaineksen määrä		1000 kg		
Kiviaineksen kosteus		4 %		0,04
Kiven alkulämpötila Tkivi1		15 °C		
Kiven loppulämpötila Tkivi2		180 °C		
Savukaasujen loppulämpötila T2		100 °C		
Energiatase Q		270 851 kJ/tn		
Polttoaineen määrä		6,74 kg _{pa} /tn		
Energiatase GWh		0,00007584 GWh/tn		
Energiatase MWh		0,075296461 MWh/tn		
Kokonaismassan määrä vuodessa		150000 tkg		
Kokonaisenergian määrä vuodessa		40627586962 kJ/vuosi		40628 GJ/vuosi
Kokonaisenergian määrä vuodessa		11,29 GWh/vuosi		
Kokonaisenergian määrä vuodessa		11294 MWh/vuosi		
Polttoaineen määrä per vuosi		1010787 kg _{pa} /vuosi		

Keskisyöttörumpu	Valitse ↓		
Käytettävä polttoaine:	Raskas polttoöljy		
Kuivattavan kivinaineksen määrä	1000 kg		
Kivinaineksen kosteus	4 %		0,04
RC:n kosteus	2 %		0,02
RC:n määrä	40 %		
Bitumin määrä RC:ssä	4 %		
Bitumin määrä RC:ssä	1,6 kg		
Neitseellisen kiven määrä	60 %		0,6
Neitseellisen kiven määrä	600 kg		
Kiven määrä neits. + rc-kivi	98,4 %		0,984
Kiven määrä neits. + rc-kivi	984 kg		
Kiven alkulämpötila Tkivi1	15 °C		
Kiven loppulämpötila Tkivi2	180 °C		
Savukaasujen loppulämpötila T2	100 °C		
Energiatase Q	249 471 kJ/tn		
Polttoaineen määrä	6,21 kg _{pa} /tn		
Energiatase GWh	0,00006985 GWh/tn		
Energiatase MWh	0,069352924 MWh/tn		
Kokonaismassan määrä vuodessa	150000 tkg		
Kokonaisenergian määrä vuodessa	37420642587 kJ/vuosi	37421	GJ/vuosi
Kokonaisenergian määrä vuodessa	10,40 GWh/vuosi		
Kokonaisenergian määrä vuodessa	10403 MWh/vuosi		
Polttoaineen määrä per vuosi	931001 kg _{pa} /vuosi		

LTA	Valitse ↓		
Käytettävä polttoaine:	Raskas polttoöljy		
Neits. + RC määrä		1000 kg	
Neitseellisen kiven määrä		600 kg	
Kiviaineksen kosteus		4 %	0,04
RC:n määrä		40 %	0,4
Bitumin määrä RC:ssä		4 %	
Bitumin määrä RC:ssä		1,6 kg	
Neitseellisen kiven määrä		60 %	0,6
Kiven määrä neits. + rc-kivi		98,4 %	
Kiven alkulämpötila Tkivi1		15 °C	
Kiven lämpö ennen RC Tkivi2		180 °C	
Lopullisen materiaalin loppulämpötila		140 °C	
Savukaasujen loppulämpötila T2		100 °C	
Energiatase Q		162 850 kJ/tn	
Polttoaineen määrä		4,05 kg _{pa} /tn	
Energiatase GWh		0,00004560 GWh/tn	
Energiatase MWh		0,04527228 MWh/tn	
Kokonaismassan määrä vuodessa		150000 tkg	
Kokonaisenergian määrä vuodessa		24427489241 kJ/vuosi	24427 GJ/vuosi
Kokonaisenergian määrä vuodessa		6,79 GWh/vuosi	
Kokonaisenergian määrä vuodessa		6791 MWh/vuosi	
Polttoaineen määrä per vuosi		607740 kg _{pa} /vuosi	