

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Kemiantekniikan osasto

Prosessitekniikan laboratorio

Diplomityö

**ENERGIANKÄYTÖN KARTOITUS LAPPEENRANNAN SEMENTTI-
TEHTAALLA**

Diplomityön aihe on hyväksytty kemiantekniikan osastoneuvoston kokouksessa

13.10.1999

Työn tarkastaja

Professori Lars Nyström

Työn ohjaaja

DI Stefan Lindfors

Lappeenrannassa 7.1.2000

Jari Koskinen

Jäkälätie 15

01380 Vantaa

puh. 040 512 1830

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Jari Koskinen
Nimi: Energiankäytön kartoitus Lappeenrannan sementtitehtaalla
Osasto: Kemianteekniikan osasto
Vuosi: 2000
Paikka: Lappeenranta

Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu,
128 sivua, 38 kuvaa, 27 taulukkoa, 10 liitettä.

Hakusanat: energiansäästö, energiatase, jauhatus, luokitus, sementtiuuni, raakamyly, sementtimyly, luokitin

Diplomityön tavoitteena oli kartoittaa Finnsementti Oy:n Lappeenrannan sementtitehtaan energiankäyttöä ja etsiä potentiaalisia energiansäästökohteita. Diplomityö liittyy Kauppa- ja teollisuusministeriön ja Teollisuuden ja Työnantajain Keskusliiton väliseen teollisuuden energiankäytön tehostamiseen tähtäävään puitesopimukseen, johon Finnsementti Oy on liittynyt.

Diplomityön teoriaosassa tutustutaan sementin kemiaan raaka-aineista valmiisiin tuotteisiin. Lisäksi kartoitetaan sementtiteollisuuden energiansäästämahdollisuuksia laitehankintojen ja prosessin optimointinnin kannalta. Työssä tutustutaan sementinvalmistuksessa käytettäviin laitteistoihin ja selvitetään niiden teknistä kehitystä ja energiaa säästäviä ratkaisuja.

Kokeellinen osuus alkaa yksityiskohtaisella kuvauksella Lappeenrannan sementtitehtaan valmistusprosessista. Kokeellisessa osassa tutustutaan tehtaan energiankulutukseen sähkön ja polttoaineen muodossa. Lisäksi käsitellään paineilmaa ja vettä. Sähkön osalta kokeellinen osa sisältää sähkönkulutuksen historian ja sähkönjakeluverkon selvityksen lisäksi tehtaalla käytössä olevien luokittimien tehokkuustarkasteluita sähkönkulutuksen kannalta. Polttoaineen osalta diplomityö sisältää sementtiuunien energiataseiden mittaukset ja tulosten laskemisen sekä Excel-pohjaisen menetelmän kehittämisen energiataseiden laskemiseksi tulevaisuudessa. Paineilman ja veden osalta selvitetään niiden kulutusta tehtaalla ja lasketaan paineilmalle teoreettinen ominaissähkönkulutus.

Luokittimien tehokkuustarkastelujen osalta havaittiin raakamylyn luokittimen erottelu-terävyyden olevan huono verrattuna nykyaikaisiin korkeatehokkuusluokittimiin. Sementtimylyjen luokittimien toiminnasta ei havaittu merkittäviä ongelmia. Energiataseiden tuloksina havaittiin Lappeenrannan sementtitehtaan sementtiuunien edustavan vanhentunutta sementinvalmistustekniikkaa. Molempien uunien savukaasukanavien vuotoilmojen määrien havaittiin olevan suuret. Energiataloutta pystyttäisiin parantamaan mm. uusilla polttimilla, jolloin lämmittämättömän ensiöilman osuutta saataisiin pienentymään ja polttoaineen polttoa tehostumaan. Paineilman suhteen havaittiin kuumailman paineenalennuksen aiheuttavan turhia energiahäviöitä.

ABSTRACT

Author: Jari Koskinen
Title: A Survey of energy usage at the Lappeenranta cement works
Department: Department of Chemical Technology
Year: 2000
Place: Lappeenranta

Master's Thesis, Lappeenranta University of Technology,
128 pages, 38 pictures, 27 tables, 10 appendixes.

Keywords: energy saving, heat balance, grinding, classification, cement kiln, raw mill,
cement mill, separator

The target of this thesis for the degree of master of science was to study the energy usage at Finnsementti Oy's Lappeenranta cement works and find possibilities for saving energy. This thesis is written in conjunction with a skeleton agreement between the Finnish Ministry of Trade and Industry and the Confederation of Finnish Industry and Employers. Finnsementti, along with other Finnish companies, has signed this agreement, the goal of which is to save energy in the Finnish industry.

This paper discusses cement chemistry from the raw materials to the finished products. Miscellaneous energy saving possibilities for cement industry are presented. This paper also surveys the equipment needed to produce cement from out-dated to the best available technology.

The experimental part of this paper begins with a detailed description of the manufacturing process in the Lappeenranta cement works. Besides electrical and fuel energy consumption, this paper also studies the consumption of water and compressed air. The part of this paper that deals with electricity presents a history of electrical consumption and studies the efficiencies of the separators at the raw and cement mills. As far as fuel is concerned, this paper presents a history of fuel energy consumption and calculates the heat balances of the cement kilns. In addition an Excel-based method for calculating heat balances in the future was developed and the theoretical specific energy consumption for compressed air was calculated.

The study showed that the efficiency of the separator at the raw mill is poor in comparison to the modern high-efficiency separators. No significant problems were observed in the separators at the cement mills. The heat balances showed that the cement kilns in use in the Lappeenranta cement works represent out-dated technology. The false air volumes in both kilns turned out to be high. New multichannel burners could improve the conservation of energy in both kilns. This would reduce the volume of unpreheated primary air and make combustion more effective. The decompression of compressed hot air was observed as being a cause of useless energy losses.

ALKUSANAT

Työ on tehty Finnsementti Oy:n Lappeenrannan sementtitehtaalla 31.5.1999 – 7.1.2000 välisenä aikana.

Haluan kiittää työni tarkastajaa professori Lars Nyströmiä ja ohjaajaa käyttöinsinööri Stefan Lindforsia ohjauksesta ja opastuksesta.

Lisäksi haluan kiittää Taisto Liuskia, Matti Turusta, Karl-Erik Nymania, Mathias Frankenhaeuseria ja kaikkia muita projektiin osallistuneita.

Suurkiitokset myös vanhemmilleni koko pitkän opiskeluaikani kestäneestä taloudellisesta tuesta ja kannustuksesta.

Lappeenrannassa 7.1.2000

Jari Koskinen

SISÄLLYSLUETTELO

SISÄLLYSLUETTELO	1
SYMBOLILUETTELO	4
1 JOHDANTO	9
1.1 SEMENTINVALMISTUS	9
1.2 YRITYSKUVAUS	10
1.3 ENERGIANSÄÄSTÖSOPIMUS	11
1.4 DIPLOMITYÖN RAKENNE JA TAVOITTEET	12
2 SEMENTIN KEMIAA	14
2.1 JOHDANTO	14
2.2 SEMENTIN RAAKA-AINEET	14
2.3 SEMENTIN MINERAALIT JA NIIDEN MUODOSTUMINEN	15
2.4 SEMENTIN HYDRATAATIO	17
2.5 SEMENTTILAADUT	19
3 ----- ENERGIANSÄÄSTÖMAHDOLLISUUDET SEMMENTTITEOLLISUUDESSA	20
3.1 JOHDANTO	20
3.2 KLINKKERIJÄÄHDYTTIMET	21
3.3 POLTTO	24
3.4 VAIHTOEHTOISET POLTTOAINEET	25
3.5 SEMENTTIUUNI	26
3.6 SYKLONIJÄRJESTELMÄT JA ESIKALSINOINTI	27
3.7 ENERGIAN TALTEENOTTO SAVUKAASUISTA	29
3.8 JAUHATUS	30
3.8.1 Kuulamyllyt	31
3.8.2 Jauhinvalssi	32
3.8.3 Pystymylly	34
3.8.4 Vaakatasoinen valssimylly	35
3.9 LUOKITTIMET	36
3.9.1 Ensimmäisen sukupolven luokittimet	37
3.9.2 Toisen sukupolven luokittimet	37
3.9.3 Kolmannen sukupolven luokittimet	38
3.9.4 Luokittimien vaikutus energiankulutukseen	42
3.10 KIINTOAINEIDEN KULJETUS	42
4 LAPPEENRANNAN SEMENTTITEHTAAN PROSESSIKUVAUS	44
4.1 JOHDANTO	44
4.2 LAPPEENRANNAN SEMENTTITEHTAALLA KÄYTETTÄVÄT RAAKA-AINEET	45
4.3 RAAKAJAUHATUS	45
4.4 RAAKAJAUHEEN HOMOGENISOINTI	47
4.5 SEMENTTIUUNIT	49
4.6 UUNIEN POLTTOAINEJÄRJESTELMÄT	49

4.7	SYKLONESILÄMMITYSJÄRJESTELMÄ -----	50
4.8	KLINKKERIN KÄSITTELY-----	51
4.9	UUNIN 4 SAVUKAASUJÄRJESTELMÄ -----	52
4.10	UUNIN 5 SAVUKAASUJÄRJESTELMÄ -----	53
4.11	ANTI-NO _x -VESILAITOS -----	54
4.12	SEMENTTIMYLLYT JA NIIDEN LUOKITTIMET -----	55
4.13	SEMENTIN VARASTOINTI JA PAKKAUS -----	57
4.14	LAPPEENRANNAN SEMENTTITEHTAALLA VALMISTETTAVAT SEMENTTILAADUT --	57
4.15	PROSESSIN HALLINTA JA LAADUNVALVONTA-----	58
4.15.1	Modulit-----	60
4.15.2	Päästöt-----	61
5	SÄHKÖNKULUTUS-----	63
5.1	JOHDANTO-----	63
5.2	SÄHKÖVERKON KUVAUS -----	63
5.3	SÄHKÖNKULUTUKSEN HISTORIAA-----	68
5.4	LUOKITTIMIEN TEHOKKUUSTARKASTELUT -----	71
5.4.1	Näytteenotto-----	71
5.4.1.1	Raakamyllly-----	71
5.4.1.2	Sementtimyllyt-----	72
5.4.2	Näytteiden analysointi -----	73
5.4.3	Luokituksen tehokkuuslaskelmat-----	73
5.4.3.1	Luokittimen energiansäästöpotentialiaali -----	74
5.4.3.2	Tromp-kuvaaja-----	78
5.4.4	Luokittimien tehokkuustarkasteluiden tulokset -----	80
6	POLTTOAINEENKULUTUS-----	82
6.1	JOHDANTO-----	82
6.2	POLTTOAINEENKULUTUKSEN HISTORIAA -----	82
6.3	ENERGIATASEMITTAUKSET -----	84
6.3.1	Energiatasemittaukset 28 – 29.7.1999 uuneille 4 ja 5-----	85
6.3.1.1	Uunijauhe-----	85
6.3.1.2	Klinkkeri -----	86
6.3.1.3	Polttoaine -----	87
6.3.1.4	Ensiöilma -----	87
6.3.1.5	Sekundääri-ilma -----	88
6.3.1.6	Vuotoilma-----	88
6.3.1.7	Savukaasut piipuihin ja hiilimylylle -----	89
6.3.1.8	Jäähdytystornivesi -----	89
6.3.1.9	Uunin 5 sähkösuodinpöly -----	90
6.3.1.10	Uunin 5 jäähdytystornipöly-----	90
6.3.1.11	Pintalämpötilat -----	90
6.3.2	Energiatasemittaus 13.10.1999 uunille 5-----	91
6.3.3	Energiatasemittaus 11.11.1999 uunille 4-----	92

6.3.4	Taselaskut-----	92
6.3.4.1	Mittaustulokset-----	93
6.3.4.2	Laskuarvot-----	93
6.3.4.3	Vakiot-----	95
6.3.4.4	Savukaasulaskut-----	96
6.3.4.5	Energiataseet-----	101
6.3.4.6	Massataseet-----	106
6.3.5	Tasemittausten tulokset-----	107
6.3.6	Virhearviointi-----	108
7	PAINEILMANKULUTUS-----	111
7.1	JOHDANTO-----	111
7.2	YLEISILMA-----	112
7.3	KUUMAILMA-----	113
7.4	PAINEILMAN OMINAISSÄHKÖNKULUTUS-----	113
8	VEDENKULUTUS-----	115
8.1	JOHDANTO-----	115
8.2	PROSESSIVESI-----	115
8.3	TALOUSVESI-----	116
9	JOHTOPÄÄTÖKSET-----	117
9.1	JOHDANTO-----	117
9.2	SÄHKÖNKULUTUS-----	117
9.3	POLTTOAINEEN KULUTUS-----	118
9.4	MUUT PARANNUSMAHDOLLISUUDET-----	120
10	YHTEENVETO-----	121
	KIRJALLISUUSLUETTELO-----	123
	LIITELUETTELO-----	128

SYMBOLILUETTELO

ISOT KIRJAIMET

$A_{häviö}$	lämpöhäviöitä aiheuttava pinta-ala, m ²
$A_{jääh.}$	satelliittijäähdyttimien lämpöhäviöitä aiheuttava pinta-ala, m ²
B	olemassa olevan suljetun jauhuspiirin teoreettinen energiansäästöpotentiaali, %
B_{max}	jauhatuksen suurin mahdollinen energiansäästöpotentiaali ideaaliselle luokittimelle, %
C	kiertokuorma, -
C_{ka}	kaikkien partikkelikoiden C -lukujen keskiarvo, -
D	jäähdyttimen putken halkaisija, m
E_0	ominaisenergiankulutus
H_{ka}	kiintoaineen entalpiavirta, MJ/h
H_{pa}	polttoaineen entalpiavirta, MJ/h
H_S	polttoaineen kalorimetrinen lämpöarvo, kJ/kg
H_{sk}	kaasun entalpiavirta, kJ/h
H_{vap}	veden höyrystymisen entalpiavirta, MJ/h
K	jäähdyttimien lukumäärästä riippuva vakio, -
L	jäähdyttimen putken pituus, m
M_C	hiilen moolimassa, g/mol
M_H	vedyn moolimassa, g/mol
M_{H_2O}	veden moolimassa, g/mol
M_i	kaasun moolimassa, g/mol
M_O	hapen moolimassa, g/mol
M_S	rikin moolimassa, g/mol
P_{pur}	puristusteho, W
$O_2(ilma)$	hapen määrä ilmassa, t-%
$O_2(savu)$	hapen määrä savukaasussa, t-%
$O_2(seos)$	hapen määrä savukaasu-vuotoilmaseoksessa, t-%

Q_{con}	konvektiohäviö neliometriä kohti, kJ/h m ²
Q_{rad}	säteilyhäviö neliometriä kohti, kJ/h m ²
Q_{tot}	pinnan lämpöhäviöt, kJ/h
R	klinkkeröitymisen vaatima reaktioenergia, kJ/kg klinkkeriä
R_f	korjattu kumulatiivinen ylitteen määrä luokittimen erottamasta hienosta materiaalista, %
R_{f1}	korjattu ylitteen määrä luokittimen erottamasta hienosta materiaalista partikkelikoolle d_1 , %
R_{f2}	korjattu ylitteen määrä luokittimen erottamasta hienosta materiaalista partikkelikoolle d_2 , %
R_g	korjattu kumulatiivinen ylitteen määrä luokittimen hylkäämästä karkeasta materiaalista, %
R_{g1}	korjattu ylitteen määrä luokittimen hylkäämästä karkeasta materiaalista partikkelikoolle d_1 , %
R_{g2}	korjattu ylitteen määrä luokittimen hylkäämästä karkeasta materiaalista partikkelikoolle d_2 , %
R_m	korjattu kumulatiivinen ylitteen luokittimen syötöstä, %
$R_{m12}(korj.)$	C-lukujen keskiarvoilla korjattu ylitteen määrä luokittimen syötöstä partikkelikoolle d_{12} , %
R_o	uuden syötön ylitteen määrä, oletetaan 100 %:ksi pienillä seulakooilla, %
R_x	korjattu kumulatiivinen ylitteen määrä, %
$R_x(Cilas)$	granulometrin antama kumulatiivinen ylitteen määrä eri seulakooille, %
T_{ilma}	ympäröivän ilman lämpötila, K
T_{ka}	kiintoaineen lämpötila, K
T_{pa}	polttoaineen lämpötila, K
T_{pinta}	pinnan lämpötila, K
T_{ref}	referenssilämpötila, K
T_{sk}	kaasun lämpötila, K
V_i	kaasun tilavuusvirtavirta normaalitilassa, m ³ n/h
V_{ilma}	ilman tilavuusvirta, m ³ n/h
V_m	ideaalikaasun moolitilavuus normaalitilassa, dm ³ /mol

V_s jauhatuksen suurin mahdollinen energiansäästöpotentiaali todelliselle luokittimelle, %

\dot{V}_{savu} savukaasun tilavuusvirta, m³/h

\dot{V}_{vuoto} vuotoilman tilavuusvirta, m³/h

PIENET KIRJAIMET

a ainekohtainen vakio, J/mol K

b ainekohtainen vakio, J/mol K²

c ainekohtainen vakio, J/mol K³

c_0 vakio

$c_{p,ka}$ kiintoaineen ominaislämpökapasiteetti, J/ kg K

c_{p,ka_ref} kiintoaineen ominaislämpökapasiteetti referenssilämpötilassa, J/ kg K

$c_{p,pa}$ polttoaineen ominaislämpökapasiteetti, J/ kg K

c_{p,pa_ref} polttoaineen ominaislämpökapasiteetti referenssilämpötilassa, J/ kg K

$c_{p,sk}$ kaasun ominaislämpökapasiteetti, J/ kg K

c_{p,sk_ref} kaasun ominaislämpökapasiteetti referenssilämpötilassa, J/ kg K

d ainekohtainen vakio, J/mol K⁴

d_{12} uusi partikkelikoko, μm

d_1, d_2, \dots, d_n aikaisemmat partikkelikoot, μm

f polttoaineen kosteuspitoisuus, -

$h_{vap,ref}$ veden höyrystymislämpö referenssipisteessä, kJ/kg

\dot{m}_c kaasun massavirta, kg/h

\dot{m}_{ka} kiintoaineen massavirta, t/h

$m_{massa(200)}$ seulottu kiintoaineen määrä 200 μm:n seulalla, g

\dot{m}_{pa} polttoaineen massavirta, kg/h

$m_{ylite(200)}$ punnittu ylitteen määrä 200 μm:n seulalta, g

n polytrooppiekspONENTTI, -

n_0 vakio, -

n'_{CO_2} poltossa syntyneen hiilidioksidin määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti, mol/kg ka

$\dot{m}_{CO_2(kals.)}$	kalsinoitumisesta tulevan hiilidioksidin ainevirta, kmol/h
n'_{H_2O}	vesihöyryn määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti, mol/kg ka
\dot{m}	kokonaisilmavirta, kmol/h
\dot{m}_{ilma}	ilman ainevirta, kmol/h
n'_{ki}	palamiseen käytetty kuivan ilman määrä polttoainekiloa kohti, mol/kg pa
$n'_{ki,o}$	kuivan ilman määrä polttoainekiloa kohti, mol/kg pa
$\dot{m}_{ki,o}$	polttoon tarvittava kuivan ilman stokiometrinen ainemäärä, kmol/h
$n'_{ks,o}$	stokiometrisen polton savukaasumäärä polttoainekiloa kohti, mol/kg pa
n'_{N_2}	typen määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti, mol/kg ka
n'_{O_2}	hapen määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti, mol/kg ka
\dot{m}_{O_2}	polttoon tarvittava hapen stokiometrinen ainemäärä, kmol/h
\dot{m}_{sk}	kaasun ainevirta, kmol/h
n'_{SO_2}	poltoissa syntyneen rikkidioksidin määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti, mol/kg ka
n'_{vi}	palamisilman mukana tuleva vesihöyry polttoainekiloa kohti, mol/kg pa
$\dot{m}_{n,ilma}$	vesihöyryn ainevirta, kmol/h
$\dot{m}_{n,ks}$	savukaasun sisältämän vesihöyryn ainevirta, kmol/h
p_{imu}	imuilman paine, Pa
$p_{työ}$	työilman paine, Pa
$q_{V,imu}$	imuilman tilavuusvirta, m ³ /s
w_C	hiilen massaosuus polttoaineessa, -
w_H	vedyn massaosuus polttoaineessa, -
w_O	hapen massaosuus polttoaineessa, -
w_S	rikin massaosuus polttoaineessa, -
x	ilman absoluuttinen kosteus, kg H ₂ O/kg kuivaa ilmaa
x_0	partikkelikoko
x_{O_2}	kuivan ilman hapen mooliosuus, -
$x_{O_2,ks}$	kuivan savukaasun hapen mooliosuus uunin perällä, -
x_r	ilman happirikastus, -

KREIKKALAISET KIRJAIMET

η_{tuotto}	tuottoprosessin hyötysuhde
λ	ilmakerroin, -
ρ_{ilma}	ilman tiheys, kg/m ³

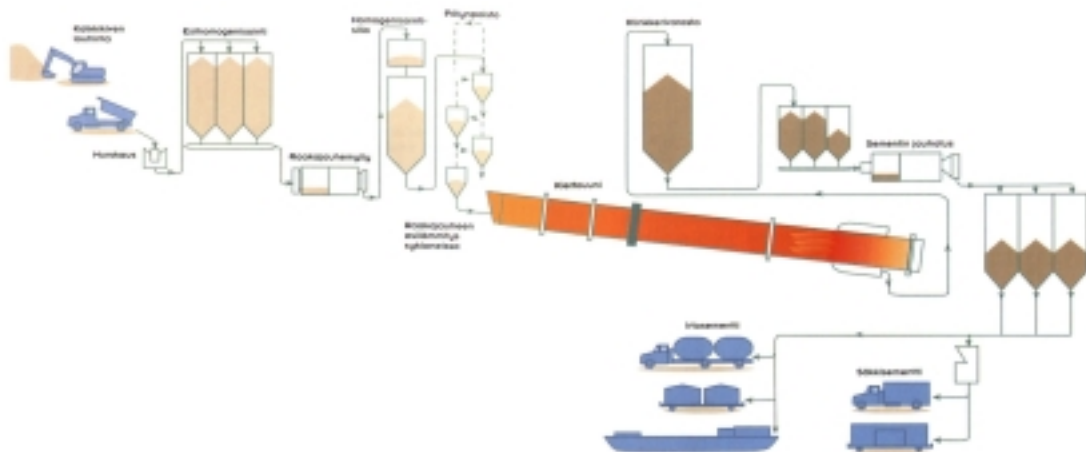
LYHENTEET

A	alumiinioksidi (Al ₂ O ₃)
AlM	aluminaattimoduli, -
Al ₂ O ₃	dialumiinitrioksidin määrä, %
C	kalsiumoksidi (CaO)
CaO	kalsiumoksidin määrä, %
CaStd	kalkkistandardi, -
F	rautaoksidi (Fe ₂ O ₃)
Fe ₂ O ₃	dirautatrioksidin määrä, %
F.R.	fractional recovery eli tromp-käyrän piste, %
I.R.	ideal recovery eli ”ideaalisen” valmiin tuotteen sekä palautteen osuus luokittimen syötöstä, %
R.C.	recovery of coarse eli palautteen osuus luokittimen syötöstä, %
R.F.	recovery of fines eli valmiin tuotteen osuus luokittimen syötöstä, %
S	piioksidi (SiO ₂)
SiM	silikaattimoduli, -
SiO ₂	piidioksidin määrä, %

1 JOHDANTO

1.1 Sementinvalmistus

Portlandsementtiä valmistetaan kahdella eri menetelmällä. Vanhempaa eli märkämenetelmää käyttävät tehtaat alkavat kuitenkin olla jo harvinaisia, sillä menetelmän on syrjäyttänyt kuvassa 1.1 esitettävä energiataloudellisempi kuivamenetelmä. Sprungin /17/ mukaan 71 % Euroopan Unionin alueella vuonna 1992 toimivista sementtitehtaista perustui kuivamenetelmään. Sementinvalmistuksen päämineraali on kalkkikivi, jota on runsaasti maaperässä lähes kaikkialla maailmassa. Kalkkikiven pääkomponentin eli kalsiuminkarbonaatin lisäksi sementinvalmistuksessa tarvitaan piitä, rautaa sekä alumiinia, joiden pääasiallisina lähteinä ovat muut mineraalit ja teollisuuden sivutuotteet.



Kuva 1.1 Sementinvalmistusprosessi kuivamenetelmällä (Finnsementti /7/)

Kalkkikiven lähteenä toimivat lähes aina tehtaiden välittömässä yhteydessä olevat avolouhokset, joissa louhimisen lisäksi kalkkikivi murskataan. Useimmissa sementtitehtaissa on ennen raaka-ainesiloja kalkkikiven esihomogenisointi, jolla pyritään saavuttamaan mahdollisimman tasalaatuista kiviainesta. Tehtaasta riippuen homogenisoitu tai homogenisoimaton kalkkikivimurska sekä muut raaka-aineet kuljetetaan siloihin, jotka toimivat prosessin raaka-ainevarastoina. Raaka-aineet jauhetaan hienoksi jauheeksi raakamyllyssä, jonne ne syötetään kemiallisen analyysin perusteella halutuissa suhteissa.

Raakajauhe homogenisoidaan homogenisointisiilossa, jonka jälkeen se on valmista syötettäväksi sementtiuuniin. Homogenisoitua raakajauhetta kutsutaan uunijauheeksi. Ennen sementtiuunia voi uunin yhteydessä olla sykloniesilämmitysjärjestelmä ja esikalsinointiuuni. Sykloneiden tarkoituksena on uunin savukaasujen avulla nostaa uunijauheen lämpötilaa ennen varsinaista kiertouunia. Syklonijärjestelmien vaiheiden lukumäärä vaihtelee kahdesta kuuteen. Monivaiheisella syklonijärjestelmällä ja etenkin esikalsinointiuunilla varustetuissa sementtiuuneissa uunijauheen lämpötila saavuttaa 900 °C lämpötilan jo ennen varsinaista kiertouunia. Kyseisessä lämpötilassa alkaa kalsinoituminen eli kalsiumkarbonaatin (CaCO_3) hajoaminen kalsiumoksidiksi (CaO) ja hiilidioksidiksi (CO_2). Sementtiuunit ovat 50 – 200 metriä pitkiä kiertouuneja, joita lämmitetään hiilellä tai jollain muulla fossiilisella polttoaineella. Uunin sisällä uunijauhe etenee uunin kaltevuuden ja sen kiertoliikkeen avulla. Uunissa lämpötilan noustessa pii-, rauta-, ja alumiiniyhdisteet reagoivat kalsiumoksidin kanssa kalsiumyhdisteiksi muodostaen sementinvalmistuksen seuraavaa välituotetta klinkkeriä. Uunin jälkeen klinkkeri jäädytetään uunin polttoilmalla ja kuljetetaan välivarastoon. Uunin perällä polttoaineen poltosta syntyvät savukaasut johdetaan syklonijärjestelmän jälkeen jäähdystornin ja sähkösuodattimen kautta piippuun. Sähkösuodattimen erottama pöly palautetaan takaisin uuniin.

Klinkkeri jauhetaan sementiksi sementtimyllyissä yhdessä seosaineiden ja kipsin kanssa. Sementin seosaineita ovat laadusta riippuen kalkkikivi ja masuunikuona. Kipsiä käytetään sementin sitomisajan säätöön. Jauhettu sementti siirretään pneumaattisesti sementtisiiloihin ja sieltä säiliöautoilla tai säkitettynä asiakkaille.

1.2 Yrityskuvaus

Suomessa sementtiä valmistaa vain yksi yritys Finnsementti Oy. Yrityksen juuret ovat vuosisadan vaihteessa, jolloin Paraisten Kalkkivuori Oy ja Lohjan Kalkkitehdas Oy aloittivat sementintuotannon Paraisilla ja Lohjalla. Paraisten Kalkkivuori Oy, sittemmin Partek, aloitti sementintuotannon myös Lappeenrannassa 1938 sekä Kolarissa 1968.

Parhaimmillaan Suomessa oli siis neljä toimivaa sementtitehdasta. Vuonna 1992 Partek ja Lohja yhdistivät sementintuotantonsa Partek Sementiksi ja toiminta Lohjan tehtaalla lakkautettiin. Kolarissa toiminta oli lopetettu jo 1980-luvun lopulla. Vuonna 1993 yrityksen nimi muutettiin Finnsementiksi ja omistajaksi tuli ruotsalais-suomalainen Euroc-konserni. Vuonna 1996 Euroc:iin yhdistettiin norjalainen sementintuottaja ja konsernin nimi muutettiin Scancem:ksi. Samalla Partek luopui osuudestaan Euroc:sta. Kesästä 1999 Finnsementti Oy on kuulunut kansainväliseen CRH-konserniin, joka on maailman kahdeksanneksi suurin rakennusmateriaaleihin erikoistunut yritys.

Finnsementti tuottaa noin 85 % Suomen sementintarpeesta kahdella tehtaallaan. Sementtitehtaiden lisäksi Finnsementillä on kuonajauhetehtas Raahessa, betonin lisäainetehtas sekä kivirouheasema Paraisilla. Sementtiasemia Finnsementillä on puolenkymmentä Suomen rannikkokaupungeissa. Paraisten tehtaan yksi sementtiuuni ja Lappeenrannan tehtaan kaksi sementtiuunia perustuvat kaikki kuivamenetelmään. Vuonna 1998 Paraisilla tuotettiin 817 000 tonnia ja Lappeenrannassa 411 000 tonnia sementtiä. Henkilöstöä Finnsementti Oy:llä on noin 200 ja liikevaihto vuonna 1998 oli noin 550 miljoonaa markkaa.

Finnsementti Oy:n laatu järjestelmälle myönnettiin ISO 9002-laatusertifikaatti vuonna 1994, jonka mukaisesti yrityksen tavoitteena on tuottaa laadukasta ja tasalaatuista sementtiä. Raaka-aineiden kotimaisuusaste on 80 – 90 %, joka osaltaan turvaa toimitusten luotettavuuden ja sementin tasalaatuisuuden. Finnsementti Oy:n ympäristöhallintajärjestelmälle myönnettiin ISO 14001-sertifiointi vuonna 1998.

1.3 Energiansäästösopimus

Teollisuus käyttää Motivan /29/ mukaan 45 % Suomen energiankulutuksesta. Energiankäytön tehostamiseksi Kauppa- ja teollisuusministeriö (KTM) solmi joukon energiansäästösopimuksia energia-alaa ja energiankäyttäjiä edustavien yhteisöjen kanssa Helsingissä 10.11.1997. Sopimusten tavoitteena on saada asumisen, liikenteen, palveluiden ja teollisuuden energiankäyttö tehostumaan 10 - 20 % vuoteen 2010 mennessä. Lisäksi tavoitteena on pienentää merkittävästi liikenteen ja teollisuuden hiilidioksidipäästöjä.

Allekirjoitetut sopimukset ovat luonteeltaan puitesopimuksia, joihin halukkaat yritykset voivat liittyä tehostukseen energiankäyttöään. Kauppa- ja teollisuusministeriö rahoittaa osan yritysten energiakatselmuksista ja -analyysistä sekä pyrkii avustamaan säästöinvestointeja erityisesti säästösopimuksia tehneissä yrityksissä. Motivan eli energiansäästön ja uusiutuvien energialähteiden käytön markkinoita aktivoivan palvelukeskuksen tehtävänä on energiakatselmustoiminnan seuranta, edistäminen ja kehittäminen yhteistyössä alan asiantuntijoiden, KTM:n, katselmusten tilaajien ja energiakatselmoijien kanssa.

Finnsementti Oy liittyi Teollisuuden ja Työnantajain Keskusliiton ja KTM:n väliseen energiansäästösopimukseen 2.2.1999. Sopimus velvoittaa Finnsementtiä mm. seuraavasti:

- Finnsementtin tulee tehdä 31.12.1999 mennessä energiankäytön tilanneselvitys, jossa sovitut energiakatselmuksiset – ja analyysit tehdään sovitun aikataulun mukaisesti
- Finnsementti laatii tehostamissuunnitelman, joka sisältää määrälliset tehostamistavoitteet, kustannukset ja aikataulun
- Finnsementti sitoutuu huomioimaan energiansäästön investoinneissa ja pyrkii energiaa säästävien teknikoiden käyttöönottoon aina kun se on taloudelliset ja turvallisuus- ja ympäristönäkökohdat huomioon ottaen mahdollista
- Finnsementti antaa vuosittain Teollisuuden ja työnantajain keskusliitolle tiedot toimipaikoittain energiankulutuksesta ja energiatehokkuuteen vaikuttaneista tekijöistä

1.4 Diplomityön rakenne ja tavoitteet

Diplomityön tarkoituksena on selvittää Lappeenrannan sementtitehtaiden energiankäytön nykytilaa kaikkien käytettyjen energiamuotojen osalta. Työ liittyy kiinteästi Finnsementti Oy:n ja Kauppa- ja teollisuusministeriön väliseen energiansäästösopimukseen, ollen osa sopimuksessa sovittua tilanneselvitystä. Diplomityössä käydään läpi sementin kemialla raaka-aineista valmiiseen tuotteeseen sekä luodaan katsaus sementtilaatuihin. Työn kirjallisuustutkimuksen tarkoituksena on luoda kokonaisvaltainen kuva energiansäästömahdollisuuksista sementtiteollisuudessa.

Kirjallisuusosassa käydään läpi kaikki sementinvalmistusprosessin osa-alueet ja tutustutaan prosessin eri osien energiansäästämömahdollisuuksiin niin laitehankintojen kuin prosessin optimoinnin kannalta. Lappeenrannan tehtaiden sementinvalmistusprosessin kuvaus pyrkii antamaan kuvan juuri kyseisen tehtaan ominaispiirteistä ja helpottaa lukijaa ymmärtämään tämän diplomityön kokeellista osuutta. Työn kokeellisessa osassa keskityttiin kolmeen eri osa-alueeseen: sementtiuunien energiataseisiin, raakamyllyn sekä sementtimylyjen luokittimien erotustehokkuuksiin ja tehtaan sähkönjakeluverkoston selvittämiseen.

Tehtaalla käytettyjä energiamuotoja käydään työssä läpi erikseen. Sähkö- ja polttoenergiaosuudet sisältävät kuvauksen energiamuodon käytöstä, katsauksen energiankäytön historiaan ja kokeellisen osuuden kyseisestä energiamuodosta. Sähkön osalta kokeellinen osuus sisältää selvityksen tehtaan sähkönjakeluverkostosta ja olemassa olevista mittauksista. Lisäksi tarkastellaan raakamyllyn ja sementtimylyjen luokittimien tehokkuutta sähkönkulutuksen kannalta. Polttoaineen suhteen kokeellinen osuus sisältää tämän työn suurimman kokonaisuuden, uunien energiataseiden selvityksen. Diplomityön tarkoituksena oli selvittää uunien energiataseita energiatasemittausten perusteella. Tarkoituksena oli luoda menetelmä ja Excel-taulukkopohja, joiden perusteella tasemittausten suoritus onnistuu tulevaisuudessa helposti.

Paineilman ja veden osalta diplomityö sisältää kuvaukset kyseisten energiamuotojen käytöstä sekä kulutustietoja muutaman viimevuoden ajalta. Johtopäätösten osalta työn tavoitteena oli luoda katsaus tehtyjen mittausten ja laskelmien perusteella Lappeenrannan sementtitehtaan mahdollisiin energiasäästämömahdollisuuksiin. Selvät energiataloudelliset epäkohdat tuli tunnistaa ja ehdottaa niihin mahdollisia parannuksia. Kuitenkin työn ensisijainen tavoite oli kartoittaa energiankäyttöä Lappeenrannan sementtitehtaalla.

2 SEMENTIN KEMIAA

2.1 Johdanto

Sementistä puhuttaessa tarkoitetaan yleensä Portlandsementtiä, jonka juuret juontavat 1800-luvun alun Englantiin. Ei-hydraulisia ja hydraulisia sideaineita tunnettiin jo muinaisten egyptiläisten ajoista lähtien, mutta Mindessin ja Youngin /5/ mukaan varsinainen Portlandsementti sai virallisesti alkunsa vuonna 1824 kun englantilainen Joseph Aspdin patentoi Portlandsementin varhaisen asteen. Tuolloin kuitenkin uunien lämpötilat eivät olleet vielä riittäviä todelliseen klinkkeröitymiseen. Portland nimen Aspdin antoi tuotteelleen, Portlandista Englannista louhitun ja rakennusmateriaalina käytetyn kiven louhintapaikan mukaan, koska kovettunut sementti muistutti väriltään ja ulkonäöltään paljon tuota kiveä. Tämän hydraulisen sementin käyttö levisi nopeasti Eurooppaan ja Amerikkaan. Cembureauun /45/ mukaan Portlandsementtiä valmistettiin maailmassa vuonna 1998 noin 1530 miljoonaa tonnia, josta Kiinan osuus on peräti 34,5 %:a. Muita suuria sementintuottajamaita ovat Intia (5,6 %), Japani (5,4 %) ja Yhdysvallat (5,4 %). Alsopin ja Postin /1/ mukaan henkeä kohti vuonna 1995 maailmassa kulutettiin keskimäärin 242 kg sementtiä. Suomessa sementinkulutus on Finnsementin /7/ mukaan juuri tätä kokoluokkaa. Tilastossa kärkipaikkaa pitää ylivoimaisesti Etelä-Korea 1147 kg:llaan. Suurimmat investoinnit sementtiteollisuudessa vuonna 1997 tehtiinkin juuri Aasiassa, kärkimaina Indonesia, Filippiinit ja Kiina.

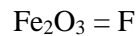
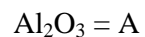
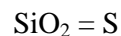
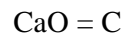
2.2 Sementin raaka-aineet

Portland sementin pääraaka-aine on kalkkikivi, jonka pääkomponentti on kalsiumkarbonaatti (CaCO_3). Alsopin ja Postin /1/ mukaan sementtiuunin syötöstä on kalsiumkarbonaattia 78 - 80 %. Muita pääkomponentteja ovat pii, rauta ja alumiini, jotka analysoidaan raaka-aineissa oksideina. Sementin raaka-aineet vaihtelevat yhdestä sementtimineraalista, joka sisältää riittävästi kaikkia tarvittavia komponentteja, lukuisiin eri mineraalilaatuihin. Sementtitehtailla käytetään yhtä peruslaatuista kalkkikiveä päämineraalina sekä hyvälaatuista lähes puhdasta kalkkikiveä prosessin säätöön.

Lisäksi piin-, raudan- ja alumiinin lähteinä käytetään niitä runsaasti sisältäviä mineraalilaaatua tai teollisuuden sivutuotteita, kuten lentotuhkaa ja valssihilsettä. Sementin jauhatuksen yhteydessä sementtimyllyihin syötetään kipsiä, jolla säädetään sementin sitoutumisnopeutta. Seosaineina saatetaan käyttää kalkkikiveä ja masuunikuonaa, joka toimii hydraulisena eli sitovana seosaineena.

2.3 Sementin mineraalit ja niiden muodostuminen

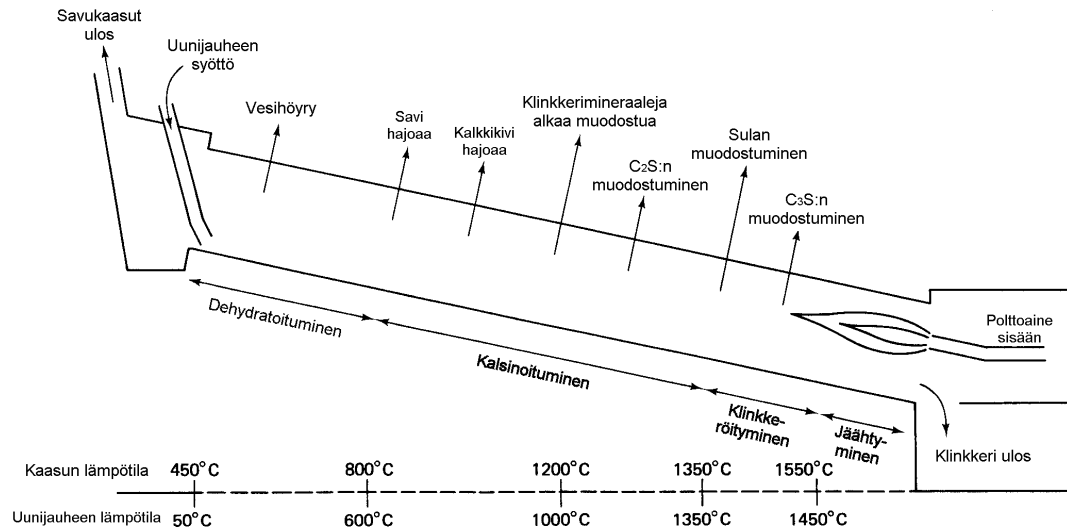
Sementtiuunissa tapahtuvissa reaktioissa raaka-aineista muodostuu sementinvalmistuksen välituotetta klinkkeriä. Se koostuu pääasiassa kalsiumoksidin ja pii-, rauta- ja alumiinioksidien muodostamista yhdisteistä. Sementtiteollisuudessa käytetään yleisesti seuraavia lyhenteitä kuvaamaan näitä oksideja.



Uunissa lämpötilan noustessa tapahtuu Alsopin ja Postin /1/ mukaan seuraavaa.

100 °C	vesi höyrystyy
>500 °C	kidevesi poistuu
>900 °C	kalsinoituminen: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
>900 °C	CaO:n ja SiO ₂ :n, Al ₂ O ₃ :n sekä Fe ₂ O ₃ :n väliset reaktiot tapahtuvat
>1200 °C	sula olomuoto
>1280 °C	C ₃ S:n muodostuminen ja täydellinen kalsinoituminen

Mindess ja Young /5/ esittävät kuvassa 2.1 klinkkeröitymisen hieman tarkemmin.



Kuva 2.1 Klinkkerimineraalien muodostuminen sementtiuunissa (Mindess ja Young /5/)

Truedssonin /28/ mukaan kalkkikivi sisältää 1 – 4 % dolomiittia eli magnesiumkalsiumkarbonaattia ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), joka hajoaa kalsiumkarbonaatin tapaan noin $900\text{ }^\circ\text{C}$:ssa. Dolomiitti hajoaa kalsium- ja magnesiumoksideiksi sekä hiilidioksidiksi. Ennen kuin C_3S muodostuu noin $1400\text{ }^\circ\text{C}$:ssa on noin $1300\text{ }^\circ\text{C}$:ssa muodostunut C_2S , joka edelleen reagoi C_3S :ksi C:n kanssa lämpötilan noustessa. Taulukossa 2.1 on listattu Duda /2/ mukaan klinkkerin sisältämät tärkeimmät mineraalit.

Taulukko 2.1 Klinkkerimineraalit ja niiden kemiallinen koostumus (Duda /2/)

NIMI	YHDISTE	LYHENNE
Trikalsiumsilikaatti	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Dikalsiumsilikaatti	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Trikalsiumaluminaatti	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetrakalsiumaluminaattiferriitti	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
Kalsiumaluminaattiferriitti	$2\text{CaO} \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\text{C}_2(\text{A},\text{F})$
Vapaa kalkki	CaO	
Vapaa magnesiumoksidi	MgO	
Aluminaattia sisältävät alkalit	$(\text{K}, \text{Na})_2\text{O} \cdot 8\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$	$(\text{K}, \text{N})\text{C}_8\text{A}_3$
Kalium- ja natriumsulfaatti	$\text{K}_2\text{SO}_4, \text{Na}_2\text{SO}_4$	
Kalsiumsulfaatti	CaSO_4	

Klinkkerimineraalien muodostuminen vaatii korkean lämpötilan ja huomattavan määrän energiaa vaikka osa reaktioista onkin eksotermisiä. Lean /33/ mukaan viiden pääreaktion reaktiolämmöt klinkkerinmuodostuksessa ovat seuraavaa kokoluokkaa.

		<i>Reaktioentalpia</i>
CaCO ₃	CaO + CO ₂	-1767 kJ/kg klinkkeriä
2C + S	C ₂ S	776 kJ/kg klinkkeriä
3C + S	C ₃ S	267 kJ/kg klinkkeriä
4C + A + F	C ₄ AF	7 kJ/kg klinkkeriä
3C + A	C ₃ A	6 kJ/kg klinkkeriä

Alsopin ja Postin /1/ mukaan lopullinen Portlandsementti sisältää näitä aineita taulukon 2.2 osoittamissa suhteissa. Määrät vaihtelevat eri sementtitehtaiden välillä suuresti, riippuen saatavilla olevista raaka-aineista ja niiden laadusta.

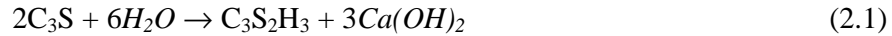
Taulukko 2.2 Portlandsementin kemiallinen koostumus (Alsop ja Post /1/)

YHDISTE	MÄÄRÄ
CaO	58 – 75 %
SiO ₂	16 – 25 %
Al ₂ O ₃	4 – 8 %
Fe ₂ O ₃	2 – 5 %
MgO	1 – 4 %
Mn ₂ O ₃	0,1 – 3 %
TiO ₂	0,1 – 1 %
SO ₃	0,1 – 2 %
K ₂ O	0,1 – 1 %
Na ₂ O	0,1 – 0,5 %

2.4 Sementin hydrataatio

Portlandsementti muodostaa yhdessä veden kanssa pastan, joka kuivuessaan kovettuu hydrataation vaikutuksesta. Hydrataatioksi kutsutaan veden ja sementin sisältämien mineraalien välisiä reaktioita.

Nevillen /6/ mukaan esimerkiksi nopean lujuuskehityksen omaavan sementin päämineraalin C_3S :n ja veden välinen reaktio voidaan lyhenteitä käyttäen kirjoittaa seuraavasti.



Lopputuotteena syntyy siis hydratoituneen trikalsiumsilikaatin lisäksi myös kalsiumhydroksidia. Sementin toisen pääkomponentin C_2S :n reaktiotuotteet ovat täysin samat, mutta eri suhteessa. Sementin mineraalien hydrataatiossa oleellisia tekijöitä ovat hydrataation nopeus ja lujuuskehitys. Taulukossa 2.3 on listattu sementin mineraalien ja raaka-aineiden ominaisuuksia.

Taulukko 2.3 Sementin mineraalien ja raaka-aineiden ominaisuuksia (Finnsementti /7/)

KOMPONENTTI	OMINAISUUDET
C_3S	Nopea lujuuskehitys, suuri loppulujuus, korkea hydrataatiolämpö (500 kJ/kg), sulfaatinkestävä
C_2S	Hidas lujuuskehitys, suuri loppulujuus, alhainen hydrataatiolämpö (250 kJ/kg), sulfaatinkestävä
C_3A	Suuri reaktionopeus ja vedentarve, pieni loppulujuus ja erittäin korkea hydrataatiolämpö (1340 kJ/kg), ei sulfaatinkestävä
C_4AF	Hidas lujuuskehitys, pieni loppulujuus, korkea hydrataatiolämpö (420 kJ/kg), sulfaatinkestävä
CaO (vapaa)	Reagoi nopeasti veden kanssa kalsiumhydroksidiksi $Ca(OH)_2$, korkea pitoisuus voi aiheuttaa nopean sitomisen ja tuotteen paisumisen
MgO	Reagoi hitaasti veden kanssa magnesiumhydroksidiksi $Mg(OH)_2$, korkea MgO pitoisuus voi aiheuttaa lopputuotteessa paisumista
K_2O, Na_2O	Alkaliyhdisteet nopeuttavat hydrataatioreaktiota, nostavat hieman alkulujuustasoa ja laskevat loppulujuustasoa
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Kipsillä hidastetaan C_3A :n reaktiota ja säädetään näin sitomisaikaa
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	Rautasulfaatilla pelkistetään vesiliukoinen kromaatti

2.5 Sementtilaadut

Sementit jaetaan SFS-standardin 3165 mukaan neljään päätyyppiin, jotka on esitetty taulukossa 2.4.

Taulukko 2.4 Sementin päätyypit (Finnsementti /7/)

NIMI	TYYPPI	KLINKKERIÄ (%)	SEOSAINEITA (%)
Portlandsementti	CEM I	95...100	0...5
Portlandseossementti A	CEM IIA	80...94	6...20
Portlandseossementti B	CEM IIB	65...79	21...35
Masuunikuonasementti	CEM III	20...64	36...80

Sementtilaadun perässä ilmoitetaan myös sementin lujuusluokka 28 päivän iässä, joita on kolme kappaletta: 32,5, 42,5 ja 52,5 MN/m². Sementtien varhaislujuudet ilmoitetaan normaalisti joko kahden tai seitsemän päivän iässä, mutta myös yhden päivän varhaislujuuksia käytetään jos valmistetusta sementistä vaaditaan nopeaa palautetta. Nopea varhaislujuuksinen sementti saa lujuusluokan peräänsä kirjaimen R. Lisäksi sementin yhteydessä voidaan ilmoittaa kirjaimet LH ja SR, joiden perusteella sementit jaetaan eri alatyyppeihin. LH tarkoittaa sementin kuuluvan alhaislämpösementteihin ja sen hydrataatiolämpö ei ylitä 250 kJ/kg ensimmäisten seitsemän vuorokauden aikana. Osa sementtilaaduista on sulfaatinkestäviä, tällöin sementin yhteydessä käytetään merkintää SR. Sulfaatteja kestävässä sementissä saa trikalsiumalumiinaattia (C₃A) enintään 3 % ja alumiinioksidia (Al₂O₃) enintään 5 %.

3 ENERGIANSÄÄSTÖMAHDOLLISUUDET SEMENTTITEOLLISUUDESSA

3.1 Johdanto

Sementin valmistaminen vaatii verrattain paljon energiaa. Scheuerin et al. /16/ mukaan sementtitonnia kohti tarvitaan parhaalla mahdollisella teknologialla noin 3000 MJ polttoenergiaa ja hieman yli 100 kWh sähköenergiaa. Taulukossa 3.1 on polttoaineen kulutukset klinkkeritonnia kohti eri tyyppisille klinkkerinvalmistusprosesseille IPPC:n /31/ mukaan.

Taulukko 3.1 Polttoaineen ominaiskulutukset eri tyyppisille sementtiuuneille (IPPC /31/)

MJ/tonnia klinkkeriä	UUNITYYPPI
Noin 3000	Kuiva prosessi, monivaiheinen esilämmitys ja esikalsinointiuuni
3100 – 4200	Kuiva prosessi syklonesilämmityksellä
3300 – 4500	Puolikuiva prosessi
5000 saakka	Kuiva prosessi ja pitkä uuni
5000 – 6000	Märkä prosessi ja pitkä uuni

Sprungin /17/ mukaan sementtiteollisuus käyttää polttoenergiaa 73 % koko sementinvalmistuksen energiantarpeesta. Kuitenkin poltto- ja sähköenergia aiheuttavat karkeasti yhtä paljon kustannuksia sementtiteollisuudessa. Teknologian parantuessa polttoenergian kulutuksen suhteen 50-luvun lukemat on puolitettu 90-luvulle tultaessa, mutta sähköenergian suhteen kulutus on hieman kasvanut. Lämpöenergiaa otetaan nykyään tehokkaasti talteen savukaasuista ja parhaimmillaan savukaasujen mukana karkaava lämpömäärä on pienempi kuin tehtaan muut lämpöhäviöt. Tämä yhdessä tiukentuneiden päästörajojen ja automatisoitumisen kanssa on osaltaan aiheuttanut sähkönkulutuksen lievän kasvun. Sähköenergian hinnan jatkuva kasvu on keskittänyt kehitystyön pääasiassa sähkönkulutuksen pienentämiseen, mutta toki muitakin energiansäästömahdollisuuksia mietitään.

Tässä kappaleessa paneudutaan mahdollisiin energiansäästämahdollisuuksiin sementtiteollisuudessa niin polttoenergian kuin sähköenergian suhteen. Polttoenergian suhteen Kreft et al. /20/ listaa artikkelissaan yleisimpiä energiankulutusta lisääviä puutteita sementtitehtaissa.

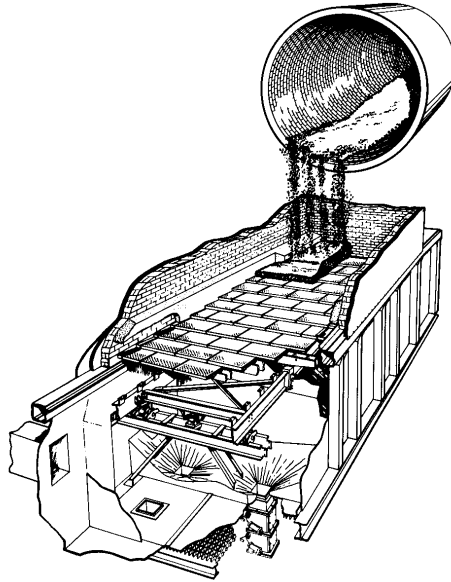
- klinkkerin ylipoltto
- polttoaineen epätäydellinen palaminen ja hiilimonoksidin muodostuminen
- poltto liian suurella ilmaylimäärällä
- vuotoilman pääsy uunijauheen esilämmittimeen
- huonosti hoidettu uunin esilämmitys
- huonosti toimiva klinkkerijäähdytys

Sähköenergian suhteen suurimmat energiansäästöt saadaan uusimalla vanhentunutta jauhatus- ja luokitustekniikkaa uudemmallalla energiaa säästävällä tekniikalla.

3.2 Klinkkerijäähdyttimet

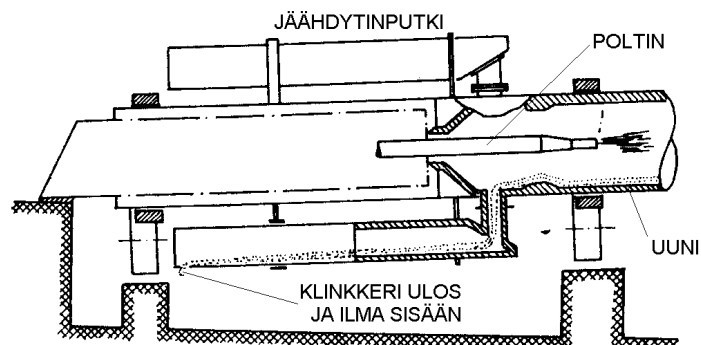
Klinkkerijäähdyttimien suhteen energiansäästämahdollisuudet perustuvat paljolti niiden tehokkuuteen siirtää klinkkerin sisältämä lämpö sekundääri-ilmaan. Scheuerin et al. /16/ mukaan yleensä pyritään vähintään 70 %:n hyötysuhteeseen jäähdyttimen osalta eli klinkkerin sisältämästä lämpöenergiasta 30 % menee hukkaan säteilyhäviöinä ja klinkkerin mukana. Klinkkerijäähdyttimiä on kolmea päätyyppiä arina-, rotaatio- ja satelliitti-jäähdyttimet.

Arinajäähdyttimissä (kuva 3.1) klinkkeri valuu uunin jälkeen arinaa pitkin eteenpäin, jolloin klinkkerin läpi kulkeutuva sekundääri-ilma lämpenee ja klinkkeri jäähtyy.



Kuva 3.1 Arinajäähdytin (Duda /2/)

Rotaatiojäähdytin on iso uunia muistuttava pyörivä putki, jonka läpi klinkkeri kulkee uunin jälkeen. Sekundääri-ilma johdetaan klinkkeriin nähden vastavirtaan kohti uunia. Satelliittijäähdyttimet (kuva 3.2), yleensä 9 – 12 kappaletta, on sijoitettu kiinteästi uunin ympärille.



Kuva 3.2 Satelliittijäähdyttimen toimintaperiaate (Wilck /12/)

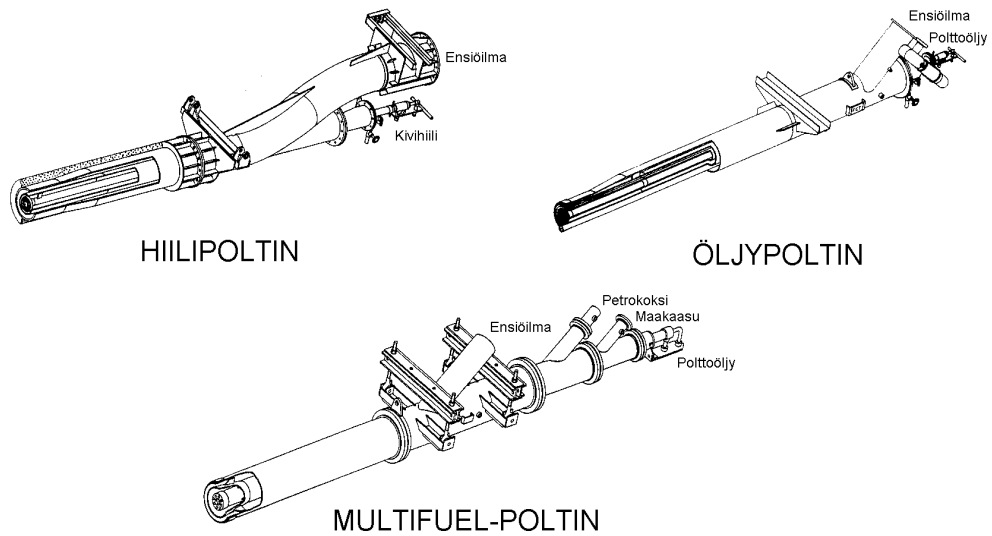
Uunista tuleva kuuma klinkkeri tipahtaa uunin kiertoliikkeen vaikutuksesta jäähdytysputkiin ja kulkeutuu putkien perälle. Lämmitettävä sekundääri-ilma taas kulkee uuniin imun vaikutuksesta näiden jäähdytysputkien läpi jäähdyttäen klinkkeriä. Molempien, sekä rotaatio- että satelliittijäähdyttimien putket on varustettu klinkkeriä sekoittavilla nostinlevyillä jäähdytyksen tehostamiseksi. Steinbissin /22/ mukaan näiden nostinlevyjen konstruktiolla on huomattava merkitys etenkin rotaatiojäähdyttäjien hyötysuhteisiin. Nostinlevyjen tehtävänä on sekoittaa mahdollisimman hyvin klinkkeripetiä, rikkoa suurimmat klinkkerikokkareet ja saada aikaan mahdollisimman paljon pinta-alaa klinkkerin ja ilman välille, jotta lämmönsiirto maksimoituisi. Ongelmana on Steinbissin /22/ mukaan löytää riittävän kestäviä materiaaleja nostinlevyille jäähdyttimien kuumaan päähän, lisäksi nostinlevykonstruktiota muuttamalla ei saa lisätä klinkkerin pölyämistä jäähdyttimissä. F.L. Smidthin /39/ mukaan jäähdyttimissä muodostunut pöly kulkeutuu takaisin uuniin haitaten liekin ja uunin välistä lämmönsiirtoa ja siten heikentäen klinkkerin muodostumista. Tämä taas lisää pölykiertoa entisestään.

Ilman esilämmityksen suhteen arinajäähdytin tarjoaa eniten mahdollisuuksia ja ne ovatkin yleisempiä etenkin suurissa tehtaissa. Erhardin ja Scheuerin /21/ mukaan kapasiteetiltaan alle 3000 – 4000 tonnia klinkkeriä päivässä olevissa uuneissa satelliittijäähdytin on vielä mahdollinen, mutta suuremman kapasiteetin omaavat uunit on poikkeuksetta aina varustettu arina- tai rotaatiojäähdyttimellä. Scheuerin et al. /16/ mukaan rotaatio- ja satelliittijäähdyttimiä käytettäessä jäähdytys saattaa tuottaa ongelmia kun klinkkeri on hienojakoista tai laajan partikkelijakauman omaavaa. Etenkin satelliittijäähdyttimien tehokkuus laskee kun jäähdytysputken alkupäätä suojaavan tiilivuorauksen karhennus kuluu ja sekundääri-ilman kohtaavan klinkkeripatjan pinta-ala pienenee. Satelliittijäähdyttimien lämpöhäviöt ovat myös täysin eri luokkaa kun verrataan toiseen päätyyppiin eli arinajäähdyttimiin. Toisaalta satelliittijäähdyttimet ovat edullisempia hankintakustannuksiltaan ja prosessin hallintaa ajatellen yksinkertaisempia. Arinajäähdytin tarjoaa energiataloudellisesti kuitenkin parhaimman ratkaisun. Erhard ja Scheuer /21/ toteavat artikkelissaan satelliittijäähdyttimen tarvitsevan noin 180 kJ/kg klinkkeriä enemmän polttoenergiaa kuin arinajäähdytin.

3.3 Poltto

Poltin ja siihen liittyvät polttoaineen ja ilman syötöt muodostavat tärkeän kokonaisuuden energiankulutuksen suhteen. Mullinger ja Jenkins /19/ toteavat artikkelissaan polttimen olevan yksi sementtiuunin kriittisimmistä laitteista. Poltin mielletään harvoin kiinteäksi osaksi koko uunia, mikä olisi uunin toiminnan optimoimisen kannalta varsin tärkeää. Polttoilman esilämmityksellä ja polton ilmaylimäärällä on suora vaikutus polttoaineen kulutukseen. Jos uunin savukaasujen happipitoisuus nostetaan 1 %:sta 5 %:iin, lisää tämä polttoaineen kulutusta noin 10 %. Ilmaylimäärä lisää ilman virtausta klinkkeri-jäähdyttimissä ja näin alentaa polttoilman lämpötilaa, mikä taas alentaa liekin lämpötilaa. Näin polttoaineen kulutus kasvaa, jotta vaadittu klinkkeröityminen tapahtuu täydellisesti. Toisaalta ilmaylimäärää ei saa laskea liian alhaiseksi. Tällöin palaminen jää epätäydelliseksi ja polttoaineen kulutus kasvaa. Mullingerin ja Jenkinsin /19/ mukaan optimaalisin happimäärä uunista poistuvissa savukaasuissa olisi 0,5 – 1,5 %, jos polttoaine ei sisällä rikkiä.

Suurin osa polttoilmasta on jäähdyttimien kautta tulevaa sekundääri-ilmaa. Näin ollen polton tehokkuuteen vaikuttaa myös jäähdyttimien ja uunin alkupään aerodynamiikka eli se kuinka sekundääri-ilma sekoittuu polttoaineen kanssa. Primääri- eli ensiöilmalla ja siihen sekoittuneella polttoaineella on tietty liikemäärä polttimen jälkeen. Tällä liikemäärällä ja sekundääri-ilman nopeudella on Mullingerin ja Jenkinsin /19/ mukaan yhteys. Uunit joiden primääri-ilman määrä on liian alhainen kärsivät huonosta sekundääri-ilman ja polttoaineen sekoittumisesta. Siten liekistä tulee pitkä ja palaminen jää epätäydelliseksi. Toisaalta usein primääri-ilma ei ole esilämmitettyä, joten sen määrä tulisi minimoida kuitenkin heikentämättä polttoaineen sekoittumista sekundääri-ilmaan. Tämä on mahdollista pitkälle kehitetyillä poltinratkaisuilla. F.L. Smidthin /40/ mukaan perinteisiä yksikanavaisia polttimia käyttävissä uuneissa ensiöilman määrä on noin 25 % polttoilmasta. Uudemmissa poltinratkaisuilla (kuva 3.3) saadaan ensiöilman määrä pienennettyä jopa 10 %:iin polttoilmasta. Uusia tehtaita suunniteltaessa ja vanhoja uudistettaessa sekundääri-ilman virtaukseen ja polttimien valintaan on kiinnitettävä nykyistä enemmän huomiota.



Kuva 3.3 Erityyppisiä poltinaratkaisuja (Mullinger ja Jenkins /19/)

3.4 Vaihtoehtoiset polttoaineet

Eräs tapa nykyaikana pienentää energiakustannuksia polttolaitoksissa on käyttää uusiutumattomien fossiilisten polttoaineiden tilalla vaihtoehtoisia polttoaineita. Sementtiteollisuudessa tämä huomattiin jo aikoja sitten, mutta siitä huolimatta vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttö on varsin vähäistä. Monesti tämä johtuu tiukoista päästörajoituksista, vaikka pitkät sementtiuunit tarjoavatkin otollisen ympäristön käyttää mitä erilaisimpia polttoaineita. Sheinbaumin ja Ozavan /18/ mukaan juuri uunien korkeat lämpötilat ja pitkät viipymäajat pienentävät haitallisten aineiden päästöjä. Yksi sementtiteollisuudessa käytetty vaihtoehtoinen polttoaine on käytetyt auton renkaat. Muun muassa osa Formula 1-kilpailuissa käytetyistä renkaista kuljetetaan Keski-Englannissa sijaitsevalle sementtitehtaalle poltettavaksi. Murskattujen renkaiden syöttö uuniin tapahtuu yleensä uunin perältä. Kumi palaa tällöin uunin peräosan lisäksi esikalsinointiuunissa tai nousuputkessa riippuen syöttökohdasta ja uunijärjestelmästä. Sheinbaumin ja Ozavan /18/ mukaan Meksikossa vuonna 1992 kolme sementtitehdasta alkoi käyttää autonrenkaita toisarvoisena polttoaineena polttoöljyn rinnalla. Nämä tehtaot pystyivät yhteensä polttamaan 16 600 tonnia käytettyjä renkaita vuodessa, mikä merkitsi polttoöljyssä säästöä tehdasta kohti noin 15 %.

Kreftin et al. /20/ sekä Caluorin ja Moserin /8/ mukaan renkaiden lisäksi käytetään myös monia muita toisarvoisia polttoaineita kuten jäteöljyjä ja -liuottimia, tislauksen jäännöksiä, puuta, puuhiiltä sekä jopa riisistä erotettuja akanoita ja muita orgaanisia jätteitä. Joitakin jäteperäisiä ja matala energisiä polttoaineitakin käytetään kuten kuivattua jäteliettä ja happotervaa. Caluorin ja Moserin /8/ mukaan Sveitsissä on kokeiltu myös kotitalouksien ja teollisuuden erotteleman pakkausmateriaalin polttamista sekundäärisenä polttoaineena. Pakkausmateriaalina käytettävää PVC-muovia ei kuitenkaan tässä kokeessa käytetty sen sisältämän kloorin takia. Lajitellut pakkausmuovit revittiin ja jauhettiin 3 – 8 mm kokoiseksi rouheeksi, joka paineilman avulla syötettiin polttovyöhykkeelle. Lajitellun muovin lämpöarvo on hyvin korkea ja alle 8 mm kokoiset rakeet paloivat täydellisesti ilman, että klinkkeriin jäi minkäänlaisia jäämiä kiinteästä polttoaineesta. Pakkausmuovit eivät myöskään sisältäneet juuri ollenkaan minkäänlaisia haitallisia metalleja tai muita aineita. Tutkimuksessa todettiin pakkausmuovien sopivan hyvin sementtitehtaiden sekundääriseksi polttoaineeksi.

Kreftin et al. /20/ mukaan vaihtoehtoisten polttoaineiden ongelmana on, että kun nämä matalan lämpöarvon omaavat polttoaineet syötetään uuniin esilämmittämättöminä, niiden tuhkan tulee kuitenkin saavuttaa kalsinointilämpötila. Lisäksi toisarvoisia polttoaineita käytettäessä prosessin optimointi on hankalaa ja usein lämpöenergian tarve on suurempi kuin pelkästään primäärisiä polttoaineita käyttävillä laitoksilla. Vaikka energiatalous onkin hyvin tärkeä asia ennen vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöönottoa on kuitenkin selvitettävä perinpohjaisesti niiden polttamisen vaikutus tehtaan päästöihin ja klinkkerin laatuun. Kreft et al. /20/ kuitenkin muistuttaa, että vaikka vaihtoehtoisilla polttoaineilla pystytään saamaan huomattavia säästöjä energiakustannuksissa, ei niiden suora käyttöönotto ole ainut tapa parantaa tehtaan energiataloutta. Ensiksi kannattaa etsiä tehtaasta sen energiataloutta heikentävät pullonkaulat.

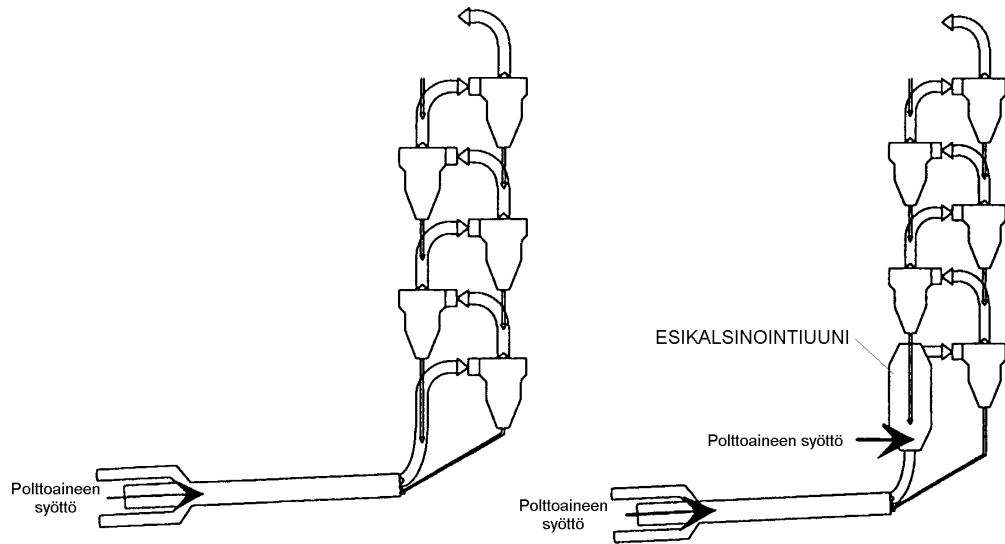
3.5 Sementtiuuni

Pyörivä sementtiuuni on säilyttänyt paikkansa sementinvalmistuksessa, vaikka etenkin Japanissa leijupetiuunien tarjoamia mahdollisuuksia tutkitaankin paljon. Esikalsinointitekniikan myötä uunien pituus on lyhentynyt huomattavasti.

Uunien mittasuhteita kuvaa pituuden ja halkaisijan lisäksi niiden välinen L/D-suhde. Erhardin ja Scheuerin /21/ mukaan pienimmillään, tehokkailla esikalsinointijärjestelmillä varustetuilla sementtiuuneilla, L/D-suhde on 11:1. Valmistajasta riippuen nykyään uusilla sementtitehtailla suhde on maksimissaankin vain 17:1, kun vanhoilla ilman minkäänlaista esikalsinointia olevilla uuneilla L/D-suhde voi olla jopa 38:1. Tällöin puhutaan käytännössä yli 200 metriä pitkistä uuneista, kun uudet uunit ovat vain 50 – 60 metriä. Energiankulutuksen kannalta juuri uunin pituus ja sitä myötä kasvanut pinta-ala aiheuttavat lämpöhäviöitä. Jos uuni sijaitsee ulkona, kuten yleensä tapana on, lisää tuuli lämpöhäviöitä entisestään. Uunin vuorauksesta riippuen pintalämpötilat vaihtelevat polttovyöhykkeen lähes 400 °C:sta uunin peräpään alle 100 °C:een. Uunin lyhentäminen ei suorassa suhteessa vähennä lämpöhäviöiden suuruutta, sillä myös esilämmityssykloneissa on paljon pinta-alaa. Uunien lyhentäminen lähinnä helpottaa prosessin hallintaa, lisää kapasiteettia ja pienentää investointikustannuksia.

3.6 Syklonijärjestelmät ja esikalsinointi

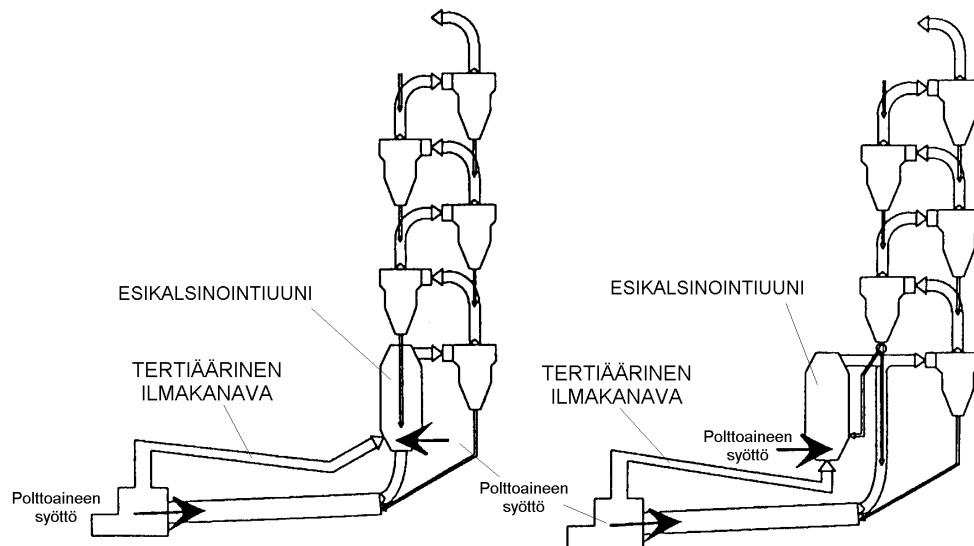
Monivaiheisella uunijauheen sykloniesilämmitysjärjestelmällä varustetut tehtaat ovat sementtitehtaista suurimpia kapasiteetiltaan ja taloudellisimpia polttoenergian kulutuksen suhteen klinkkerikiloa kohti. Järjestelmällä (kuva 3.4) tarkoitetaan päällekkäin sijoitettuja sykloneita, joissa kuumat savukaasut esilämmittävät uunijauheen ennen varsinaista uunia. Syklonivaiheinen lukumäärä vaihtelee kahden ja kuuden välillä. Usein pätee, että mitä enemmän sykloneita, sitä taloudellisempi tehdas on polttoenergian kulutuksen suhteen. Erhardin ja Schauerin /21/ varsin optimistisen arvion mukaan 5-vaiheisella syklonijärjestelmällä varustettu tehdas on 270 kJ/kg klinkkeriä taloudellisempi kuin 4-vaiheisella järjestelmällä varustettu tehdas. Vastaavasti 6-vaiheinen on 5-vaiheista 120 kJ/kg klinkkeriä taloudellisempi polttoenergian kulutuksen suhteen. Menzel /25/ esittää artikkelissaan hieman varovaisemman arvion syklonivaiheiden lisäämisen tuomasta energiansäästöstä. Hänen mukaansa 5-vaiheinen syklonijärjestelmä on 80 kJ/kg klinkkeriä taloudellisempi ja 6-vaiheinen 50 kJ/kg klinkkeriä taloudellisempi 5-vaiheista. Menzelin arvot tuntuvat realistisimmilta ja ne perustuvatkin kokemuseräiseen tietoon.



Kuva 3.4 Satelliittijäähdyttimillä ja 5-vaiheisilla syklonijärjestelmillä varustettuja uunijärjestelmiä (F.L. Smidth /37/)

Useissa tehtaissa sykloneissa tapahtuu myös esikalsinoitumista eli kalkkikiven lämpötila on jo sykloneissa niin suuri, että se alkaa hajota kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi jo ennen uunia. Tällä pyritään siihen, että uuniin jäisi pelkästään varsinainen klinkkerimineraalien muodostuminen. Esikalsinointia ja syklonijärjestelmää käyttäen uuni voidaan suunnitella lyhyemmäksi ja lämpöenergian talteenotto savukaasuista tehostuu. Toteutusmahdollisuuksia on useita, mutta kaikille on yhteistä että polttoainetta syötetään myös uuniin perälle, joko suoraan nousuputkeen tai varsinaiseen esikalsinointiuuniin. Erhardin ja Schauerin /21/ mukaan on hyvin yleistä, että uunin perälle syötettävät polttoaineet ovat sekundäärisiä polttoaineita kuten käytettyjä öljyjä, vanhoja renkaita, muita kumiliuskeita ja öljy- tai hiililiusketta. Polttoilma uunin perällä tai nousuputkessa tapahtuvalle palamiselle voi olla joko uunin läpi tullutta ilmaa tai kuumaa ilmaa suoraan klinkkerijäähdyttimiltä erillistä ilmakehää pitkin. Jälkimmäistä kutsutaan tertiääriseksi ilmakehäksi (tertiary air duct). Erhard ja Schauer /21/ jakavat esikalsinointiprosessit kahteen kategoriaan sen mukaan kuinka palamiseen tarvittava ilma saadaan. Tertiäärisen ilmakehän tapauksessa käytetään nimitystä AS-prosessi (air separate) tai jos palamisilma tulee uunin läpi on kyseessä AT-prosessi (air through). Prosesseissa, joissa uunin jälkeen ei ole varsinaista palamiselle tarkoitettua kammiota, uunin perälle syötettävän polttoaineen maksimimäärä on noin 20 % kaikesta polttoaineesta.

Tätä suuremmat polttoaineen syötöt vaativat laajennetun kammion, jota kutsutaan esikalsinointiuuniksi (kuvat 3.4 ja 3.5). Näin uunin perälle syötettävän polttoaineen määrä voi olla jopa 70 %. Esikalsinointiuunit voidaan jakaa kahteen kategoriaan, uuneihin joissa palaminen tapahtuu puhtaassa ilmassa ja uuneihin joissa palaminen tapahtuu ilman ja uunin savukaasujen seoksessa. Esikalsinointiuunit eivät suoranaisesti säästä ollenkaan polttoenergiaa, mutta hyödyt saavutetaan muissa muodoissa, kuten esim. investointikustannukset ja prosessin muut kustannukset ovat alhaisemmat. Lisäksi esikalsinointiuunit mahdollistavat suuremman kapasiteetin, paremman prosessin hallinnan ja pienemmät päästöt.



Kuva 3.5 Arinajäähdyttimillä, tertiäärisillä ilmanavilla, esikalsinointiuuneilla ja 5-vaiheisilla syklonijärjestelmillä varustettuja uunijärjestelmiä (F.L. Smidth /37/)

3.7 Energian talteenotto savukaasuista

Ennen syklonijärjestelmiä joissain sementtitehtaissa savukaasut johdettiin höyrykattilaan, jonka tuottamalla höyryllä pyöritettiin generaattoria. Näin osa hukkalämmöstä pystyttiin muuttamaan sähköksi. Sykloniesilämmittimien yleistymisen jälkeen ei sähköntuotanto enää yleensä kannattanut pienemmissä tehtaissa.

Scheuerin et al. /16/ mukaan sementtitehtaan yhteyteen rakennetut jätelämpökattilat turbiineineen ja generaattoreineen kannattavat vain jos tehtaalle tulevat raaka-aineet eivät sisällä paljon kosteutta ja tehtaan kapasiteetti on yli 3000 tonnia klinkkeriä per päivä. Kuitenkin, Lang ja Mosimann /23/ kirjoittavat artikkelissaan Sveitsissä olevasta sementtitehtaasta johon asennettiin jätelämpökattila, turbiini ja generaattori jälkikäteen. Tehtaan sementtiuunin kapasiteetti on vain 1600 tonnia klinkkeriä päivässä ja uuni on varustettu neljällä syklonivaiheella. Savukaasujen suuresta pölypitoisuudesta huolimatta järjestelmän kerrotaan kannattavan hyvin osaksi alueen korkean sähkön hinnan vuoksi. Steinbissin /9/ mukaan suurissa sementtitehtaissa, tarkkaan tehtaan mukaan mitoitettut, jätelämpökattilat voivat vähentää 20 – 30 % sementinvalmistuksen vaatimia energiakustannuksia. Suurimpien sementtiuunien yhteyteen rakennetuilla höyryturbiinijärjestelmillä pystytään klinkkeritonnia kohti saamaan jopa 35 kWh sähköä. Scheuerin et al. /16/ mukaan sementtiuunien yhteyteen rakennettujen jätelämpökattiloiden, turbiinien ja generaattorien hyötysuhde on aika pieni. Esimerkiksi jos savukaasujen lämpötila on 350 °C vain noin 25 % virran sisältämästä lämpöenergiasta pystytään muuttamaan sähköksi. Steinbiss /9/ toteaa lisäksi artikkelissaan, että alle 100 °C savukaasujen hyödyntäminen ei ole enää taloudellisesti kannattavaa. Kuten aikaisemmin todettiin paras hyöty saadaan kuumista savukaasuista kun niillä esilämmitetään tai esikalsinoidaan uunijauhe sykloneissa ennen uunia. Hyvin usein savukaasut johdetaan myös raakamylyn läpi, jolloin raaka-aineet kuivuvat ja niiden lämpötila nousee. Normaalisti hienoksi jauhetun uunijauheen lämpötila on raakamylyn jälkeen noin 70 – 80 °C ja kosteus prosentien luokkaa. Monissa sementtiuuneissa osa savukaasuista johdetaan ekonomaisemmin läpi, jolla lämmitetään suljettua vesikiertoa. Tästä vesikierrosta energiaa voidaan siirtää esim. kaukolämpöverkkoon.

3.8 Jauhatus

Ellerbrockin ja Mathiakin /24/ mukaan keskimääräinen sähköenergian kulutus sementtitehtaissa on noin 400 MJ eli noin 111 kWh tonnia sementtiä kohti kun polttoenergiaa kuluu noin 3000 MJ tonnia sementtiä kohti. Kuitenkin kustannuksissa ajatellen niiden osuudet kokonaiskustannuksista on suurinpiirtein samaa luokkaa. Sähköenergianhinta on moninkertainen verrattuna polttoenergiaan.

Näin ollen sementtitehtaissa paneudutaankin nykyään enemmän sähköenergian kulutuksen pienentämiseen ennemmin kuin polttoenergian kulutuksen pienentämiseen. Taulukossa 3.2 on suuntaa antavia lukuja erään sementtitehtaan eri prosessiosien sähkönkulutuksesta.

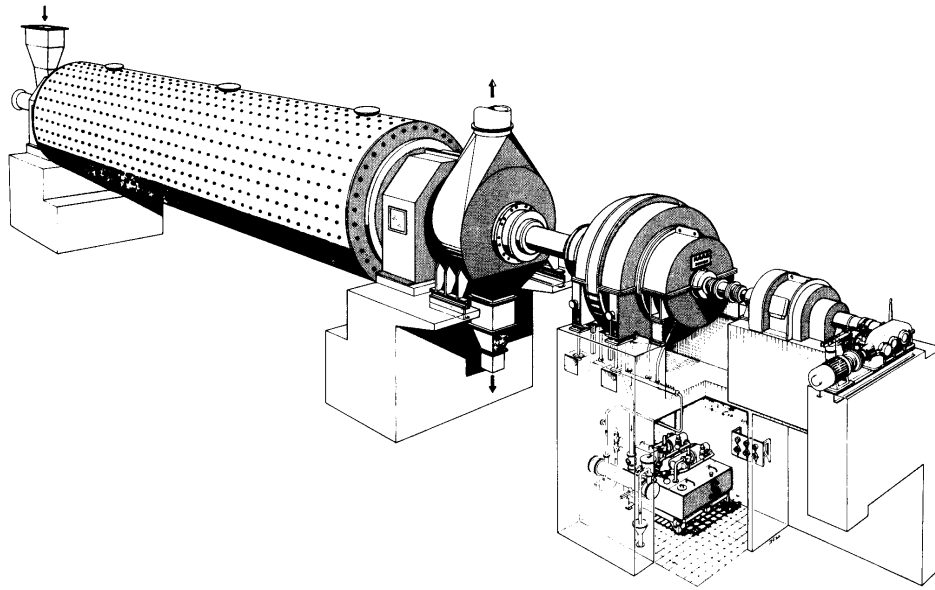
Taulukko 3.2 Erään sementtitehtaan (2000 t/d) prosessivaiheiden sähkönkulutus kokonaissähkönkulutuksesta (Duda /3/)

PROSESSIVAIHE	SÄHKÖENERGIAN KULUTUS (%)
Louhinta ja murskaus	2
Raakajauhatus	25
Homogenisointi ja uunin syöttö	13
Klinkkerin poltto ja jäähtytys	17
Sementin jauhatus	38
Pakkaus	1
Muut	4

Kuten taulukosta 3.2 nähdään kattaa raaka-aineiden ja sementin jauhatus 63 % sementtitehtaan sähkönkulutuksesta.

3.8.1 Kuulamyllyt

Perinteisesti jauhatukseen on käytetty kuulamyllyjä (kuva 3.6) ja niiden käyttö jatkuu vielä pitkälle ensi vuosituhanalle. Kuitenkin uusia tehtaita rakennettaessa nykyaikaisemmat, energiaa säästävät jauhatusmenetelmät ovat yleistyneet. Kuulamyllyjä käytettäessä suurin osa jauhatuksen vaatimasta energiasta kuluu lämpöhäviöihin. Ellerbrockin ja Mathiakin /24/ mukaan juuri näiden häviöiden minimoimiseen tulee kiinnittää mahdollisimman paljon huomiota myllyjen toimintaa optimoitaessa. Kuulamyllyn energiankulutus riippuu pääasiassa kolmesta tekijästä: raaka-aineiden jauhautuvuudesta, niiden kosteudesta ja lopputuotteen hienoudesta. Muita sähkön kulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat jauhatuslämpötila, myllyn täyttöaste, myllyn seinämiä suojaavan vuorauksen konstruktio ja myllyn luokittimen toiminta.

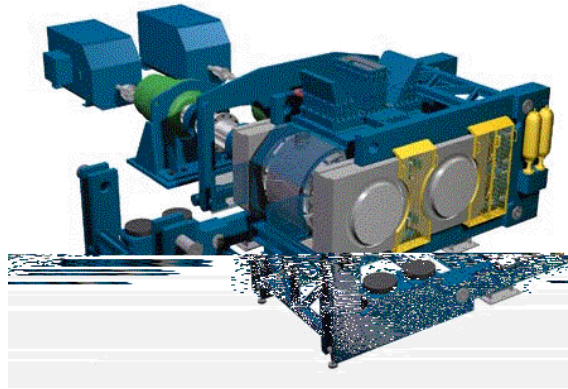


Kuva 3.6 Kuulamyly vaihteistoinen (Duda /2/)

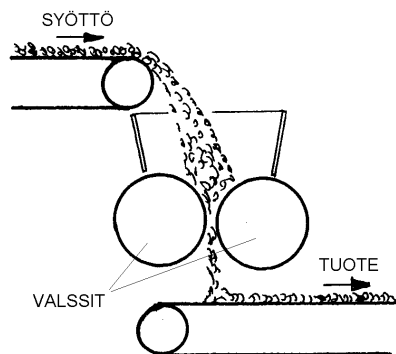
Ellerbrockin ja Mathiakin /24/ mukaan juuri lämpötilalla on verrattain suuri vaikutus jauhatuksen energiankulutukseen. Sementin jauhatuksessa suurehkoilla lämpötiloilla on vaarana sementin agglomeraatio, jolloin sementti takertuu kiinni jauhinkappaleisiin ja myllyn kapasiteetti tippuu rajusti. Tämä aiheuttaa luonnollisesti sähkönkulutuksen kasvua. Agglomeraatiota pystytään ehkäisemään jäädyttämällä sementtiä jauhatuksen aikana tai jauhatuspiirissä. Toinen vaihtoehto on käyttää agglomeraatiota ehkäiseviä jauhatusapuaineita sementtimyllyissä. Näistä aineista on etenkin hyötyä kun jauhetaan erittäin hienojakoista sementtiä.

3.8.2 Jauhinvalssi

Kuulamylyjen rinnalle ja tilalle on tullut energiaa säästäviä jauhatusmenetelmiä. Kaksi yleisintä on kuvassa 3.7 oleva korkeapaineinen jauhinvalssi (high-pressure grinding rolls) ja pystymylly (roller grinding mills). Jauhinvalssin toimintaperiaate (kuva 3.8) on yksinkertainen. Siinä jauhettava materiaali syötetään kahden vastakkaisiin suuntiin pyörievien telojen välistä, jolloin osa materiaalista hienontuu korkean, yli 50 MPa:n, puristuksen vaikutuksesta.



Kuva 3.7 Jauhinvalssi (F.L. Smidth /36/)



Kuva 3.8 Jauhinvalssin toimintaperiaate (Wilck /12/)

Telojen alapuolelta saatava kiinteä kakku sisältää Ellerbrockin ja Mathiakkin /24/ mukaan yli 70 % kiintoainetta, joista jopa 40 % on alle 90 µm kokoluokkaa. Kakun sisältämät karkeat jakeet ovat puristuksessa saaneet alkavia säröjä ja halkeamia, jotka pienentävät jatkossa merkittävästi jauhatuksen energiankulutusta. Tämän takia jauhinvalsseja ei yleensä käytetä yksin, vaan osana koko jauhatussysteemiä. Scheuer et al. /16/ listaa artikkelissaan kolme suosittua nykyaikaista jauhatussysteemiä, joissa yhdistetään tehokkaasti korkeapaineinen jauhinvalssi ja kuulamylly.

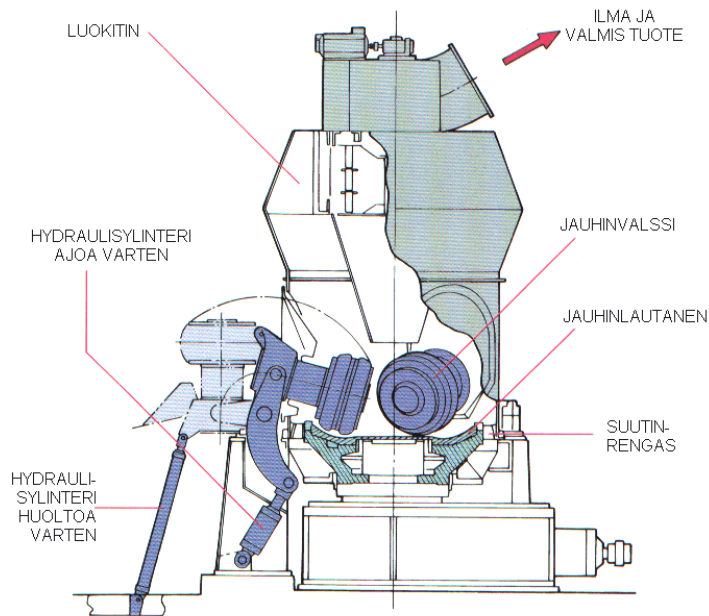
- esijauhatus korkeapaineisella jauhinvalssilla ja hienojauhatus suljetussa piirissä toimivalla ja luokittimella varustetulla kuulamyllyllä
- yhdistetty jauhatus jauhinvalssilla ja kuulamyllyllä edellisen tapaan, mutta osa luokittimen erottamasta karkeasta jakeesta palautetaan jauhinvalssiin

- esijauhatusta jauhinvalssilla suljetussa luokittimella varustetussa piirissä ja hienojauhatusta kuulamylyllä avoimessa tai suljetussa ja omalla luokittimella varustetussa piirissä

Edellä mainitut yhdistelmät sopivat hyvin vanhoihin tehtaisiin, joissa on jo olemassa oleva kuulamyly ja luokitin.

3.8.3 Pystymylly

Toinen suuren suosion saanut jauhatusmenetelmä on pystymylly (kuva 3.9), jota joissain yhteyksissä kutsutaan valssimyllyksi. Siinä kahdesta neljään kääntyvää ja varren päässä olevaa valssia pyörii vaakatasossa olevalla pyörivällä jauhintasolla. Jauhettava materiaali syötetään keskeltä tälle tasolle, jossa se jauhaantuu valssien ja tason välissä. Hieno materiaali kuljetetaan ilma- tai savukaasuvirran avulla pois alhaalta ylöspäin luokittimelle.



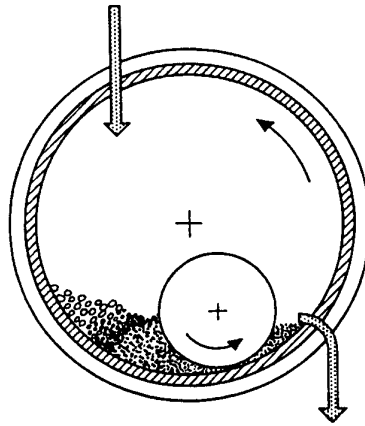
Kuva 3.9 Pystymylly (F.L. Smidth /36/)

Pystymyllyssä on kuulamylyjen tapaan mahdollista kuivata materiaali jauhatuksen yhteydessä. Valmistajasta riippuen pystymyllykonstruktioita on useita, mutta kaikissa on periaate samankaltainen. Toistaiseksi pystymyllyillä ei kuitenkaan pystytä hienousrajoituksen takia jauhamaan sementtiä. Pystymyllyjen avulla tehtaiden hiilen- ja raakajauheen jauhatuskapasiteettia pystytään helposti lisäämään, mutta suurin hyöty saadaan energiankulutuksen pienentymisestä. Ellerbrockin ja Mathiakin /24/ mukaan pystymyllyjen energiankulutus on 30 % pienempi kuin perinteisillä kuulamylyillä.

Investointikustannuksiltaan pystymyllyt ovat varsin kalliita, mutta rakenteensa ansiosta ne ovat mekaanisesti luotettavia, joten kunnossapitokustannuksissa tulee säästöä. Energiansäästöä ajatellen parhaimmat tulokset saavutetaan kun yhdistetään korkeapaine jauhinvalssi ja pystymylly samaan jauhatuspiiriin. Edellä mainittiin jauhinvalssien ja kuulamylyjen yhdistelmistä, jotka sopivat hyvin jo olemassa oleviin tehtaisiin, mutta uusia tehtaita rakennettaessa jauhinvalssin ja pystymyllyn yhdistelmällä voidaan saavuttaa Ellerbrockin ja Mathiakin /24/ mukaan jopa 50 % energiansäästö perinteisiin jauhatusmenetelmiin verrattuna. Investointikustannukset ovat kuitenkin niin suuret ettei jo olemassa olevien kuulamylyjen syrjäyttäminen tällaisella yhdistelmällä taida olla kannattavaa.

3.8.4 Vaakatasoinen valssimylly

Energiaa säästäviä myllyratkaisuita on muitakin. Vuonna 1993 esiteltiin täysin uudentyyppinen mylly, vaakatasoon sijoitettu valssimylly (horizontal roller mill tai roller tube mill). Ellerbrockin ja Mathiakin /24/ mukaan siinä pyrittiin yhdistämään kuulamylyyn luotettavuus, hyvä tuotantokapasiteetti, pieni sähkönkulutus ja jauhinvalssin joustavuus. Myllyssä on kuulamylyyn tapaan sylinterin muotoinen putki, jonka sisällä on myllyn pyörivää seinämää vasten rulla. Myllyn pyöriessä jauhettava materiaali kulkeutuu rullan ja myllyn seinämän välistä (kuva 3.10) jauhautuen hieman samaan tapaan kuin jauhinvalssissa.



Kuva 3.10 Vaakatasoisen valssimyllyn toimintaperiaate (Ellerbrock ja Mathiak /24/)

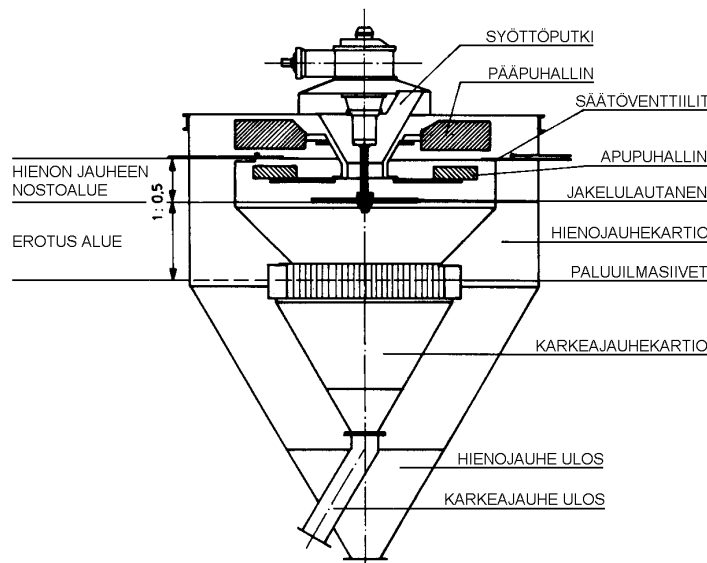
Raaka-aineen syöttö tapahtuu myllyn keskeltä ja jauhetun materiaalin poisto myllyputken päistä. Vaakatasoinen valssimylly on tarkoitettu toimimaan luokittimella varustettuun suljettuun piiriin. Portlandsementtiä jauhattaessa myllyllä saavutettiin huomattava 40 % energiansäästö verrattuna vastaavan kapasiteetin omaavaan kuulamyllyyn.

3.9 Luokittimet

Sementti- ja raakajauhemyllyjen yhteydessä on yleensä nykyään luokitin, jonka tarkoituksena on erottaa karkeat jakeet hienoista. Luokittimen toiminnan tehokkuudella on huomattava vaikutus jauhatusprosessin energiankulutukseen. Mitä huonommin luokitin toimii, sitä enemmän hienoa materiaalia pääsee takaisin myllyyn, mikä taas pienentää myllyn kapasiteettia ja lisää energiankulutusta. Toisaalta, jos karkeaa materiaalia pääsee hienon joukkoon, heikentää tämä prosessin toimintaa myöhemmin jauhettavasta materiaalista riippuen. Esimerkiksi Ellerbrock /24/ toteaa artikkelissaan, että mitä kapeampi korkean reaktiivisuuden omaavan sementtilaadun partikkelijakauma on sitä suurempi kyseisen sementin puristuslujuus. Lisäksi hän toteaa, että monesti uudemmat korkeatehokkuusluokittimet kuluttavat itsessään enemmän energiaa kuin vanhemmat luokittimet. Näin ollen, jotta tehokkaammista luokittimista saataisiin paras energiataloudellinen hyöty irti, tulee jo myllyn tuottaa mahdollisimman kapeaa partikkelijakaumaa.

3.9.1 Ensimmäisen sukupolven luokittimet

Luokittimet jaetaan kolmeen eri sukupolveen. Ensimmäisen sukupolven luokittimissa (kuva 3.11) ns. hajoituslautanen ja roottori, jolla saadaan aikaan luokittimen sisäinen virtaus, ovat samalla akselilla. Luokittimen erottamien jakeiden suuruutta voidaan muuttaa sälepelleillä, joita säätämällä muutetaan ilman nopeutta ja siten sen kantovoimaa. Jos ohjauspeltien läpi ilman mukana kulkevat partikkelit ovat riittävän pieniä saavuttamaan ilman nopeuden, ne kulkeutuvat ilman mukana sälepeltien läpi ja siten luokittevat karkeammista partikkeleista. Ensimmäisen sukupolven luokittimet ovat jo nykyään vanhahkoja ja ne eivät pärjää erotustehokkuudessa toisen ja kolmannen sukupolven luokittimille.

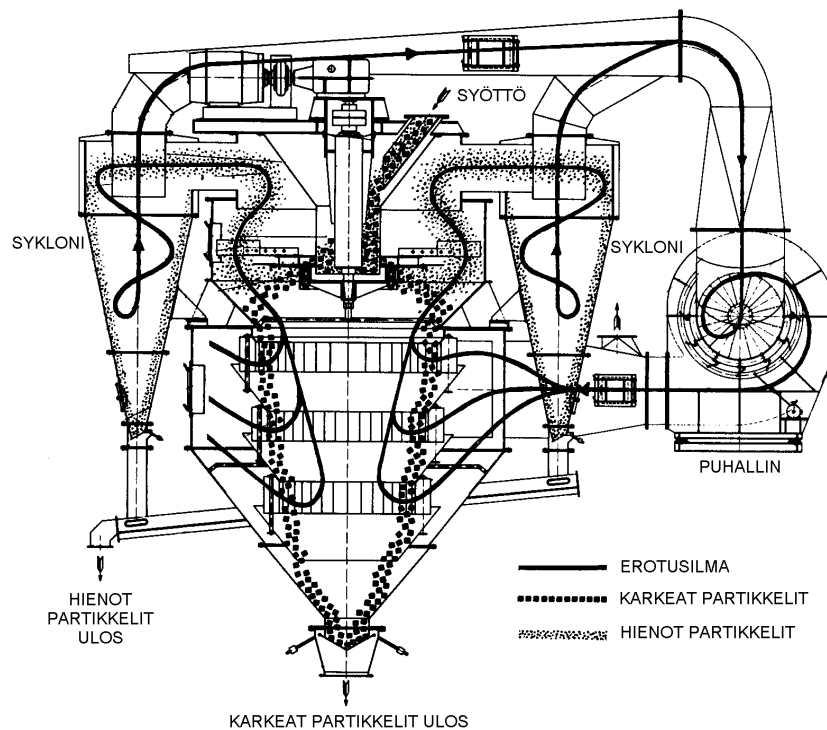


Kuva 3.11 Ensimmäisen sukupolven luokittimien toimintaperiaate (Duda /2/)

3.9.2 Toisen sukupolven luokittimet

Toisen sukupolven luokittimet sisältävät erillisen puhaltimen luokitinilmalle. Variaatioita on useita riippuen milta valmistajalta kyseinen luokitin on. Yleisiä toisen sukupolven luokittimia ovat Hischmann (kuva 3.12) ja Krupp Polysiuksen Cyklopol.

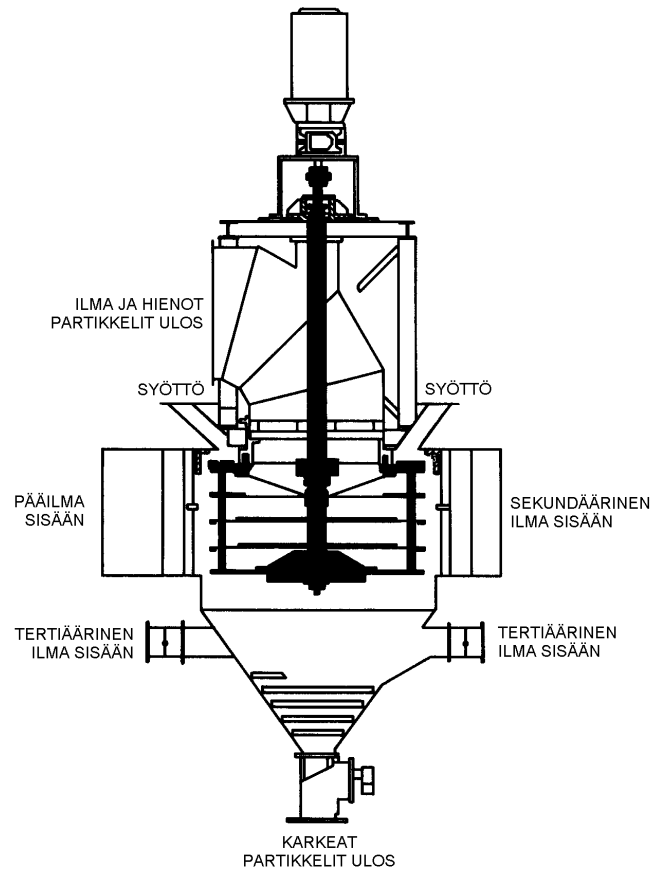
Hischmann käsittää itse luokittimen lisäksi ulkopuolisen puhaltimen ja kaksi sykklonia, joissa hienot jakeet erotetaan kiertoilmasta. Luokittimen sisällä olevalla roottorilla aiheutetaan puhaltimen ilmavirtaan nähden vastakkainen ilmavirta, joka painaa karkeat jakeet luokittimen alaosaan. Hienot jakeet kulkeutuvat ensimmäisen sukupolven luokittimien tapaan sälepeltien läpi ja sen jälkeen puhaltimen ilmavirran vaikutuksesta sykkloneihin. Hischmann-luokitin on tehokas kunhan sen kuormitusaste säilyy kohtuullisena.



Kuva 3.12 Hischmann-luokitin (Duda /2/)

3.9.3 Kolmannen sukupolven luokittimet

Kolmannen sukupolven luokittimista eli korkeatehokkuusluokittimista ensimmäinen oli O-SEPA-luokitin (kuva 3.13), joka tuli markkinoille 1980-luvun puolessavälissä. Siinä materiaalin syöttö tapahtuu ylhäältä luokittimen molemmilta puolilta.

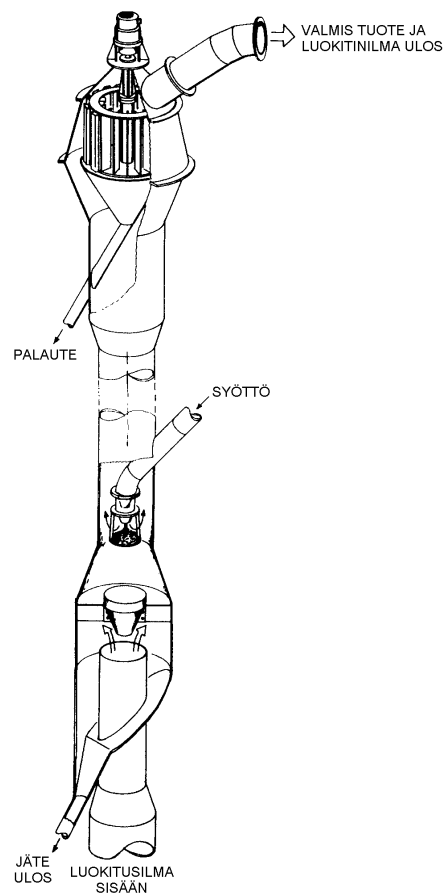


Kuva 3.13 O-SEPA-luokitin (Duda /2/)

Onuman ja Iton /26/ mukaan materiaali välittömästi luokittimen sisälle jouduttuaan joutuu hajottajalevyn ja luokittimeen nähden tangentiaalisen ilmavirran vaikutuksesta voimakkaaseen pyörteeseen. Ilmavirtaan aiheutetaan siipien ja ohjainlevyjen avulla tarkasti vaakatasoinen pyörre, johon materiaali joutuu. Luokitus tapahtuu tässä pyörteessä ilmavirran aiheuttaman vetovoiman ja keskipakovoiman vaikutuksesta. Ilmavirran mukana kulkeutuvat hienot jakeet suodatetaan esim. pussisuodattimilla ilmavirrasta. Kun karkeat jakeet valuvat luokittimen pohjaa kohti kohdistetaan niihin luokittimien alaosassa vielä toinen ilmavirta, joka luokittelee jakeet toistamiseen. Onuman ja Iton /26/ mukaan näin varmistetaan erittäin tarkka luokittelu. Luokittimen pohjalle kerättävät karkeat jakeet kierrätetään takaisin myllyyn. Luokitin on energiataloudellisesti edullinen, koska partikkelien ja roottorin lapojen välinen nopeusero on hyvin pieni.

Laite on myös kooltaan hyvin pieni, sillä käytännössä luokitusta tapahtuu luokittimen sisällä lähes kaikkialla ja luokituksen vaadittavan pyörteen tuottaminen tapahtuu vain pienillä siivillä. Luokituksen raejakaumaa pystytään myös helposti säätämään muuttamalla luokittimen roottorin pyörimisnopeutta.

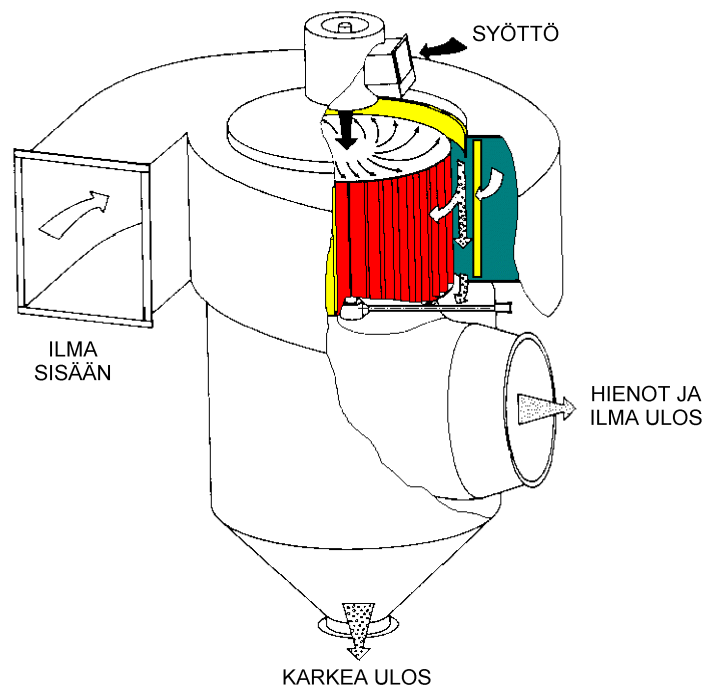
Kaikille kolmannen sukupolven luokittimille on yleensä yhteistä korkea roottori ja sen ympärillä ohjaussäleet, jotka jakavat ilman sekä luokiteltavan materiaalin tasaisesti roottorille ja keräävät karkeat jakeet alapuolella olevaan suppiloon. Poikkeuksiakin löytyy kuten suosittu SEPAX-luokitin (kuva 3.14), joka yhdistelmäluokittimena poikkeaa hieman konstruktioltaan muista kolmannen sukupolven luokittimista.



Kuva 3.14 SEPAX-luokitin (Wilck /12/)

Siinä luokittimen alaosassa eli ns. dispersio-osassa ilma ja luokiteltava materiaali esim. sementti sekoitetaan toisiinsa. Luokittimen yläosa on varsinainen luokitinosa ja se on yhdistetty dispersio-osaan nousuputkella. Oleellisin ero muihin kolmannen sukupolven luokittimiin on ilman tulosuunta, joka SEPAX-luokittimessa on siis alhaalta päin. Onuman ja Iton /26/ mukaan konstruktion etuna on luokittimeen irtonaisten metallikappaleiden täydellinen erotus jo luokittimen dispersio-osassa ennen varsinaiseen luokittimeen joutumista, missä ne saattaisivat aiheuttaa vahinkoa.

F.L. Smidthin SEPAX-luokittinta vastaa Krupp Polysiuksen SEPOL-luokitin (kuva 3.15). Siinä ilman ja hiukkasten kulkusuunta on SEPAX:iin nähden päinvastainen eli ylhäältä alaspäin. Näin ollen SEPOL on SEPAX:ia hieman energiataloudellisempi, mutta muuten vastaava korkeatehokkuusluokitin.



Kuva 3.15 SEPOL-luokitin (Ahlfors /34/)

Muita korkeatehokkuusluokittimia ovat mm. O&K-ristivirtaus- sekä SD-luokitin. Kuulamylyjä varten on kehitetty muutamia täysin niitä varten räätälöityjä luokitintyyppejä, kuten TSV- ja Sepmaster SKS-L-luokittimet. Molemmissa osa syötöstä tulee kuulamylyyn läpi virtaavan ilman mukana ja osa elevaattoreilla myllystä. Pystymyllyjen yleistyminen on tuonut markkinoille myös pystymyllyn ja korkeatehokkuusluokittimen yhdistelmän. Siinä luokitin sijaitsee jauhinvalssien välittömässä läheisyydessä saman kuoren sisällä. Näin saavutetaan luonnollisesti tehokkaampi luokitustapahtuma ja mahdollisimman alhainen energiankulutus.

3.9.4 Luokittimien vaikutus energiankulutukseen

Luokittimen toiminnalla on selvä vaikutus jauhatuksen energiankulutukseen. Onuma ja Ito /26/ ovat tutkineet Japanissa Fujiwaran sementtitehtaalla erään suljetun sementinjauhatuspiirin sähkönkulutusta. Kyseiseen, kuulamylyllä varustettuun piiriin, uusittiin luokitin ensimmäisen sukupolven luokittimesta ja kolmannen sukupolven O-SEPA-luokittimeen. Jauhetun sementin hienous oli molemmilla systeemeillä sama.

Taulukko 3.3 Erään kuulamylyjauhatuspiirin ominaissähkönkulutus perinteisellä luokittimella ja O-SEPA-korkeatehokkuusluokittimella (Onuma ja Ito /26/)

Luokittimen tyyppi	Sähkön kulutus (kWh/t sementtiä)				
	Mylly	Luokitin	Elevaattori	Suodatinpuhallin	Yhteensä
Perinteinen	36,9	4,0	0,6	1,7	43,2
O-SEPA	31,0	0,7	0,5	2,6	34,8

Kuten taulukosta 3.3 nähdään sähkönkulutuksessa säästettiin 8,4 kWh sementtitonnia kohti. Suurin säästö saatiin juuri itse myllystä, jonka energiankulutus pieneni luokituksen tarkentuessa. Myös itse luokittimen sähkönkulutus pieneni ratkaisevasti.

3.10 Kiintoaineiden kuljetus

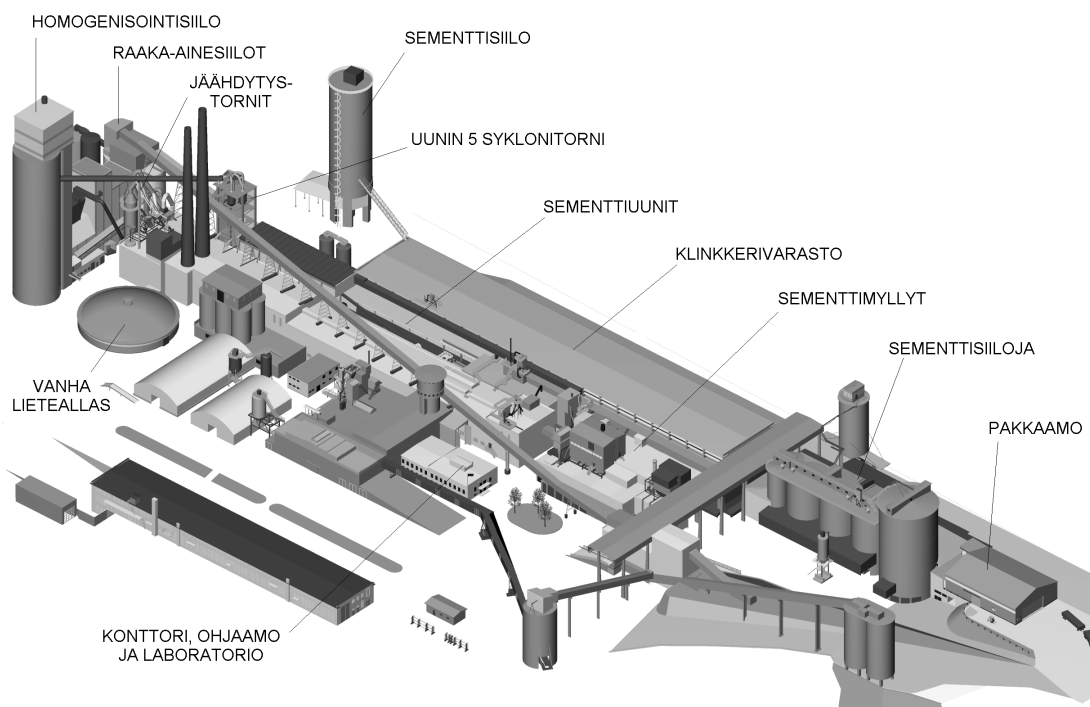
Sementtiteollisuudessa joudutaan kuljettamaan verrattain suuria määriä kiinteitä aineita ja siksi onkin aiheellista perehtyä kiintoaineiden kuljetuksen vaatimaan energiankulutukseen. Kuljetus voi tapahtua joko mekaanisesti tai pneumaattisesti.

Pneumaattisen kuljetuksen ollessa kyseessä tulee kuljetettavan materiaalin olla verrattain hienoa tai kevyttä, jotta kuljetus on ylipäättänsä mahdollinen. Hilgraffin /27/ mukaan pneumaattisen kuljetuksen energiankulutus on erityisen riippuvainen kuljettavasta materiaalista ja vallitsevista kuljetusolosuhteista. Näin ollen mekaanisen ja pneumaattisen kuljetuksen energiataloudellinen vertailu on mahdollista vain jos kuljetusolosuhteet ja kuljetettava materiaali ovat täysin samat molemmille systeemeille. Hilgraf /27/ on esittänyt, että vaakatasoisessa kuljetuksessa hihnakuljettimen ja ilmarännin energiankulutus oli samaa kokoluokkaa kun taas pneumaattinen putkikuljetus vaati moninkertaisesti edellä mainittujen kuljetusmuotojen vaatiman energiamäärän. Pystysuorassa kuljetuksessa energiataloudellisin vaihtoehto oli paljon käytetty kauhaelevaattori. Pneumaattinen putkikuljetus tarjoaa vaihtoehtoisen kuljetusmuodon kiintoaineille, mutta energiataloudellisesti se kannattaa vain jos koko kuljetussysteemi on täydellisesti optimoitu juuri kuljetettavalle materiaalille.

4 LAPPEENRANNAN SEMENTTITEHTAAN PROSESSIKUVAUS

4.1 Johdanto

Lappeenrannan sementtitehtaan valmistusprosessi, kuten kaikkien muidenkin sementtitehtaiden prosessit, voidaan jakaa kolmeen osaan: raaka-ainepäähän, uuneihin ja sementin jauhatukseen. Kuvassa 4.1 on esitetty Lappeenrannan sementtitehtaan 3D-malli pohjoisesta kuvattuna.



Kuva 4.1 Lappeenrannan sementtitehtaan 3D-malli pohjoisesta kuvattuna (Finnsementti /42/)

Lappeenrannan sementtitehtaalla raaka-ainepäässä kalkkikivi tulee tehtaalle jo valmiiksi murskattuna läheiseltä Partek Nordkalkin avolouhokselta. Muut raaka-aineet tulevat tehtaalle myös jo valmiina murskana, joten näin ollen louhintaa ja murskausta ei tässä työssä käsitellä. Kuitenkin monissa muissa sementinvalmistusprosesseissa louhinta ja murskaus lasketaan osaksi prosessia.

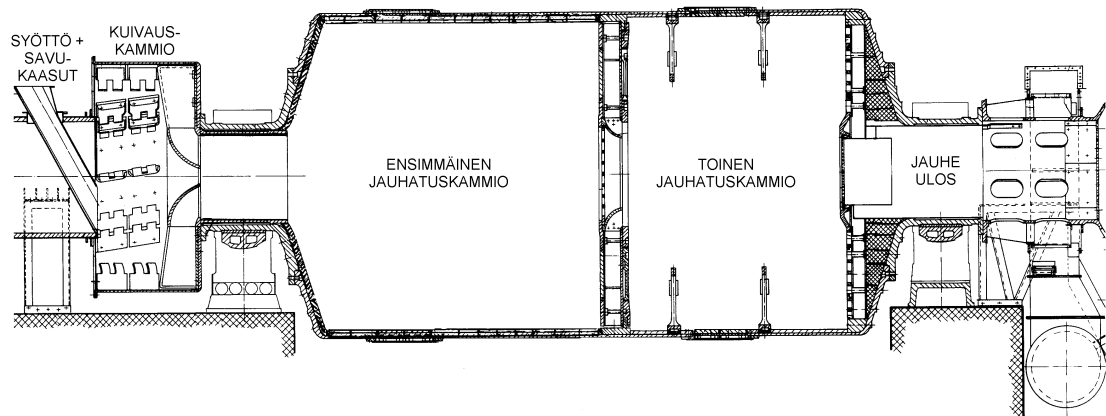
Tehtaan raaka-ainepäässä raaka-aineet lisäksi jauhetaan raakamylyssä sekä homogenisoidaan homogenisointisiilossa. Toisen prosessin osa-alueen muodostavat sementtiuunit, joissa sementin valmistuksessa vaadittavat kemialliset reaktiot tapahtuvat. Uuneja Lappeenrannan tehtaalla on kaksi kappaletta ja niistä käytetään nimitystä uuni 4 (U4) sekä uuni 5 (U5). Kolmannessa prosessiosassa uuneista saatava välituote eli klinkkeri jauhetaan sementtimylyissä yhdessä kipsin ja seosaineiden kanssa. Tällöin sementti saa lopullisen muotonsa, jonka jälkeen tuote on valmis lähtemään kuluttajille.

4.2 Lappeenrannan sementtitehtaalla käytettävät raaka-aineet

Lappeenrannan sementtitehtaalla käytetään läheiseltä Partek Nordkalk Oyj:n avolouhokselta saatavaa kalkkikiveä, joka luokitellaan peruslaadun kiveksi eli ”+kiveksi”, hyvän peruslaadun kiveksi eli ”++kiveksi” ja mustaksi kiveksi eli ”-kiveksi”. Hyvän peruslaadun kivi on lähes puhdasta kalkkikiveä kun taas peruslaadun kivi sisältää hieman myös muita mineraaleja ja se on tehtaalla ylivoimaisesti eniten käytetty raaka-aine. Mustakivi on taas se osuus, joka jää jäljelle kun hyvän peruslaadun kivi erotetaan peruslaadun kivistä. Kaikkein puhtainta kivilaatua eli ”++kiveä” käytetään vain prosessin säätöön ja sen syötön määrä riippuu siitä kuinka hyvälaatuista ”+kivi” on. Lisäksi raaka-ainepäässä raakamylyyn syötetään Hyvärilän kiveä eli diabaasia, valssihilsettä ja lentotuhkaa. Diabaasi toimii pääasiallisena piin ja alumiinin lähteenä, lentotuhkalla säädetään alumiinitasoa ja valssihilseellä rautatasoa.

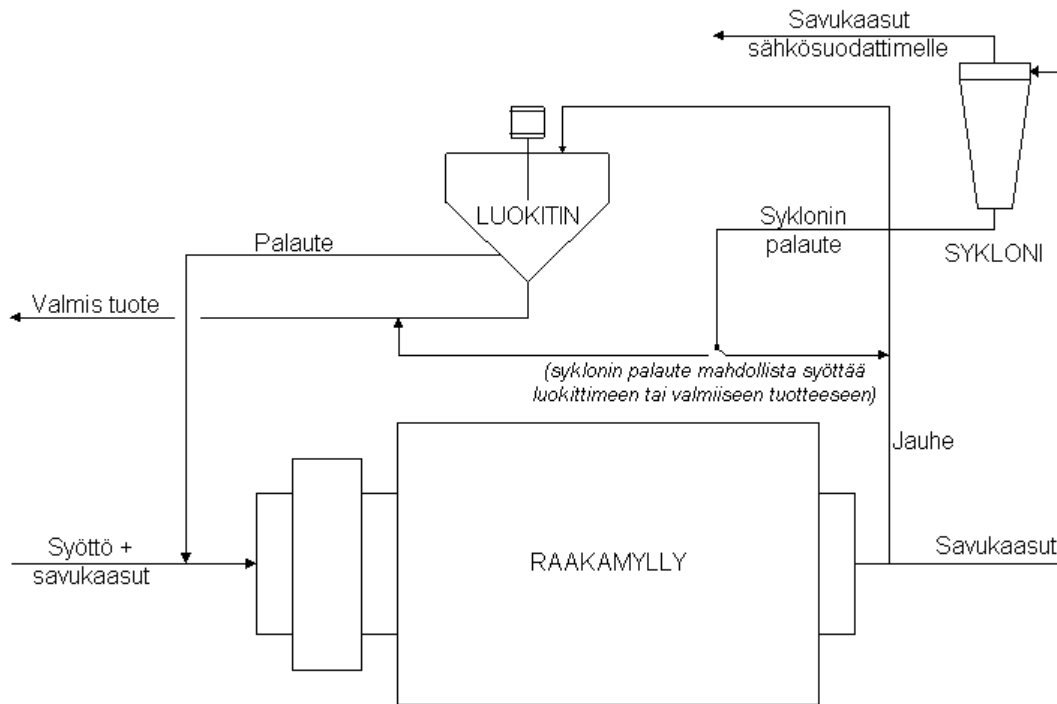
4.3 Raakajauhatus

Raaka-ainepäässä sementin valmistuksessa tarvittavat kivimurskat ja rautakuona johdetaan hihnakuuljettimia pitkin raaka-ainesiiiloihin. Lentotuhkalle on oma siilonsa, joka täytetään suoraan säiliöautosta. Siiloista mineraalit syötetään punnitsevilla hihnavaailla raakamylyyn (kuva 4.2), jossa jauhatus tapahtuu.



Kuva 4.2 Lappeenrannan sementtitehtaan raakamyly (Finnsementi /42/)

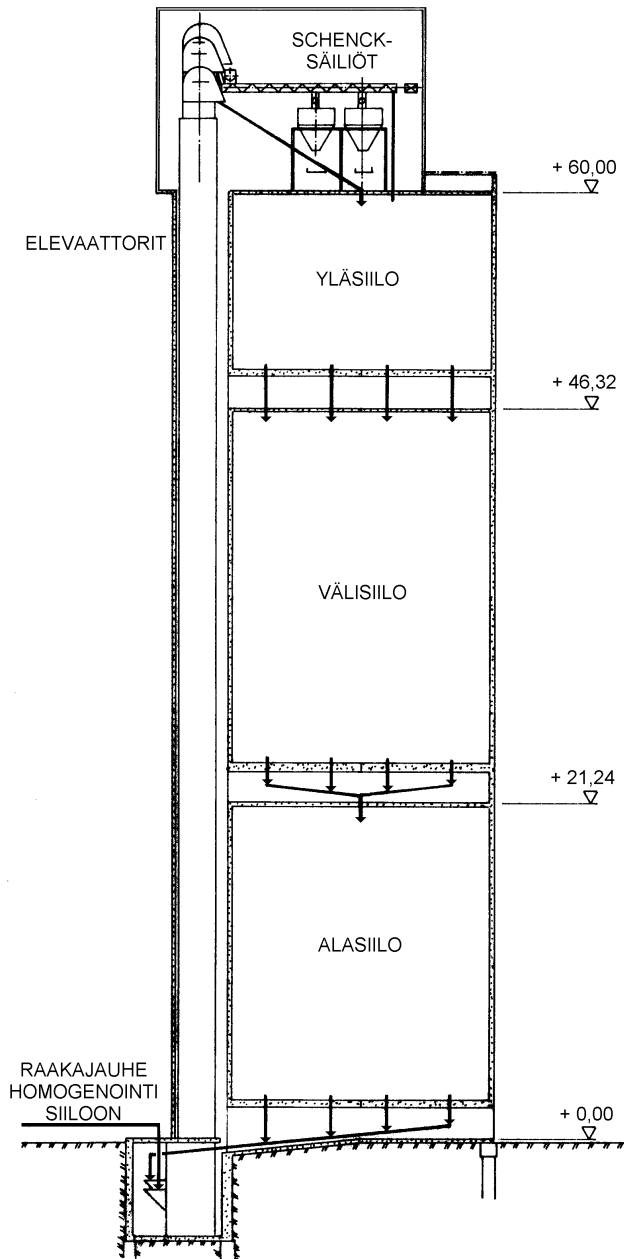
Mylly on tyypiltään F.L. Smidthin kaksikammioinen Tirax-Unidan-kuulamyly, jonka kapasiteetti on 100 - 120 t/h. Myllyä pyörittää 1850 kW:n sähkömoottori, halkaisijaltaan mylly on 4,25 metriä ja pituutta sillä on 7,2 metriä. Raakamylyn yhteydessä on erillinen rumpu, jossa raaka-aineita kuivataan ennen jauhatusta uunista 5 saatavilla savukaasuilla. Tämän jälkeen kivi kulkeutuu myllyn ensimmäiseen kammioon, jossa jauhatus alkaa. Tässä kammiossa kiveä jauhetaan halkaisijaltaan 100 millimetriä olevilla rautakuulilla. Myllyn toisessa jauhatuskammiossa, kivi jauhetaan hienommaksi sylinterin muotoisilla ja noin kaksi senttiä pitkillä ja sentin halkaisijaltaan olevilla rautakappaleilla eli Cylpebseillä. Savukaasut kulkevat koko raakamylyn läpi poistaen kosteutta kivistä jauhatuksen yhteydessä. Raakamylyn jälkeen ne kulkevat syklonin kautta sähkösuodattimelle. Syklonissa ja sähkösuodattimessa savukaasuista erotetaan mukana kulkeutunut hieno kiviaines pois. Suurin osa myllystä tulleesta jauhetusta kivistä kuitenkin kuljetetaan ruuvikuljettimen, elevaattorin ja ilmarännin kautta luokittimelle, jossa karkea kiviaines erotetaan hienosta. Luokitin on tyypiltään ensimmäistä sukupolvea edustava dynaaminen F.L. Smidthin CV-luokitin. Luokittimen jälkeen karkea kiviaines kuljetetaan takaisin raakamylyyn, kun taas hieno raakajauhe kuljetetaan yhdessä syklonin erottaman raakajauheen kanssa homogeenointisiilon elevaattoreille. Kuvassa 4.3 on esitetty Lappeenrannan sementtitehtaan raakamylypiiri.



Kuva 4.3 Lappeenrannan sementtitehtaan raakamyllypiiri

4.4 Raakajauheen homogenisointi

Raakajauheen homogenisointi tapahtuu kolmivaiheisessa homogenisointisiilossa, joka on esitetty kuvassa 4.4. Siilon varastokapasiteetti on yhteensä 12 000 tonnia jauhetta, josta yläsiilon osuus on noin 2000, välisiilon noin 6000 ja alasiilon noin 4000 tonnia. Siilon varastointikapasiteetti vastaa noin 5,5 vuorokauden klinkkerintuotantoa uunien toimiessa täydellä kapasiteetilla. Homogenointisiilossa elevaattoreita on kolme kappaletta: yksi raaka-jauheelle, yksi uunijauheelle ja yksi toimii varaelevaattorina. Raaka- ja uunijauhetta voidaan nostaa kuitenkin millä tahansa elevaattorilla tarpeen mukaan. Luokittimelta tuleva raakajauhe ohjataan halutulle elevaattorille sulkupelleillä ja ruuvikuljettimilla.



Kuva 4.4 Lappeenrannan sementtitehtaan homogenisointisiilo (Finnsementti /42/)

Elevaattorin ylösnostama raakajauhe johdetaan ilmaränniä pitkin yläsiiloon, joka toimii varsinaisen homogenisoinnin varastona. Ilmarännin toiminta perustuu ilmaan, jota puhalletaan kaltevassa rännissä olevan kankaan alapuolelle. Kankaan yläpuolella hieno kivijauhe kulkee kankaan läpi vuotavan ilman ja painovoiman avulla eteenpäin.

Kun välisiilossa on riittävästi tilaa pudotetaan koko yläsiilon sisältö välisiiloon putkia pitkin. Yläsiilon tyhjeneminen välisiiloon kestää sisällön määrästä riippuen noin puoli tuntia. Ylä- ja välisiiloihin tulee lisäksi uunijauheen ylivuotoputki homogenisointisiilorakennuksen katolla olevista uunijauhesiiloista. Välisiilosta raakajauhetta pudotetaan alasiilon ilmarännejä pitkin vuoroin toiselta ja vuoroin toiselta puolelta siiloa, jolloin raakajauhe homogenisoituu. Homogenisoitunutta raakajauhetta nimitetään uunijauheeksi. Alasiilosta uunijauhe kuljetaan ilmarännejä pitkin uunijauhe-elevaattorille, jonne tulee myös uunin 5 jäähdystornin ja sähkösuodattimen erottama pöly. Elevaattori nostaa uunijauheen homogenisointisiilon katolla oleviin Schenck-säiliöihin, joista jauhe syötetään molempiin uuneihin punnitsevilla hihnakuuljettimilla.

4.5 Sementtiuunit

Sementtiuuneja Lappeenrannan sementtitehtaalla on kaksi kappaletta: vuonna 1957 käyttöön otettu, 135 metriä pitkä ja halkaisijaltaan 3,6 – 3,95 metriä oleva uuni 4 ja 1967 käyttöön otettu, kaksivaiheisella sykloniesilämmitysjärjestelmällä varustettu, 95 metriä pitkä ja halkaisijaltaan 3,95 – 4,55 metriä oleva uuni 5. Molemmat uunit ovat tyypiltään F.L. Smidthin Unax-uuneja. Uunit on varustettu klinkkerin satelliittijäähdyttimillä, joissa jäähdytinputkia uunilla 4 on 10 kappaletta ja uunilla 5 11 kappaletta. Uunin 4 kapasiteetti on 600 – 650 tonnia klinkkeriä vuorokaudessa ja uunin 5 kapasiteetti on 700 – 750 tonnia klinkkeriä vuorokaudessa. Uunien sisällä on tulenkestävä vuoraus estämässä uunien manttelien kulumista.

4.6 Uunien polttoainejärjestelmät

Uunien polttoainejärjestelmät muodostavat oman prosessikonaisuutensa. Lappeenrannan sementtitehtailla käytetään polttoaineena kivihiilen ja petrokoksin seosta suhteessa 1:1. Petrokoksi on etenkin vanhemmilla öljynjalostamoilla sivutuotteena syntyvää kiinteätä sakkaa, joka omaa korkean lämpöarvon ja matalan tuhkapitoisuuden verrattuna esim. kivihiileen. Kivihiili on pääasiassa venäläistä, kun petrokoksia tuodaan mm. Pohjois-Amerikasta.

Polttoaine tuodaan tehtaalte kuorma-autoilla jo valmiiksi sekoitettuna oikeaan suhteeseensa. Vaikka polttoaine onkin kivihiilen ja petrokoksin seosta, Lappeenrannan sementtitehtailla puhutaan pelkästään hiilestä. Tehtaalla polttoaineseos on varastoituna raakahiilisiiloihin, joista se hihnavaa'alla punnitaan hiilimyllyyn jauhattavaksi. Hiilimyllyjä on Lappeenrannan sementtitehtaalla kaksi kappaletta, joista vanhempi hiilimylly 1 on varamyllynä. Lähes jatkuvasti pyörivä hiilimylly 2 on tyypiltään F.L. Smidthin Tirax-kuulamyly kapasiteetiltaan 10 t/h. Hiilimyllyn läpi johdetaan noin 270 – 300 °C:sta ilmaa uunin 5 polttimen yläpuolelta, jonka tarkoituksena on poistaa hiilestä kosteutta sekä toimia suodattimelle saakka hiilenkuljettimena. Hiilisuodattimen jälkeen ilma johdetaan puhaltimella ulos. Myllyn jälkeen, sykklonia muistuttavalla, staattisella luokittimella erotetaan jauhetusta polttoaineesta karkeaksi jäänyt osuus, joka syötetään takaisin myllyyn. Luokittimen jälkeen on pussisuodatin, josta hienoksi jauhettu hiili-petrokoksiseos voidaan kuljettaa ruuvikuljettimilla suoraan uunien hiilensyöttimille tai hienohiilivarastosiiloihin. Hienohiilivarastoista hiiltä otetaan ruuvikuljettimilla ja elevaattorilla hiilensyöttimille, joissa itsessään on pienet syöttösäiliöt. Hiilensyöttimet ovat Pfister DRV-roottorisyöttimiä, jotka punnitsevat ja syöttävät hiilipölyn polttimille yhdessä kompressorin kehittämän korkeapaineisen ilman kanssa. Polton tarvitsema ensiöilma tuotetaan polttimelle puhaltimella sekä roottorisyöttäjän kompressorilla. Hiilensyöttimeltä tuleva hiili-ilmaseos sekoitetaan juuri ennen poltinta puhaltimen tuottamaan ensiöilmaan. Polttimet ovat molemmilla uuneilla tyypiltään yksikanavaisia F.L. Smidthin Uniflow-polttimia, jossa ensiöilma sekoittuu hiili-ilmaseokseen jo polttimessa. Uunilla 5 käytetty puhaltimen ensiöilma imetään uunin 5 klinkkerijäähdyttimien päältä, joten se on hieman esilämmitettyä.

4.7 Sykloniesilämmitysjärjestelmä

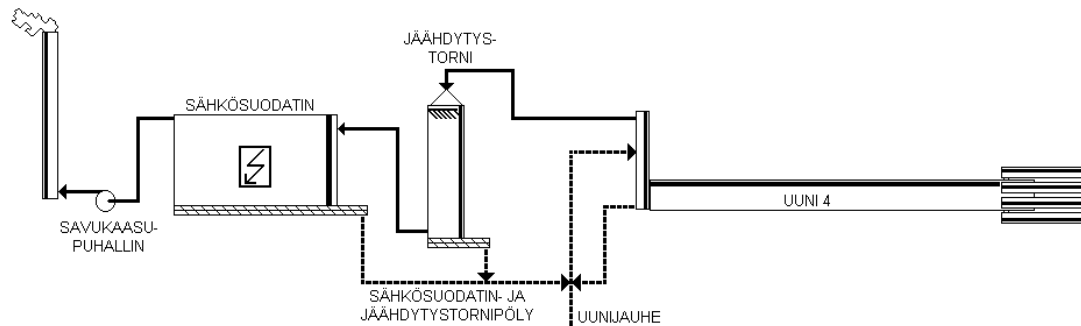
Molempiin uuneihin uunijauhe tulee siis homogenointisiilon katolla olevista Schenck-säiliöistä. Niistä jauhe johdetaan ilmarännejä pitkin lokerosyöttimien kautta uuneihin. Uuniin 4 jauhe syötetään suoraan ilman esilämmitystä, kun taas uunilla 5 uunijauhe esilämmitetään savukaasuilla kaksivaiheisessa sykklonijärjestelmässä. Ennen sykkloneita sijaitsevalla lokerosyöttimellä jauhe syötetään alemman vaiheen sykklonin savukaasujen ulostuloputkeen. Uunijauhe jatkaa savukaasujen mukana kolmeen pienempään sykkloniin.

Pienemmissä sykloneissa savukaasut erotetaan uunijauheesta, joka kulkeutuu syklonien pohjien kautta uunin savukaasukanavaan ja sieltä uuniin. Savukaasut johdetaan sykloneihin tangentiaalisesti, jolloin syklonin sisälle syntyvä pyörre erottaa pienet kiintoainehiukkaset suuremmista. Isot painavimmat partikkelit tippuvat syklonin pohjalle, kun kevyet partikkelit jäävät savukaasuun ja poistuvat sen mukana syklonin keskeltä. Ennen varsinaista uunia 5 uunijauhe on lämmennyt noin 800 °C:een sykloneissa, mutta kalsinointia ei ole alkanut vielä tapahtua.

4.8 Klinkkerin käsittely

Sementtiuuneissa jauhe kulkee uunien kiertoliikkeen ja uunien kaltevuuden vaikutuksesta eteenpäin lämpötilan noustessa jatkuvasti. Suurimmillaan materiaali lämpötila on polttovyöhykkeellä noin 1400 – 1450 °C. Klinkkeri saa lopullisen muotonsa satelliittijäähdyttimissä, joihin se tipahtaa uunin pyörimisliikkeen vaikutuksesta. Jäähdyttimissä tulikuuma klinkkeri kohtaa polton sekundääri-ilman lämmittäen sen, jolloin klinkkerin lämpötila tippuu noin 100 - 150 °C:een. Satelliittijäähdyttimiltä klinkkeri putoaa 50 mm:n välpälle, jonka ylite murskataan. Välpän alite ja murskattu ylite kuljetetaan laahauskuljettimien ja elevaattorien avulla klinkkerivarastoon. Klinkkerielevaattoreita on kolme kappaletta, joista uunin 5 klinkkerin nostamiseen voidaan käyttää kaikkia kolmea kun taas uunin 4 klinkkerille pystytään käyttämään vain kahta. Klinkkeri varastoidaan betoniseinämällä erotettuihin avovarastoihin yhdessä muiden sementinvalmistuksessa tarvittavien seosaineiden kanssa. Yleis-, rapid- ja pikasementteihin käytettävää klinkkeriä mahtuu varastoon noin 30 000 tonnia. Varastosta klinkkeri ja seosaineet siirretään kahmarinosturilla sementtimyllyjen syöttötaskuihin.

4.9 Uunin 4 savukaasujärjestelmä



Kuva 4.5 Uuni 4:n savukaasujärjestelmä (Finnsementti /42/)

Kuvan 4.5 mukaisesti savukaasut johdetaan uunilta 4 suoraan jäähdytystorniin, jossa sähkösuodattimen vaatima kosteustaso saavutetaan ja kaasujen lämpötila alenee noin 450 °C:sta alle 250 °C:een. Jäähdytystornissa savukaasut johdetaan tornin yläosaan, jonne myös suihkutetaan rengassuuttimella vettä. Veden syötön määrää säädetään poistuvien savukaasujen lämpötilan perusteella. Savukaasut ja höyrystynyt vesi johdetaan tornin alaosaan sähkösuodattimelle, jonka tehtävänä on poistaa kiintoainehiukkaset lähes täydellisesti savukaasuista.

Sähkösuodattimen (kuva 4.6) toiminta perustuu Dudan /2/ mukaan savukaasun ionisointiin korkeajännitteisillä elektrodeilla. Savukaasun sisältämät kiintoainehiukkaset saavat sähkösuodattimen sisällä koronapurkauksissa negatiivisen varauksen, jolloin positiivinen elektrodi alkaa vetää niitä puoleensa. Koskettaessaan elektrodi hiukkaset menettävät varauksensa ja ne voidaan helposti kerätä talteen suodattimen alaosaan. Sähkösuodattimen jälkeen savukaasupuhaltimen avustamana savukaasut johdetaan suoraan piippuun, jossa niiden lämpötila on noin 130 - 140 °C. Sähkösuodattimen erottama pöly, jäähdytystornin pohjalle kerääntynyt pöly ja uuniin savukaasukanavan pohjalle kertynyt pöly kuljetetaan ruuvikuljettimilla ja elevaattorilla takaisin uunin perältä lähtevään savukaasukanavaan ja takaisin uuniin.

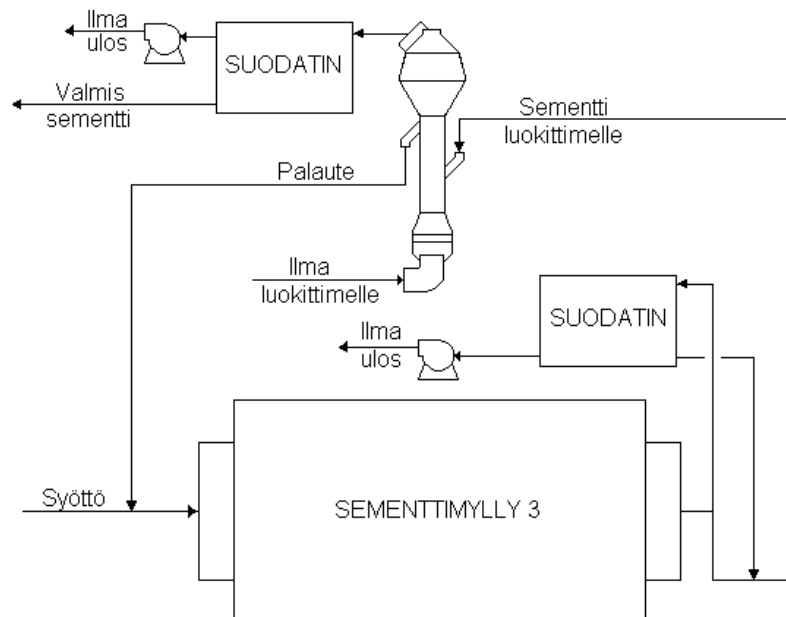
Välittömästi uunin jälkeen savukaasut johdetaan syklonijärjestelmään, jossa uunijauhe esilämmitetään. Sykloneiden jälkeen ennen savukaasupuhallinta savukaasujen lämpötila on noin 470 °C. Puhaltimen jälkeen osa savukaasuista johdetaan jäähdytystorniin ja osa raakamylylle. Ennen jäähdytystornia osa savukaasuista kierrätetään vielä lämmönvaihtimen kautta, joka siirtää lämpöenergiaa savukaasuista suljettuun vesikiertoon. Tästä ensiövesikierrrosta lämpöä siirretään lämmönvaihtimilla kaupungin kaukolämpöverkoston. Jäähdytystornin periaate uunilla 5 on sama kuin uunilla 4. Savukaasujen lämpötila ennen uunin 5 jäähdytystornia on noin 350 °C ja jäähdytystornin jälkeen noin 190 °C. Raakamylyltä tuleva savukaasukanava yhtyy jäähdytystornilta tulevaan savukaasukanavaan ennen sähkösuodatinta. Paine-erojen tasaamiseksi uunin 5 savukaasujärjestelmässä on myös toinen puhallin, joka sijaitsee homogointisiilossa aivan uunin 5 piipun huipulla. Sähkösuodattimen erottamasta pölystä osa, noin 20 – 30 %, ohjataan kellokytkimen avulla sähkösuodinpölysiiloon ja loput yhdessä jäähdytystornipölyn kanssa raakajauheen joukkoon homogointisiilossa. Sähkösuodinpölysiiloon kertynyt pöly kuljetetaan säiliöautolla täytemaaksi.

4.11 Anti-NO_x-vesilaitos

Kesän 1999 aikana Lappeenrannan sementtitehtailla otettiin käyttöön typen oksidipäästöjen alentamiseen tarkoitettu anti-NO_x-vesijärjestelmä. Laitos käsittää kaksi suurta jätevesisäiliötä, joihin toimitetaan tankkiautoilla jätevesien kierrätysjärjestelmän kautta tarkkaan analysoitua vesi-liuotinseosta. Toimitetulle seokselle on tarkat raja-arvot mm. raskasmetallien osalta. Liuoksen vesipitoisuuden tulee olla yli 90 prosenttia ja veteen liukenevia liuottimia siinä saa olla enintään 5 %. Seos sisältää veden lisäksi mm. valokuvateollisuuden kehitysvesiä, isopropanolia ja glykolia. Seosta ruiskutetaan pumpuilla toistaiseksi vain uunin 4 liekkiin, jolloin liekin lämpötila alenee ja typen oksidien määrä vähenee. Jäteveden mukana tulevat liuottimet palavat uunissa täydellisesti. Järjestelmällä pystytään hävittämään muuten hankalasti käsiteltäviä jätevesiä sekä pienentämään NO_x-päästöjä. Vesisuihkutus heikentää hieman uunin energiataloutta, mutta järjestelmä pienentää ratkaisevasti typen oksidien päästöjä.

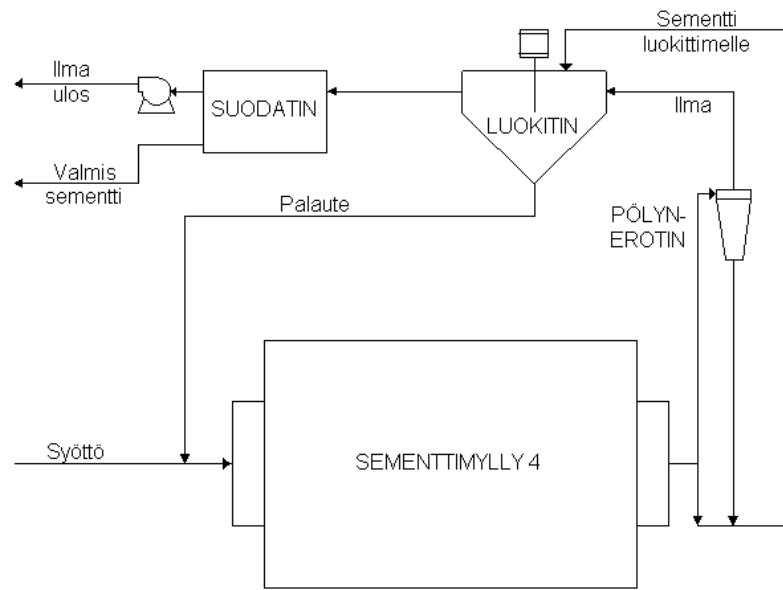
4.12 Sementtimyllyt ja niiden luokittimet

Käytössä olevia sementtimyllyjä on kolme kappaletta: sementtimyllyt 3, 4 ja 5. Sementtimyllyt toimivat suljetuissa piireissä ja niillä jauhetaan kaikkia tehtaalla valmistettavia sementtilaatuja. Klinkkeri ja muut sementin raaka-aineet syötetään syöttötaskuilta punnitsevilla hihnavaaioilla myllyihin. Lisäksi myllyihin syötetään luokittimilta tuleva karkea sementtiaines, rautasulfaatti ja jauhatuksen apuaine. Myllyjen luokitinpiirit poikkeavat aika paljon toisistaan, sillä jokaisen myllyn luokitin edustaa eri valmistajan näkemystä. Sementtimyllyn 3 kapasiteetti on sementtilaadusta riippuen maksimissaan 25 t/h. Mylly on F.L. Smidthin valmista kaksikammioinen Unidan-mylly, jonka halkaisija on 2,6 m ja pituus 12 m. Myllyn moottori on teholtaan 960 kW ja luokitin on tyypiltään FLS:n SEPAX-korkeatehokkuusluokitin. Myllyn jauhatuspiiri on esitetty kuvassa 4.8.



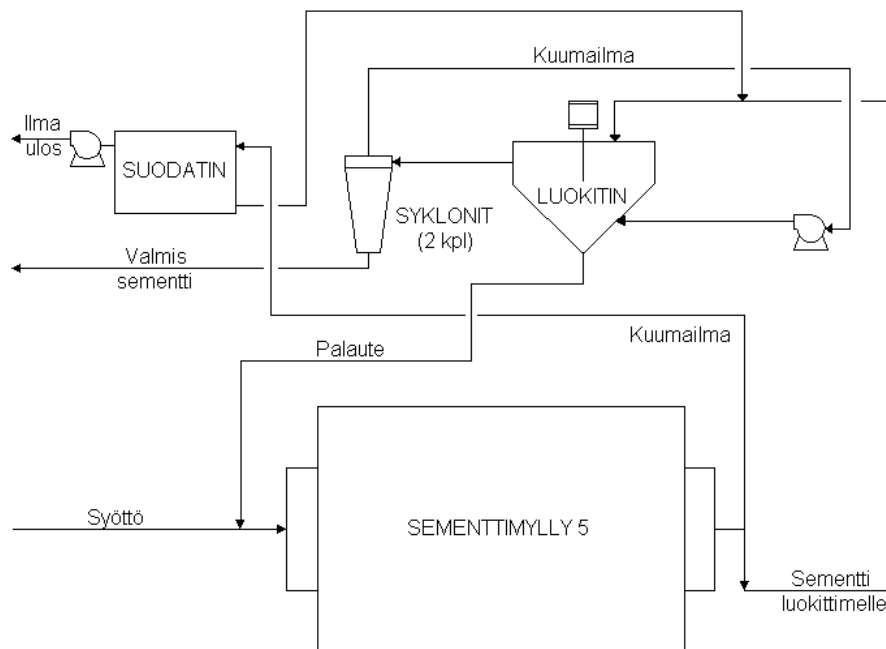
Kuva 4.8 Sementtimylly 3:n jauhatuspiiri

Sementtimylly 4 on myös FLS:n kaksikammioinen Unidan-mylly, jonka halkaisija on 2,9 m ja pituus 10,9 m. Myllyn moottori on myös teholtaan 960 kW ja luokitin on Krupp Polysiusksen SEPOL-korkeatehokkuusluokitin. Maksimikapasiteetiltaan sementtimylly 4 on 30 t/h. Myllyn jauhatuspiiri on esitetty kuvassa 4.9.



Kuva 4.9 Sementtimylly 4:n jauhatuspiiri

Sementtimylly 5 on sementtimyllyistä uusin. Sen maksimikapasiteetti on 50 t/h ja moottorin teho 1850 kW. Myllyn jauhatuspiiri on esitetty kuvassa 4.10.



Kuva 4.10 Sementtimylly 5:n jauhatuspiiri

Sementtimylly 5 on muiden myllyjen tapaan tyypiltään kaksikammioinen FLS:n Unidan. Halkaisijaltaan sementtimylly 5 on 3,5 m ja pituutta sillä on 12,0 m. Sementtimylly 5:n luokitin on kahdella syklonilla varustettu Hirschmann-luokitin. Sementtimyllyjen luokittimien jälkeen olevista pussisuodattimista hieno sementtijauhe kerätään kokoajasuppiloiden kautta FLS:n Fluxo-pumpuille, jotka syöttävät sementin paineilman avulla putkia pitkin sementtisiiloihin. Karkea sementtijauhe palautetaan luokittimilta takaisin myllyihin.

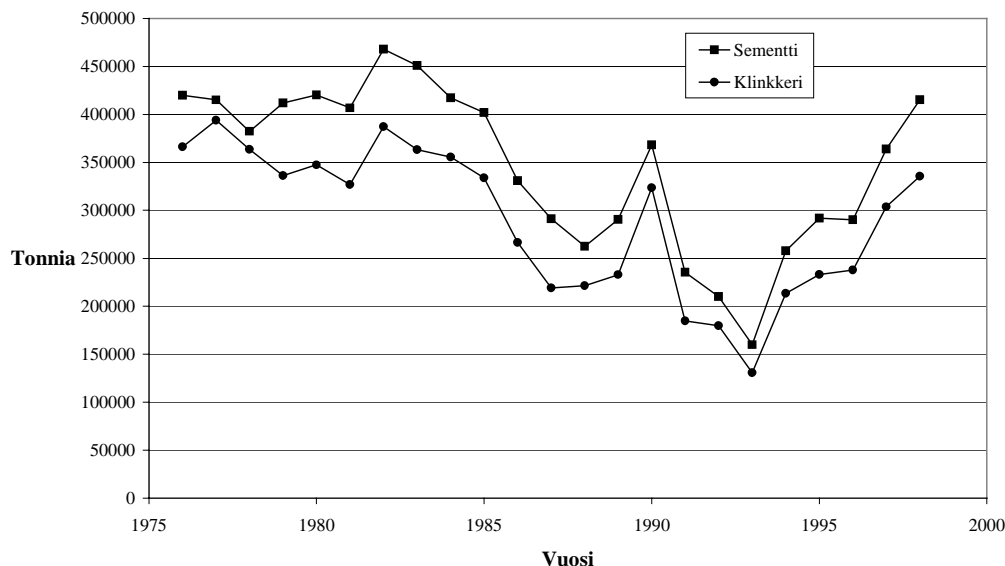
4.13 Sementin varastointi ja pakkaus

Sementtisiiloja tehtaalla on kahdeksan kappaletta, joista siilot 1 – 6 sijaitsevat toistensa yhteydessä. Suursiilot 7 ja 8 sijaitsevat hieman erillään muista siiloista. Suurin osa sementistä, noin 80 – 85 %, lastataan, joko suoraan siilosta tai ilmarännien avulla, säiliöautoihin ja edelleen kuljetettavaksi betoniteollisuuteen. Osa sementistä pakataan myös 1 m³:n suursäkkeihin ja kuljetetaan junalla Kazakhstaniin saakka. Pienrakentajille menevä sementti säkitetään ja lavataan pakkaamossa 40 kg:n säkkeihin.

4.14 Lappeenrannan sementtitehtaalla valmistettavat sementtilaadut

Lappeenrannan tehtaalla valmistetaan neljää sementtilaata, jotka tehdään kahdesta klinkkerilaadusta. Yleisementti (CEM II A 42,5) on perusementti, joka kovettuu normaalilla nopeudella. Rapidementti (CEM II A 42,5 R) on nopeasti kovettuva mm. talvibetonilaatujen valmistamiseen käytetty sementtilaatu. Pikasementti (CEM I 52,5 R) on taas erittäin nopeasti kovettuva sementtilaatu, jota käytetään mm. elementtitehtailla. Sulfaatteja sietävää SR-sementtiä (CEM I 42,5 SR) valmistetaan Lappeenrannan tehtaalla sitä varten valmistetusta SR-klinkeristä. Kuvassa 4.11 on näkyvissä Lappeenrannan sementtitehtaan tuotanto vuosilta 1976 – 1998.

Lappeenrannan sementtitehtaan tuotanto vuosina 1976 - 1998



Kuva 4.11 Lappeenrannan sementtitehtaan klinkkerin ja sementin tuotanto vuosilta 1976 – 1998 (Finnsementti /30/)

4.15 Prosessin hallinta ja laadunvalvonta

Lappeenrannan sementtitehtaalla prosessin ohjaus on toteutettu Damatic-automaatiojärjestelmällä. Ylemmän tason prosessin säätöä hoitaa kuitenkin HP1000-prosessitietokone, joka ohjaa mm. raakamylyä ja sementtimylyjä. Tehtaalla on yksi keskusvalvomo, josta hallitaan pakkaamoa lukuun ottamatta koko prosessia. Raakamylyyn mineraalien syöttösuhteita säädetään raakajauheesta tehtävän kemiallisen analyysin perusteella tunnin välein. Analyysi tehdään XRF-spektrometrillä eli röntgenfluoresenssi-spektrometrillä. Analysaattori syöttää analyysitulokset suoraan HP1000-prosessitietokoneelle, joka säätää laskemiensa ainesosasuhteiden eli modulien perusteella eri kivilaatujen syöttöhihnojen nopeuksia.

Kerran työvuorossa eli kolme kertaa vuorokaudessa tehdään lisäksi käsin 90 mm seulajäännösanalyysi, jonka tarkoituksena on seurata raakamyllyn senhetkistä tilaa. Raakajauheen homogenisoinnin jälkeen uunijauheesta tehdään kerran vuorokaudessa XRF-spektrometrillä kemiallinen analyysi, jolla varmistetaan uunijauheen laatu.

Klinkkeristä tehdään kerran vuorokaudessa seurannan vuoksi analyysi XRF-spektrometrillä. Tähän analyysiin uunienhoitajat keräävät klinkkerinäytteitä vuorokauden ajalta, jotta analyysi edustaisi mahdollisimman hyvin vuorokauden aikana valmistetun klinkkerin keskiarvoa. Lisäksi klinkkeristä tehdään kerran vuorossa XRF:llä SO_3 -analyysi klinkkerin rikkimäärän seuraamiseksi. Kerran vuorossa titrataan klinkkeristä vapaa kalkki, jolla seurataan klinkkerin polttoa. Jos vapaan kalkin määrä klinkkerissä ylittää 3,5 % on klinkkeri kevytklinkkeriä eli laadultaan heikkoa. Hiilimyllyn toimintaa seurataan hiilen kosteusanalyysillä ja 90 mm seulajäännöksellä, joista jälkimmäisellä säädetään hiilimyllyn syötön määrää.

Sementin laadunvalvonnassa on käytössä useita eri analyysejä, joista yksi tärkeimmistä on Blaine-analyysi eli ominaispinta-alan määrittäminen. Yleissementin hienous on noin $380 \text{ m}^2/\text{kg}$, rapidsementin noin $440 \text{ m}^2/\text{kg}$ ja pikasementin $530 \text{ m}^2/\text{kg}$. Sulfaatteja kestävä SR-sementin hienous on vain $330 \text{ m}^2/\text{kg}$. Sementistä tehdään myös seulajäännökset, joiden tarkoituksena on raakamyllyn tapaan sementtimyllyjen toiminnan seuraaminen eli kuinka hyvin mylly toimii ohjeparametrien puitteissa. Kipsin syötön määrää säädetään XRF-spektrometrillä tehtävän sementin SO_3 -analyysin perusteella. Vesiliukoisien kromaattien seurannalla säädetään kerran vuorossa ferrosulfaatin syöttöä. Ferrosulfaatin tehtävänä sementissä on passivoida vesiliukoinen kromi, joka luokitellaan ihmiselle haitalliseksi yli 2 ppm pitoisuuksina. Lisäksi seurataan kerran vuorossa sementin sitomisaikaa. Puristuslujuusmittauksia tehdään 1, 7 ja 28 vuorokauden ikäisistä sementtiprismoista eli kovettuneista sementtitangoista. Puristuslujuuden ja sitomisajan perusteella säädetään sementin sekaan lisättävän lisäainekiven määrää, joka vaihtelee sementtilaadusta riippuen 0 – 10 %:n välillä.

4.15.1 Moduulit

Raaka-aineiden syöttösuhteet raakamylyyn lasketaan kalsium-, alumiini- ja piioksidien ainesosaryhmien suhteita eli moduleita. Pii- eli silikaattimoduli on piidioksidin määrän suhde alumiini- ja rautaoksidien määrän. Peray /4/ ja Wilck /12/ laskevat piimodulin seuraavalla tavalla:

$$SiM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (4.1)$$

jossa	SiM	silikaattimoduli
	SiO_2	piidioksidin määrä syötössä [%]
	Al_2O_3	dialumiinitrioksidin määrä syötössä [%]
	Fe_2O_3	dirautatrioksidin määrä syötössä [%]

Aluminattimoduli on alumiinioksidin ja rautaoksidin välinen suhde ja se lasketaan seuraavasti:

$$AlM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (4.2)$$

jossa	AlM	aluminaattimoduli
-------	-------	-------------------

Kalkin suhdetta muihin pääkomponentteihin seurataan syötössä kalkkistandardilla. Peray /4/ laskee kalkkistandardin kahdella eri tavalla riippuen aluminaattimodulista. Jos aluminaattimoduli on yli 0,64 käyttää Peray /4/ yhtälöä:

$$CaStd = \frac{CaO}{2,8SiO_2 + 1,65Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3} \quad (4.3)$$

jossa	$CaStd$	kalkkistandardi
	CaO	kalsiumoksidin määrä syötössä [%]

Aluminaattimodulin ollessa alle 0,64 vastaava yhtälö Perayn /4/ mukaan on:

$$CaStd = \frac{CaO}{2,8SiO_2 + 1,1Al_2O_3 + 0,7Fe_2O_3} \quad (4.4)$$

Myös Duda /2/ laskee kalkkistandardin edellisen yhtälön osoittamalla tavalla, jos aluminaattimoduuli on alle 0,64. Lappeenrannan tehtailla silikaatti- ja aluminaattimodulit lasketaan yhtälöillä 4.1 ja 4.2, mutta kalkkistandardin laskemiseksi käytetään seuraavaa, Dudan /2/ mukaan tarkempien tutkimusten perusteella muodostettua yhtälöä.

$$CaStd = \frac{CaO}{2,8SiO_2 + 1,18Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} \quad (4.5)$$

Lappeenrannan tehtailla kalkkistandardi ilmaistaan aikaisemmista yhtälöistä poiketen sadalla kerrottuna. Yhtälöiden pienillä eroavaisuuksilla ei ole suurtakaan merkitystä, sillä niiden ensisijainen tarkoitus on laskea tehdaskohtaisia raaka-aineiden syöttösuhteita. Kalkkistandardista Peray /4/ kuitenkin toteaa, että jos uunijauheen kalkkistandardi ylittää 0,97 jää klinkkeriin vapaata kalkkia aina riippumatta siitä miten paljon klinkkeriä poltetaan.

4.15.2 Päästöt

Lappeenrannan sementtiuunien päästöjä valvotaan jatkuvatoimisilla NO_x- ja SO₂-analysointilaitteilla. Vähintään kerran kahdessa vuodessa suoritetaan lakisääteinen päästömittaus uunille 4 ja 5. Tällöin uunien ollessa normaalissa tilassa päästöjä seurataan ulkopuolisen konsultin toimesta. Uunille 5 suoritetaan päästömittaukset raakamylyn ollessa sekä päällä että seis. Savukaasuista mitataan kiintoaine-, NO_x-, CO-, SO₂-, O₂- ja raskasmetallipäästöt. Sähkösuodinpolystä mitataan lisäksi raskasmetallipitoisuudet. Vuoden 1998 päästömittausten tulokset ovat taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1 Lappeenrannan sementtitehtaan päästöarvoja vuodelta 1998
(Energia-Ekono Oy /15/)

PÄÄSTÖMITTAUS	U4	U5 (raakamylyllä päällä)	U5 (raakamylyllä seis)
Kiintoaine (mg/m ³ n)	34	23	56
NO _x (mg/m ³ n)	2759	1125	1529
CO (mg/m ³ n)	47	72	87
SO ₂ (mg/m ³ n)	127	29	64
O ₂ (t-%)	9,1	11,2	8,5

Sittemmin uunin 4 typen oksidien päästöt ovat ratkaisevasti alentuneet NO_x-vesi-järjestelmän käyttöönoton myötä.

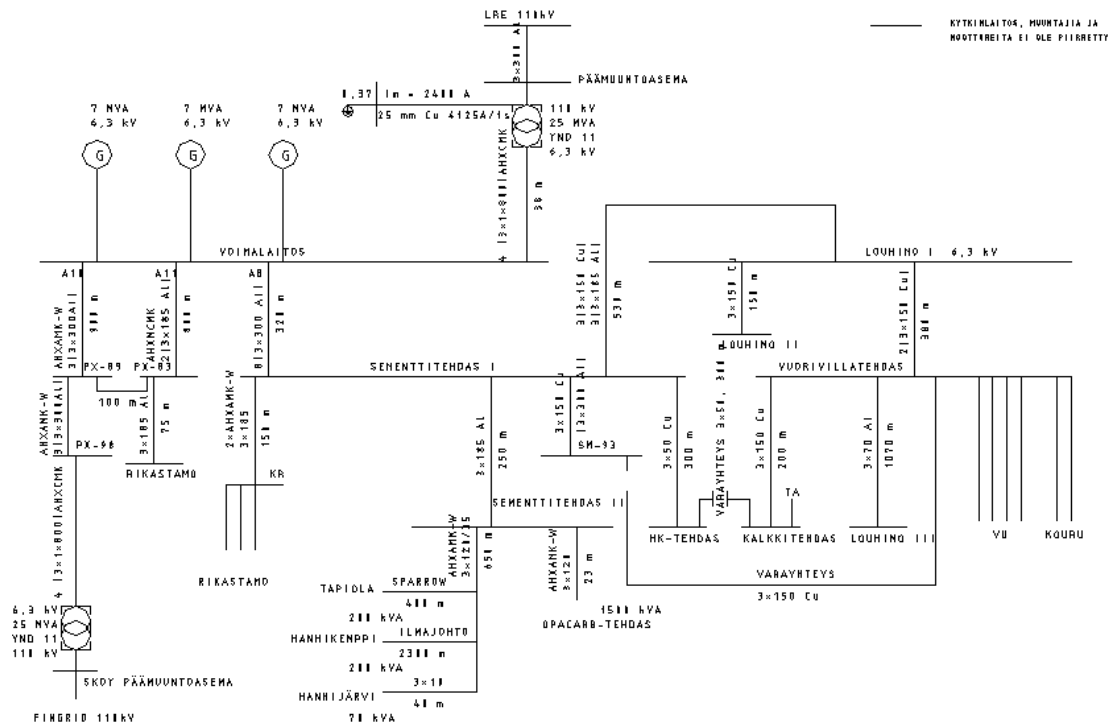
5 SÄHKÖNKULUTUS

5.1 Johdanto

Lappeenrannan sementtitehtaan sähkönkulutus on vuosina 1995-98 ollut keskimäärin 110,9 kWh tuotettua sementtitonnia kohti. Tämä vastaa hyvin kirjallisuudessa esiintyviä lukuja sementinvalmistuksen ominaissähkökulutuksesta. Kokonaissähkökulutuksesta Lappeenrannan sementtitehtaalla suurimman osuuden vie sementinjauhatus, johon on kulunut vuosina 1995-98 keskimäärin 57,9 kWh tuotettua sementtitonnia kohti. Vastaavasti samana aikana raakajauhatukseen on kulunut keskimäärin 39,3 kWh tuotettua klinkkeritonnia kohti. Yhdessä nämä vastaavat noin 85 % kokonaissähkökulutuksesta. Kun tähän lisätään polttoaineen jauhatus, on varsin selvää, että sähkönkulutuksen alentamiseen tähtäävät toimenpiteet tulee keskittää jauhatustekniikkaan.

5.2 Sähköverkon kuvaus

Sähkön Finnsementti Oy:n Lappeenrannan sementtitehdas ostaa Fortum Oyj:tä. Partekin Lappeenrannan tehdasalueelle sähkö tulee valtakunnallisen Fingrid Oyj:n kantaverkon ja Lappeenrannan energia Oy:n alueverkon kautta. Sähkö syötetään Partekin tehdasalueelle Partek Nordkalk Oyj:n omistuksessa olevan päämuuntoaseman kautta, jossa jännite alennetaan kanta- ja alueverkon 110 kV:sta tehdasverkon 6,3 kV:ksi. Tehdasverkko sekä tehdasalueen kytkinlaitokset ja muuntajat ovat Partek Nordkalkin omistuksessa. Tehdasalueen aikaisemman yhtenäisen omistussuhteen vuoksi tehdasverkko on varsin monimutkainen tehdasalueella nykyisin toimiviin yrityksiin nähden. Esimerkiksi sementtitehtaan kytkinlaitokselta lähtevät syötöt Partek Nordkalkin kalkkitehtaalle ja louhimolle sekä Paroc Oy:n vuorivillatehtaalle. Sementtitehtaan sähkönsyöttöjärjestelmään kuuluu kaksi kytkinlaitosta, joita kutsutaan sementtitehdas I:ksi ja sementtitehdas II:ksi. Tehdasalueen sähköverkosto on kuvattu kuvassa 5.1.



Kuva 5.1 Partek Oy:n Lappeenrannan tehdasalueen sähköverkosto kytkinlaitoksineen (Finnsementti /42/)

Sementtitehdas I on 6,3 kV:n kytkinlaitos, josta lähtee lukuisia syöttöjä ympäri tehdasaluetta. Sementtitehtaan osalta sementtitehdas I:ltä (S1) lähtee syötöt sementtitehdas II (S2) kytkinlaitokselle ja kaikille kolmelle sementtimyllylle. Lisäksi S1:ltä lähtee syötöt kahdelle 2000 kVA:n muuntajalle, jotka palvelevat pääasiassa sementtitehdasta. Muuntajien kennot ovat nimeltään 01A ja 01B. S2 on S1:n tapaan 6,3 kV:n kytkinlaitos, josta sementtitehtaalle lähtee syöttö raakamylylle ja yhteen 2000 kVA:n muuntajaan. Kyseistä muuntajaa kutsutaan kennona 13A. Raakamylyä, sementtimyllyjä ja sementin sosiaalituloja lukuun ottamatta sementtitehtaan sähkölaitteet ovat kolmen muuntajan eli 01A:n, 01B:n ja 13A:n perässä. Raakamyly ja sementtimyllyt saavat virran suoraan kytkinlaitoksilta 6,3 kV verkosta. Sementin sosiaalitulojen sähkönsyöttö tapahtuu Partek Nordkalkin kalsiittirikastamon kautta. Taulukossa 5.1 on kytkinlaitos S1:n sähkösyötöt sementtitehtaalle. Taulukossa 5.2 on muuntajan 01A ja taulukossa 5.3 muuntajan 01B sähkösyötöt tehtaalle. Taulukko 5.4 sisältää kytkinlaitos S2:n sähkösyötöt sementtitehtaalle ja taulukossa 5.5 on muuntajan 13A sähkösyötöt sementtitehtaalle. Lisäksi taulukossa 5.6 on sementin sosiaalitulojen sähkönsyöttö.

Taulukko 5.1 Kytkinlaitos sementtitehdas I:n sähkönsyötöt sementtitehtaalle

NIMITYS	KENNO	LAITEKUVAUS
Sementtimylly 4	0101	- Sementtimylly 4:n moottori (960 kW)
Sementtimylly 3	0102	- Sementtimylly 3:n moottori (960 kW)
Sementtitehdas II	0106	- Sementtitehdas II kytkinlaitoksen syöttö
Sementtimylly 5	0107	- Sementtimylly 5:n moottori (1850 kW)
Sementtimylly 1	0111	- Ei käytössä
Muuntaja 01A	01A	- Muuntaja (2000 kVA)
Muuntaja 01B	01B	- Muuntaja (2000 kVA)

Taulukko 5.2 Muuntajan 01A sähkönsyötöt sementtitehtaalle

NIMITYS	LÄHTÖ	LAITEKUVAUS
Sementtimylly 1 keskus	01A01	- SM 4:n syöttölaitteet, luokitin, kompressorit, puhallin ja kuljettimia - SM 5:n syöttölaitteita ja puhallin - Siilojen pölynpoisto - Laboratorion ilmastointi
Sementtimyllyt 3 & 4 keskus	01A02	- SM 3:n syöttölaitteita ja öljypumput - SM 4:n syöttölaitteita, vaa'at, puhaltimia ja elevaattori - Sementtimyllyjen luistinventtiilien ohjaukset
Pakkaamo keskus	01A03	- Siilojen ja pakkaamon laitteet
Uuni 5 polttolava	01A05	- Uuni 5:n apumoottori, hiilikierukat ja Pfister-hiilensyötin - Uuni 4:n Pfister-hiilensyötin - Hiilielevaattori, kuljettimia ja keskushuoneen ilmastointi
Uunihuone 2	01A08	- Ei käytössä
Hiiliosasto ”bunkkerikeskus”	01A09	- Uunien 4 ja 5 hiilensyöttimien kompressorit ja puhaltimet - Sulkusyöttimiä
Siirtonosturit	01A10	- Siirtonosturien laitteet (ei nosturi 5)

Taulukko 5.3 Muuntajan 01B sähkönsyötöt sementtitehtaalle

NIMITYS	LÄHTÖ	LAITEKUVAUS
Uuni 5 käyttömoottori	01B01	- Uuni 5:n käyttömoottori
Mylly 5	01B02	- SM 5:n kuljettimia, ilmarännejä, öljypumput, puhallin, suodatin, luokitin ja elevaattori
Klinkkerikeskus	01B03	- Uunien 4 ja 5 klinkkerielevaattorit, murskaimet ja laahauskuljettimet - Säätepelten ohjaukset
Laboratorio/konttori keskus	01B0409	- Laboratorio- ja konttorirakennuksen virransyöttö (Huom! 01B04 on Partek Nordkalkin kalsiittirikastamon virransyöttö)
Keskussiivouslaite	01B05	- Keskussiivouslaitteen virransyöttö
Polttolava (U4)	01B06	- Uuniosaston keskusvoitelu - Polttotunnelin valaistus
Hiilimyllyt	01B07	- Hiilimyllyt 1 ja 2 laitteineen
Uunimoottorikeskus (U4)	01B08	- Uuni 4:n apumoottori - Korjauskopin virransyöttö - Uunihuoneen valaistus
Savukaasupuhallin-keskus (U4)	01B09	- Uuni 4:n sähkösuodatin, poroelevaattori ja kierukka sekä syöttimiä ja kuljettimia - Uuni 5:n lämmönjohtopumppu - Anti-NO _x -vesilaitos
Sementtimylly 3 keskus	01B11	- SM 3:n uusia laitteita: luokitin, puhallin, pumput, kuljettimet ja ilmarännit - Nosturin 5:n virransyöttö

Taulukko 5.4 Kytkinlaitos sementtitehdas II:n sähkönsyötöt sementtitehtaalle

NIMITYS	KENNO	LAITEKUVAUS
Raakamylly	1303	- Raakamyllyn moottori (1850 kW)
Muuntaja 13A	13A	- Muuntaja (2000 kVA)

Taulukko 5.5 Muuntajan 13A sähkönsyötöt sementtitehtaalle

NIMITYS	LÄHTÖ	LAITEKUVAUS
Raaka-ainesiilon alakerta	13A01	- Homogenisointisiilon alakerran kuljettimia, ilmarännejä, puhaltimia ja kompressori
Raaka-ainesiilon yläkerta	13A03	- Raakajauhe-elevaattorit ja niiden apumoottorit - Homogenointisiilon yläkerran pölynpoisto
Myllyhuone	13A04	- Raakamyllyn apumoottori, öljypumput ja sulkupellit - Uuni 5:n jäähdytystornivesipumput - Hiilihihna
Raakamyllyn luokitin	13A05	- Raakamyllyn luokitin ja sen laitteita
Uuni 5 savukaasupuhallin	13A06	- Uuni 5:n syklonien jälkeinen savukaasupuhallin
Myllyhuone II	13A07	- Raakamyllyn elevaattori, kierukka syöttölaitteet, vaa'at ja jäähdytyspuhallin - Uuni 5:n sähkösuodatin ja nuohouslaitteita
Kivisiilot	13A09	- Hihnakuuljettimia ja -harjoja - Siilohihnan kääntömoottori - Uuni 4:n jäähdytystornivesipumput
Raakamyllyn puhallin	13A10	- Raakamyllyn savukaasupuhallin
Savukaasupuhallin 575	13A12	- Uuni 5:n homogenointisiilon huipulla oleva savukaasupuhallin
Uuni 4 moottori	13A16	- Uuni 4:n päämoottori
"Kipsinjauhatuskeskus"	13A17	- Uuni 4:n savukaasupuhallin, sähkösuodatin, syöttölaitteita ja säätöpeltejä
Siivouslaitteen pistorasia	13A19	- Ulkoisen siivouslaitteen virransyöttö
Siilo 8	13A20	- Siilo 8:n laitteet

Taulukko 5.6 Sementtitehtaan sosiaalitulojen sähkönsyöttö

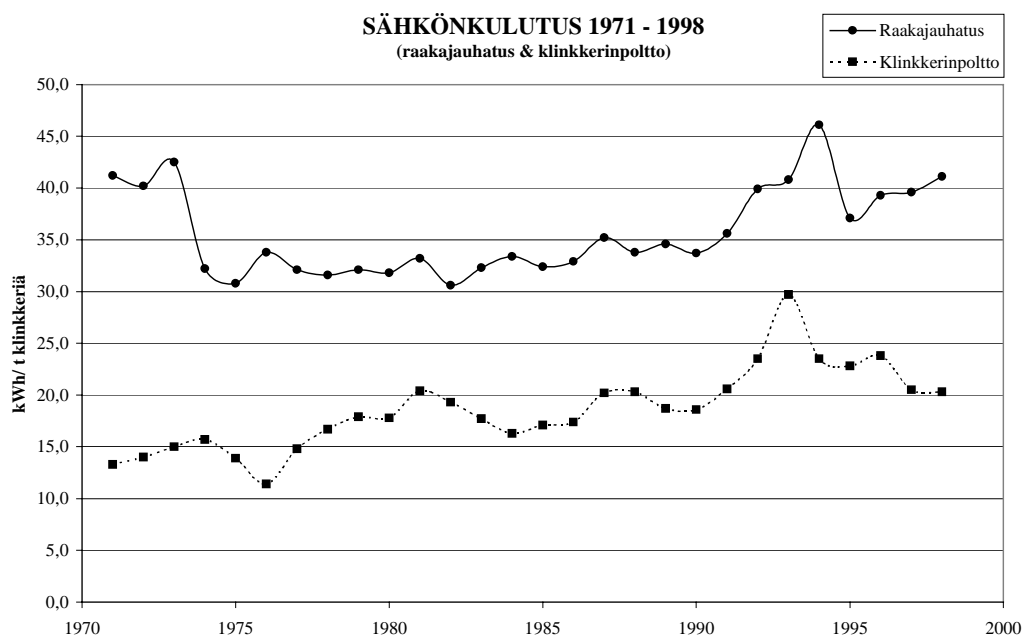
NIMITYS	LÄHTÖ	LAITEKUVAUS
Sementin sosiaalitulat	23B02	- Finnsementin sosiaalitulojen virransyöttö Partek Nordkalkin kalsiittirikastamon muuntajasta

Taulukoiden 5.1 – 5.6 positioiden virransyötöille on jokaiselle oma kilowattituntimittarinsa, joista osa on nykyaikaisia digitaalimittareita ja osa vanhempia analogisia laitteita. Vanhanaikaisia kilowattituntimittareita lukiessa tulee huomioida päävirran ja mittausvirran välinen suhde eli kerroin, jolla mittarin lukema muutetaan todelliseksi sähköenergian määräksi. Uudemmissa digitaalisissa mittalaitteissa tämä on hoidettu elektronisesti.

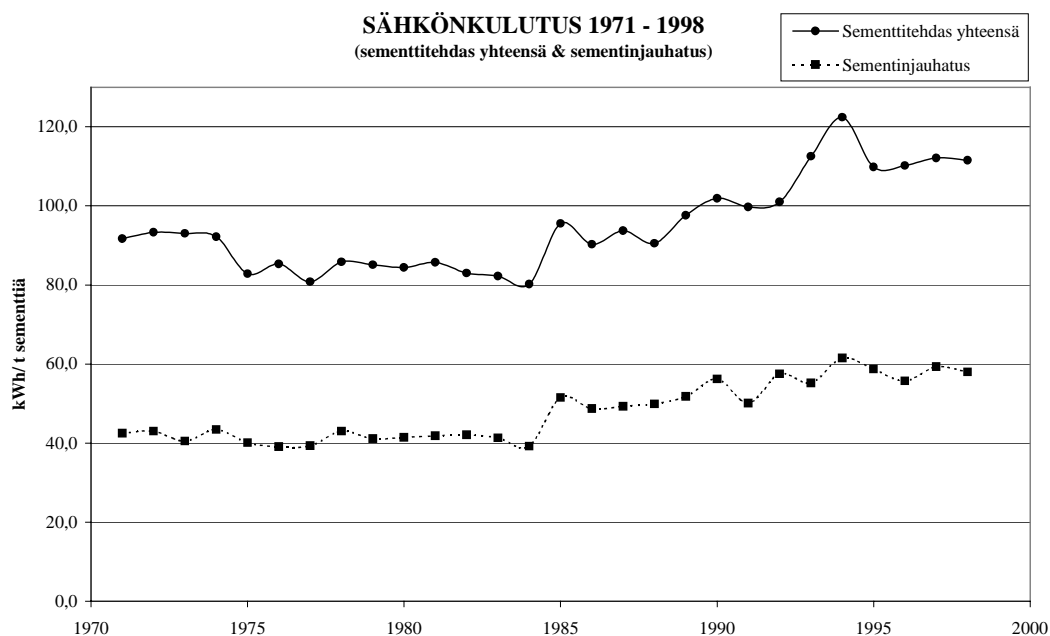
5.3 Sähkönkulutuksen historiaa

Sähkönkulutuksen kannalta ylivoimaisesti suurimmat kuluttajat ovat tehtaalla toimivat viisi myllyä: raakamyllly, hiilimyllly ja kolme sementtimyllyä. Kaikki ne ovat kuulamylllyjä, mutta niiden luokitinjärjestelmät poikkeavat toisistaan suuresti. Raakajauhituksen osalta nykyinen raakamyllly aloitti toimintansa vuonna 1967, samoin kuin nykyään käytössä oleva hiilimyllly. Molemmat myllyt ovat myös vuodelta 1967, samoin kuin homogenisointijärjestelmä ja uuni 5. Käytössä olevista sementtimyllyistä vanhin on sementtimylly 3, joka on jauhanut sementtiä vuodesta 1955. Vuonna 1998 myllyyn hankittiin uusi luokitin ja mylly muutettiin toimimaan suljetulla periaatteella. Kolmesta käytössä olevasta sementtimyllystä toiseksi vanhin on sementtimylly 4, joka toimi vuodesta 1957 märkäjauhituksen perustavana raakamylllynä. Mylly muutettiin sementtimyllyksi 1970-luvun alussa ja siihen uusittiin vuonna 1990 kolmannen sukupolven luokitin. Kolmas ja uusin sementtimylly 5 on toiminut vuodesta 1971. Vuonna 1977 mylly muutettiin toimimaan suljetulla periaatteella ja siihen lisättiin toista luokitinsukupolvea edustava Hischmann-luokitin.

Sähkönkulutuksen osalta käytävissä olevat vuosiraportit yltivät vuoteen 1971. Kulutustietoja löytyi raakajauhuksesta, klinkkerinpoltosta, sementinjauhuksesta ja koko tehtaan sähkönkulutuksesta. Raakajauhatus ja klinkkerinpoltto (kuva 5.2) on ilmaistu kWh:na tuotettua klinkkeritonnia kohti kun taas sementinjauhituksen ja koko tehtaan sähkönkulutukset (kuva 5.3) on ilmaistu tuotettua sementtitonnia kohti. Raakajauhatus käsittää raakamylllyn lisäksi myllyn ympärille sisältyvät apulaitteet kuten luokittimen. Klinkkerinpoltto sisältää uunien ja niiden tarvitsemien laitteiden sähkönkulutuksen. Sementinjauhatus taas käsittää kaikki sementtimyllyt ja niiden apulaitteet. Seuraavissa kuvaajissa on esitetty tehtaan sähkönkulutuksen kehitys vuodesta 1971 vuoteen 1998.



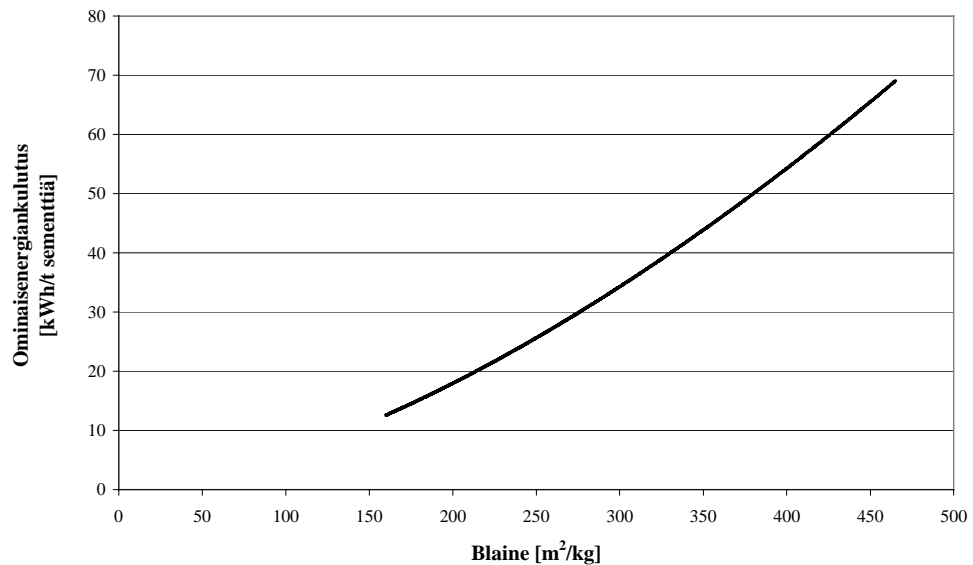
Kuva 5.2 Lappeenrannan sementtitehtaan ominaissähkönkulutus raakajauhauksen ja klinkkerinpolton osalta vuosilta 1971 – 1998 (Finnsementti /30/)



Kuva 5.3 Lappeenrannan sementtitehtaan ominaissähkönkulutus sementinjauhauksen ja koko sementtitehtaan osalta vuosilta 1971 – 1998 (Finnsementti /30/)

Sähkönkulutuksen suhteen Lappeenrannan tehdas ei tee poikkeusta normaalista kehityksestä sementtitehtaiden suhteen. Ellerbrock /24/ toteaa artikkelissaan Länsi-Saksan sementtitehtaiden sähkönkulutuksen nousseen 1960-luvulta 1980-luvun puoliväliin tultaessa 80:stä 110:een kWh/tonnia sementtiä. Lappeenrannan tehtailla sähkönkulutus on noussut täsmälleen samassa suhteessa tosin 10 vuotta Länsi-Saksan sementtitehtaita jäljessä. 1990-luvun puolessavälissä sähkönkulutus oli Lappeenrannan tehtailla saavuttanut 110 kWh tason sementtitonnia kohti, josta toivon mukaan kulutus lähtee laskemaan kuten Ellerbrockin /24/ mukaan Saksan sementtiteollisuudessa on tapahtunut. Siellä ollaan uudemmalla jauhatustekniikalla pystytty laskemaan sähkönkulutusta noin 5 – 10 kWh sementtitonnia kohti. Yksi syy sementinjauhatuksen sähkönkulutuksen kasvuun on sementin laatuvaatimusten tiukentuminen hienouden osalta. Sementin hienoutta on tasaisesti lisätty 1970-luvulta lähtien ja tämä tarkoittaa luokittimelta myllyyn palautettavan osuuden kasvattamista ja siten enemmän sähköenergiaa. Kuvassa 5.4 on sementin hienouden vaikutus sähköenergian ominaiskulutukseen.

Sementinjauhatuksen ominaisenergiankulutus



Kuva 5.4 Sementinjauhatuksen ominaisenergiankulutus (F.L. Smidth /41/)

Raakajauhatuksen osalta 1990-luvun alkupuolella oleva reilu sähkönkulutuksen kasvu, johtuu alhaisista tuotantomääristä lamavuosien takia. Tällöin raakamyllyn käyttöaste oli alhainen ja epäsäännöllinen käyttö lukuisine käynnistyksineen aiheutti kulutuksen kasvua. Vuodesta 1995 alkaen raakajauhatuksen tasaisesti kasvanut sähkönkulutus taas johtuu käytettävän kalkkikiven laadun huonontumisesta, joka on alentanut raakamyllyn kapasiteettia ja siten lisännyt sähkönkulutusta.

5.4 Luokittimien tehokkuustarkastelut

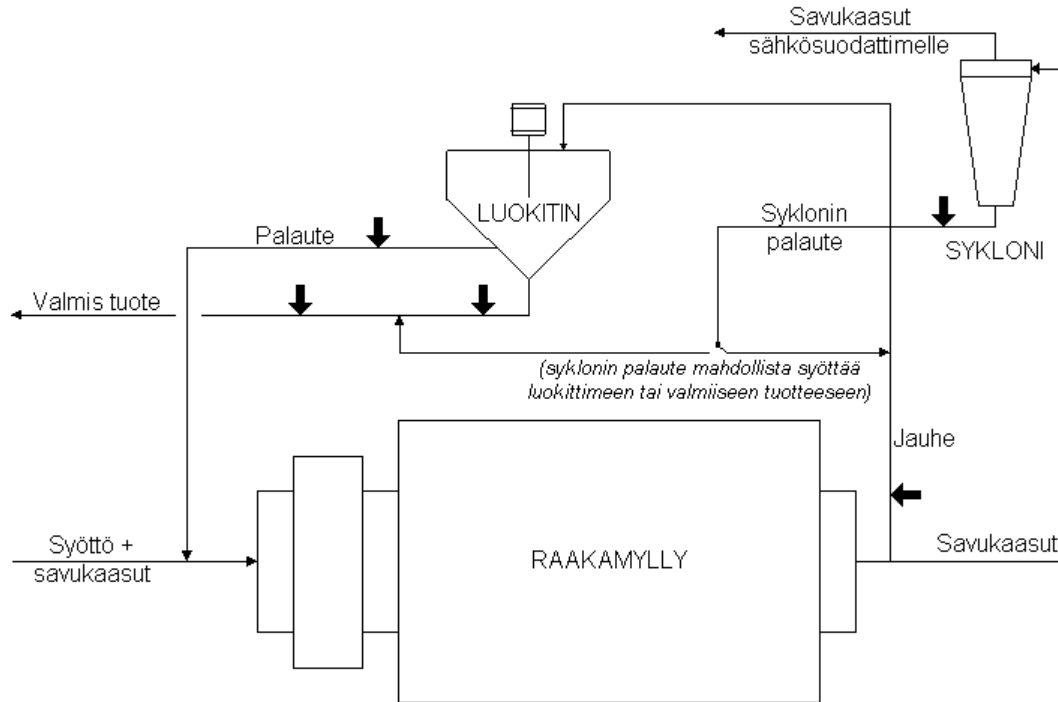
Kokeelliseen osaan kuului myös raakamyllyn sekä sementtimyllyjen luokittimien energiataloudelliset tehokkuustarkastelut. Näiden tarkoituksena oli selvittää luokittimien erotustehokkuus ja suurin mahdollinen energiansäästöpotentiaali. Raakamyllyn luokittimelle tehokkuustarkastelu tehtiin kahteen otteeseen, sillä työssä haluttiin nimenomaan tutustua raakamyllyn luokittimen toimintaan. Sementtimyllyjen luokittimille tehokkuustarkastelu tehtiin vertailun vuoksi kertaalleen.

5.4.1 Näytteenotto

5.4.1.1 Raakamyllly

Raakamyllyn luokittimen ympäriltä otettiin näytteitä viidestä eri kohtaa (kuva 5.5). Luokittimelle menevästä ainevirrasta otettiin näyte heti raakamyllyn jälkeen. Näytteenotto tapahtui juuri kyseistä tarkoitusta varten rakennetulla näytteenottimella, joka estää hienoimpien partikkelien imeytymisen kanavaan savukaasujen aiheuttaman alipaineen vaikutuksesta. Luokittimen alapuolelta otettiin näytteet myllyyn palautettavasta karkeasta materiaaliveirrasta ja valmiista hienosta materiaaliveirrasta. Lisäksi pölykierron laskemista varten otettiin näytteet syklonin erottamasta pölystä ja valmiista raakajauheesta ennen homogointisiiloa. Syklonilla erotetaan raakamyllyn läpi kulkeneista savukaasuista hienojakoinen pöly ennen savukaasujen ohjaamista sähkösuodattimelle. Pölykiertoon sisältyviä laskelmia ei kuitenkaan suoritettu, sillä syklonin erottama hieno materiaali ohjattiin näytteenottojen aikana takaisin luokittimen syöttöön.

Ennen molempia näytteenottokertoja varmistettiin, että raakamyly ja luokitin olivat käyneet tasaisesti useamman tunnin ajan.



Kuva 5.5 Näytteenottokohdat (merkitty nuolilla) raakamylypiiristä

5.4.1.2 Sementtimyllyt

Sementtimyllyjen luokittimien ympäriltä otettiin näytteitä luokittimen syötöstä, palautevirrasta myllyyn sekä valmiista tuotteesta. Näytteenotto tapahtui myllyjen mahdollisimman tasaisen käynnin yhteydessä. Luokittimien palautteista ja syötöistä näytteenotto oli hieman hankalaa kunnollisten näytteenottopaikkojen puuttumisen vuoksi. Näytteet jouduttiin ottamaan kauhalla suoraan ilmaränneistä, jolloin vaarana on kaikista pienimpien partikkelien imeytyminen näytekauhasta takaisin ilmaränniin.

5.4.2 Näytteiden analysointi

Hiukkaskokoanalyysiä varten näyte jouduttiin seulomaan 200 µm:n seulalla, sillä käytetyllä Cilas 715 granulometrillä ei voinut analysoida yli 200 µm:n partikkeleita. Tämän takia näytteistä seulottiin Alpine-alipaineseulalla tarkkaan punnittu näyte, jonka seulalle jäänyt ylite punnittiin Mettler PM600 laboratoriovaa'alla. Varsinaisen granulometrin antama partikkelijakauma korjattiin myöhemmin näillä punnitustuloksilla. Raakamyllyn tuloksille tällä korjauksella oli merkittävä vaikutus, mutta sementtimyllyillä palautekin oli niin hienoa ettei korjauksella ollut suurta vaikutusta tuloksiin. Varsinainen analysoitava näyte punnittiin Mettler PM600 laboratoriovaa'alla ja seulottiin käsin 200 µm:n seulalla, jolloin vaarana on ettei käsin seulonta vastaa täysin Alpine-alipaineseulalla seulottua korjausnäytettä. Kuitenkaan parempaa menetelmää ei ollut tarjolla. Granulometrin toiminta perustuu laser-valoon, joka osuessaan partikkeleihin taittuu partikkelin koosta riippuen eri tavalla. Laite mittaa heijastumien määrää ja määrittää niiden perusteella näytteen partikkelijakauman, joka voidaan ajatella seulasarjana. Analysointia ennen granulometrin täytyi lämmitä ja sillä tuli suorittaa taustan määrittäminen. Tämän jälkeen laitteessa käytettävään ioni-vaihdettuun veteen lisättiin 4 ml:aa Peramin F-dispergointiainetta ja hieman alle gramma näytettä. Seosta sekoitettiin minuutin verran ultraäänellä, jonka jälkeen laite antoi tuloksena partikkelijakauman. Granulometrin tuloksia tarkastettiin myös seulomalla näytteitä alipaineseulalla. Raakamyllyn näytteistä tehtiin lisäksi kemiallinen analyysi Philips PW 1480 röntgenfluoresenssispektrometrillä. Tällä haluttiin selvittää kuinka paljon luokitus vaikuttaa uunijauheen kemialliseen koostumukseen.

5.4.3 Luokituksen tehokkuuslaskelmat

Hienonnuksen energiankulutukseen liittyen on F.L. Smidthin /35/ mukaan julkaistu lukuisia teorioita, joista yksikään ei pohjautu luonnonlakeihin. Heiskasen /43/ mukaan ainoa edelleen käytössä oleva teoria on Bondin kolmas teoria. Siinä määritetään jauhattavalle materiaalille ”Work Index” eli energia, jonka materiaali tarvitsee jauhautuakseen äärettömästä koosta 80 %:sti alle 100 µm kokoon.

Myös Bondin kolmas teoria, kuten kaikki muutkin jauhatusteoriat on johdettavissa Walkerin vuonna 1937 esittämästä laista.

$$dE_0 = -c_0 \frac{dx_0}{x_0^{n_0}} \quad (5.1)$$

jossa	E_0	ominaisenergiankulutus
	c_0	vakio
	x_0	partikkelikoko
	n_0	vakio

Sementtiteollisuuteen suuntautuneet yritykset ovat kehittäneet tämän teorian pohjalta omia menetelmiä jauhatuspiirin energiankulutuksen estimoimiseksi. Seuraavat luokituksen tehokkuuslaskelmat perustuvat F.L. Smitdihin /11, 35/ laskumenetelmiin luokituksen tehokkuustarkastelusta. Luokituksen tehokkuus esitetään suoraan mahdollisena energiansäästönä kun siirrytään olemassa olevasta luokittimesta teoreettiseen ideaalitapaukseen.

5.4.3.1 Luokittimen energiansäästöpotentiaali

Ennen varsinaisia laskelmia granulometrin tuloksina antamien kumulatiivisten seulajakaumien korjaus laskettiin 200 µm seulan seulomistuloksilla. Raakamylyn palautteen suhteen korjaus oli varsin merkittävä, sillä yli kolmasosa näytteestä oli partikkelikooltaan yli 200 µm.

$$R_x = 100 - R_{x(Cilas)} \cdot \left(1 - \frac{m_{ylite(200)}}{m_{massa(200)}} \right) \quad (5.2)$$

jossa	R_x	korjattu kumulatiivinen ylitteen määrä (x = syöttö, palaute tai valmis) [%]
	$R_{x(Cilas)}$	granulometrin antama kumulatiivinen ylitteen määrä eri seulakooille [%]
	$m_{ylite(200)}$	punnittu ylitteen määrä 200 µm:n seulalta [g]
	$m_{massa(200)}$	seulottu kiintoaineen määrä 200 µm:n seulalla [g]

Edellä laskettujen korjattujen kumulatiivisten ylitteiden määrien perusteella suoritettiin varsinaiset luokittimen tehokkuuteen liittyvät laskelmat. Ensimmäisenä laskettiin F.L. Smidthin /11/ mukaan C-luku eli kiertokuorma, joka on myllyyn syötettävän materiaalin ja luokittimen palauttaman osuuden suhde luokittimen erottamaan hienoon materiaaliin. Teoriassa C-luku kertoo kuinka monta kertaa kunkin partikkelikoon hiukkanen kiertää keskimäärin jauhatuspiirin. Kiertokuorma on sitä suurempi mitä hienempi on haluttu lopputuote.

Korkeatehokkuusluokittimilla pystytään jauhatuspiiriä ajamaan hieman pienemmillä kiertokuormilla kuin vanhempien sukupolvien luokittimilla.

$$C = \frac{R_g - R_f}{R_g - R_m} \quad (5.3)$$

jossa	C	kiertokuorma
	R_g	korjattu kumulatiivinen ylitteen määrä luokittimen hylkäämästä karkeasta materiaalista [%]
	R_f	korjattu kumulatiivinen ylitteen määrä luokittimen erottamasta hienosta materiaalista [%]
	R_m	korjattu kumulatiivinen ylitteen luokittimen syötöstä [%]

R.F. (Recovery of Fines) kertoo Ahlforsin /34/ mukaan kuinka suuri osuus luokittimelle syötetystä jauheesta kulkeutuu valmiiseen tuotteeseen. *R.F.* lasketaan kaikille granulometrin antamille partikkelikooille.

$$R.F. = \frac{(R_g - R_f)}{(R_g - R_m)} \cdot \frac{1}{C} \cdot 100\% \quad (5.4)$$

jossa *R.F.* valmiin tuotteen osuus syötöstä [%]

R.C. (Recovery of Coarse) kertoo puolestaan kuinka paljon syötöstä joutuu luokittimen hylkäämäksi eri partikkelikoolla.

$$R.C. = \frac{R_g}{R_m} \cdot \frac{(C-1)}{C} \cdot 100\% \quad (5.5)$$

jossa *R.C.* palautteen osuus syötöstä [%]

I.R. (Ideal Recovery) on edellisten yhteisvaikutus eli kuinka paljon luokittimen syötöstä saatiin ”ideaalista” valmista tuotetta sekä palautetta.

$$I.R. = R.F. - R.C. - 100 \quad (5.6)$$

jossa *I.R.* ”ideaalisen” valmiin tuotteen sekä palautteen osuus syötöstä [%]

Jauhatuksen suurinta mahdollista energiansäästöpotentiaalia eli B_{max} :ia laskettaessa ideaalisen luokittimen oletetaan toimivan avoimessa piirissä eli karkeaa jaetta ei palautetakaan myllyyn. B_{max} on siis jauhatuksen suurin mahdollinen energiansäästöpotentiaali kun muunnetaan ideaalista luokitinta käyttävä jauhatuspiiri avoimesta suljettuun piiriin. Toisin sanoen F.L. Smidthin /11/ mukaan suurin energiansäästö saavutetaan kun palaute ei sisällä yhtään jotakin tiettyä partikkelikokoa pienempää hiukkasta.

$$B_{\max} = \frac{C \cdot \log\left(\frac{R_o + 100 \cdot (C - 1)}{R_f + 100 \cdot (C - 1)}\right)}{\log\left(\frac{R_o}{R_f}\right)} \cdot 100\% \quad (5.7)$$

jossa B_{\max} jauhatuksen suurin mahdollinen energiansäästöpotentiaali
 ideaaliselle luokittimelle [%]
 R_o uuden syötön ylitteen määrä, oletetaan 100 %:ksi näin pienillä
 seulakooilla [%]

Tarkasteltavan luokittimen erotustehokkuutta kuvaa V_s , joka on B_{\max} :in tapaan jauhatuksen energiansäästöpotentiaali kun luokitinpiiri muunnetaan avoimesta suljettuun piiriin. V_s :ää laskettaessa kyseessä ei ole kuitenkaan teoreettinen ideaalinen luokitin vaan tarkastelun alla oleva todellinen luokitin.

$$V_s = \frac{\log\left(\frac{R_o}{R_f}\right) - C \cdot \log\left(\frac{R_o + (C - 1) \cdot R_g}{R_f + (C - 1) \cdot R_g}\right)}{\log\left(\frac{R_o}{R_f}\right) - C \cdot \log\left(\frac{R_o + (C - 1) \cdot 100}{R_f + (C - 1) \cdot 100}\right)} \cdot 100 \quad (5.8)$$

jossa V_s jauhatuksen suurin mahdollinen energiansäästöpotentiaali
 todelliselle luokittimelle [%]

Tarkastelun alla olevan suljetun jauhatuspiirin teoreettinen energiansäästöpotentiaali B pystytään nyt laskemaan B_{\max} :in ja V_s :n avulla. Teoreettisella energiansäästöpotentiaalilla tarkoitetaan sähkönkulutuksen pienenemistä prosentteina kun myllypiirin luokittimen tilalle vaihdettaisiin teoreettinen ideaaliluokitin.

Luonnollisesti tämä on käytännössä täysin mahdoton tilanne, mutta B :n perusteella pystytään vertailemaan luokittimien toimintaa.

$$B = B_{\max} \cdot V_s \quad (5.9)$$

jossa B olemassa olevan suljetun jauhatuspiirin teoreettinen energiansäästöpotentiaali [%]

5.4.3.2 Tromp-kuvaaja

Luokittimen toimintaa kuvaavan Tromp-käyrän piirtämiseksi tuli R_g :n, R_f :n, R_m :n sekä C -luvun arvot laskea uusille, granulometrin antamien partikkelikokojen puolivälissä oleville, partikkelikooille. Esimerkiksi kun granulometri antaa tuloksena seulajäännökset 6 ja 8 μm :n seuloille lasketaankin Tromp-käyrän piste 7 μm :n kohdalle. Oletetaan granulometrin antavan partikkelikoot d_1, d_2, \dots, d_n .

Uusi partikkelikoko lasketaan seuraavasti.

$$d_{12} = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad (5.10)$$

jossa d_{12} uusi partikkelikoko [μm]
 d_1, d_2 aikaisemmat partikkelikoot [μm]

Tromp-käyrän laskennassa käytettävät korjatut R_g :n, R_f :n ja R_m :n arvot ovat seulajäännöksiä kokonaismäärästä eikä kumulatiivisia kuten esimerkiksi B_{\max} :ia ja V_s :ää laskettaessa.

Tromp-käyrää varten tuli laskea C -lukujen keskiarvoilla korjattu R_m :n arvo, joka lasketaan seuraavasti.

$$R_{m12}(korj.) = \left(R_{g1} - \frac{(R_{g1} - R_{f1})}{C_{ka}} \right) - \left(R_{g2} - \frac{(R_{g2} - R_{f2})}{C_{ka}} \right) \quad (5.11)$$

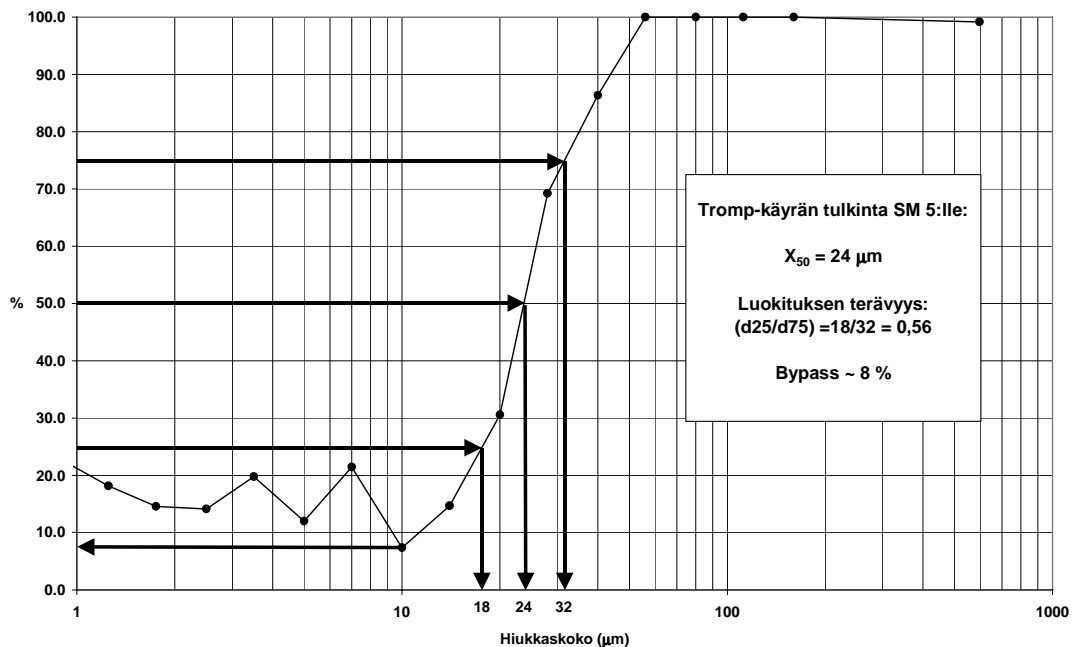
jossa	$R_{m12}(korj.)$	C -lukujen keskiarvoilla korjattu ylitteen määrä luokittimen syötöstä partikkelikoolle d_{12} [%]
	R_{g1}	korjattu ylitteen määrä luokittimen hylkäämästä karkeasta materiaalista partikkelikoolle d_1 [%]
	R_{f1}	korjattu ylitteen määrä luokittimen erottamasta hienosta materiaalista partikkelikoolle d_1 [%]
	R_{g2}	korjattu ylitteen määrä luokittimen hylkäämästä karkeasta materiaalista partikkelikoolle d_2 [%]
	R_{f2}	korjattu ylitteen määrä luokittimen erottamasta hienosta materiaalista partikkelikoolle d_2 [%]
	C_{ka}	kaikkien partikkelikoiden C -lukujen keskiarvo

Varsinaisen Tromp-käyrän pisteet lasketaan eri partikkelikooille seuraavasti.

$$F.R. = \frac{R_g}{R_m(korj.)} \cdot \frac{(C_{ka} - 1)}{C_{ka}} \cdot 100\% \quad (5.12)$$

jossa	$F.R.$	Tromp-käyrän piste (Fractional recovery)
-------	--------	--

Tromp-käyrästä voidaan kuvan 5.6 osoittamalla tavalla tulkita keskimääräinen partikkelikoko, luokituksen terävyys ja bypass, jolla tarkoitetaan ohivirtausta eli luokitukseen osallistumattomien partikkelien määrää.



Kuva 5.6 Tromp-käyrän tulkinta sementtimylly 5:n luokittimelle (Näytteenottoaika: 27.11.1999 klo 17.30, jauhettu sementtilaatu: Rapid)

5.4.4 Luokittimien tehokkuustarkasteluiden tulokset

Taulukkoon 5.7 on kerätty luokituksen tehokkuustarkastelujen tuloksia.

Taulukko 5.7 Luokittimien tehokkuustarkastelujen tuloksia

Laskuarvo	Raakamyllä (1. Mittaus)	Raakamyllä (2. mittaus)	Sementtimylly 3	Sementtimylly 4	Sementtimylly 5
Sementtilaatu	-	-	Yleis	Pika	Rapid
C_{ka}	2,5	2,7	2,5	6,3	3,2
B [%]	13	11	19	30	21
x_{50} [µm]	54	60	32	14	24
Luokituksen terävyys	0,16	0,28	0,66	0,67	0,56
Bypass	~25	~28	~2	~15	~10

Raakamyllän luokittimen bypass on huomattavasti suurempi kuin sementtimyllyillä. Tämä ja luokituksen terävyyden selvästi alhaisemmat lukemat selittyvät luokittimen tyypillä.

Raakamyllyn luokitin edustaa luokittimien ensimmäistä sukupolvea kun sementtimyllyjen luokittimet ovat nykyaikaisempia luokittimia. Sementtimyllyjen luokittimista myllyn 5 luokitin on toisen sukupolven Hirschmann-luokitin ja se näkyy hieman heikompana luokituksen terävyytenä kuin sementtimyllyillä 3 ja 4, joiden luokittimet ovat kolmannen sukupolven korkeatehokkuusluokittimia. Kuitenkin sementtimylly 4:n SEPOL-luokittimen ohivirtaus on korkea verrattuna sementtimylly 3:n SEPAX-luokittimeen. Tämä saattaa johtua jauhattavasta pikasementtilaadusta, mikä näkyy selvimmin kiertokuorman suuruudessa. Sementtimylly 3:lla jauhetaan normaalisti yleissementtiä ja myllypiirin kiertokuorma on samaa kokoluokkaa raakamyllyn kanssa. Sementtimyllyllä 5 jauhetaan hienompaa rapidsementtiä ja kiertokuorma on tämän johdosta hieman sementtimylly 3:a suurempi. Sementtimylly 4:llä taas jauhetaan erittäin hienoa pikasementtiä ja siten kiertokuorma on selvästi suurin.

Teoreettisia energiansäästöpotentiaaleja B tarkastellessa huomio kiinnittyy sementtimylly 4:ään, jonka lähes 30 %:n teoreettinen energiansäästöpotentiaali vaikuttaa suurelta kun otetaan huomioon, että luokitin on korkeatehokkuusluokitin. Tähän saattaa olla syynä juuri jauhettu hieno pikasementtilaatu. Raakamyllyn osalta teoreettinen energiansäästöpotentiaali on varsin pieni verrattuna sementtimyllyihin. Tämä selittyy todennäköisesti sillä, että raakamyllypiirissä keskimääräinen hiukkaskoko on selvästi suurempi kuin sementtimyllypiireissä ja siten luokituksesta ei vaadita niin paljon kuin sementtimyllypiireissä.

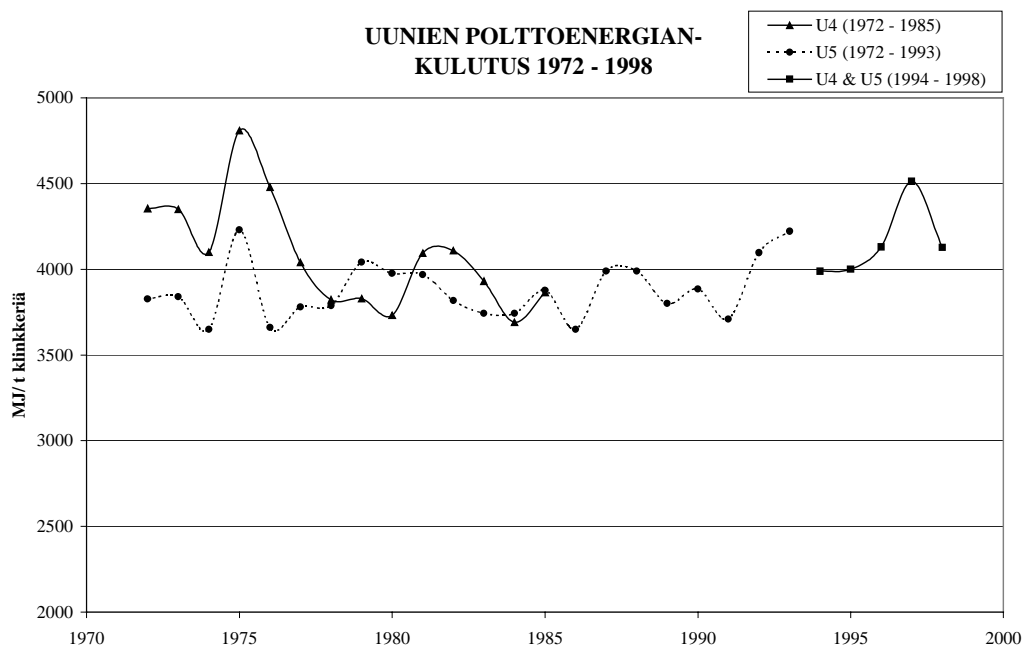
6 POLTTOAINEENKULUTUS

6.1 Johdanto

Lappeenrannan sementtitehtaat käyttävät sementtiuunien polttoaineena kivihiilen ja petrokoksin seosta suhteessa 1:1. Lisäksi sementtiuunien ylösajossa käytetään polttoöljyä ja liekkiin sytytykseen nestekaasua. Sementtiuunien polttoaineen kulutusta tuotettua klinkkeritonnia kohti sekä koko uunijärjestelmän energiatasapainoa voidaan selvittää energiatasemittauksilla. Tällöin sementtiuunin ympärille määritetään taseraja, jonka ylittävät aine- ja energiavirrat sekä niiden ominaisuudet mitataan tietyn ajanjakson ajan. Näiden mittausten perusteella pystytään sementtiuunille laskemaan massa- ja energiataseet.

6.2 Polttoaineenkulutuksen historiaa

Sementintuotannon käynnisti Lappeenrannassa Paraisten Kalkkivuori Osakeyhtiö vuonna 1938, jolloin käynnistyi tehtaan ensimmäinen sementtiuuni. Vuonna 1957 investoitiin toinen sementtiuuni, nykyinen uuni 4, vanhan uunin rinnalle. Molempien uunien toiminta perustui märkämenetelmään ja polttoaineena käytettiin kivihiiltä. Vähitellen sementinvalmistus kuivamenetelmällä yleistyi ja niin Lappeenrantaankin investoitiin ensimmäinen kuivamenetelmään perustuva sementtiuuni vuonna 1967. Tämä uuni 5 on varustettu kaksivaiheisella uunijauheen esilämmitysyklonijärjestelmällä ja uuni 4:n tapaan klinkkerin jäähdytys tapahtuu satelliittijäähdyttimillä. Kaksi vuotta myöhemmin eli 1969 uuni 4 muutettiin märkämenetelmästä kuivamenetelmään perustuvaksi. Vanhimman, vuonna 1938 käynnistyneen, uuni 1:n tuotanto lopetettiin 1970-luvun alussa ja siitä lähtien sementtiä on Lappeenrannassa tuotettu kahdella kuivamenetelmään perustuvalla uunilla. Kivihiilen rinnalle uunien polttoaineeksi tuli 1990-alussa petrokoksi. Mittausmenetelmien kehittymisen ja 1970-luvun ”optimistisen ajatusmallin” vuoksi tulee kuvassa 6.1 esiintyviin polttoenergiankulutuslukemiin suhtautua pienellä varauksella.



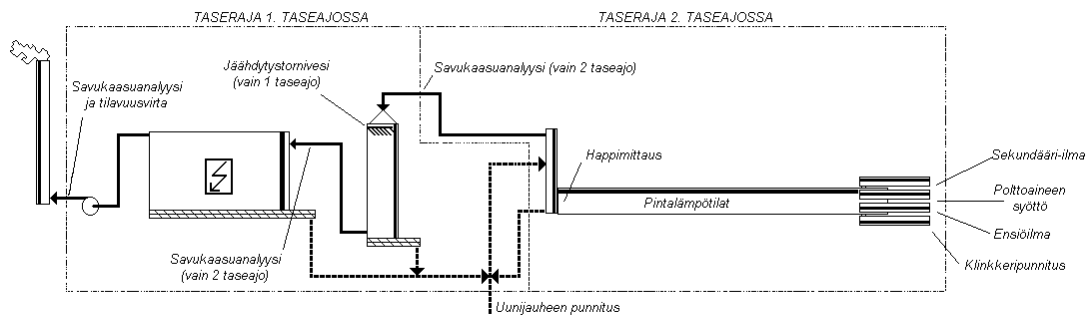
Kuva 6.1 Lappeenrannan sementtitehtaan ominaispolttoenergiankulutus uuneilta 4 ja 5 vuosilta 1971 – 1998 (Finnsementti /30/)

Tulokset ovat lähinnä suuntaa-antavia ja niiden virhemarginaali voi olla yllättävän suuri. Esimerkiksi vuodesta 1994 polttoaineen kulutustiedot perustuvat varastosaldoihin, näin ollen virhettä tulee jos varastojen koko ei vastaa toisiaan raportointikauden alussa ja lopussa. Lisäksi lämpöarvojen mittausten menetelmät ovat muuttuneet viimeisten kolmenkymmenen vuoden aikana, joten on mahdotonta sanoa kuinka luotettavia ovat esim. 1970-luvulta olevat arvot. Säännöllisiä tilastotietoja löytyi molempien uunien osalta vuodesta 1972 eli uunin 4 osalta vain kuivamenetelmän ajalta. Märkämenetelmän ajoilla uunin 4 polttoenergiankulutus on Finnsementin /30/ mukaan ollut luokkaa 5800 MJ klinkkeritonniä kohti, kun kuivamenetelmää käyttäen päästään parhaimmillaan hieman yli 4000 MJ klinkkeritonniä kohti. Ero märkä- ja kuivamenetelmien välillä on siis huomattava. Uuni 4 ei ollut käytössä vuosien 1986 ja 1988 välisenä aikana sekä vuosina 1992 ja 1993. Näin ollen koko aikaväliltä 1986 – 1993 ei uunin 4 polttoenergiakulutustietoja ole huomioitu. Vuodesta 1994 lähtien käytettävissä oli siis vain varastosaldot, joten niiden tietojen perusteella uunikohtainen kulutus ei ollut selvitetävissä. Kuten kuvaajasta nähdään polttoenergiakulutuksessa tapahtuu melkoista huojuntaa. Tämä saattaa johtua mittausmenetelmistä ja niiden muuttumisesta.

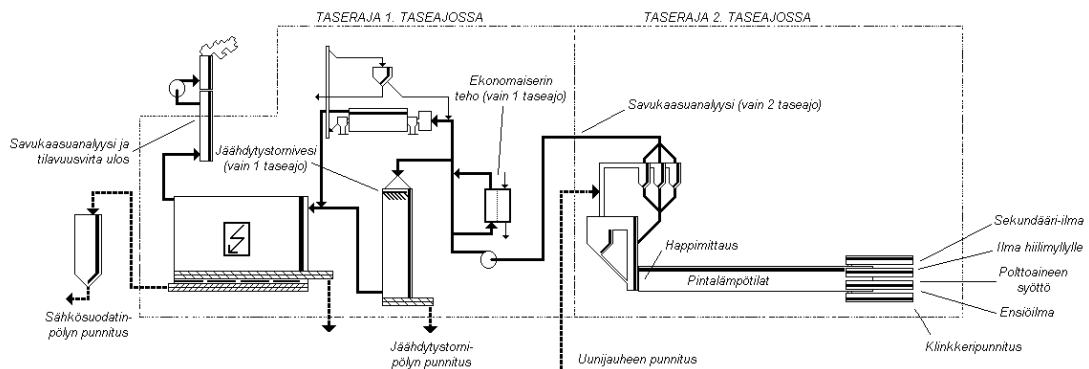
Molemmilla uuneilla on kuitenkin havaittavissa, että polttoenergian suhteen ei ole vuosien saatossa suurta muutosta tapahtunut. Unien tekninen taso huomioiden ollaan energiankulutuksen suhteen juuri sillä tasolla, johon niillä pystytään pääsemään. Nykytekniikalla päästään jopa alle 3000 MJ:n klinkkeritonnia kohti, mutta se vaatii hyvin optimoidun prosessin monivaiheisine syklonitorneineen ja esikalsinointiuuneineen.

6.3 Energiatasemittaukset

Unien ympärille lämpöenergiatsetta suunniteltaessa oli ensimmäinen tehtävä määrätä mittauksen taserajat. Kuvissa 6.2 ja 6.3 olevat katkoviivoilla merkatut taserajat määräytyivät pääasiassa olevassa olevien mittausmahdollisuuksien ja resurssien mukaan.



Kuva 6.2 Unin 4 energiatasemittausten taserajat ja mittauspisteet



Kuva 6.3 Unin 5 energiatasemittausten taserajat ja mittauspisteet

Koska kyseessä oli tase vain ainevirtojen ja lämpöenergian suhteen, ei taserajoja suunniteltaessa tarvinnut ottaa huomioon sähkön kulutusta ja siihen liittyviä mittauksia. Molemmille uuneille suoritettiin kaksi taseajoa, joiden taserajat poikkesivat toisistaan.

6.3.1 Energiatasemittaukset 28 – 29.7.1999 uuneille 4 ja 5

Ensimmäinen mittauspäivä oli 28.7.1999, jolloin suoritettiin 12 tuntia kestänyt taseajo uunille 4. Seuraavana päivänä oli vuorossa vastaava taseajo uunille 5, jonka pituus jäi tosin vain 8 tunnin mittaiseksi hiilensyöttölaitteeseen tulleen vian vuoksi. Molemmat taseajot aloitettiin aamulla kello yhdeksän tarkoituksena mitata iltayhdeksään saakka. Prosessitietokoneelta saatavien tietojen lisäksi mittauspäivien aikana suoritettiin useita lämpötila-, massa- ja tilavuusvirtamittauksia. Koska tilavuusvirtamittaukset tehtiin pitotputkella, savukaasujen tilavuusvirtojen mittauksen tuli tapahtua sähkösuodattimen jälkeen. Ennen suodatinta kaasujen pölymäärät ovat niin suuret, että pitotmittaus olisi ollut käytännössä hyvin hankalaa. Kuvassa 6.2 on näkyvissä uunille 4 tehtyjen taseajojen taserajat. Ensimmäisellä taseajolla tarkoitetaan 28.7.1999 tehtyä taseajoa.

Uunilla 5 tilanne oli hieman toinen. Uunijauheen esilämmityssyklonit ja sähkösuodatin jäivät kokonaan taserajan sisäpuolelle. Tasemittauksen kannalta kuitenkin uunilla 5 piti huomioida, että osa savukaasuista kiertää myös ekonomaiserin ja raakamylyn kautta sekä sähkösuodattimen ja jäähdytystornin pölykierto rikkoo taserajan. Lisäksi hiilimyllyn läpi virtaava kuuma ilma otetaan uunin 5 palotilasta polttimen juuresta. Näin ollen uunin 5 energiataase on huomattavasti monimutkaisempi kuin uunilla 4.

6.3.1.1 Uunijauhe

Uunijauheen syötön selvittämisessä luotettiin olemassa oleviin hihnaakoihin ja prosessitietokoneelta saataviin, kerran minuutissa päivittyviin, syöttölukemiin. Arvoista laskettiin taselaskuja varten keskiarvo koko mittausajalta. Tämä tehtiin kaikille prosessitietokoneelta saataville arvoille. Uunijauheen lämpötila mitattiin pistokokeena kerran käsilämpömittarilla molemmille uuneilla.

Uunijauheesta oli myös tarkoitus ottaa näyte automaattisen näytteenoton avulla joka toinen tunti. Tällä oli tarkoitus selvitetään uunijauheen laadunvaihtelu XRF-analyysin avulla. Tämä jäi kuitenkin tekemättä molempina mittauspäivinä näytteiden kuljetukseen käytetyn putkipostin pettäessä juuri kriittisellä hetkellä.

6.3.1.2 Klinkkeri

Klinkkerituotannon määrää ei Lappeenrannan sementtitehtaalla normaalisti punnita ollenkaan, vaan se lasketaan teoreettisesti syötetystä uunijauheen määrästä. Taseajoa varten yksi vaihtoehto olisikin ollut määrittää klinkkerituotanto teoreettisesti uunijauheen heikutushäviön avulla. Klinkkerituotanto päätettiin kuitenkin punnita kuorma-autojen ja autovaa'an avulla. Uunilla 4 klinkkeri ohjattiin välittömästi mittauksen alettua tyhjään kevytklinkkeritaskuun, josta klinkkerivaraston nosturinkuljettaja siirsi klinkkerin kauhalla tyhjänä punnittuun kuorma-autoon. Autonkuljettaja kävi punnitsemassa klinkkerin vaa'alla ja tämän jälkeen kippasi kuorman klinkkerivarastoon. Uunilla 5 punnitus tapahtui muuten samalla tavalla, mutta klinkkeriä ei ohjattu kevytklinkkeritaskuun vaan tyhjän klinkkerivaraston lattialle. Molempina mittauspäivinä kuorma-autoja oli varattu punnitusta varten kaksi kappaletta. Klinkkeri-tuotossa piti myös huomioida, että noin 1 t/h uunin 5 klinkkeristä joutuu uunin 4 klinkkerin joukkoon. Tämä johtuu klinkkerin kuljetukseen käytetyistä laahauskuljettimista, joilla klinkkeri siirretään elevaattoreille. Klinkkeripunnitus uunille 4 onnistui varsin hyvin, vaikka klinkkeriä jouduttiinkin hieman punnitsemaan seuraavana päivänä, koska kevytklinkkeritaskussa havaittiin pölyn hälvettyä vielä olevan jonkin verran klinkkeriä.

Uunille 5 klinkkerin punnitus epäonnistui täydellisesti. Todennäköisesti punnitun klinkkerin joukkoon oli eksynyt vanhempaa klinkkeriä varastosta, sillä punnitut klinkkerimäärät ovat teoreettisesti täysin mahdottomia. Tasemittauksissa käytetty klinkkerituotanto on määritetty teoreettisesti heikutushäviön perusteella. Vaikka käytetyt klinkkerin lämpötilat saatiinkin suoraan prosessitietokoneelta, ne mitattiin molemmille uuneille kertaalleen tarkastuksen vuoksi käsin.

Jäähdyttimistä tulevasta klinkkeristä otettiin polttolavalla näyte peltiämpäriin, jossa klinkkerin lämpötila mitattiin välittömästi Fluke 51 K/J lämpömittarilla. Tarkastusmittauksissa havaittiin klinkkerin lämpötilan vaihtelevan suuresti eri jäähdytinputkilla. Prosessitietokoneelta saatavat arvot edustivat kuitenkin hyvin käsimitoituksilla saatuja keskiarvoja.

6.3.1.3 Polttoaine

Hiili-petrokoksiseoksen punnituksessa luotettiin juuri ennen tasemittausta kalibroittujen hiilensyöttimien antamiin lukemiin. Prosessitietokoneelle tallentuvat syöttölukemat minuutin välein ja lisäksi laitteissa on toinen, koko hiilisiilon painoon perustuva, mittaus. Jälkimmäisen lukemat otettiin ylös ennen ja jälkeen mittauksen. Molemmat mittaukset vastasivat tarkasti toisiaan molemmilla uuneilla. Hiilinäytteet otettiin ilmatiiviiseen näytepurkkiin hiilisuodattimen alapuolelta kolme kertaa tasemittauksien aikana. Uunin 4 tasemittauspäivänä otetuista näytteistä sekoitettiin noin 120 gramman näyte, joka lähetettiin ilmatiiviissä pussissa ulkopuoliseen laboratorioon analysoitavaksi. Hiilestä teetettiin elementaarianalyysin lisäksi kosteus, tuhkapitoisuus ja lämpöarvoanalyysit. Uunin 5 hiilinäytteitä ei lähetetty laboratorioon epäonnistuneen mittauspäivän takia.

6.3.1.4 Ensiöilma

Ensiöilmapuhaltimien tilavuusvirran mittaus suoritettiin pitot-putki mittauksella neljä kertaa uunin 4 tasemittauksen aikana. Mittauksissa käytettiin SFS-standardin 3866 /10/ mukaista pitot-putkea ja Alnor MP6KMD mikromanometriä. Uunille 5 mittaus ehdittiin suorittaa kolme kertaa ennen kuin taseajo päättyi ennen sovittua ajankohtaa. Mittauspisteiden lukumäärä ensiöilmaputkien sisällä valittiin SFS-standardin 3866 /10/ esittämällä tavalla. Virtausmittauksen yhteydessä mitattiin pitot-laskuja varten putkessa virtaavan ilman lämpötila Fluke 51 K/J lämpömittarilla. Ulkoilman lämpötilasta saatiin mittausajan keskiarvo prosessitietokoneelta.

Ulkoilman kosteus saatiin mittaamalla ulkoilman lämpötila kiertämällä kostea pumpulituppo lämpötila-anturin ympärille. Näin saatiin ns. kostea lämpötila. Tämän ja normaalin lämpötilan avulla voitiin F.L. Smidthin /11/ esittämistä taulukoista katsoa kastepistelämpötila ja sen perusteella ilman kosteus. Hiilensyöttimien kompressoreiden tuottama ilmamäärä arvioitiin kompressoreiden tietojen perusteella.

6.3.1.5 Sekundääri-ilma

Sekundääri-ilman tilavuusvirtoja on mahdotonta mitata millään menetelmällä, joten niiden suuruus täytyi laskea teoreettisesti uunien perillä olevien kiinteiden happimittauksien perusteella. Happimittauksien keskiarvot mittauspäiviltä saatiin suoraan prosessitietokoneelta. Uunin perällä olevat happimittaukset ovatkin prosessien säädön kannalta varsin tärkeä mittaus, sillä niiden perusteella säädetään polttoa. Koska happimittaukset ovat uuneissa kuumasta päästä katsoen peräosassa, vuotoilmaa pääsee uuneihin ainoastaan polttolavalta uunin, polttimen ja päätylevyn tiivistyksistä. Tätä vuotoilmaa ei arvioitu, vaan kaiken sekundääri-ilman oletettiin tulevan jäähdyttimien kautta. Happimittauksen perusteella pystytään laskemaan sekundääri-ilman määrä kun tiedetään poltosta tulevien savukaasujen määrä, polton ilmaylimäärä, kalsinoinnista tuleva hiilidioksidin määrä sekä ensiöilman määrä.

6.3.1.6 Vuotoilma

Polttoilman tapaan vuotoilmojen suuruus on mahdoton mitata, joten ne laskettiin savukaasukanavista tapahtuneiden happimittausten ja uunin perällä olevien happimittausten perusteella. Molemmilla uuneilla vuotoilman määrä oli huomattavan suuri. Eniten ihmetytti uunin 4 suurempi vuotoilman määrä uuniin 5 verrattuna, vaikka uunin 5 savukaasujärjestelmä on huomattavasti monimutkaisempi. Uunin 4 sähkösuodatin on kuitenkin niin huonossa kunnossa, että suurin osa vuotoilmoista savukaasukanavaan tulee sieltä.

6.3.1.7 Savukaasut piipuihin ja hiilimyllylle

Savukaasujen tilavuusvirta- ja lämpötilamittaukset suoritettiin samalla tavalla ja samoilla laitteilla kuin ensiöilman mittaukset pitot-putkea lukuun ottamatta, joka oli hieman isompi ja siten sopivampi isoihin savukaasukanaviin. Uunin 4 mittauspaikka sijaitsi piipun juurella savukaasupuhaltimen jälkeisessä savukaasukanavassa ja uunin 5 mittauspaikka sijaitsi homogenisointisiilossa olevan savupiipun puolella välissä. Pitot-mittauskohtia oli kuitenkin kanavien koosta johtuen huomattavasti enemmän kuin ensiöilmaputkessa. Savukaasuanalyysit suoritettiin pitot-mittauksen yhteydessä erillisellä Rosemountin (GAV 100, Binos 100, Oxynos 100) savukaasuanalyysaattorilla, jota ennen kaasut kuivattiin ja jäähdytettiin M&C ECP merkkisellä kaasujen jäähdytyslaitteistolla. Hiilimyllyn läpi virtaava kaasumäärä mitattiin ennen sementtitehtaan katolla olevaa savukaasupuhallinta. Tästä mittauspisteestä mitattiin lämpötila vain pitot-laskuja varten. Taselaskuissa käytettävä hiilimyllyn virtaavan kaasun lämpötila saatiin prosessitietokoneelta. Hiilimyllyn läpi virtaavan kaasun analyysi suoritettiin imemällä myllyn läpi virrannutta kaasua erilliseen mittauspussiin, josta savukaasujen mittauspaikalla olevan analyysaattorin annettiin imeä kaasu. Mitattujen happi- ja hiilidioksidilukemien perusteella hiilimyllyn läpi havaittiin virtaavan puhdasta ilmaa vaikka kaasu imetäänkin hiilimyllylle uunin 5 palotilasta.

6.3.1.8 Jäähdytystornivesi

Jäähdytystornivesien tilavuusvirrat mitattiin ulkopuolisen konsultin toimesta kannettavalla virtausmittarilla. Ultraääneen perustuvalla mittarilla mitattiin tilavuusvirtoja suoraan putkien päältä. Ennen mittauksen aloittamista laitteeseen syötettiin tarkkaan putken tiedot, joiden perusteella kone laski ultraäänianturien etäisyyden toisistaan. Uunin 4 jäähdytystorniveden määrä mitattiin mittaamalla jäähdytystornivettä varten olevan muutaman kuution kierrätys säiliön täyttövirtausta. Uunilla 5 vastaavan putken virtauksen mittaaminen ei onnistunut todennäköisesti putken sisäpinnalla olleen kerrostuman takia. Tämän takia mittaus suoritettiin mittaamalla ensin jonkin aikaa jäähdytystorniin menevää vesimäärää ja sen jälkeen jonkin aikaa tornista takaisin säiliöön palaavaa virtausta.

Jäähdytystorniin suihkutettavan veden määrää säädellään takaisinvirtauksella jäähdytystornin jälkeisten savukaasujen lämpötilan mukaan. Molempien uunien jäähdytystornivesimäärät saatiin tällä tavalla tarkasti selville.

6.3.1.9 Uunin 5 sähkösuodinpöly

Osa uunin 5 sähkösuodatinpölystä poistetaan kokonaan prosessista ja loput syötetään takaisin prosessiin uunijauhesiilojen kautta. Näin ollen sähkösuodatinpölyn määrä tuli ottaa taseissa huomioon toisin kuin uunilla 4, jossa pöly syötetään suoraan takaisin uuniin 4. Suurin osa eli 80 % uunin 5 sähkösuodatinpölystä ohjattiin kellokytkimen avulla takaisin prosessiin ja loput 20 % siiloon. Pölyn kokonaismäärä saatiin selville tyhjentämällä siilo mittauspäivän aamuna juuri taseajon alkamisajankohtana ja antamalla siilon täytyä normaalisti koko päivän. Taseajon päätyttyä siiloon kertynyt pöly punnittiin ja kokonaismäärä saatiin laskemalla. Sähkösuodinpölyn lämpötila käytiin mittaamassa kertaluonteisesti käsin.

6.3.1.10 Uunin 5 jäähdytystornipöly

Jäähdytystornipöly uunilta 5 kierrätetään sähkösuodatinpölyn tapaan takaisin prosessiin uunijauhesiilojen kautta, joten sen määrä tuli huomioida taseissa. Uunin 4 jäähdytystornipöly syötetään takaisin uuniin 4. Jäähdytystornipöly uunilta 5 ohjattiin tasemittauksessa puolen tunnin ajan tyhjänä punnittuun kuuppaan, jossa pölyn määrä punnittiin säkkiväällä. Mittaus toistettiin kahteen kertaan ja punnitukset vastasivat melko hyvin toisiaan. Pölyn lämpötila mitattiin käsin molemmilla mittauskerroilla.

6.3.1.11 Pintalämpötilat

Lämpöhäviöiden arvioinnissa tarvitaan molempien uunien manttelien pintalämpötilojen keskiarvot. Molemmilla uuneilla on polttovyöhykkeen kattavat pintalämpötilaskannerit, joiden antamien pintalämpötilatietojen perusteella pystytään tälle osalle uunia määrittämään pintalämpötilan keskiarvo.

Näin ollen uunit jaettiin pintalämpötilojen suhteen kahteen osaan: skannerin kattamaan alueeseen ja loppuun osaan uunista. Skannerin ulkopuolinen osuus uuneista mitattiin käsin IMPAC IE7 infrapunapintalämpötilamittarilla kymmenen metrin välein. Näistä arvoista laskettiin pintalämpötilojen keskiarvot loppuosille uuneja. Satelliittijäähdyttimien, joita uunilla 4 on 10 kappaletta ja uunilla 5 yhteensä 11 kappaletta, keskimääräiset lämpötilat mitattiin jäähdytin kerrallaan kolmesta kohtaa jäähdytinputkia. Näin saatiin verrattain kattava otos uunien jäähdyttimien pinta-lämpötiloista, joista laskettiin taselaskuja varten keskiarvo. Uunilla 5 mitattiin käsin lisäksi syklonien pintalämpötilat niiden lämpöhäviöiden selvittämiseksi. Käsin suoritettut pintalämpötilamittaukset toistettiin kahteen kertaan molemmille uuneille.

6.3.2 Energiatasemittaus 13.10.1999 uunille 5

Uunille 5 suoritettiin lokakuun puolessavälissä toinen energiatasemittaus. Tällä kertaa taseajo onnistui hyvin ja 12 tuntia saatiin täyteen ilman ongelmia. Uunin tila oli kuitenkin hieman huono, mikä näkyy suuressa sähkösuodatinta- ja jäähdytystornipölyjen määrässä. Pölyjen määrän ollessa suuri voidaan olettaa uunin sisälle muodostuneen pölystä kasautumia, jotka heikentävät uuniin vetoa ja siten vaikuttavat uuniin syötettävän uunijauheen määrään. Mittauspäivänä oli uunilla 4 seisokki, joka ilmeisesti osaltaan vaikutti uunin 5 tilaan.

Edellisen uuni 5:n taseajon yhteydessä taseraja oli piipussa, joka ei ole F.L. Smidthin /35/ energiatasemallin mukainen. Uuden taseajon haluttiin olevan tämän yleisesti käytetyn mallin kanssa vertailukelpoinen, mikä tarkoitti taserajan siirtämistä uunin 5 sykloiden ja savukaasupuhaltimen väliin. Mittausteknisesti tämä tarkoitti savukaasukanavaan yhtä mittauspistettä lisää, josta tehtäisiin savukaasuanalyysi. Savukaasuista mitattiinkin happi- ja hiilidioksidipitoisuudet heti syklonien jälkeen. Mittauspaikka on ennen sähkösuodatinta joten savukaasun virtauksen mittaus olisi hyvin hankalaa pitot-putkella suuren pölymäärän takia. Taserajan siirtäminen tarkoitti myös sitä, ettei jäähdytystorniveden määrää tarvinnut tällä kertaa mitata. Hiilinäytteet otettiin tällä kertaa hienohiilivarastojen pohjalta, jolloin hiilinäyte vastaa paremmin mittauspäivänä poltettavaa hiiltä.

Hienohiilivarastoon mahtuu noin vuorokauden tarve hiiltä molempien uunien ollessa normaalissa tuotannossa. Kaikilta muilta osin tasemittaus tapahtui edellisen mittauksen tapaan.

6.3.3 Energiatasemittaus 11.11.1999 uunille 4

Uunille 4 suoritettiin myös toinen tasemittaus, jossa taseraja oli siirretty edellisen uunin ja jäähdytystornin väliin. Savukaasuanalyysi tehtiin kuitenkin kolmesta kohtaa vuotoilmojen selvittämiseksi eri osissa savukaasukanavaa. Savukaasuanalyysi tehtiin ennen jäähdytystornia, jäähdytystornin ja sähkösuodattimen välistä ja piipusta. Jäähdytystorniveden määrää ei kuitenkaan mitattu, koska taseraja oli ennen jäähdytystornia. Täällä kertaa energiatasetelaskuissa tarvittu sähkösuodatin- ja jäähdytystornipölyjen määrät jouduttiin arvioimaan prosessitietokoneelta saatavien tietojen perusteella, sillä niiden punnitus olisi ollut käytännössä liian hankalaa. Hiilinäyte otettiin samasta paikasta kuin edellisen uuni 5:lle tehdyn mittauksen yhteydessä. Muuten tasemittaus tapahtui samoilla välineillä ja menetelmillä kuin aikaisemmin.

6.3.4 Taselaskut

Ennen varsinaisia taselaskelmia laskettiin pitot-mittaustulosten perusteella ensiöilman, savukaasujen ja uunille 5 hiilimyllyn läpi virtaavan ilmamäärän tilavuusvirrat. Lisäksi laskettiin F.L. Smitdhin /11/ mukaan vuotoilmojen määrät sekä Myréeenin /14/ mukaiset savukaasulaskut. Liitteinä löytyvät energiatasetelaskut sisältävät neljän eri tasemittauspäivän mittaustulokset, niistä lasketut laskuarvot, taselaskuissa käytettävät vakiot, savukaasulaskut sekä massa- ja energiatasetet.

Taulukko 6.2 5 uunin 13.10.1999 suoritettujen taseajon pitot-mittausten laskut

Pitot-mittauksen laskut	Ensiöilma	Savukaasut	Ilma hiilim.	Yksikkö
Kuivan kaasun tiheys normaalitilassa	1.29	1.38	1.29	kg/m ³
Kostean kaasun tiheys normaalitilassa	1.28	1.38	1.28	kg/m ³
Kuivan kaasun tiheys kanavassa	1.18	0.82	0.97	kg/m ³
Kuivan kaasun nopeus kanavassa	20.8	12.8	12.0	m/s
Kuivan kaasun tilavuusvirta kanavassa	9411	157887	12217	m ³ /h
Kuivan kaasun tilavuusvirta normaalitilassa	8596	93242	9176	m ³ /h

Taulukko 6.3 5 uunin 13.10.1999 suoritettujen taseajon massa- ja tilavuusvirrat

Massavirrat		Yksikkö
Polttoaineen syöttö	3.86	t/h
Tuhka hiilenpoltosta	0.35	t/h
Uunijauhe	46.36	t/h
Klinkkerintuotanto	29.58	t/h
Jäähdytystornipöly	1.00	t/h
Sähkösuodinpöly	7.07	t/h

Hehkutushäviö		Yksikkö
Uunijauhetta	67.12	%
Hiilidioksidia	32.88	%

Tilavuusvirrat		Yksikkö
Ensiöilma kompressorilta	1600	m ³ /h
Ensiöilma puhaltimelta	8596	m ³ /h
Sekundääri-ilma	26624	m ³ /h
Ilma hiilimyllylle	9176	m ³ /h
CO ₂ kalsinoinnista	7761	m ³ /h
Savukaasut uunista	42733	m ³ /h
Vuotoilma uunin perältä ja sykloneista	5070	m ³ /h
Savukaasut jäähdytystornille	55564	m ³ /h
Vuotoilma sykloneiden ja piipun väliltä	35642	m ³ /h
Savukaasut piippuun	91206	m ³ /h

Taselaskuissa käytettävä polttoaineen syöttöarvo sisältää tuhkan, mutta laskuarvotaulukoissa on tuhkan määrä laskettu erikseen massatasea varten. Ensiöilmakompressorin ilmavirta perustuu kompressorin tiedoissa ilmoitettuun ilmantuottoon. Ensiöilma-puhaltimen tilavuusvirta on laskettu pitot-putkimittauksien tulosten ja SFS-standardin 3866 /10/ yhtälöiden avulla. Sekundääri- eli polttoilman määrä on saatu suoraan myöhemmin esitettävistä savukaasulaskuista vähentämällä kokonaisilmamäärästä kompressorin ja puhaltimen tuottamat ensiöilmanmäärät. Uunin 5 laskuarvotaulukoissa olevat hiilimyllyn ilmamäärät perustuvat ensiöilman tavoin SFS-standardin 3866 /10/ mukaisiin laskuihin. Kalsinoitumisesta vapautuvan hiilidioksidin määrä on laskettu uunijauheesta tehdyn hehkutushäviön perusteella. Hehkutushäviössä hieman alle gramman uunijauhenäytettä hehkutetaan noin 1000 °C:ssa uunissa tunnin ajan. Tänä aikana kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi. Punnitsemalla jäljelle jäänyt uunijauhe saadaan selville vapautuneen hiilidioksidin määrä. Sementtiuunista vapautuvien savukaasujen tilavuusvirta on laskettu myöhemmin savukaasulaskujen perusteella.

Vuotoilmojen tilavuusvirrat on laskettu F.L. Smitdh:n /11/ mukaan seuraavasti.

$$\dot{V}_{vuoto} = \dot{V}_{savu} \cdot \frac{(O_2(seos) - O_2(savu))}{(O_2(ilma) - O_2(seos))} \quad (6.1)$$

jossa	\dot{V}_{vuoto}	vuotoilman tilavuusvirta [m ³ n/h]
	\dot{V}_{savu}	savukaasun tilavuusvirta [m ³ n/h]
	$O_2(seos)$	hapen määrä savukaasu-vuotoilmaseoksessa [t-%]
	$O_2(savu)$	hapen määrä savukaasussa [t-%]
	$O_2(ilma)$	hapen määrä ilmassa [t-%]

Yhtälöllä 6.1 on laskettu vuotoilmojen määrät happimittausten perusteella eri osille savukaasukanavaa. Taulukossa 6.2 oleva savukaasujen tilavuusvirta piipussa on laskennallinen arvo, kun taas taulukossa 6.3 on pitot-putkimittauksien mukaan laskettu savukaasun tilavuusvirta piipussa. Kaikissa massa- ja energialaskuissa on käytetty laskennallista arvoa, sillä savukaasujen pitot-mittauskohta uunille 4 oli hieman liian lähellä savukaasupuhaltajaa ja siten tuloksiin on suhtauduttava kriittisesti.

6.3.4.3 Vakiot

Savukaasu- ja energiataselaskuissa käytettävät ominaislämpökapasiteetit pohjautuvat kaasujen osalta Laineen /13/ kirjassa esitettyyn polynomisovitukseen.

$$c_{p,sk} = a + bT_{sk} + cT_{sk}^2 + dT_{sk}^3 \quad (6.2)$$

jossa	$c_{p,sk}$	kaasun ominaislämpökapasiteetti [J/mol K]
	T_{sk}	kaasun lämpötila [K]
	a	ainekohtainen vakio [J/mol K]
	b	ainekohtainen vakio [J/mol K ²]
	c	ainekohtainen vakio [J/mol K ³]
	d	ainekohtainen vakio [J/mol K ⁴]

Veden ominaislämpökapasiteetti on laskettu Kayen ja Labyin /32/ kirjassa esitetyn vastaavanlaisen polynomisovituksen avulla. Edellisten kaltaista polynomisovitusta käyttää myös F.L. Smidth /38/ uunijauheen, klinkkerin ja kivihiilen ominaislämpökapasiteettien laskemiseksi eri lämpötiloissa. Sähkösuodin- ja jäädytystornipölylle on laskuissa käytetty uunijauheen ominaislämpökapasiteetin polynomisovitusta. Ominaislämpökapasiteetit kuten muutkin energiataselaskuissa käytetyt vakiot löytyvät liitteistä.

6.3.4.4 Savukaasulaskut

Energiataselaskuissa on käytetty lähtötietoina edellä mainittujen tietojen lisäksi myös Myréenin /14/ esittämän polttimien aine- ja energiavirtojen laskumallin mukaan määritettyjä polttoilman sekä savukaasujen eri komponenttien tilavuusvirtoja. Lähtötietoina on käytetty polttoaineen massavirran lisäksi tasemittauspäivinä otettujen hiilinäytteiden elementaari- ja lämpöarvoanalyysyjä. Poltossa käytettävän hapen stokiometrinen ainemäärä lasketaan seuraavalla tavalla.

$$\dot{V}_{O_2} = \dot{V}_{pa} \left(\frac{w_C}{M_C} + \frac{w_H}{4M_H} + \frac{w_S}{M_S} - \frac{w_O}{2M_O} \right) \quad (6.3)$$

jossa	\dot{V}_{O_2}	polttoon tarvittava hapen stokiometrinen ainemäärä [kmol/h]
	\dot{V}_{pa}	polttoaineen massavirta [kg/h]
	w_C	hiilen massaosuus polttoaineessa
	M_C	hiilen moolimassa [g/mol]
	w_H	vedyn massaosuus polttoaineessa
	M_H	vedyn moolimassa [g/mol]
	w_S	rikin massaosuus polttoaineessa
	M_S	rikin moolimassa [g/mol]
	w_O	hapen massaosuus polttoaineessa
	M_O	hapen moolimassa [g/mol]

Hapen stokiometrisen ainemäärän perusteella voidaan laskea polttoilman stokiometrinen ainemäärä kun tiedetään hapen mooliosuus ilmassa.

$$\dot{n}_{ki,o} = \frac{\dot{n}_{O_2}}{x_{O_2}} \quad (6.4)$$

jossa $\dot{n}_{ki,o}$ polttoon tarvittava kuivan ilman stokiometrinen ainemäärä [kmol/h]
 x_{O_2} kuivan ilman hapen mooliosuus

Jatkossa ainemääriä verrataan polttoaineen massaan.

$$\dot{n}'_{ki,o} = \frac{\dot{n}_{ki,o}}{\dot{m}_{pa}} \quad (6.5)$$

jossa $\dot{n}'_{ki,o}$ kuivan ilman määrä polttoainekiloa kohti [mol/kg pa]
 \dot{m}_{pa} polttoaineen massavirta [t/h]

Nyt voidaan laskea stokiometrisen polton savukaasumäärä hiili-petrokoksiseoksen elementaarianalyysin ja kuivan ilman määrän perusteella. Sementtiuunin ollessa kyseessä tulee kuitenkin huomioida, että osa savukaasujen hiilidioksidista tulee uunijauheen kalsinoitumisesta.

Kun Myrénin /14/ esittämään yhtälöön lisätään kalsinoitumisesta tulevan hiilidioksidin ainevirta ja jaetaan se polttoaineen syötöllä saadaan ilmakertoimen laskemista varten oikea savukaasun ainevirta tasemittausaikana polttoainekiloa kohti.

$$n'_{ks,o} = 83,3w_c + 31,2w_s + 35,7w_N + (1 - x_{O_2} \cdot x_r)n'_{ki,o} + \frac{\dot{V}_{O_2(kals.)}}{V_{pa}} \quad (6.6)$$

jossa $n'_{ks,o}$ stokiometrisen polton savukaasumäärä polttoainekiloa kohti [mol/kg pa]
 x_r ilman happirikastus ($x_r = 1$)
 $\dot{V}_{O_2(kals.)}$ kalsinoitumisesta tulevan hiilidioksidin ainevirta [kmol/h]

Sementtiuunin perällä olevan happimittauksen perusteella pystytään laskemaan polton ilmakerroin.

$$\lambda = 1 + \frac{n'_{ks,o}}{n'_{ki,o}} \cdot \frac{x_{O_2,ks}}{(x_{O_2} \cdot x_r - x_{O_2,ks})} \quad (6.7)$$

jossa λ ilmakerroin
 $x_{O_2,ks}$ kuivan savukaasun hapen mooliosuus uunin perällä

Ilmakertoimen avulla voidaan laskea palamiseen käytetyn kuivan ilman määrä polttoainekiloa kohti.

$$n'_{ki} = \lambda \cdot n'_{ki,o} \quad (6.8)$$

jossa n'_{ki} palamiseen käytetty kuivan ilman määrä polttoainekiloa kohti [mol/kg pa]

Polttoilman mukana tulee lähes aina vesihöyryä, jonka määrä polttoainekiloa kohti pystytään laskemaan kun tiedetään ilmankosteus.

$$n'_{vi} = 1,607 \cdot x \cdot n'_{ki} \quad (6.9)$$

jossa n'_{vi} palamisilman mukana tuleva vesihöyry polttoainekiloa kohti [mol/kg pa]
 x ilman absoluuttinen kosteus [kg H₂O/kg kuivaa ilmaa]

Näin saadaan kokonaisilmavirta laskettua, johon aikaisemmin mainittu sementtiunien sekundääri-ilman määrä pohjautuu.

$$\dot{n}_{\Sigma} = \dot{n}_{pa} (n'_{ki} + n'_{vi}) \quad (6.10)$$

jossa \dot{n}_{Σ} kokonaisilmavirta [kmol/h]
 \dot{n}_{pa} polttoaineen massavirta [kg/h]

Myréenin /14/ laskumallissa lasketaan lisäksi polttoilman tilavuusvirta yleisellä tilanyhtälöllä ulkoilman lämpötilassa referenssilämpötilan ollessa 25 °C. Liitteinä olevissa savukaasulaskuissa on tämän lisäksi laskettu myös polttoilman entalpiavirta. Energiataselaskuissa referenssilämpötila on 0 °C:tta ja polttoilma on jaettu ensiö- ja sekundääri-ilmoihin, joten savukaasulaskuissa laskettua entalpiavirtaa ei pystytä vertaamaan taselaskuissa esitettyihin arvoihin.

Taselaskujen kannalta oleellista on tietää poltossa syntyneen hiilidioksidin määrä savukaasussa.

$$n'_{CO_2} = 83,3w_c \quad (6.11)$$

jossa n'_{CO_2} poltossa syntyneen hiilidioksidin määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti [mol/kg ka]

Rikkidioksidin määrä savukaasussa lasketaan vastaavalla tavalla, mutta koska kyseessä on kalkkikiveen perustuva prosessi, oletetaan rikkidioksidin reagoivan uunissa täydellisesti kalsiumsulfaatiksi ja poistuvan prosessista klinkkerissä.

$$n'_{SO_2} = 31,2w_S \quad (6.12)$$

jossa n'_{SO_2} poltossa syntyneen rikkidioksidin määrä savukaasussa
polttoainekiloa kohti [mol/kg ka]

Jos uunin oletetaan olevan täysin tiivis uunin perällä olevaan happimittaukseen saakka, happea savukaasuihin tulee vain polton ilmaylimäärästä. Hapen määrä savukaasuissa lasketaan seuraavalla tavalla.

$$n'_{O_2} = x_{O_2} \cdot x_r (\lambda - 1) n'_{ki,o} \quad (6.13)$$

jossa n'_{O_2} hapen määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti [mol/kg ka]

Typpeä savukaasuihin tulee polttoilman lisäksi myös polttoaineesta.

$$n'_{N_2} = (1 - x_{O_2} \cdot x_r) \lambda \cdot n'_{ki,o} + 35,7w_N \quad (6.14)$$

jossa n'_{N_2} typen määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti [mol/kg ka]

Vesihöyryä savukaasuihin tulee fossiilisen polttoaineen poltosta sekä polttoilman ja polttoaineen sisältämistä kosteuksista. Myrreen /14/ on huomionut ne seuraavasti.

$$\dot{n}_{H_2O} = 496w_H + 55,5f + \dot{n}_{vi} \quad (6.15)$$

jossa \dot{n}_{H_2O} vesihöyryn määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti
[mol/kg ka]
 f polttoaineen kosteuspitoisuus

Edellisten, energiataselaskuissa käytettyjen, savukaasulaskujen lisäksi liitteinä olevissa savukaasulaskuissa on Myrreenin /14/ savukaasulaskumallin mukaan laskettu myös polton savukaasujen ainevirrat sekä tilavuus- ja entalpiavirrat mitatussa lämpötilassa referenssilämpötilan ollessa 25 °C.

6.3.4.5 Energiataseet

Energiataseelaskut on järjestetty tuleviin ja poistuviin virtoihin. Taseelaskuissa on esitetty kyseisen virran massa- tai tilavuusvirta, entalpiavirta ja entalpia tuotettua klinkkerikiloa kohti. Taseelaskuissa käytetty referenssilämpötila on 0 °C:tta. Polttoaineen entalpiavirta on laskettu Myrreenin /14/ mukaan kalorimetrinen lämpöarvon perusteella seuraavasti.

$$\dot{H}_{pa} = \dot{m}_{pa}(1-f)H_S + \dot{m}_{pa}(c_{p,pa}T_{pa} - c_{p,pa_ref}T_{ref}) \quad (6.16)$$

jossa \dot{H}_{pa} polttoaineen entalpiavirta [MJ/h]
 H_S polttoaineen kalorimetrinen lämpöarvo [kJ/kg]
 $c_{p,pa}$ polttoaineen ominaislämpökapasiteetti [J/kg K]
 T_{pa} polttoaineen lämpötila [K]
 c_{p,pa_ref} polttoaineen ominaislämpökapasiteetti referenssilämpötilassa [J/kg K]
 T_{ref} referenssilämpötila (=273,15) [K]

Taselaskuissa esiintyvien ensiö-, sekundääri-, vuoto- ja hiilimyllyn ainevirrat on laskettu seuraavalla yhtälöllä.

$$\dot{n}_{ilma} = \frac{V_{ilma}}{V_m} \quad (6.17)$$

jossa \dot{n}_{ilma} ilman ainevirta [kmol/h]
 V_{ilma} ilman tilavuusvirta [m³n/h]
 V_m ideaalikaasun moolitilavuus normaalitilassa (=22,41) [dm³/mol]

Yhtälön 6.17 mukaan on laskettu myös kalsinoitumisesta vapautuvan hiilidioksidin ainevirta. Ilman ja savukaasun sisältämien vesihöyryjen entalpiavirrat on laskettu energiataseissa erikseen. Ennen entalpiavirtoja on kuitenkin selvitetty vesihöyryjen ainevirrat poltto- ja vuotoilmoissa.

$$\dot{n}_{h,ilma} = \frac{V_{ilma} \cdot \rho_{ilma} \cdot x}{M_{H_2O}} \quad (6.18)$$

jossa $\dot{n}_{h,ilma}$ vesihöyryn ainevirta [kmol/h]
 ρ_{ilma} ilman tiheys [kg/m³]
 x ilman absoluuttinen kosteus [kg H₂O/kg kuivaa ilmaa]
 M_{H_2O} veden moolimassa [g/mol]

Poltosta ja ilmaylimäärästä savukaasuun tulleen vesihöyryn ainevirta laskettiin savukaasulaskujen perusteella seuraavasti.

$$\dot{n}_{h,ks} = n'_{H_2O} \cdot \dot{n}_{pa} \quad (6.19)$$

jossa $\dot{n}_{h,ks}$ savukaasun sisältämän vesihöyryn ainevirta [kmol/h]

Vastaavalla tavalla on laskettu myös savukaasussa olevien komponenttien eli hiilidioksidin, typen ja hapen ainevirrat. Laskettujen ainevirtojen perusteella on laskettu kaasuvirtojen entalpiavirrat mitatuissa lämpötiloissa.

$$\dot{H}_{sk} = \dot{n}_{sk} (c_{p,sk} T_{sk} - c_{p,sk_ref} T_{ref}) \quad (6.20)$$

jossa	\dot{H}_{sk}	kaasun entalpiavirta [kJ/h]
	\dot{n}_{sk}	kaasun ainevirta [kmol/h]
	$c_{p,sk}$	kaasun ominaislämpökapasiteetti [J/mol K]
	T_{sk}	kaasun lämpötila [K]
	c_{p,sk_ref}	kaasun ominaislämpökapasiteetti referenssilämpötilassa [J/mol K]

Kiintoaineiden eli uunijauheen, klinkkerin sekä sähkösuodatin- ja jäähdytystornipölyjen entalpiavirrat on laskettu seuraavalla yhtälöllä.

$$\dot{H}_{ka} = \dot{m}_{ka} (c_{p,ka} T_{ka} - c_{p,ka_ref} T_{ref}) \quad (6.21)$$

jossa	\dot{H}_{ka}	kiintoaineen entalpiavirta [MJ/h]
	\dot{m}_{ka}	kiintoaineen massavirta [t/h]
	$c_{p,ka}$	kiintoaineen ominaislämpökapasiteetti [J/kg K]
	T_{ka}	kiintoaineen lämpötila [K]
	c_{p,ka_ref}	kiintoaineen ominaislämpökapasiteetti referenssilämpötilassa [J/kg K]

Kiintoaine- ja kaasuvirtojen entalpioiden lisäksi energiataseessa tulee huomioida prosessin mahdolliset lämpöhäviöt sekä muut energiaa kuluttavat prosessitekijät. Sementtiuunin tapauksessa tällaisia tekijöitä ovat klinkkeröitymisen vaatima reaktioenergia sekä veden höyrystymislämpö.

Lämpöhäviöiden laskemiseksi on käytetty F.L. Smidthin /38/ esittämiä yhtälöitä.

$$Q_{rad} = 167 \cdot 10^{-9} \cdot (T_{pinta}^4 - T_{ilma}^4) \quad (6.22)$$

$$Q_{con} = 336,33 \cdot \left(\frac{T_{pinta} + T_{ilma}}{2} \right)^{-0,724} \cdot (T_{pinta} - T_{ilma})^{1,333} \quad (6.23)$$

joissa	Q_{rad}	säteilyhäviö neliometriä kohti [kJ/h m ²]
	Q_{con}	konvektiohäviö neliometriä kohti [kJ/h m ²]
	T_{pinta}	pinnan lämpötila [K]
	T_{ilma}	ympäröivän ilman lämpötila [K]

Pinnan lämpöhäviöt muodostuvat säteily- ja konvektiohäviöiden summasta kerrottuna pinta-alalla.

$$Q_{tot} = A_{häviö} \cdot (Q_{rad} + Q_{con}) \quad (6.24)$$

joissa	Q_{tot}	pinnan lämpöhäviöt [kJ/h]
	$A_{häviö}$	lämpöhäviöitä aiheuttava pinta-ala [m ²]

Taulukossa 6.4 on Lappeenrannan sementtiuunien manttelien ja satelliittijäähdyttimien sekä uunin 5 syklonien pinta-alat.

Taulukko 6.4 Sementtiuunien ja syklonien lämpöhäviöitä aiheuttavat pinta-alat

Alue	UUNI 4		UUNI 5		
	Scannerin kattama alue	Muu osa uunista	Scannerin kattama alue	Muu osa uunista	Syklonit
Pinta-ala [m²]	583.7	1021.5	583.2	627.5	260.9

Satelliittijäähdyttimien lämpöhäviöitä aiheuttava pinta-ala on laskettu F.L. Smidthin /38/ esittämän mallin mukaan seuraavasti.

$$A_{j\ddot{a}h.} = K \cdot D \cdot L \quad (6.25)$$

jossa	$A_{j\ddot{a}h.}$	satelliittijäähdyttimien lämpöhäviöitä aiheuttava pinta-ala [m ²]
	K	jäähdyttimien lukumäärästä riippuva vakio
	D	jäähdyttimen putken halkaisija [m]
	L	jäähdyttimen putken pituus [m]

Vakion K arvo on 26,3 jos jäähdyttimessä on putkia 10 kappaletta (uuni 4) ja 28,1 jos jäähdyttimessä on putkia 11 kappaletta (uuni 5). Taulukossa 6.4 on lämpöhäviöitä aiheuttavat pinta-alat.

Klinkkerimineraalien muodostuminen vaatii varsin korkean reaktiolämpötilan. Osa tapahtuvista reaktioista on eksotermisiä ja osa endotermisiä. Klinkkeröitymisen reaktioenergia voidaan laskea F.L. Smidthin /38/ esittämän yhtälön mukaan klinkkerin kemiallisen analyysinperusteella seuraavasti.

$$R = 7,646 \cdot CaO + 6,48 \cdot MgO + 2,22 \cdot Al_2O_3 - 5,116 \cdot SiO_2 - 0,59 \cdot Fe_2O_3 - 10 \cdot (K_2O + Na_2O) \quad (6.26)$$

jossa	R	klinkkeröitymisen vaatima reaktioenergia [kcal/kg klinkkeriä]
		$Al_2O_3, SiO_2, Fe_2O_3, K_2O$ ja Na_2O ovat massaprosentteja klinkkerissä

Energiataselaskuissa ei ole kuitenkaan käytetty yhtälöä 6.26, vaan reaktiolämpö on määritetty kokeellisesti F.L. Smidthin laboratoriossa Tanskassa Lappeenrannan uunijauheesta otetusta näytteestä.

Veden höyrystymisen vaatima entalpiavirta on huomioitu vesihöyryn entalpiavirroissa.

$$\dot{H}_{vap} = \dot{m}_{vesi} \cdot h_{vap,ref} \quad (6.27)$$

jossa \dot{H}_{vap} veden höyrystymisen entalpiavirta [MJ/h]
 $h_{vap,ref}$ veden höyrystymislämpö referenssipisteessä [kJ/kg]

F.L. Smidthin /38/ mukaan veden höyrystyminen referenssilämpötilassa eli 0 °C:ssa vaatii 597 kcal/kg eli noin 2500 kJ/kg. Taselaskuissa on lisäksi laskettu kunkin entalpiavirran suhde tuotettuun klinkkerikiloon yksikössä kJ/kg klinkkeriä. Lisäksi on laskettu tulevin ja poistuvien virtojen yhteenlasketut entalpiavirrat sekä näiden virtojen erotus.

6.3.4.6 Massataseet

Vertailun vuoksi laskettiin myös massataseet energiataselaskuissa esiintyvien massa- ja tilavuusvirtojen pohjalta. Jäähdytystorni- ja anti-NO_x-vesien tilavuusvirrat on muutettu massavirroiksi veden tiheydellä 1000 kg/m³. Kaasujen tilavuusvirrat on muutettu massavirroiksi seuraavalla tavalla.

$$\dot{m}_i = \frac{\dot{V}_i}{V_m} \cdot M_i \quad (6.28)$$

jossa \dot{m}_i kaasun massavirta [kg/h]
 \dot{V}_i kaasun tilavuusvirta normaalitilassa [m³n/h]
 M_i kaasun moolimassa [g/mol]

6.3.5 Tasemittausten tulokset

Taulukossa 6.5 on näkyvissä kaikkien neljän energiatasemittauskerran tulokset tulevien ja poistuvien virtojen osalta.

Taulukko 6.5 Energiatasemittausten tulokset tulevien ja poistuvien virtojen osalta

Ominaisentalpia [kJ/kg kl.]	Uuni 4 taseajo 28.7.1999	Uuni 4 taseajo 11.11.1999	Uuni 5 taseajo 29.7.1999	Uuni 5 taseajo 13.10.1999
Hiilensyöttö	4413	4525	4194	4154
Tulevat virrat	4604	4667	4402	4286
Poistuvat virrat	3933	4563	3515	4153
Erotus	671	104	887	133

Heinäkuussa suoritettujen taseajojen tulevien ja poistuvien virtojen erotukset eli prosessin muut häviöt molemmille uuneille ovat suurempia, koska heinäkuun mittausten taseajan sisäpuolelle jäi suurempi osa prosessia kuin myöhemmin suoritetuissa taseajoissa. Energiataseista nähdään, että uuni 5 on noin 350 - 400 kJ/kg klinkkeriä energiataloudellisempi kuin uuni 4. Tämä selittyy pitkälti uunin 5 kaksivaiheisella syklonijärjestelmällä.

Vuotoilma ei vaikuta paljoakaan prosessin energiatalouteen, mutta prosessin kapasiteettiin sillä on suora vaikutus. Mitä enemmän vuotoilmaa pääsee savukaasukanavaan sitä enemmän kuormitetaan savukaasupuhallinta, jonka kapasiteetti vaikuttaa suoraan uunin vetoon ja siten tuotantoon. Taulukossa 6.6 on energiatasemittauksissa laskettujen vuotoilmojen määrä prosentteina piipussa virtaavasta savukaasusta.

Taulukko 6.6 Vuotoilman osuus piipun savukaasuvirtauksesta

	Uuni 4 taseajo 28.7.1999	Uuni 4 taseajo 11.11.1999	Uuni 5 taseajo 29.7.1999	Uuni 5 taseajo 13.10.1999
Virtaus Piipussa [m³n]	99800	91400	95200	91200
Vuotoilmaa piipussa [m³n]	41300	45600	36800	40700
Vuotoilman osuus piipussa	41 %	50 %	39 %	45 %

Uunin 5 savukaasukanava on huomattavasti monimutkaisempi kuin uunilla 4 ja siitä huolimatta uunin 4 vuotoilman määrä on suurempi kuin uunilla 5. Tämä johtuu uunin 4 sähkösuodattimen huonosta kunnosta. Uunin 4 toisessa tasemittauksessa kaikista vuotoilmoista noin 75 % tuli sähkösuodattimesta ja savukaasupuhaltimesta. Uunille 5 vastaavaa tarkastelua ei suoritettu. Uunin 5 toisessa taseajossa ei raakamyylly käynyt eli savukaasuja ei kierrätetty raakamyyllyn kautta. Tämä saattaa olla syynä uunin 5 toisen taseajon varsin suureen vuotoilman määrään. Tällöin osa vuotoilmasta saattaa tulla raakamyyllyn kautta, mikäli raakamyyllyn savukaasukanavan sulkeva pelti vuotaa.

Yksi tarkastelun aihe on lämmittämättömän ensiöilman osuus polttoilmasta. Taulukossa 6.7 on tasemittauksissa määritetyt ensiöilman prosentuaaliset osuudet polttoilmasta.

Taulukko 6.7 Ensiöilman osuus polttoilmasta

	Uuni 4 taseajo 28.7.1999	Uuni 4 taseajo 11.11.1999	Uuni 5 taseajo 29.7.1999	Uuni 5 taseajo 13.10.1999
Ensiöilmaa polttoilmasta	20 %	26 %	23 %	28 %

6.3.6 Virhearviointi

Näin suuren energiatasekokonaisuuden yksityiskohtainen virhearviointi on energiavirtojen osalta tarpeeton, koska jo parin prosenttiyksikön virhe hiilenpunnituksessa aiheuttaa niin suuren virheen, että muut mittausvirheet menettävät kokonaisuutta ajatellen merkityksensä. Ennen mittauksien aloittamista kannattaakin miettiä kuinka suurella tarkkuudella mittaukset on suoritettava, jotta tulos vastaa tavoitteita. Sementtitehtaalla käsitellään suuria määriä kiintoaineita, joiden tarkka punnitus on varsin hankalasti toteutettavissa. Samoin on suurten kaasumäärien virtausmittaus. Kaikki mittaukset pitävät sisällään jonkin verran mittausvirhettä ja näin suurten kiintoaine- ja kaasumäärien ollessa kyseessä ovat huomattavan suuria. Kaikista neljästä tasemittauksesta suurin tunnistettavissa ollut mittausvirhe oli ensimmäisessä uuni 5:n klinkkeripunnituksessa, jolloin klinkkeri nostettiin kuorma-autonlavalle klinkkerivaraston lattialta. Tällöin klinkkeriä punnittiin liikaa kahdeksan tunnin taseajossa noin 64 tonnia eli noin 8 t/h.

Taselaskuissa on tämä punnitusvirhe korjattu uunijauheen hehikutushäviön perusteella ja seuraavassa uuni 5:n tasemittauksessa klinkkeripunnitus onnistuikin jo paljon paremmin. Toinen klinkkeripunnituksessa tapahtunut mittausrvirhe oli uuni 4:n toisessa taseajossa, jossa klinkkerituotanto jäi noin 2,5 t/h liian alhaiseksi.

Energiataseiden kannalta ei juuri kannata keskittyä muuhun kuin hiilen ja klinkkerin punnitukseen, sillä jo muutaman prosentin virhe niissä vaikuttaa taseeseen enemmän kuin kaikkien muiden mittausten virheet yhteensä. Lappeenrannan sementtitehtaililla on kuitenkin käytössä varsin tarkat hiilensyöttimet, jotka kalibroitiin aina ennen taseajoja. Klinkkeripunnituksen virhe vaikuttaa lähinnä vain ominaisentalpioihin. Taulukoissa 6.8 ja 6.9 on kaikkien neljän energiatasetauksen virhearviointia viiden prosentin marginaalilla prosessin pääkomponenttien osalta.

Taulukko 6.8 Uunin 4 energiatasetaukujen virhearviointi pääkomponenttien osalta ($\pm 5\%$)

Entalpiavirta	Uuni 4 taseajo 28.7.1999		Uuni 4 taseajo 11.11.1999	
	Massa [t/h]	Ominaisentalpia [kJ/kg kl]	Massa [t/h]	Ominaisentalpia [kJ/kg kl]
Polttoaineen syöttö	3,99 \pm 0,20	4413 \pm 221	3,51 \pm 0,16	4525 \pm 226
Palamistuotteet (O ₂ , N ₂ , CO ₂)	-	417 \pm 20	-	1137 \pm 56
Uunijauhe	39,96 \pm 2,00	100 \pm 5	39,63 \pm 1,98	110 \pm 6
CO ₂ kalsinoitumisesta	-	98 \pm 5	-	318 \pm 16
Klinkkeri	28,06 \pm 1,41	88 \pm 4	24,04 \pm 1,20	104 \pm 5
Uunin manttelin lämpöhäviöt	-	627 \pm 28	-	812 \pm 28
Satelliittijäähdyttäjän lämpöhäviöt	-	276 \pm 13	-	335 \pm 13
TULEVAT VIRRAT	-	4606 \pm 243	-	4667 \pm 246

Taulukko 6.9 Uunin 5 energiatasetaukujen virhearviointi pääkomponenttien osalta ($\pm 5\%$)

Entalpiavirta	Uuni 5 taseajo 29.7.1999		Uuni 5 taseajo 13.10.1999	
	Massa [t/h]	Ominaisentalpia [kJ/kg kl]	Massa [t/h]	Ominaisentalpia [kJ/kg kl]
Polttoaineen syöttö	4,14 \pm 0,22	4194 \pm 220	3,86 \pm 0,19	4154 \pm 208
Palamistuotteet (O ₂ , N ₂ , CO ₂)	-	285 \pm 14	-	1033 \pm 73
Uunijauhe	46,23 \pm 2,31	111 \pm 6	46,36 \pm 2,32	104 \pm 5
CO ₂ kalsinoitumisesta	-	76 \pm 4	-	308 \pm 15
Klinkkeri	30,61 \pm 1,53	109 \pm 5	29,58 \pm 1,48	67 \pm 3
Uunin manttelin lämpöhäviöt	-	445 \pm 20	-	524 \pm 20
Satelliittijäähdyttäjän lämpöhäviöt	-	242 \pm 12	-	257 \pm 10
TULEVAT VIRRAT	-	4402 \pm 232	-	4286 \pm 225

Polttoaineen syötön ja palamistuotteiden virhe on laskettu polttoaineen syötössä oletetun 5 %:n virhemarginaalin perusteella. Samoin kalsinoitumisesta vapautuvan hiilidioksidin virheen suuruus on laskettu uunijauheen punnituksessa tapahtuneen 5 %:n mittausvirheen perusteella. Lämpöhäviöiden virhearviointi perustuu lämpötilanmittauksessa tapahtuneeseen 5 %:n virheeseen. Tulevien virtojen osalta ominaisentalpian virhe perustuu klinkkerin punnituksessa tapahtuneeseen 5 %:n virheeseen.

7 PAINEILMANKULUTUS

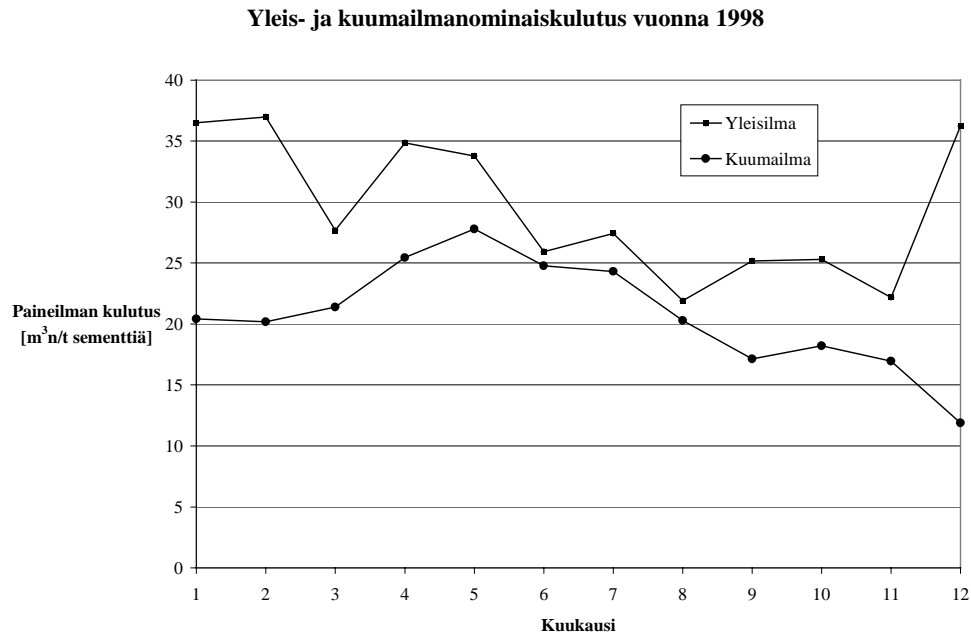
7.1 Johdanto

Lähes kaikki teollisuudenalat käyttävät paineilmaa ja sementtiteollisuus ei tee poikkeusta. Lappeenrannan sementtitehtaalla on käytössä kahdenlaista paineilmaa: kuivattua ja jäähdytettyä yleisilmaa ja suoraan kompressorilta tulevaa kuivaamatonta kuumailmaa. Yhteensä tehtaalla kulutettiin paineilmaa vuosina 1996 - 98 noin 18,5 miljoonaa normikuutiota vuodessa. Tästä noin 10 miljoonaa normikuutiota on yleisilmaa ja 8,5 miljoonaa normikuutiota kuumailmaa. Sementintuotantoon suhteutettuna tämä tarkoittaa noin 52 m³ paineilmaa tuotettua sementtitonnin kohti. Kiintoaineteollisuutena suurin osa paineilmasta sementtitehtaissa kuluu sementtijauheen siirtämiseen paikasta toiseen. Suurimman osan käyttämästään paineilmasta Finnsementti ostaa Partek Nordkalkilta, joka tuottaa sekä yleis- että kuumailmaa. Sementtitehtaalla on myös muutama oma kompressorin kuten sementtimylly 4:n kompressorin, joka tuottaa kuumailmaa myllyn 4 käyttöön. Sementtitehtaan raaka-ainepäässä on yksi korkeapainekompressorin homogenisointia varten ja uunin 5 ekonomaiserin nuohousta varten on oma korkeapainekompressorinsa. Lisäksi uunien hiilensyöttimillä on omat kompressorinsa. Taulukossa 7.1 on sementtitehtaan paineilmankulutus muutamalta viime vuodelta.

Taulukko 7.1 Paineilman kulutus Lappeenrannan sementtitehtaalla vuosina 1996 – 98 (Finnsementti /30/)

Vuosi	Yleisilma [m ³ n]	Kuumailma [m ³ n]
1996	7 304 765	8 393 300
1997	10 243 100	8 794 100
1998	11 709 865	8 750 500

Kuvassa 7.1 on paineilman yleis- ja kuumailmankulutus vuodelta 1998 eri kuukausille.



Kuva 7.1 Yleis- ja kuumailmanominaiskulutus vuonna 1998 (Finnsementti /30/)

Kuumailman kulutuksesta nähdään hyvin tuotannon kasvu kevät- ja kesäkuukausina. Tähän on syynä sesonkiluonteinen tuote. Yleisilman suhteen joulukuussa on havaittavissa erittäin korkea kulutus, mikä johtuu huoltoseisokista.

7.2 Yleisilma

Yleisilmaksi kutsutaan kuivattua ja jäädytettyä paineilmaa, jonka kastepiste on reilusti alle -30 °C . Yleisilmaverkoston paine sementtitehtaalla on noin 7 bar ylipainetta ja sen käyttö keskittyy mm. laitteiden instrumentointiin. Muita käyttökohteita ovat homogenointisiilo ja sementtimyllyjen suodattimet, joissa sitä käytetään suodinkankaiden ravistamiseen. Lisäksi yleisilmaa käytetään ajoittain myös ferrosulfaatin siirtoon sementtimyllyille.

7.3 Kuumailma

Kuumailma on kuivaamatonta ja suoraan kompressoreilta peräisin olevaa jäädyttämätöntä ilmaa. Sen paine kompressoreilla on normaalilla kulutuksella noin 7 bar ylipainetta, mutta sementtitehtaan puolella paine alennetaan paineenalentimella 5 bar:iin. Kuumailman käyttö keskittyy sementtitehtaan loppupäähän eli sementtimyllyihin ja pakkaamoon. Niissä sitä käytetään sementin kuljetukseen myllypiireissä sekä sementin siirtämiseen Fluxo-pumppujen kautta silloihin.

7.4 Paineilman ominaissähkökulutus

Paineilman ostamisesta johtuen ei ominaissähkökulutustietoja ollut saatavilla, joten paineilman ominaissähkökulutusta tarkastellaan teoreettiselta pohjalta. Airilan /44/ mukaan paineilman tekemiseen käytetty puristusteho lasketaan seuraavasti.

$$P_{pur} = \frac{q_{V,imu} p_{imu}}{\eta_{tuotto}} \cdot \frac{n}{(n-1)} \cdot \left[\left(\frac{p_{työ}}{p_{imu}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (7.1)$$

jossa	P_{pur}	puristusteho [W]
	$q_{V,imu}$	imuilman tilavuusvirta [m^3/s]
	η_{tuotto}	tuottoprosessin hyötysuhde
	n	polytrooppiekspONENTTI
	p_{imu}	imuilman paine [Pa]
	$p_{työ}$	työilman paine [Pa]

Taulukossa 7.2 on näkyvissä vuoden 1998 paineilman kulutuslukemilla laskettu teoreettinen sähkökulutus adiabaattisella puristuksella eli polytrooppiekspONENTIN SUURUUS on 1,4. Hyötysuhteen on oletettu olevan 0,7. Lisäksi taulukossa on laskettu teoreettinen sähkökulutus kuumailmalle, jos tuotetaankin suoraan Fluxo-pumppujen vaatimaa 4 bar paineilmaa.

Taulukko 7.2 Paineilman teoreettinen sähkönkulutus vuonna 1998 adiabaattisella puristuksella hyötysuhteen ollessa 0,7

1998	Yleisilma		Kuumailma		
	m ³ n	MWh (7 bar)	m ³ n	MWh (7 bar)	MWh (4 bar)
tammi	887 000	101	497 000	56	40
helmi	771 000	87	421 000	48	34
maalis	520 000	59	402 000	46	33
huhti	1 011 000	115	738 000	84	60
touko	1 074 000	122	884 000	100	72
kesä	1 279 000	145	1 222 000	139	100
heinä	1 420 000	161	1 259 000	143	103
elo	1 104 000	125	1 023 000	116	83
syys	1 029 000	117	700 000	79	57
loka	1 064 000	121	766 000	87	62
marras	757 000	86	579 000	66	47
joulu	794 000	90	261 000	30	21
yhteensä	11 710 000	1 327	8 752 000	992	713

Näin laskettuna saadaan ominaisähkönkulutukseksi 0,11 kWh/m³n tuottaessa 7 bar:sta kuivaamatonta paineilmaa. Vastaavasti jos tuotettaisiin 4 bar:sta kuumailmaa olisi ominaisähkönkulutus 0,08 kWh/m³n. Oletetaan, että kuumailman paineenalennus poistettaisiin ja tuotettaisiin suoraan Fluxo-pumppujen vaatimaa 4 bar:sta kuumailmaa. Näin saavutettaisiin teoriassa vuositasolla noin 250 - 300 MWh säästöt.

8 VEDENKULUTUS

8.1 Johdanto

Finnsementti Oy:n Lappeenrannan tehtaalla käytettiin vuosina 1996 - 98 vettä keskimäärin 465 000 m³ vuodessa. Tästä noin 400 000 m³ on prosessivettä ja loput 65 000 m³ puhdasta talousvettä. Sementintuotantoon suhteutettuna tämä tarkoittaa noin 1,1 m³ prosessivettä ja 0,2 m³ talousvettä tuotettua sementtitonnia kohti. Taulukossa 8.1 on sementtitehtaan vedenkulutus muutamalta viime vuodelta.

Taulukko 8.1 Vedenkulutus Lappeenrannan sementtitehtaalla vuosina 1996 – 98
(Finnsementti /30/)

Vuosi	Talousvesi [m³]	Prosessivesi [m³]
1996	53 357	350 470
1997	67 747	461 325
1998	75 111	398 248

8.2 Prosessivesi

Prosessivedeksi kutsutaan puhdistamatonta vettä, joka pumpataan prosessien käytettäväksi Partek Nordkalkin läheisestä avolouhoksesta ja ns. Toikan tunnelista. Pumpattu vesi on louhokseen ja tunneliin kertyvää sade- ja valumavettä. Sementtitehtaalla prosessivesi pumpataan 4000 m³ varastoaltaaseen, joka on vanha lieteallas sementinvalmistuksen märkämenetelmän ajoilta. Tästä altaasta vettä pumpataan sementin tehdasalueella sijaitsevaan 100 m³ vesitorniin, josta vesi valuu käyttökohteisiin omalla paineella. Sementtitehtaalla prosessivettä käytetään pääasiassa uunien ja myllyjen laakerien jäähdtykseen. Uunien ja raakamyllyn laakerien jäähdtyksvedet kierrätetään takaisin altaaseen, mutta sementtimyllyillä vastaavat jäähdtyksvedet menevät viemäriin. Varastoaltaasta prosessivettä käyttää myös naapuriyritykset Speciality Minerals sekä Partek Nordkalk.

8.3 Talousvesi

Talousvedeksi kutsutaan puhdistettua ja juomakelpoista vettä, joka on lähtöisin läheisestä Hanhijärvestä. Partek Nordkalkin omistama pumppaamo pumppaa vettä järvestä Hanhikempin vedenpuhdistamolle, jossa vesi suodatetaan 0,5 – 1,5 metriä paksun hiikkakerroksen läpi. Suodatuksen jälkeen tekopohjavesi pumpataan Partekin tehdasalueen käyttöön ilman lisäkäsittelyjä. Lappeenrannan sementtitehtaalla talousvettä käytetään jäädytystornien syöttövetenä sekä laboratoriossa ja sosiaalityötiloissa.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

9.1 Johdanto

Lappeenrannan sementtitehdas on vanha tuotantolaitos ja näin vanhan tehtaan uudistaminen täysin viimeisintä teknologiaa edustavaksi laitokseksi ei ole taloudellisesti kannattavaa. Ennemmin kannattaa rakentaa uusi tuotantolaitos viereen ja käyttää vanhasta tehtaasta hyväksi ne osat, joilla on vielä pitkä käyttöikä tiedossa. Sementtitehtaan energiansäästömahdollisuudet on helppo jakaa kolmeen luokkaan: sähköön, polttoaineeseen ja muihin mahdollisuuksiin.

9.2 Sähkönkulutus

Tehdasalueen aikaisemman yhden omistajan vuoksi koko alueen sähköverkosto on varsin monimutkainen nykyisiin omistajiin nähden. Sähkönkäyttöä on tehtailta toisille ja koko verkoston uudistaminen nykyisten tehtaiden mukaan ei ole kovin kannattavaa, koska kaikesta huolimatta nykyinen järjestelmä toimii varsin hyvin. Tehtaiden ja koko tehdasalueen osalta kannattaisi kuitenkin tehdä perusteellinen selvitys nykytilanteesta, jotta epäselvyyksiltä vältyttäisiin tulevaisuudessa.

Sähkön kulutuksen suhteen sementtitehtaalla energiansäästötoimenpiteet tulee keskittää jauhatuksen optimoimiseen. Tehtaalla käytössä olevat myllyt ovat kaikki kuulamylyjä ja eikä raaka- tai hiilimylyyn vaihtaminen energiataloudelliseksi pystymylyksi ole taloudellisesti kannattavaa. Myllypiirien sähkönkulutukseen voidaan kuitenkin vaikuttaa alentavasti muillakin keinoilla. Raakamylyyn luokitin on varsin vanhaa teknologiaa ja sen uusiminen yhdessä ennen raakamylyä sijoitettavaa korkeapaineista jauhinvalssia toisi huomattavia etuja. Sähkönkulutuksen suhteen korkeapaineinen jauhinvalssi ei toisi mitenkään valtavia säästöjä, mutta luokittimen vaihdolla luokituksen terävyys paranisi ja varsin suuri yli 25 % ohivirtaus pieneni. Raakajauhatuksen energiankulutusta pystyttäisiin alentamaan näillä menetelmillä mahdollisesti 3 – 8 kWh/tonni raakajauhetta.

Sementtimyllyjen osalta luokittimien toiminnalla on sähkönkulutuksen kannalta merkittävä rooli. Sementtimylly 3:n SEPAX-korkeatehokkuusluokitin toimii kolmesta luokittimesta kaikista parhaiten tehtyjen tarkastelujen perusteella. Luokitin onkin sementtimyllyjen luokittimista kaikkein uusin. Sementtimylly 4:n SEPOL-korkeatehokkuusluokitin ei tehtyjen tarkastelujen perusteella toimi aivan kuten korkeatehokkuusluokittimen pitäisi toimia. Myllypiirin teoreettinen energiansäästöpotentiaali oli kaikista myllypiireistä suurin, vaikka sementtimylly 5:n Hischmann-luokitin edustaa vanhempaa sukupolvea. Silti SEPOL-luokittimen luokituksen terävyys on yhtä hyvä kilpailevan yrityksen SEPAX-luokittimella. Sementtimylly 5:n Hischmann-luokitin ylittää toisen sukupolven luokittimeksi kohtuullisiin tuloksiin, mutta luokitinpiirin toiminnan kannalta tärkeätä on huomioida että Hischmann-luokitin toimii kaikista parhaiten kun sen kuormitus pidetään kohtuullisena.

Hiilimyllypiiri on vanha ja kapasiteetiltaan melkein liian pieni tehtaan tarpeisiin. Molempien uunien ollessa täydessä tuotannossa tulee hiilimyllyn pyöriä käytännössä aina, jotta tuotantoa pystytään pitämään yllä. Hiilimyllypiirin luokitusta parantamalla myllypiirin kapasiteetti lisääntyisi ja siten myllyn käyttöikä pitenisi. Paras, mutta kallein ratkaisu hiilenjauhatukseen olisi luokittimella varustettu pystymylly. Tällä tavalla saataisiin kapasiteettia lisää ja ainakin hiilenjauhatuksen osalta sähkönkulutusta pienenemään.

9.3 Polttoaineen kulutus

Polttoaineen kulutuksen suhteen Lappeenrannan sementtuunit eivät edusta viimeisintä teknologiaa. Kun nykyään parhaimmalla mahdollisella teknologialla pystytään pääsemään noin 3000 kJ/kg klinkkeriä on Lappeenrannan uunien ominaisenergiankulutus yli 4200 kJ/kg klinkkeriä. Uuni 5 on kaksivaiheisen syklonijärjestelmän ansiosta 350 – 400 kJ/kg klinkkeriä taloudellisempi uuni 4:ää, joka vanhana märkäuunina ilman uunijauheen esilämmitystä on auttamatta vanhanaikainen.

Uunien energiatalouden kannalta edullista olisi luopua yksikanavapolttimista ja asentaa niiden tilalle monikanavapolttimet. Näin pystyttäisiin pienentämään lämmittämättömän ensiöilman osuutta polttoilmasta yli 20 %:sta jopa 10 %:iin. Energiataloudellisesti tämä tarkoittaisi säästöä uunia kohti ehkä noin 150 – 250 kJ/kg klinkkeriä. Samalla kannattaisi toteuttaa ensiöilman esilämmitys hyödyntämällä satelliittijäähdyttäjien säteilylämpöä. Muutenkin lämmittämättömän ilman pääsy uuneihin pitäisi minimoida etenkin uunin kuumasta päästä parantamalla tiivistyksiä polttolavalla.

Vuotoilmojen minimoinnilla savukaasukanavissa ei saavuteta merkittäviä energiansäästöjä, mutta uunien kapasiteetin kannalta niillä on merkitystä. Etenkin uunin 4 sähkösuodatin vuotaa niin paljon, että se vaikuttaa uunin kapasiteettiin. Noin puolet uuni 4:n savukaasupuhaltimen kapasiteetista kuluu vuotoilmojen puhaltamiseen piipusta ulos. Uunin 4 piipun kaasuvirrasta noin 35 % on pelkästään sähkösuodattimesta tullutta vuotoilmaa. Uunilla 5 on vuotoilmojen määrä myös huomattavan suuri ja todennäköisesti suuri osa vuotoilmoista tulee huonokuntoisen jäähdytystornin kautta.

Uunien energiatalouteen vaikuttaa heikentävästi anti-NO_x-vesijärjestelmä, jossa liekkiin suihkutetaan teollisuuden jätevettä NO_x-päästöjen alentamiseksi. Uunilla 4 anti-NO_x-veden höyrystämiseen ja höyryn lämpötilan nousuun kuluu noin 90 kJ/kg klinkkeriä energiaa. Menetelmä ei ole energiataloudellisesti järkevä, mutta taloudelliset ja ympäristötekniset seikat puoltavat sitä. Vesisuihkutus pienentää NO_x-päästöjä merkittävästi ja samalla hävitetään ympäristölle haitallisia jätevesiä

Uunilla 5 osa savukaasujen sisältämästä lämpöenergiasta siirretään ekonomaiserin kautta kaukolämpöverkkoon. Uunin 5 ensimmäisessä taseajossa ekonomaiserin kautta hyödynnettiin savukaasujen sisältämästä energiasta noin 100 kJ/kg klinkkeriä. Mikäli tarvetta kaukolämmöstä olisi, kannattaisi uunin 4 savukaasukanavaan ennen jäähdytystornia investoida vastaavanlainen ekonomaiser.

9.4 Muut parannusmahdollisuudet

Yksi varsin merkittävä muu parannuskohde tehtaalta löytyy. Kuumailma ostetaan 7 bar:in paineessa ja se alennetaan paineenalentimella Fluxo-pumppujen vaatimaan 5 bar:iin. Pumput toimisivat hyvin vielä 4 bar:in paineella, joten sähköenergiaa kuluu hukkaan adiabaattisella puristuksella ja 70 %:n hyötysuhteella laskettuna noin 0,03 kWh/m³n kuumailmaa. Vuositasolla sähköenergiaksi muutettuna paineenalennus aiheuttaa teoriassa noin 250 – 300 MWh verran energiahäviötä. Paras ratkaisu ongelmaan olisi Fluxo-pumppuja varten nykyaikainen tehokas ruuvikompressori, jonka hyötysuhde on vanhanaikaisia mäntäkompressoreja parempi.

10 YHTEENVETO

Työn ensisijaisena tavoitteena oli Finnsementti Oy:n Lappeenrannan sementtitehtaan energiankäytön kartoitus eri energiamuotojen osalta. Kartoitus käsitti lähinnä sähköä ja polttoainetta, mutta pienimuotoisesti käytiin läpi myös paineilma ja vesi. Työssä tutustuttiin Kauppa- ja teollisuusministeriön ja Finnsementti Oy:n väliseen energiansäästösopimukseen, johon tämäkin diplomityö kiinteästi liittyy ollen osa sopimuksessa vaadittua tilanneselvitystä.

Työn alussa tutustuttiin sementinvalmistusprosessiin ja sementin kemiaan raaka-aineista valmiiseen tuotteeseen. Kirjallisuusosassa käytiin läpi sementtiteollisuuden energiansäästömahdollisuuksia niin sähkön kuin polttoaineen osalta. Eri lähteiden avulla tutustuttiin uusimpaan ja energiaa säästävään teknologiaan prosessin eri osa-alueilla. Erityisen tarkasti käytiin läpi jauhatus- ja luokitustekniikkaa.

Työssä käytiin läpi Lappeenrannan sementtitehtaan prosessi raaka-ainepäästä pakkaukseen. Lisäksi tutustuttiin hieman prosessin hallintaan, säätöön sekä laadunvalvontaan liittyviin seikkoihin. Kokeellisen osuuden alussa selvitettiin tehtaan sähköverkoston rakennetta ja olemassa olevia mittauksia. Lisäksi tehtiin katsaus sähkönkulutuksen historiaan Lappeenrannan sementtitehtaalla. Sähkönkulutukseen liittyen tehtiin raakamylylle ja sementtimylyille niiden luokittimien tehokkuustarkastelut, joiden suoritus käytiin työssä läpi.

Polttoaineen osalta kokeellinen osa käsitti sementtiuunien energiataseiden selvityksen ja Excel-taulukkopohjan rakentamisen, jonka perusteella energiataseiden selvitys onnistuisi tulevaisuudessakin helposti. Taseiden selvittämiseksi työn aikana tehtiin kaksi taseajoa tehtaan kummallekin sementtiuunille. Näiden taseajojen sekä energiataseiden laskeminen käytiin työssä läpi.

Työssä tutustuttiin myös paineilman ja veden kulutukseen muutaman viimevuoden ajalta. Lisäksi käytiin lyhyesti läpi niihin liittyviä ominaispiirteitä. Paineilman suhteen tutkittiin teoreettisesti paineilman tuottamiseen vaadittavaa ominaissähkönkulutusta ja verrattiin sitä käytännön tilanteeseen.

Kokeellisen osan tulosten perusteella piti paikallistaa Lappeenrannan sementtitehtaan energiankulutuksen ne osa-alueet, jotka vaativat parannusta. Johtopäätöksiin on kerätty Lappeenrannan sementtitehtaalte sopivia parannusmahdollisuuksia sähkö- ja polttoenergiankulutusten pienentämiseksi.

KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Alsop, P.A., Post, J.W., The Cement plant operations handbook, Second edition, Tradeship Publications Ltd, Portland, 1998
2. Duda, W.H., Cement-data-book, Volume 1, International process engineering in the cement industry, 3rd edition, Bauverlag GMBH, Wiesbaden and Berlin, 1985
3. Duda, W.H., Cement-data-book, Volume 2, Electrical engineering, automation, storage, transportation, dispatch, 1st edition, Bauverlag GMBH, Wiesbaden and Berlin, 1984
4. Peray, K.E., Cement manufacturer's handbook, Chemical publishing Co., Inc., New York, 1979
5. Mindess, S., Young, J.F., Concrete, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1981
6. Neville, A.M., Properties of concrete, Second edition, Pitman publishing, Bath, 1973
7. *Suomalainen sementti*, Esite, Finnsementti Oy, 1996
8. Caluori, A., Mark, F.E., Moser, M., Prisse, A., An alternative fuel for cement production – source separated plastics waste, Association of plastics manufacturers in Europe, 1997
9. Steinbiss, E., *Traditional and advanced concepts of waste heat recovery in cement plants*, KHD Humboldt Wedag AG, Cologne, W-Germany
10. *Ilmansuojelu, päästöt, kiintoaineen määrittäminen manuaalisella menetelmällä*, SFS-standardi 3866, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 1990
11. *Comminution manual*, F.L.Smith

12. Wilck, K., Cement teknologi, Cements AB, 1987
13. Laine, J., Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot, Tammer-Paino Oy, Tampere, 1997
14. Myrreen, B., *Polttimien aine- ja energiavirrat*, INSKO kurssimateriaali
15. *Klinkkeriuunin päästömittaukset*, Finnsemetti Oy, Lappeenranta, Raportti, Energia-Ekono Oy, Espoo, 1998
16. Scheuer, A., Leimen, Ellerbrock, H.-G., Possible ways of saving energy in cement production, *Zement-Kalk-Gips No. 7*, 1992, s. 175 – 182
17. Sprung, S., *Energy saving potential in the cement sector*, Cembureau, 1992
18. Sheinbaum, C., Ozawa, L., Energy use and CO₂ emissions for Mexico's cement industry, *Energy Vol. 23 No. 9*, 1998, s. 725 – 723
19. Mullinger, P., Jenkins, B., Rotary kiln coal firing, *Zement-Kalk-Gips No. 5*, 1987, s. 259 – 264
20. Kreft, W., Scheubel, B., Schutte, R., Clinker quality, power economy, and environmental load – Influencing factors and adaptation of the burning process, Part I: Basic considerations, *Zement-Kalk-Gips No. 5*, 1987, s. 107 – 111
21. Erhard, H., Scheuer, A., Burning technology and thermal economy, *Zement-Kalk-Gips International No. 2*, 1994, s. 34 – 42
22. Steinbiss, E., New curved internal fittings for rotary and planetary coolers, *Zement-Kalk-Gips No. 6*, 1992, s. 210 – 215

23. Lang, T., Mosimann, P., Production of electrical and thermal energy from exhaust gas heat of preheater kilns, *Modern cement plants – A Review*, 1985, s. 135 – 140
24. Ellerbrock, H.-G., Mathiak, H., Comminution technology and energy management, *Zement-Kalk-Gips No. 11*, 1994, s. 296 – 304
25. Menzel, K., Cyclone preheaters – a heat-technological comparison, *Zement-Kalk-Gips No. 5*, 1987, s. 102 – 106
26. Onuma, E., Ito, M., Separators in grinding circuits, *Zement-Kalk-Gips No. 9*, 1994, s. 535 – 542
27. Hilgraf, P., Der Energiebedarf pneumatischer Förderprinzipien im Vergleich mit mechanischen Förderungen, *Zement-Kalk-Gips International No. 12*, 1998, s. 660 – 673
28. Truedsson, Å., *Carbon dioxide emission from cement production*, Julkaisematon raportti, Scancem, 1997
29. <http://www.motiva.fi/tietopankki/index.html>, 30.9.1999
30. *Vuosiraportteja vuosilta 1970 – 1998*, Finnsementti Oy, Lappeenranta
31. *Reference document on best available techniques in the cement and lime manufacturing industries*, European intergrated pollution prevention and control bureau, 1999
32. Kaye, G.W.C., Laby, T.H., *Tables of physical and chemical constants*, 14th edition, Longman Group Ltd, 1973
33. Lea, F.M., *The Chemistry of cement and concrete*, Third edition, Edward Arnold Publishers Ltd, 1970

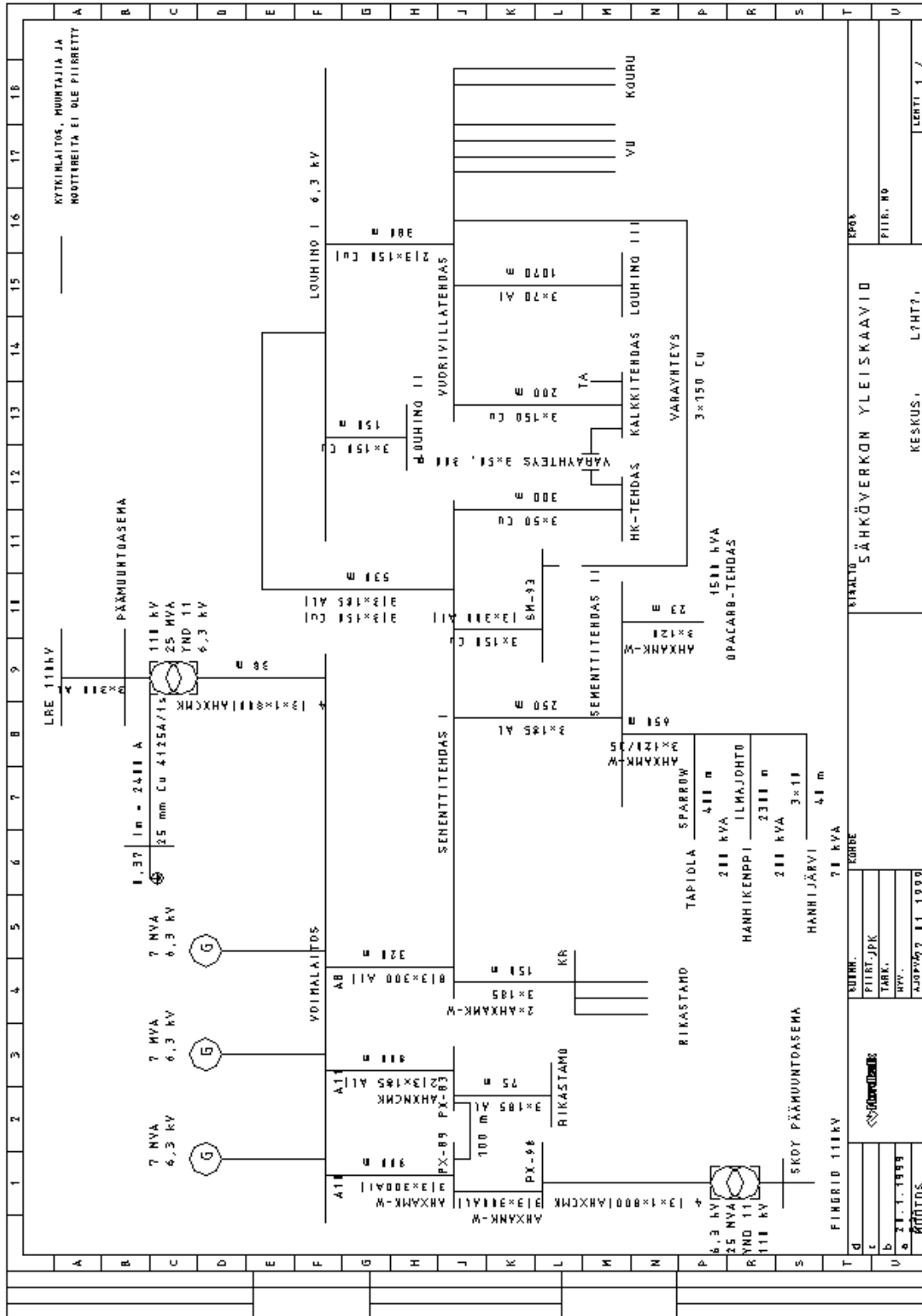
34. Ahlfors, M., *Jauhatus*, Julkaisematon koulutusmateriaali, Finnsementti Oy, Parainen, 1999
35. *Comminution and separation theories*, Lecture 4.1, The international cement production seminar, F. L. Smidth, 1999
36. *Raw material grinding*, Lecture 4.3, The international cement production seminar, F. L. Smidth, 1999
37. *Kiln systems – process & mechanical*, Lecture 5.1, The international cement production seminar, F. L. Smidth, 1999
38. *Heat balances*, Lecture 5.13 A, The international cement production seminar, F. L. Smidth, 1999
39. *Cooling of clinker*, Lecture 5.3, The international cement production seminar, F. L. Smidth, 1999
40. *Kiln conversions*, Lecture 5.4, The international cement production seminar, F. L. Smidth, 1999
41. *Cement grinding*, Lecture 6.1, The international cement production seminar, F. L. Smidth, 1999
42. *Piirustusarkisto*, Finnsementti Oy, Lappeenranta
43. Heiskanen, K., Energiankulutuksen estimoinnista, *Vuoriteollisuus No. 12*, 1999, s. 43 – 47
44. Airila, M., Paineilman kehittämisen perusteita, *Paineilma teollisuudessa*, Insinööri-järjestöjen koulutuskeskus 18-77, Helsinki, 1977

45. *Annual review 1998 – 1999*, Cembureau, 1999

LIITELUETTELO

- LIITE 1 Partek:in Lappeenrannan tehdasalueen sähköverkosto kytkinlaitoksineen
- LIITE 2 Raakamylyn luokittimen tehokkuustarkastelu 1.9.1999
- LIITE 3 Raakamylyn luokittimen tehokkuustarkastelu 6.9.1999
- LIITE 4 Raakamylyn syötön kivilaatujen seula-analyysi 1.10.1999
- LIITE 5 Sementtimylly 3:n luokittimen tehokkuustarkastelu 5.10.1999
- LIITE 6 Sementtimylly 4:n luokittimen tehokkuustarkastelu 26.11.1999
- LIITE 7 Sementtimylly 5:n luokittimen tehokkuustarkastelu 27.11.1999
- LIITE 8 Uuni 4:n ja uuni 5:n taseajot 28 – 29.7.1999
- LIITE 9 Uuni 5:n taseajo 13.10.1999
- LIITE 10 Uuni 4:n taseajo 11.11.1999

Partekin Lappeenrannan tehdasalueen sähköverkosto kytkinlaitoksineen



KYTKINLAITOS, MUUNTAJIA JA HOITUNEITA EI OLE PIIRRETTY	
LRE 11kV	
PÄÄMUUNTOASEMA	
1.37 m - 2x11 A	
7 MVA 6.3 kV	
7 MVA 6.3 kV	
7 MVA 6.3 kV	
VOIMALAITOS	
11 kV	
25 MVA	
TND 11	
6.3 kV	
SEMENTTITEHDAS I	
250 MVA	
SEMENTTITEHDAS II	
250 MVA	
LOUHINGO I	
6.3 kV	
LOUHINGO II	
150 MVA	
VUORIVILLATEHDAS	
1070 MVA	
VARAYHTEYS	
3x150 Cu	
OPACABB-TEHDAS	
1511 kVA	
RIKASTAMO	
75 MVA	
TAPIOLA SPARROW	
411 m	
HANHIKENNPI	
2311 m	
HANNIJÄRVI	
3x11	
SKOY PÄÄMUUNTOASEMA	
41 m	
FINGRID 11kV	
71 kVA	
KORBE	
KIRKKO	
SÄHKÖVERKON YLEISKAAVIO	
KESKUS	
LÄHTÖ	
LEHTI 1 /	

Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Raakamyllyn luokittimen tehokkuustarkastelu
Mittaustulokset

1.9.1999
klo 17.00

Seulomistulos (alitteen määrä %)			
Seula (µm)	Syöttö	Palaute	Valmis
200	81.2	61.5	98.6

Seulomistulos (ylitteen määrä %)			
Seula (µm)	Syöttö	Palaute	Valmis
200	18.8	38.5	1.4

Cilas-tulokset (alitteen määrä %)			
Partikkeli-koko (µm)	Syöttö	Palaute	Valmis
1	3.0	1.9	5.1
1.5	3.8	2.5	6.3
2	6.1	3.9	9.8
3	8.4	5.6	13.0
4	10.7	7.2	16.5
6	13.6	9.4	20.3
8	16.9	11.5	25.1
12	21.0	14.3	31.1
16	26.3	17.1	38.9
24	32.6	20.4	48.0
32	39.4	23.7	57.2
48	52.4	32.4	71.9
64	58.8	38.4	77.1
96	76.2	56.7	89.8
128	94.0	81.9	97.4
192	100.0	100.0	100.0

Cilas-tulokset (korjattu ylitteen määrä %)			
Partikkeli-koko (µm)	Syöttö	Palaute	Valmis
1	97.6	98.8	95.0
1.5	96.9	98.5	93.8
2	95.0	97.6	90.3
3	93.2	96.6	87.2
4	91.3	95.6	83.7
6	89.0	94.2	80.0
8	86.3	92.9	75.3
12	83.0	91.2	69.3
16	78.7	89.5	61.7
24	73.5	87.4	52.7
32	68.0	85.4	43.6
48	57.5	80.1	29.1
64	52.3	76.4	24.0
96	38.1	65.1	11.5
128	23.7	49.6	4.0
192	18.8	38.5	1.4

Cilas-tulokset (korjattu alitteen määrä %)			
Partikkeli-koko (µm)	Syöttö	Palaute	Valmis
1	2.4	1.2	5.0
1.5	3.1	1.5	6.2
2	5.0	2.4	9.7
3	6.8	3.4	12.8
4	8.7	4.4	16.3
6	11.0	5.8	20.0
8	13.7	7.1	24.7
12	17.0	8.8	30.7
16	21.3	10.5	38.3
24	26.5	12.6	47.3
32	32.0	14.6	56.4
48	42.5	19.9	70.9
64	47.7	23.6	76.0
96	61.9	34.9	88.5
128	76.3	50.4	96.0
192	81.2	61.5	98.6
1000	100.0	100.0	100.0

Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Raakamyllyn luokittimen tehokkuustarkastelu
Mittaustulokset

1.9.1999
klo 17.00

Seulomistulos (alitteen määrä %)		
Seula (µm)	Sykloni	Valmis+Syk.
200	94.4	98.5

Seulomistulos (ylitteen määrä %)		
Seula (µm)	Sykloni	Valmis+Syk.
200	5.6	1.5

Cilas-tulokset (alitteen määrä %)		
Partikkeli-koko (µm)	Sykloni	Valmis + Sykloni
1	5.1	4.7
1.5	6.4	5.9
2	10.0	9.3
3	13.5	12.4
4	17.1	15.9
6	21.4	19.7
8	26.6	24.5
12	33.1	30.4
16	41.3	38.1
24	51.0	47.2
32	60.0	56.4
48	73.5	71.1
64	78.1	76.5
96	89.2	89.5
128	97.3	97.3
192	100.0	100.0

Cilas-tulokset (korjattu ylitteen määrä %)		
Partikkeli-koko (µm)	Sykloni	Valmis + Sykloni
1	95.2	95.4
1.5	94.0	94.2
2	90.6	90.8
3	87.3	87.8
4	83.9	84.3
6	79.8	80.6
8	74.9	75.9
12	68.8	70.1
16	61.0	62.5
24	51.9	53.5
32	43.4	44.5
48	30.6	30.0
64	26.3	24.7
96	15.8	11.9
128	8.1	4.2
192	5.6	1.5

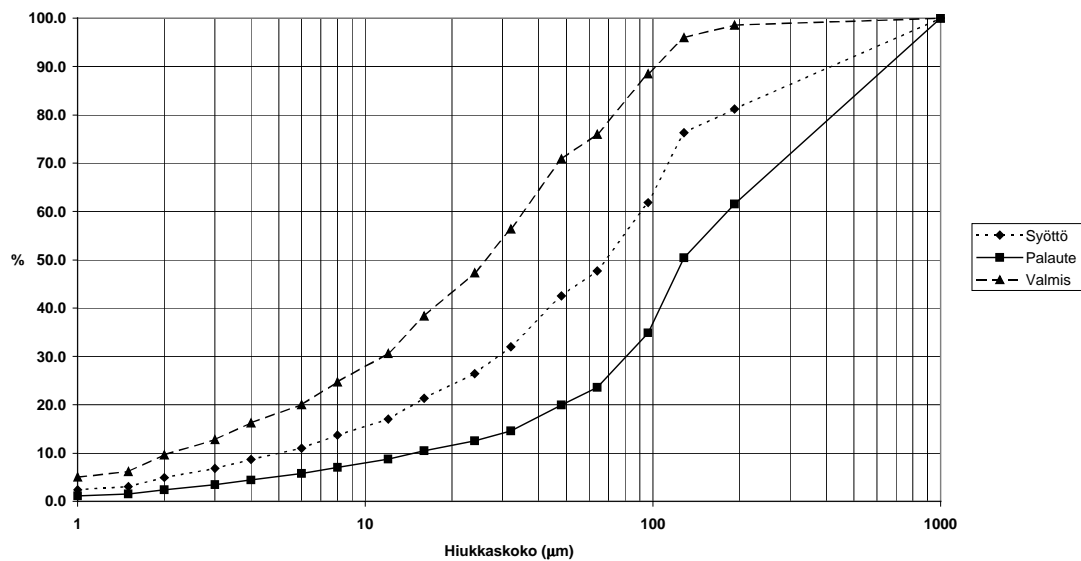
Cilas-tulokset (korjattu alitteen määrä %)		
Partikkeli-koko (µm)	Sykloni	Valmis + Sykloni
1	4.8	4.6
1.5	6.0	5.8
2	9.4	9.2
3	12.7	12.2
4	16.1	15.7
6	20.2	19.4
8	25.1	24.1
12	31.2	29.9
16	39.0	37.5
24	48.1	46.5
32	56.6	55.5
48	69.4	70.0
64	73.7	75.3
96	84.2	88.1
128	91.9	95.8
192	94.4	98.5
1000	100.0	100.0

Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Raakamylyn luokittimen tehokkuustarkastelu
Laskut

1.9.1999
klo 17.00

Partikkeli- koko (μm)	C	R.F.	R.C.	I.R.	B _{max}	V _s	B
1	3.0	67.7	68.1	35.8	1.7	54.4	0.9
1.5	3.0	66.6	68.0	34.6	2.1	51.7	1.1
2	2.8	68.6	66.6	35.2	3.3	52.2	1.7
3	2.8	67.7	66.3	34.0	4.3	48.9	2.1
4	2.8	67.3	67.0	34.4	5.6	49.0	2.7
6	2.7	67.0	66.8	33.7	6.9	46.7	3.2
8	2.7	67.8	67.2	35.0	8.6	48.5	4.2
12	2.6	67.9	68.5	36.3	11.0	49.9	5.5
16	2.6	69.9	69.5	39.4	14.1	54.4	7.7
24	2.5	71.5	71.3	42.9	18.1	58.7	10.7
32	2.4	73.4	73.3	46.7	22.5	62.8	14.2
48	2.3	73.9	77.5	51.4	31.0	65.3	20.2
64	2.2	73.3	78.9	52.1	34.5	63.8	22.0
96	2.0	72.0	84.8	56.8	45.9	63.1	28.9
128	1.8	71.5	90.4	61.9	56.9	61.0	34.7
192	1.9	64.4	95.9	60.3	67.1	61.0	40.9
Keskiarvo	2.5	69.4	73.8	43.2	20.9	55.7	12.5

Seulakäyrät raakamylyn luokittimelle
(Finnsementti Oy, Lappeenranta, 1.9.1999 klo 17.00)

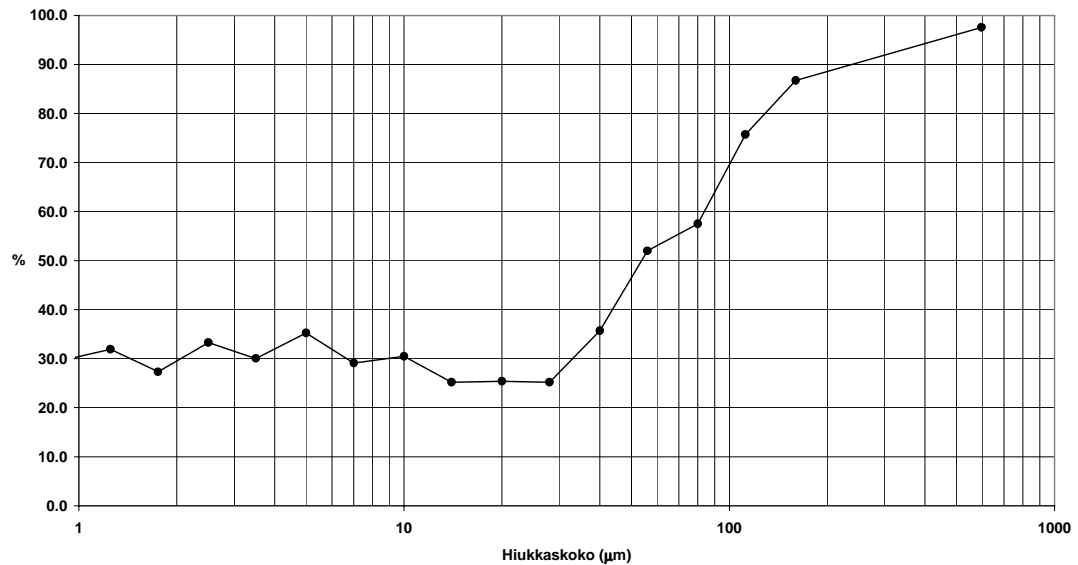


Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Raakamylyn luokittimen tehokkuustarkastelu
Tromp-laskut

1.9.1999
klo 17.00

Partikkeli- koko (μm)	R_g	R_f	R_m	C	R_m (korj.)	F.R. Tromp
0.5	1.2	5.0	2.4	-	2.7	25.9
1.25	0.4	1.2	0.6	3.0	0.7	31.9
1.75	0.9	3.4	1.9	2.9	1.9	27.3
2.5	1.0	3.2	1.9	2.8	1.9	33.3
3.5	1.0	3.4	1.9	2.8	2.0	30.0
5	1.4	3.7	2.4	2.7	2.3	35.2
7	1.3	4.7	2.7	2.7	2.7	29.1
10	1.7	5.9	3.3	2.7	3.4	30.5
14	1.7	7.7	4.3	2.6	4.1	25.2
20	2.0	9.0	5.1	2.5	4.8	25.4
28	2.0	9.1	5.5	2.5	4.8	25.2
40	5.4	14.5	10.6	2.3	9.0	35.7
56	3.7	5.1	5.2	2.2	4.3	52.0
80	11.3	12.5	14.1	2.1	11.8	57.5
112	15.5	7.5	14.4	1.9	12.3	75.7
160	11.1	2.6	4.9	1.8	7.7	86.7
596	38.5	1.4	18.8	-	23.7	97.6
Summa	100.0	100.0	100.0	-	100.0	-
Keskiarvo	-	-	-	2.5	-	-

Tromp-käyrä raakamylyn luokittimelle
(Finnsementti Oy, Lappeenranta, 1.9.1999 klo 17.00)



Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Raakamylyn luokittimen tehokkuustarkastelu
XRF-analysit (paino-%)

1.9.1999
klo 17.00

Aine	Syöttö	Valmis	Palaute	Sykloni	Valmis + Sykloni
SiO ₂	16.44	13.8	18.94	13.71	13.69
Al ₂ O ₃	2.8	2.59	3.23	2.5	2.55
Fe ₂ O ₃	3.51	1.6	5.51	1.72	1.59
CaO	44.66	46.33	42.84	46.54	46.42
K ₂ O	0.39	0.39	0.47	0.36	0.38
SO ₃	0.23	0.22	0.23	0.23	0.22
MgO	1.06	0.93	1.11	0.97	0.94
Cr ₂ O ₃	0.0113	0.0079	0.0148	0.0083	0.0082
Na ₂ O	0.73	0.53	0.99	0.52	0.53
Cl	0.0166	0.0176	0.0158	0.0177	0.0176

Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Raakamyllyn luokittimen tehokkuustarkastelu
Mittaustulokset

6.9.1999
klo 10.00

Seulomistulos (alitteen määrä %)			
Seula (µm)	Syöttö	Palaute	Valmis
200	81.3	64.2	98.6

Seulomistulos (ylitteen määrä %)			
Seula (µm)	Syöttö	Palaute	Valmis
200	18.7	35.8	1.4

Cilas-tulokset (alitteen määrä %)			
Partikkeli-koko (µm)	Syöttö	Palaute	Valmis
1	2.7	1.8	4.5
1.5	3.5	2.3	5.7
2	5.6	3.7	9.0
3	7.7	5.3	12.0
4	9.6	6.7	15.0
6	12.2	8.7	18.5
8	14.8	10.5	22.7
12	18.5	12.8	28.1
16	22.5	15.2	34.5
24	28.1	18.0	42.8
32	33.7	20.7	51.1
48	44.0	28.5	64.2
64	52.8	34.7	72.1
96	68.4	53.3	86.7
128	92.1	88.3	96.6
192	100.0	100.0	100.0

Cilas-tulokset (korjattu ylitteen määrä %)			
Partikkeli-koko (µm)	Syöttö	Palaute	Valmis
1	97.8	98.8	95.6
1.5	97.2	98.5	94.4
2	95.4	97.6	91.1
3	93.7	96.6	88.2
4	92.2	95.7	85.2
6	90.1	94.4	81.8
8	88.0	93.3	77.6
12	85.0	91.8	72.3
16	81.7	90.2	66.0
24	77.1	88.4	57.8
32	72.6	86.7	49.6
48	64.2	81.7	36.7
64	57.1	77.7	28.9
96	44.4	65.8	14.5
128	25.1	43.3	4.7
192	18.7	35.8	1.4

Cilas-tulokset (korjattu alitteen määrä %)			
Partikkeli-koko (µm)	Syöttö	Palaute	Valmis
1	2.2	1.2	4.4
1.5	2.8	1.5	5.6
2	4.6	2.4	8.9
3	6.3	3.4	11.8
4	7.8	4.3	14.8
6	9.9	5.6	18.2
8	12.0	6.7	22.4
12	15.0	8.2	27.7
16	18.3	9.8	34.0
24	22.9	11.6	42.2
32	27.4	13.3	50.4
48	35.8	18.3	63.3
64	42.9	22.3	71.1
96	55.6	34.2	85.5
128	74.9	56.7	95.3
192	81.3	64.2	98.6
1000	100.0	100.0	100.0

Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Raakamyllyn luokittimen tehokkuustarkastelu
Mittaustulokset

6.9.1999
klo 10.00

Seulomistulos (alitteen määrä %)		
Seula (µm)	Sykloni	Valmis+Syk.
200	94.4	98.7

Seulomistulos (ylitteen määrä %)		
Seula (µm)	Sykloni	Valmis+Syk.
200	5.6	1.3

Cilas-tulokset (alitteen määrä %)		
Partikkeli-koko (µm)	Sykloni	Valmis + sykloni
1	5.1	4.7
1.5	6.4	5.9
2	10.0	9.3
3	13.5	12.4
4	17.1	15.9
6	21.4	19.7
8	26.6	24.5
12	33.1	30.4
16	41.3	38.1
24	51.0	47.2
32	60.0	56.4
48	73.5	71.1
64	78.1	76.5
96	89.2	89.5
128	97.3	97.3
192	100.0	100.0

Cilas-tulokset (korjattu ylitteen määrä %)		
Partikkeli-koko (µm)	Sykloni	Valmis + sykloni
1	95.2	95.4
1.5	94.0	94.2
2	90.6	90.8
3	87.3	87.8
4	83.9	84.3
6	79.8	80.6
8	74.9	75.8
12	68.7	70.0
16	61.0	62.4
24	51.8	53.4
32	43.3	44.4
48	30.6	29.9
64	26.2	24.5
96	15.8	11.7
128	8.1	4.0
192	5.6	1.3

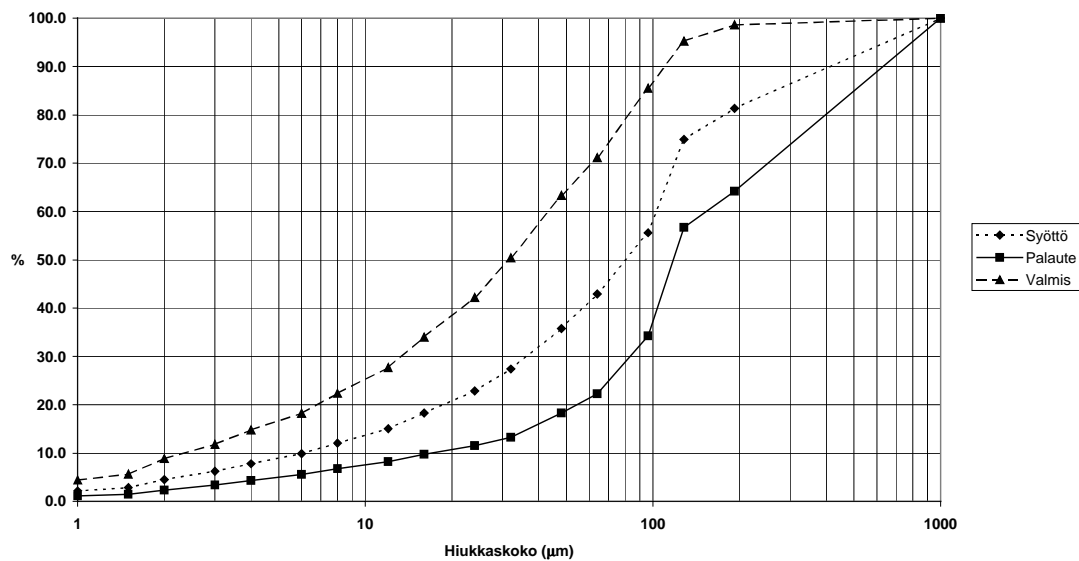
Cilas-tulokset (korjattu alitteen määrä %)		
Partikkeli-koko (µm)	Sykloni	Valmis + sykloni
1	4.8	4.6
1.5	6.0	5.8
2	9.4	9.2
3	12.7	12.2
4	16.1	15.7
6	20.2	19.4
8	25.1	24.2
12	31.3	30.0
16	39.0	37.6
24	48.2	46.6
32	56.7	55.6
48	69.4	70.1
64	73.8	75.5
96	84.2	88.3
128	91.9	96.0
192	94.4	98.7
1000	100.0	100.0

Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Raakamylyn luokittimen tehokkuustarkastelu
Laskut

6.9.1999
klo 10.00

Partikkeli- koko (μm)	C	R.F.	R.C.	I.R.	B _{max}	V _s	B
1	3.2	64.0	69.0	33.1	1.5	48.8	0.8
1.5	3.0	65.2	67.9	33.2	1.9	48.6	0.9
2	3.0	65.3	68.0	33.3	3.1	48.3	1.5
3	2.9	64.1	68.1	32.2	4.1	45.1	1.9
4	3.0	63.3	69.1	32.4	5.2	45.2	2.4
6	2.9	63.0	68.9	31.9	6.5	43.0	2.8
8	3.0	62.9	70.2	33.1	8.1	45.1	3.7
12	2.9	64.5	70.2	34.7	10.2	47.4	4.8
16	2.8	65.4	71.6	37.0	12.9	51.0	6.6
24	2.7	68.0	72.4	40.5	16.3	55.7	9.1
32	2.6	69.9	74.0	44.0	20.2	60.1	12.1
48	2.6	68.7	77.8	46.5	27.5	60.9	16.8
64	2.4	70.1	78.6	48.6	31.9	60.8	19.4
96	2.4	64.1	86.4	50.5	45.3	59.2	26.8
128	2.1	60.0	91.1	51.1	58.6	49.1	28.7
192	2.0	60.3	96.3	56.6	68.4	57.9	39.6
Keskiarvo	2.7	64.9	75.0	39.9	20.1	51.6	11.1

Seulakäyrät raakamylyn luokittimelle
(Finnsementti Oy, Lappeenranta, 6.9.1999 klo 10.00)

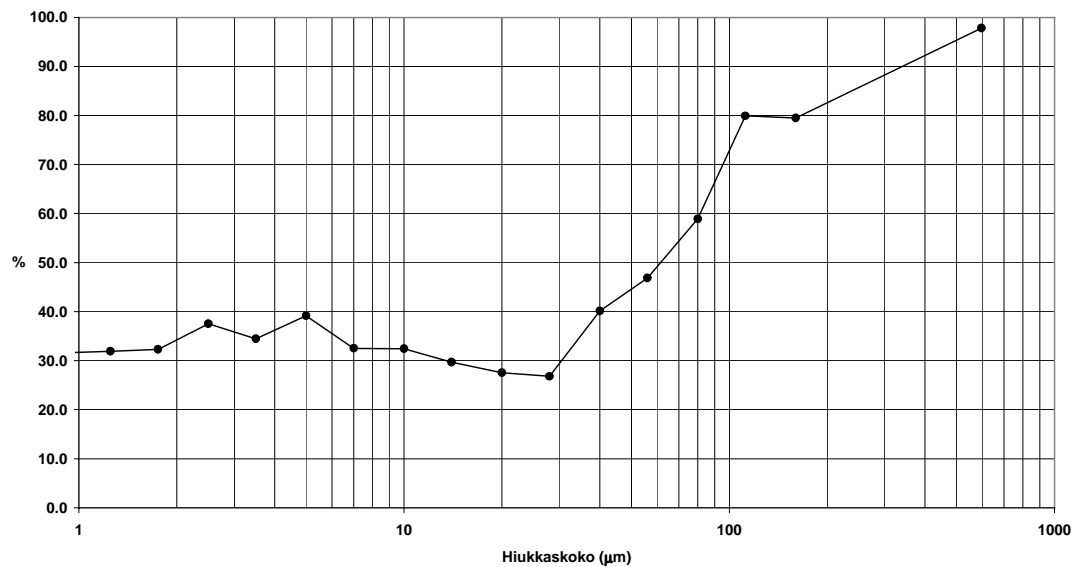


Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Raakamylyn luokittimen tehokkuustarkastelu
Tromp-laskut

6.9.1999
klo 10.00

Partikkeli- koko (µm)	R _g	R _f	R _m	C	R _m (korj.)	F.R. Tromp
0.5	1.2	4.4	2.2	-	2.4	31.0
1.25	0.3	1.2	0.7	3.1	0.6	31.9
1.75	0.9	3.3	1.7	3.0	1.8	32.3
2.5	1.0	3.0	1.7	3.0	1.7	37.5
3.5	0.9	3.0	1.5	3.0	1.7	34.4
5	1.3	3.5	2.1	3.0	2.1	39.1
7	1.2	4.1	2.1	2.9	2.3	32.5
10	1.5	5.3	3.0	2.9	2.9	32.4
14	1.5	6.3	3.3	2.8	3.3	29.7
20	1.8	8.2	4.6	2.8	4.1	27.5
28	1.7	8.2	4.6	2.7	4.1	26.8
40	5.0	12.9	8.4	2.6	7.9	40.1
56	4.0	7.8	7.2	2.5	5.4	46.9
80	11.9	14.4	12.7	2.4	12.8	58.9
112	22.5	9.8	19.3	2.3	17.8	79.9
160	7.5	3.4	6.4	2.1	6.0	79.5
596	35.8	1.4	18.7	-	23.2	97.8
Summa	100.0	100.0	100.0	-	100.0	-
Keskiarvo	-	-	-	2.7	-	-

Tromp-käyrä raakamylyn luokittimelle
(Finnsementti Oy, Lappeenranta, 6.9.1999 klo 10.00)



Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Raakamylyn luokittimen tehokkuustarkastelu
XRF-analysit (paino-%)

6.9.1999
klo 10.00

Aine	Syöttö	Valmis	Palaute	Sykloni	Valmis + Sykloni
SiO ₂	14.81	12.93	17.02	13.47	13.42
Al ₂ O ₃	2.43	2.29	2.53	2.27	2.25
Fe ₂ O ₃	4.53	1.59	7.76	1.88	1.45
CaO	44.96	46.83	43.39	46.56	46.71
K ₂ O	0.44	0.46	0.47	0.5	0.49
SO ₃	0.14	0.15	0.14	0.15	0.15
MgO	1.71	1.08	2.15	1.1	1.04
Cr ₂ O ₃	0.0122	0.0076	0.0166	0.0078	0.0081
Na ₂ O	0.48	0.4	0.57	0.44	0.41
Cl	0.0167	0.0178	0.0157	0.0177	0.0177

Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Raakamylyn syötön kivilaatujen seula-analyysi

1.10.1999
klo 11.30

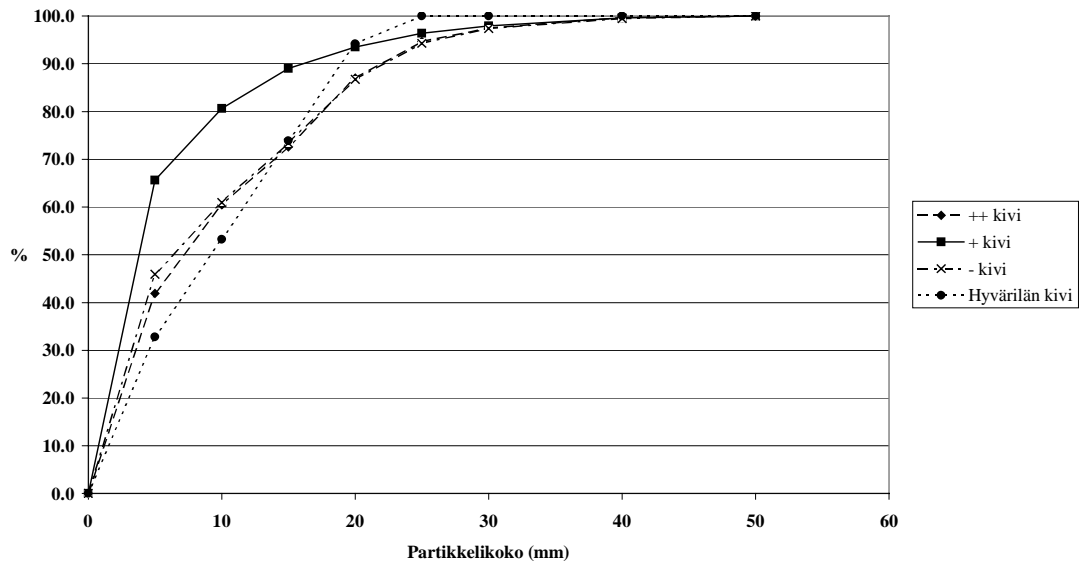
Kumulatiivinen ylitteen määrä (%)				
Seula (mm)	++ kivi	+ kivi	- kivi	Hyväriilän kivi
0	100.0	100.0	100.0	100.0
5	58.1	34.4	54.1	67.2
10	39.6	19.4	39.0	46.8
15	27.4	11.0	26.6	26.1
20	13.0	6.5	13.3	5.8
25	5.4	3.6	5.7	0.0
30	2.6	2.0	2.6	0.0
40	0.3	0.4	0.5	0.0
50	0.0	0.0	0.0	0.0

Kumulatiivinen alitteen määrä (%)				
Seula (mm)	++ kivi	+ kivi	- kivi	Hyväriilän kivi
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	41.9	65.6	45.9	32.8
10	60.4	80.6	61.0	53.2
15	72.6	89.0	73.4	73.9
20	87.0	93.5	86.7	94.2
25	94.6	96.4	94.3	100.0
30	97.4	98.0	97.4	100.0
40	99.7	99.6	99.5	100.0
50	100.0	100.0	100.0	100.0

Punnitustulokset (g)				
Seula (mm)	++ kivi	+ kivi	- kivi	Hyväriilän kivi
0	11915	17846	11861	9521
5	5263	4075	3880	5931
10	3468	2270	3213	5985
15	4090	1229	3442	5901
20	2169	777	1947	1681
25	797	436	807	0
30	630	438	538	0
40	95	116	136	0
50	0	0	0	0
Yhteensä	28427	27187	25824	29019

Seulan ylitteen määrä (%)				
Seula (mm)	++ kivi	+ kivi	- kivi	Hyväriilän kivi
0	41.9	65.6	45.9	32.8
5	18.5	15.0	15.0	20.4
10	12.2	8.3	12.4	20.6
15	14.4	4.5	13.3	20.3
20	7.6	2.9	7.5	5.8
25	2.8	1.6	3.1	0.0
30	2.2	1.6	2.1	0.0
40	0.3	0.4	0.5	0.0
50	0.0	0.0	0.0	0.0

Raakamylyn syötön kivilaatujen seula-analyysi
(Finnsementti Oy, Lappeenranta, 1.10.1999, klo 11.30)



Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Sementtimylly 3:n luokittimen tehokkuustarkastelu
Mittaustulokset (paino-%)

Yleissementti
5.10.1999
klo 14.50

Seulomistulos (alitteen määrä)			
Seula (μm)	Syöttö	Palaute	Valmis
200	98.5	97.1	99.9

Seulomistulos (ylitteen määrä)			
Seula (μm)	Syöttö	Palaute	Valmis
200	1.5	2.9	0.1

Cilas-tulokset (alitteen määrä)			
Partikkeli-koko (μm)	Syöttö	Palaute	Valmis
1	2.0	0.7	4.2
1.5	2.4	0.8	5.1
2	3.6	1.0	7.7
3	4.7	1.2	10.0
4	6.1	1.5	13.0
6	7.7	1.5	17.1
8	10.3	2.2	22.7
12	14.2	2.3	31.5
16	19.0	2.5	43.8
24	26.4	2.9	64.9
32	40.5	10.6	82.6
48	68.5	47.9	98.7
64	78.1	62.2	100.0
96	93.9	89.8	100.0
128	98.4	97.4	100.0
192	100.0	100.0	100.0

Cilas-tulokset (korjattu ylitteen määrä)			
Partikkeli-koko (μm)	Syöttö	Palaute	Valmis
1	98.0	99.3	95.8
1.5	97.6	99.2	94.9
2	96.5	99.0	92.3
3	95.4	98.8	90.0
4	94.0	98.5	87.0
6	92.4	98.5	82.9
8	89.9	97.9	77.3
12	86.0	97.8	68.5
16	81.3	97.6	56.2
24	74.0	97.2	35.1
32	60.1	89.7	17.5
48	32.5	53.5	1.4
64	23.1	39.6	0.1
96	7.5	12.8	0.1
128	3.1	5.5	0.1
192	1.5	2.9	0.1

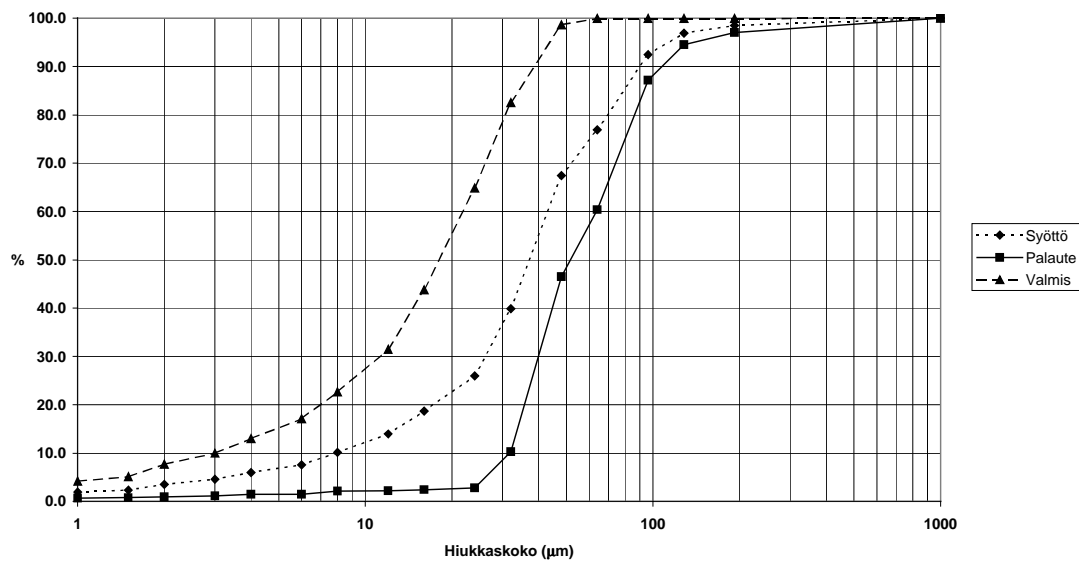
Cilas-tulokset (korjattu alitteen määrä)			
Partikkeli-koko (μm)	Syöttö	Palaute	Valmis
1	2.0	0.7	4.2
1.5	2.4	0.8	5.1
2	3.5	1.0	7.7
3	4.6	1.2	10.0
4	6.0	1.5	13.0
6	7.6	1.5	17.1
8	10.1	2.1	22.7
12	14.0	2.2	31.5
16	18.7	2.4	43.8
24	26.0	2.8	64.9
32	39.9	10.3	82.5
48	67.5	46.5	98.6
64	76.9	60.4	99.9
96	92.5	87.2	99.9
128	96.9	94.5	99.9
192	98.5	97.1	99.9
1000	100.0	100.0	100.0

Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Sementtimyly 3:n luokittimen tehokkuustarkastelu
Laskut

Yleissementti
5.10.1999
klo 14.50

Partikkeli- koko (μm)	C	R.F.	R.C.	I.R.	B _{max}	V _s	B
1	2.7	78.2	64.2	42.3	1.4	68.2	0.9
1.5	2.7	79.2	64.3	43.5	1.6	70.2	1.2
2	2.6	83.1	63.4	46.5	2.5	75.7	1.9
3	2.5	84.7	63.0	47.7	3.2	77.8	2.5
4	2.5	85.3	63.5	48.8	4.2	79.0	3.3
6	2.6	88.3	64.8	53.2	5.6	84.4	4.7
8	2.6	87.2	66.5	53.6	7.7	83.4	6.4
12	2.5	90.5	68.0	58.4	11.0	88.2	9.7
16	2.5	92.1	72.8	64.9	16.6	91.7	15.2
24	2.7	93.2	82.3	75.5	29.0	94.9	27.5
32	2.4	84.8	88.1	72.9	42.3	88.9	37.6
48	2.5	58.8	98.3	57.1	70.7	76.1	53.8
64	2.4	54.3	99.9	54.2	82.2	80.3	66.0
96	2.4	45.0	99.6	44.6	82.2	46.2	38.0
128	2.3	45.4	99.0	44.4	81.9	18.2	14.9
192	2.0	50.5	97.7	48.2			
Keskiarvo	2.5	75.0	78.4	53.5	29.5	74.9	18.9

Seulakäyrät sementtimyly 3:n luokittimelle
(Finnsementti Oy, Lappeenranta, Yleissementti, 5.10.1999, klo 14.50)

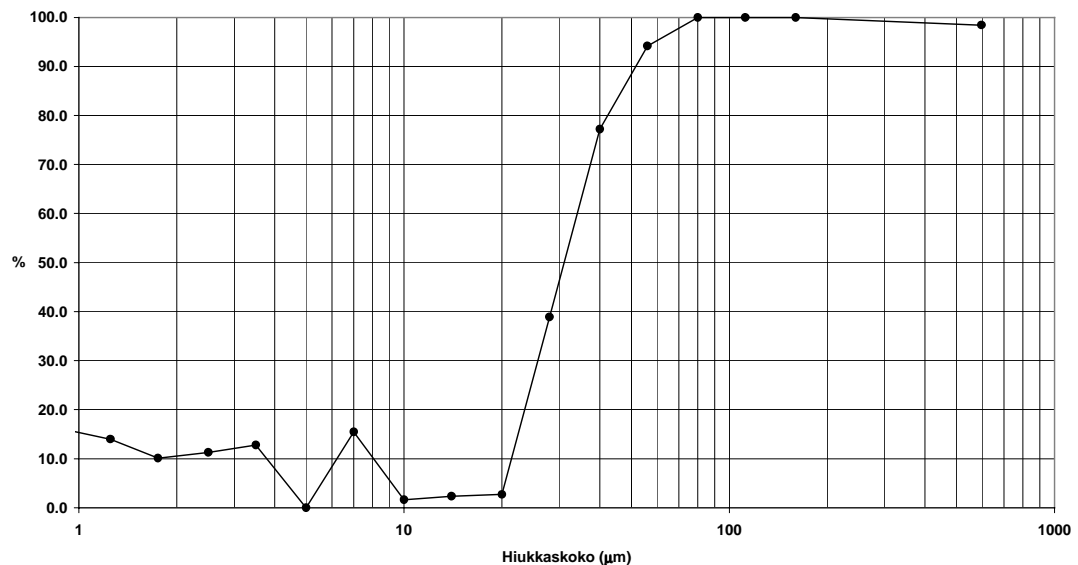


Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Sementtimylly 3:n luokittimen tehokkuustarkastelu
Tromp-laskut

Yleissementti
5.10.1999
klo 14.50

Partikkeli- koko (µm)	R _g	R _f	R _m	C	R _m (korj.)	F.R. Tromp
0.5	0.7	4.2	2.0	-	2.1	19.6
1.25	0.1	0.9	0.4	2.7	0.4	14.0
1.75	0.2	2.6	1.2	2.7	1.2	10.1
2.5	0.2	2.3	1.1	2.6	1.0	11.3
3.5	0.3	3.0	1.4	2.5	1.4	12.8
5	0.0	4.1	1.6	2.5	1.6	0.0
7	0.7	5.6	2.6	2.6	2.6	15.5
10	0.1	8.8	3.8	2.5	3.6	1.6
14	0.2	12.3	4.7	2.5	5.0	2.3
20	0.4	21.1	7.3	2.6	8.6	2.7
28	7.5	17.7	13.9	2.6	11.5	38.9
40	36.2	16.1	27.6	2.5	28.2	77.2
56	13.9	1.3	9.5	2.4	8.9	94.1
80	26.8	0.0	15.6	2.4	16.1	100.0
112	7.4	0.0	4.4	2.3	4.4	100.0
160	2.5	0.0	1.6	2.1	1.5	100.0
596	2.9	0.1	1.5	-	1.8	98.4
Summa	100.0	100.0	100.0	-	100.0	-
Keskiarvo	-	-	-	2.5	-	-

Tromp-käyrä sementtimylly 3:n luokittimelle
(Finnsementti Oy, Lappeenranta, Yleissementti, 5.10.1999, klo 14.50)



Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Sementtimylly 4:n luokittimen tehokkuustarkastelu
Mittaustulokset (paino-%)

Pikasementti
26.11.1999
klo 15.15

Seulomistulos (alitteen määrä)			
Seula (μm)	Syöttö	Palaute	Valmis
200	99.2	99.0	100.0

Seulomistulos (ylitteen määrä)			
Seula (μm)	Syöttö	Palaute	Valmis
200	0.8	1.0	0.0

Cilas-tulokset (alitteen määrä)			
Partikkeli-koko (μm)	Syöttö	Palaute	Valmis
1	2.2	1.4	6.6
1.5	2.5	1.5	8.0
2	3.2	1.8	11.0
3	3.8	1.9	14.7
4	5.0	2.5	19.1
6	6.3	2.9	26.4
8	8.1	3.3	35.4
12	11.2	3.8	53.6
16	18.2	8.6	70.8
24	34.4	24.6	89.2
32	52.2	43.9	95.6
48	77.7	73.4	100.0
64	84.5	81.3	100.0
96	96.1	94.7	100.0
128	99.0	98.6	100.0
192	100.0	100.0	100.0

Cilas-tulokset (korjattu ylitteen määrä)			
Partikkeli-koko (μm)	Syöttö	Palaute	Valmis
1	97.8	98.6	93.4
1.5	97.5	98.5	92.0
2	96.8	98.2	89.0
3	96.2	98.1	85.3
4	95.0	97.5	80.9
6	93.8	97.1	73.6
8	92.0	96.7	64.6
12	88.9	96.2	46.4
16	82.0	91.5	29.2
24	65.9	75.6	10.8
32	48.2	56.5	4.4
48	23.0	27.3	0.0
64	16.2	19.5	0.0
96	4.7	6.2	0.0
128	1.8	2.4	0.0
192	0.8	1.0	0.0

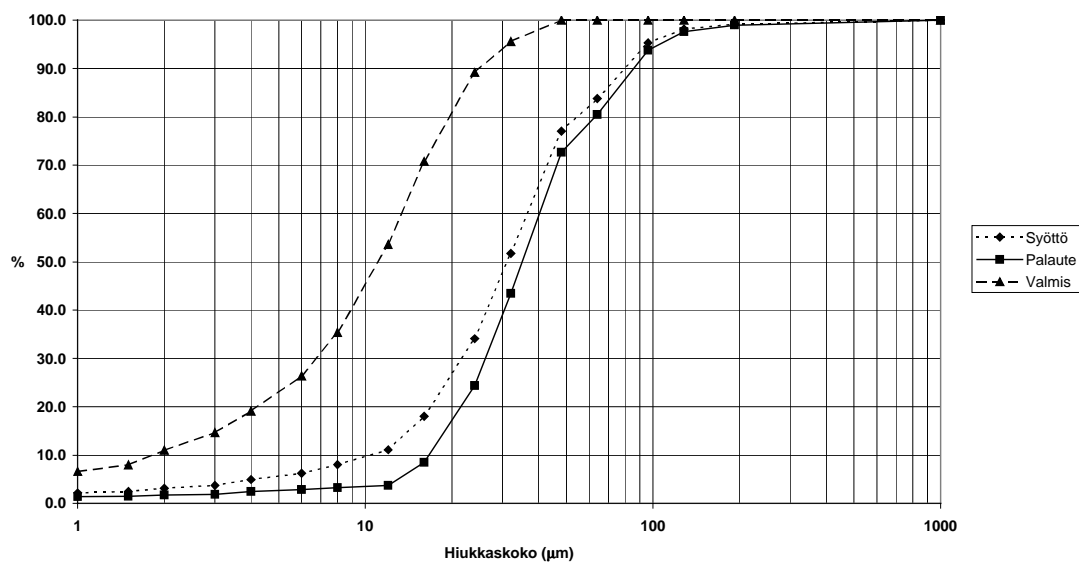
Cilas-tulokset (korjattu alitteen määrä)			
Partikkeli-koko (μm)	Syöttö	Palaute	Valmis
1	2.2	1.4	6.6
1.5	2.5	1.5	8.0
2	3.2	1.8	11.0
3	3.8	1.9	14.7
4	5.0	2.5	19.1
6	6.2	2.9	26.4
8	8.0	3.3	35.4
12	11.1	3.8	53.6
16	18.0	8.5	70.8
24	34.1	24.4	89.2
32	51.8	43.5	95.6
48	77.0	72.7	100.0
64	83.8	80.5	100.0
96	95.3	93.8	100.0
128	98.2	97.6	100.0
192	99.2	99.0	100.0
1000	100.0	100.0	100.0

Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Sementtimylly 4:n luokittimen tehokkuustarkastelu
Laskut

Pikasementti
26.11.1999
klo 15.15

Partikkeli- koko (µm)	C	R.F.	R.C.	I.R.	B _{max}	V _s	B
1	6.6	46.2	85.4	31.6	2.8	59.2	1.7
1.5	6.6	49.2	85.6	34.8	3.5	64.3	2.2
2	6.6	52.3	86.1	38.4	4.8	69.4	3.3
3	6.8	57.4	87.0	44.4	6.5	76.4	5.0
4	6.7	57.5	87.3	44.8	8.6	76.7	6.6
6	7.0	60.6	88.7	49.4	12.2	81.5	9.9
8	6.7	65.4	89.6	54.9	16.8	85.4	14.3
12	6.8	71.1	92.3	63.4	27.3	90.8	24.8
16	6.5	60.0	94.5	54.6	39.1	87.1	34.1
24	6.6	39.3	97.5	36.9	57.0	78.4	44.6
32	6.3	29.4	98.5	27.9	66.8	67.1	44.9
48	6.2	20.8	100.0	20.8	94.1	87.2	82.1
64	5.9	20.2	100.0	20.2	94.1	81.9	77.1
96	4.1	25.8	100.0	25.8	93.8	63.6	59.6
128	4.3	23.5	100.0	23.5	93.8	41.1	38.6
192	6.4	15.7	100.0	15.7			
Keskiarvo	6.3	43.4	93.3	36.7	41.4	74.0	29.9

Seulakäyrät sementtimylly 4:n luokittimelle
(Finnsementti Oy, Lappeenranta, Pikasementti, 26.11.1999, klo 15.15)

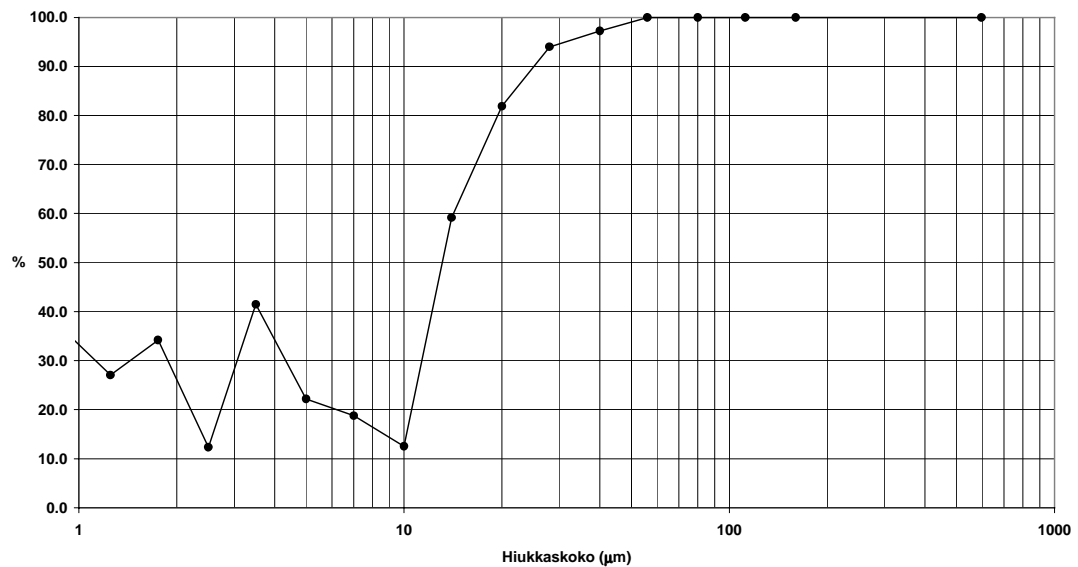


Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Sementtimylly 4:n luokittimen tehokkuustarkastelu
Tromp-laskut

Pikasementti
26.11.1999
klo 15.15

Partikkeli- koko (μm)	R_g	R_f	R_m	C	R_m (korj.)	F.R. Tromp
0.5	1.4	6.6	2.2	-	2.2	52.4
1.25	0.1	1.4	0.3	6.6	0.3	27.1
1.75	0.3	3.0	0.7	6.6	0.7	34.2
2.5	0.1	3.7	0.6	6.7	0.7	12.3
3.5	0.6	4.4	1.2	6.7	1.2	41.5
5	0.4	7.3	1.3	6.8	1.5	22.2
7	0.4	9.0	1.8	6.9	1.8	18.8
10	0.5	18.2	3.1	6.8	3.3	12.5
14	4.8	17.2	6.9	6.7	6.7	59.2
20	15.8	18.4	16.1	6.6	16.3	81.9
28	19.1	6.4	17.7	6.5	17.1	94.0
40	29.2	4.4	25.3	6.3	25.2	97.2
56	7.8	0.0	6.7	6.1	6.6	100.0
80	13.3	0.0	11.5	5.0	11.1	100.0
112	3.9	0.0	2.9	4.2	3.2	100.0
160	1.4	0.0	1.0	5.4	1.2	100.0
596	1.0	0.0	0.8	-	0.8	100.0
Summa	100.0	100.0	100.0	-	100.0	-
Keskiarvo	-	-	-	6.2	-	-

Tromp-käyrä sementtimylly 4:n luokittimelle
(Finnsementti Oy, Lappeenranta, Pikasementti, 26.11.1999, klo 15.15)



Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Sementtimylly 5:n luokittimen tehokkuustarkastelu
Mittaustulokset (paino-%)

Rapidsementti
27.11.1999
klo 17.30

Seulomistulos (alitteen määrä)			
Seula (μm)	Syöttö	Palaute	Valmis
200	98.9	98.3	100.0

Seulomistulos (ylitteen määrä)			
Seula (μm)	Syöttö	Palaute	Valmis
200	1.1	1.7	0.0

Cilas-tulokset (alitteen määrä)			
Partikkeli-koko (μm)	Syöttö	Palaute	Valmis
1	2.4	1.1	5.5
1.5	2.7	1.2	6.5
2	3.7	1.4	9.1
3	4.7	1.6	11.8
4	6.1	2.0	15.4
6	7.7	2.3	20.3
8	10.3	3.1	26.8
12	13.9	3.5	38.0
16	19.4	4.6	52.2
24	29.6	8.9	73.9
32	44.4	23.2	88.0
48	71.0	57.4	100.0
64	79.9	70.6	100.0
96	94.9	92.8	100.0
128	98.7	98.2	100.0
192	100.0	100.0	100.0

Cilas-tulokset (korjattu ylitteen määrä)			
Partikkeli-koko (μm)	Syöttö	Palaute	Valmis
1	97.6	98.9	94.5
1.5	97.3	98.8	93.5
2	96.3	98.6	90.9
3	95.3	98.4	88.2
4	94.0	98.0	84.6
6	92.4	97.7	79.7
8	89.8	97.0	73.2
12	86.2	96.6	62.0
16	80.8	95.5	47.8
24	70.7	91.2	26.1
32	56.1	77.2	12.0
48	29.8	43.6	0.0
64	20.9	30.6	0.0
96	6.1	8.8	0.0
128	2.3	3.4	0.0
192	1.1	1.7	0.0

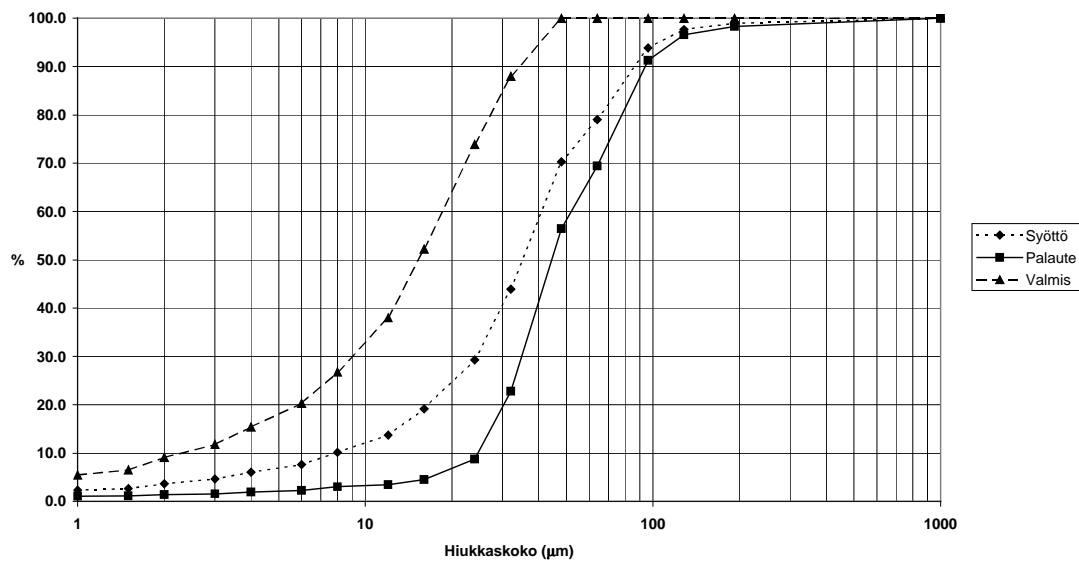
Cilas-tulokset (korjattu alitteen määrä)			
Partikkeli-koko (μm)	Syöttö	Palaute	Valmis
1	2.4	1.1	5.5
1.5	2.7	1.2	6.5
2	3.7	1.4	9.1
3	4.7	1.6	11.8
4	6.0	2.0	15.4
6	7.6	2.3	20.3
8	10.2	3.0	26.8
12	13.8	3.4	38.0
16	19.2	4.5	52.2
24	29.3	8.8	73.9
32	43.9	22.8	88.0
48	70.2	56.4	100.0
64	79.1	69.4	100.0
96	93.9	91.2	100.0
128	97.7	96.6	100.0
192	98.9	98.3	100.0
1000	100.0	100.0	100.0

Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Sementtimylly 5:n luokittimen tehokkuustarkastelu
Laskut

Rapidsementti
27.11.1999
klo 17.30

Partikkeli- koko (μm)	C	R.F.	R.C.	I.R.	B _{max}	V _s	B
1	3.4	67.8	71.7	39.4	2.0	61.6	1.2
1.5	3.6	68.2	73.1	41.3	2.4	64.8	1.5
2	3.4	73.5	72.1	45.6	3.3	71.0	2.4
3	3.3	76.4	72.2	48.5	4.3	74.9	3.2
4	3.3	77.3	72.7	50.0	5.7	76.4	4.4
6	3.4	79.1	74.4	53.5	7.7	80.1	6.2
8	3.3	79.1	75.5	54.6	10.4	80.5	8.4
12	3.4	82.4	78.5	61.0	15.6	85.8	13.4
16	3.2	83.7	81.8	65.5	22.9	88.1	20.2
24	3.2	79.5	88.4	67.9	37.3	87.6	32.7
32	3.1	64.9	93.0	58.0	51.1	78.5	40.1
48	3.2	45.2	100.0	45.1	85.0	84.1	71.6
64	3.2	39.9	100.0	39.8	85.1	75.0	63.8
96	3.3	32.4	99.8	32.2	85.2	31.5	26.9
128	3.1	33.1	99.6	32.6			
192	2.7	38.0	98.9	36.9			
Keskiarvo	3.2	63.8	84.5	48.2	29.9	74.3	21.1

Seulakäyrät sementtimylly 5:n luokittimelle
(Finnsementti Oy, Lappeenranta, Rapidsementti, 27.11.1999, klo 17.30)

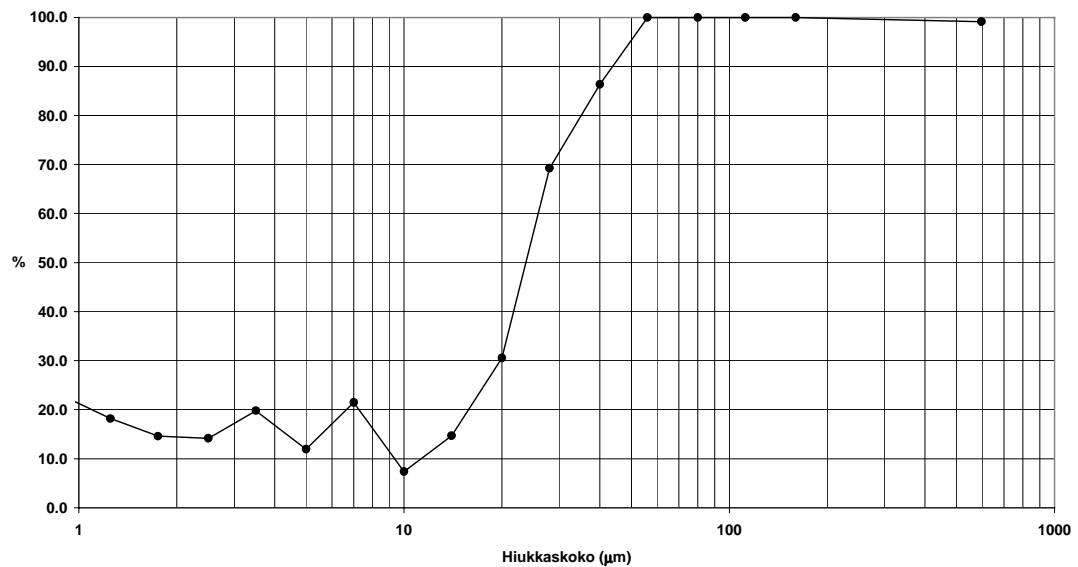


Finnsementti Oy, Lappeenranta, Jari Koskinen
Sementtimyly 5:n luokittimen tehokkuustarkastelu
Tromp-laskut

Rapidsementti
27.11.1999
klo 17.30

Partikkeli- koko (μm)	R_g	R_f	R_m	C	R_m (korj.)	F.R. Tromp
0.5	1.1	5.5	2.4	-	2.4	30.7
1.25	0.1	1.0	0.3	3.5	0.4	18.2
1.75	0.2	2.6	1.0	3.5	0.9	14.6
2.5	0.2	2.7	1.0	3.4	1.0	14.1
3.5	0.4	3.6	1.4	3.3	1.4	19.8
5	0.3	4.9	1.6	3.3	1.7	12.0
7	0.8	6.5	2.6	3.3	2.5	21.5
10	0.4	11.2	3.6	3.3	3.7	7.3
14	1.1	14.2	5.4	3.3	5.1	14.7
20	4.2	21.7	10.1	3.2	9.6	30.5
28	14.1	14.1	14.6	3.1	14.1	69.2
40	33.6	12.0	26.3	3.1	27.0	86.4
56	13.0	0.0	8.8	3.2	9.0	100.0
80	21.8	0.0	14.8	3.2	15.1	100.0
112	5.3	0.0	3.8	3.2	3.7	100.0
160	1.8	0.0	1.3	2.9	1.2	100.0
596	1.7	0.0	1.1	-	1.2	99.2
Summa	100.0	100.0	100.0	-	100.0	-
Keskiarvo	-	-	-	3.3	-	-

Tromp-käyrä sementtimyly 5:n luokittimelle
(Finnsementti Oy, Lappeenranta, Rapidsementti, 27.11.1999, klo 17.30)



ENERGIATASELASKUJEN MITTAUSTULOKSET

28 - 29.7.1999

Uunijauhe	U4	U5	Yksikkö
Massavirta	39.96	46.23	t/h
Lämpötila	70	73	°C

Jäähdytystornivesi	U4	U5	Yksikkö
Tilavuusvirta	5.58	4.39	m ³ /h
Lämpötila	21	21	°C

Massavirrat	U4	U5	Yksikkö
Hiilensyöttö	3.99	4.14	t/h
Klinkkerintuotanto	28.06	30.61	t/h
Jäähdytystornipöly	-	0.81	t/h
Sähkösuodinpöly	-	2.16	t/h

Ulkoilma	U4	U5	Yksikkö
Lämpötila	18	19	°C
Absoluuttinen kosteus	0.01	0.01	kg H ₂ O/kg ki
Ilmanpaine	748	752	mmHg

Lämpötilat	U4	U5	Yksikkö
Ilma hiilimyllylle	-	263	°C
Klinkkeri jäähdyttäjiltä	102	126	°C
Jäähdytystornipöly	-	50	°C
Sähkösuodinpöly	-	100	°C
Kivihili/ petrokoksi-seos	72	72	°C

Pintalämpötilat	U4	U5	Yksikkö
Skannerin kattama alue	210	210	°C
Muu osa uunista	167	174	°C
Satelliittijäähdyttäjät	286	242	°C
Iso sykloni	-	70	°C
Pienet syklonit	-	70	°C

Klinkkerianalyysi	U4	U5	Yksikkö
SiO ₂	21.01	21.19	%
Al ₂ O ₃	4.60	4.73	%
Fe ₂ O ₃	2.61	2.58	%
Na ₂ O	1.23	1.06	%
K ₂ O	0.61	0.57	%
MgO	2.20	2.46	%
CaO	64.77	64.88	%

Pitot-putki ja lämpötilamittaukset	Ensiöilma puhaltimelta		Savukaasut piippuun		Ilma	
	U4	U5	U4	U5	hiilimyllylle	Yksikkö
Dynaaminen paine	321	209	80	48	62	Pa
Staattinen paine	3388	4233	-250	-1103	-4540	Pa
Lämpötila	32	65	176	132	70	°C
Putken pinta-ala	0.080	0.126	2.738	3.430	0.283	m ²

Savukaasuanalyysi	U4		U5		Ilma	
	Uuni	Piippu	Uuni	Piippu	hiilimyllylle	Yksikkö
Happi (O ₂)	2.9	10.9	2.4	9.9	20.6	t-%
Typpi (N ₂)	-	74.1	-	72.1	79.4	t-%
Hiilidioksidi (CO ₂)	-	15.1	-	18.0	0.0	t-%
Hiilimonoksidi (CO)	-	0.0	-	0.0	0.0	t-%

Polttoaineanalyysi	Arvo	Yksikkö	Moduulit & laatu	U4		U5	
				Uunijauhe	Klinkkeri	Uunijauhe	Klinkkeri
Hiili (C)	77.40	%	CaStd	99.60	98.20	98.00	97.40
Vety (H)	4.00	%	SiM	3.30	2.90	3.40	2.90
Rikki (S)	3.20	%	AlM	1.70	1.80	1.70	1.80
Happi (O)	3.60	%	VapCaO	-	0.85	-	1.30
Typpi (N)	1.60	%	Laatu	2 (yleis)	2 (yleis)	2 (yleis)	2 (yleis)
Kosteus	1.30	%					
Tuhka	10.20	%					
Kalorimetrisen lämpöarvo	31320	kJ/kg					

ENERGIATASELASKUISSA KÄYTETTÄVIÄ VAKIOITA

28 - 29.7.1999

Ominaislämpökapasiteetit	Uunijauhe U4	Uunijauhe U5	Klinkkeri U4	Klinkkeri U5	Ensiöilma U4	Ensiöilma U5	Yksikkö
Lämpötila	70	73	102	126	32	65	°C
Happi (O ₂)					29.33	29.69	J/mol K
Typpi (N ₂)					28.84	29.12	J/mol K
Rikkidioksidi (SO ₂)					40.53	41.59	J/mol K
Hilidioksidi (CO ₂)					37.76	38.95	J/mol K
Hilimonoksidi (CO)					28.91	29.12	J/mol K
Ilma					29.10	29.24	J/mol K
Vesihöyry (H ₂ O)					33.46	33.77	J/mol K
Vesi (H ₂ O)							kJ/kg K
Uunijauhe	0.89	0.89					kJ/kg K
Suodinpöly							kJ/kg K
Klinkkeri			0.80	0.81			kJ/kg K
Kivihiili							kJ/kg K

Ominaislämpökapasiteetit	Ulkoilma	Savukaasut piipusta U4	Savukaasut piipusta U5	Ilma hiilimyllylle	Suodinpöly U5	Jäähdytys-tornipöly U5	Yksikkö
Lämpötila	18	176	132	263	100	50	°C
Happi (O ₂)	29.17	30.84	30.40	31.64			J/mol K
Typpi (N ₂)	28.71	30.00	29.66	30.61			J/mol K
Rikkidioksidi (SO ₂)	40.05	44.89	43.64	47.12			J/mol K
Hilidioksidi (CO ₂)	37.22	42.68	41.26	45.24			J/mol K
Hilimonoksidi (CO)	28.82	29.83	29.55	30.37			J/mol K
Ilma	29.04	29.78	29.56	30.24			J/mol K
Vesihöyry (H ₂ O)	33.33	34.89	34.44	35.82			J/mol K
Vesi (H ₂ O)							kJ/kg K
Uunijauhe							kJ/kg K
Suodinpöly		0.93	0.92	0.96	0.90	0.88	kJ/kg K
Klinkkeri							kJ/kg K
Kivihiili							kJ/kg K

Ominaislämpökapasiteetit	Kivihiili/ petrokoksi	Referenssi (25 °C)	Referenssi (0 °C)	Yksikkö	Viite
Lämpötila	72	25	0	°C	
Happi (O ₂)		29.25	28.96	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Typpi (N ₂)		28.78	28.55	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Rikkidioksidi (SO ₂)		40.29	39.44	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Hilidioksidi (CO ₂)		37.49	36.53	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Hilimonoksidi (CO)		28.87	28.71	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Ilma		29.07	28.96	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Vesihöyry (H ₂ O)		33.40	33.16	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Vesi (H ₂ O)	4.19	4.18	4.22	kJ/kg K	Tables of Physical and Chemical Constants
Uunijauhe		0.87	0.86	kJ/kg K	F.L.Smidth: Lecture 5.13 A, Heat balances
Suodinpöly		0.87	0.86	kJ/kg K	F.L.Smidth: Lecture 5.13 A, Heat balances
Klinkkeri		0.78	0.78	kJ/kg K	F.L.Smidth: Lecture 5.13 A, Heat balances
Kivihiili	1.21	1.14	1.10	kJ/kg K	F.L.Smidth: Lecture 5.13 A, Heat balances

Ilman koostumus	Arvo	Yksikkö
Happi (O ₂)	20.8	%
Typpi (N ₂)	79.2	%

Normaalitila	Arvo	Yksikkö
Vesihöyryn tiheys	0.8038	kg/m ³
Kaasun lämpötila	273.15	K
Kaasun paine	101.325	kPa

Atomimassat	Arvo	Yksikkö
Hiili (C)	12.011	g/mol
Vety (H)	1.0079	g/mol
Rikki (S)	32.06	g/mol
Happi (O)	15.9994	g/mol
Typpi (N)	14.0067	g/mol
Ilma	28.8424	g/mol

ENERGIATASELASKUJEN LASKUARVOT

28 - 29.7.1999

Pitot-mittauksen laskut	Ensiöilma puhaltimelta		Savukaasut piippuun		Ilma hiilimyllylle	Yksikkö
	U4	U5	U4	U5		
Kuivan kaasun tiheys normaalitilassa	1.29	1.29	1.38	1.40	1.29	kg/m ³
Kostean kaasun tiheys normaalitilassa	1.28	1.28	1.38	1.40	1.29	kg/m ³
Kuivan kaasun tiheys kanavassa	1.17	1.07	0.82	0.92	0.97	kg/m ³
Kuivan kaasun nopeus kanavassa	23.4	19.7	13.9	10.2	11.3	m/s
Kuivan kaasun tilavuusvirta kanavassa	6775	8922	137259	125856	11526	m ³ /h
Kuivan kaasun tilavuusvirta normaalitilassa	6168	7441	81950	82781	8677	m ³ /h

Lämpötilat	U4	U5	Yksikkö
Ensiöilma	32	65	°C
Polttoilma	18	19	°C
Polttoaine	72	72	°C
Ilma hiilimyllylle	-	263	°C
Savukaasut piipusta	176	132	°C
Uunijauhe	70	73	°C
Klinkkeri jäädyttäjiltä	102	126	°C
Jäähdytystornipöly	-	50	°C
Sähkösuodinpöly	-	100	°C
Jäähdytystornivesi	21	21	°C

Massavirrat	U4	U5	Yksikkö
Uunijauhe	39.96	46.23	t/h
Hiilensyöttö	3.99	4.14	t/h
Klinkkerintuotanto	28.06	30.61	t/h
Jäähdytystornipöly	-	0.81	t/h
Sähkösuodinpöly	-	2.16	t/h

Tilavuusvirrat	U4	U5	Yksikkö
Ensiöilma kompressorilta	1579	1461	m ³ /h
Ensiöilma puhaltimelta	6168	7441	m ³ /h
Polttoilma	30963	29908	m ³ /h
Savukaasuvirta hiilimyllylle	-	8677	m ³ /h
CO ₂ kalsinoinnista	6690	7740	m ³ /h
Savukaasut uunista	44879	45207	m ³ /h
Vuotoilma	41333	36782	m ³ /h
Savukaasut piippuun	99838	95190	m ³ /h
Jäähdytystornivesi	5.58	4.39	m ³ /h

HIILENPOLTON SAVUKAASULASKUT

28 - 29.7.1999

SAVUKAASULASKUT ($T_{ref.} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	Suure	U4	U5	Yksikkö
Poltoon tarvittava hapen stokiometrinen ainemäärä	n_{O_2}/h	296.2	307.1	kmol/h
Poltoon tarvittava kuivan ilman stokiometrinen ainemäärä	$n_{ki,o}/h$	1424.0	1476.7	kmol/h
Kuivan ilman määrä polttoainekiloa kohti	$n'_{ki,o}$	356.9	356.9	mol/kg pa
Stokiometrisen polton savukaasumäärä polttoainekiloa kohti	$n'_{ks,o}$	423.5	432.2	mol/kg pa
Polton ilmakerroin	λ	1.19	1.15	-
Palamiseen käytetty kuivan ilman määrä polttoainekiloa kohti	n'_{ki}	426.1	412.0	mol/kg pa
Palamisilman mukana tuleva vesihöyry polttoainekiloa kohti	n'_{vi}	6.8	6.6	mol/kg pa
Kokonaisilmavirta	n_i	1727.3	1731.8	kmol/h
Ilman tilavuusvirta	V_i	41915	42006	m^3/h
Palamisilman entalpiavirta polttoainekiloa kohti	H'_i	-93.8	-90.7	kJ/kg pa
Hiilidioksidin määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti	n'_{CO_2}	64.5	64.5	mol/kg pa
Rikkidioksidin määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti	n'_{SO_2}	1.0	1.0	mol/kg pa
Hapen määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti	n'_{O_2}	14.4	11.5	mol/kg pa
Typen määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti	n'_{N_2}	397.8	386.6	mol/kg pa
Vesihöyryn määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti	n'_{H_2O}	24.3	24.1	mol/kg pa
Savukaasun ainemäärä polttoainekiloa kohti	n'_{sk}	501.9	487.6	mol/kg pa
Savukaasun ainevirta	n_{sk}	2002.6	2017.3	kmol/h
Savukaasun tilavuusvirta piipussa	V_{sk}	73805	66997	m^3/h
Savukaasun entalpiavirta piipussa polttoainekiloa kohti	H'_{sk}	2683.2	1823.2	kJ/kg pa
Savukaasun entalpiavirta piipussa	H_{sk}	10706	7543	MJ/h

MASSATASE, UUNI 4**Jari Koskinen, 28.7.1999**

TULEVAT VIRRAT	t/h
Polttoaine (sis.tuhkan)	3.99
Uunijauhe	39.96
Ensiöilma	9.97
Sekundääri-ilma	39.85
Vuotoilma	53.20
Ilman sisältämä vesihöyry	1.02
Jäähdytystornivesi	5.58
Yhteensä	t/h
Tulevat virrat yhteensä	153.57

POISTUVAT VIRRAT	t/h
Klinkkerituotanto	28.06
Palamistuotteet (O ₂ , N ₂ , CO ₂)	57.62
CO ₂ kalsinoitumisesta	13.14
Vesihöyry poltosta ja ilmaylimäärästä	1.75
Vuotoilma	53.20
Vesihöyry vuotoilmasta	0.01
Vesihöyry jäähdytystornivedestä	5.58
Yhteensä	t/h
Poistuvat virrat yhteensä	159.34

EROTUS	t/h
Tulevien ja poistuvien virtojen erotus	-5.77

MASSATASE, UUNI 5**Jari Koskinen, 29.7.1999**

TULEVAT VIRRAT	t/h
Polttoaine (sis.tuhkan)	4.14
Uunijauhe	46.23
Ensiöilma	11.46
Sekundääri-ilma	49.66
Vuotoilma	47.34
Ilman sisältämä vesihöyry	1.08
Jäähdytystornivesi	4.39
Yhteensä	t/h
Tulevat virrat yhteensä	164.29

POISTUVAT VIRRAT	t/h
Klinkkerituotanto	30.61
Jäähdytystornipöly	0.81
Sähkösuodinpöly	2.16
Palamistuotteet (O ₂ , N ₂ , CO ₂)	58.06
CO ₂ kalsinoitumisesta	15.20
Vesihöyry poltosta ja ilmaylimäärästä	1.79
Vuotoilma	47.34
Vesihöyry vuotoilmasta	0.01
Ilma hiilimyllylle	11.17
Vesihöyry jäähdytystornivedestä	4.39
Yhteensä	t/h
Poistuvat virrat yhteensä	171.54

EROTUS	t/h
Tulevien ja poistuvien virtojen erotus	-7.24

ENERGIATASE, UUNI 4**Jari Koskinen, 28.7.1999**

TULEVAT VIRRAT				
Massavirrat			MJ/h	kJ/kg kl.
Polttoaine (sis.tuhkan)	3.99	t/h	123819	4413
Uunijauhe	39.96	t/h	2808	100
Tilavuusvirrat			MJ/h	kJ/kg kl.
Ensiöilma	7746	m ³ /h	337	12
Sekundääri-ilma	30963	m ³ /h	747	27
Vuotoilma	41333	m ³ /h	997	36
Ilman sisältämä vesihöyry	1274	m ³ /h	37	1
Jäähdytystornivesi	5.58	m ³ /h	427	15
Yhteensä			MJ/h	kJ/kg kl.
Tulevat virrat yhteensä			129171	4604

POISTUVAT VIRRAT				
Massavirrat			MJ/h	kJ/kg kl.
Klinkkerituotanto	28.06	t/h	2480	88
Tilavuusvirrat			MJ/h	kJ/kg kl.
Palamistuotteet (O ₂ , N ₂ , CO ₂)	42618	m ³ /h	11714	417
CO ₂ kalsinoitumisesta	6690	m ³ /h	2744	98
Vesihöyry poltosta ja ilmaylimäärästä	2236	m ³ /h	789	28
Vuotoilma	41333	m ³ /h	10079	359
Vesihöyry vuotoilmasta	658	m ³ /h	194	7
Vesihöyry jäähdytystornivedestä	6935	m ³ /h	15985	570
Lämpöhäviöt			MJ/h	kJ/kg kl.
Uuni			17586	627
Satelliittijäähdyttäjät			7750	276
Muut			MJ/h	kJ/kg kl.
Klinkkerin reaktioenergia			41021	1462
Yhteensä			MJ/h	kJ/kg kl.
Poistuvat virrat yhteensä			110343	3933

EROTUS			MJ/h	kJ/kg kl.
Tulevien ja poistuvien virtojen erotus			18828	671.0

ENERGIATASE, UUNI 5**Jari Koskinen, 29.7.1999**

TULEVAT VIRRAT				
Massavirrat			MJ/h	kJ/kg kl.
Polttoaine (sis.tuhkan)	4.14	t/h	128397	4194
Uunijauhe	46.23	t/h	3391	111
Tilavuusvirrat			MJ/h	kJ/kg kl.
Ensiöilma	8902	m ³ /h	781	26
Sekundääri-ilma	38585	m ³ /h	931	30
Vuotoilma	36782	m ³ /h	887	29
Ilman sisältämä vesihöyry	1341	m ³ /h	38	1
Jäähdytystornivesi	4.39	m ³ /h	336	11
Yhteensä			MJ/h	kJ/kg kl.
Tulevat virrat yhteensä			134761	4402

POISTUVAT VIRRAT				
Massavirrat			MJ/h	kJ/kg kl.
Klinkkerituotanto (korjattu)	30.61	t/h	3344	109
Jäähdytystornipöly	0.81	t/h	40	1.3
Sähkösuodinpöly	2.16	t/h	219	7.1
Tilavuusvirrat			MJ/h	kJ/kg kl.
Palamistuotteet (O ₂ , N ₂ , CO ₂)	42884	m ³ /h	8731	285
CO ₂ kalsinoitumisesta	7740	m ³ /h	2321	76
Vesihöyry poltosta ja ilmaylimäärästä	2297	m ³ /h	635	21
Vuotoilma	36782	m ³ /h	6652	217
Vesihöyry vuotoilmasta	585	m ³ /h	127	4
Ilma hiilimyllylle	8677	m ³ /h	3214	105
Vesihöyry jäähdytystornivedestä	5461	m ³ /h	12164	397
Lämpöhäviöt			MJ/h	kJ/kg kl.
Uuni			13623	445
Satelliittijäähdyttäjät			7402	242
Syklonit			1050	34
Muut			MJ/h	kJ/kg kl.
Klinkkerin reaktioenergia			44755	1462
Ekonomeiser			3323	109
Yhteensä			MJ/h	kJ/kg kl.
Poistuvat virrat yhteensä			107601	3515

EROTUS			MJ/h	kJ/kg kl.
Tulevien ja poistuvien virtojen erotus			27161	887.2

ENERGIATASELASKUJEN MITTAUSTULOKSET, UUNI 5

13.10.1999

Massavirrat		Yksikkö
Polttoaineen syöttö	3.86	t/h
Unijauhe	46.36	t/h
Klinkkerituotanto	29.58	t/h
Jäähdytystornipöly	1.00	t/h
Sähkösuoainpöly	7.07	t/h

Pintalämpötilat		Yksikkö
Skannerin kattama alue	200	°C
Muu osa uunista	178	°C
Satelliittijäähdyttäjät	206	°C
Iso sykloni	88	°C
Pienet syklonit	73	°C

Lämpötilat		Yksikkö
Ilma hiilimyllylle	290	°C
Savukaasut jäähdytystornille	455	°C
Klinkkeri jäähdyttäjiltä	78	°C
Kivihili/ petrokoksi	60	°C
Unijauhe	66	°C

Ulkoilma		Yksikkö
Lämpötila	6.4	°C
Kosteus	0.003	kg H ₂ O/kg ki
Ilmanpaine	743	mmHg

Pitot-putki ja lämpötilamittaukset	Ensiöilma	Savukaasut	Ilma hiilim.	Yksikkö
Dynaaminen paine	254	67	70	Pa
Staattinen paine	4990	-1025	-4475	Pa
Lämpötila	34	173	66	°C
Putken pinta-ala	0.126	3.430	0.283	m ²

Savukaasuanalyysit	Uuni	Jäähd. torni	Pippu	Yksikkö
Happi (O ₂)	2.3	4.0	10.6	t-%
Typpi (N ₂)	-	69.2	73.5	t-%
Hiilidioksidi (CO ₂)	-	26.8	16.0	t-%

Unijauheen kemiallinen analyysi							
Aika	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	SO ₃	MgO
9:00	13.10	2.56	1.54	43.81	0.53	1.02	0.81
11:00	13.40	2.60	1.60	43.89	0.47	0.97	0.83
13:00	13.30	2.59	1.59	43.87	0.48	0.98	0.84
15:00	13.17	2.56	1.56	43.92	0.52	1.00	0.82
17:00	13.15	2.57	1.58	43.97	0.49	0.98	0.82
19:00	13.36	2.57	1.60	43.92	0.49	0.98	0.83
21:00	13.28	2.57	1.59	43.89	0.47	0.97	0.83

Polttoaineen analyysi		Yksikkö
Hiili (C)	79.2	%
Vety (H)	4.2	%
Rikki (S)	3.4	%
Happi (O)	2.6	%
Typpi (N)	1.5	%
Kosteus	1.0	%
Tuhka	9.1	%
Klooripitoisuus kuiva-aineessa	60.0	mg/kg
Kalorimetrinen lämpöarvo	32070	kJ/kg

Klinkkerianalyysi		Yksikkö
SiO ₂	21.23	%
Al ₂ O ₃	4.94	%
Fe ₂ O ₃	2.69	%
Na ₂ O	1.21	%
K ₂ O	0.6	%
MgO	1.57	%
CaO	64.9	%

Laatu ja moduulit	Laatu	VapCaO	CaStd	SiM	AIM
Unijauhe	2 (yleis)	-	96.4	3.3	1.7
Klinkkeri	2 (yleis)	1.3	96.8	2.8	1.8

Unijauheen laadunvaihtelu tasemittauksen aikana			
Aika	CaStd	SiM	AIM
9:00	107.6	3.20	1.66
11:00	105.4	3.19	1.63
13:00	106.1	3.18	1.63
15:00	107.4	3.20	1.64
17:00	107.6	3.17	1.63
19:00	105.9	3.20	1.61
21:00	106.4	3.19	1.62

ENERGIATASELASKUISSA KÄYTETTÄVIÄ VAKIOITA, UUNI 5

13.10.1999

Ominaislämpökapasiteetit	Uunijauhe	Klinkkeri	Ensiöilma	Sekundääri-ilma	Savukaasut	Ilma hiilimyllylle	Yksikkö
Lämpötila	66	78	34	6	455	290	°C
Happi (O ₂)			29.35	29.04	33.16		J/mol K
Typpi (N ₂)			28.85	28.61	31.72		J/mol K
Rikkidioksidi (SO ₂)			40.59	39.66	51.03		J/mol K
Hiilidioksidi (CO ₂)			37.82	36.78	49.89		J/mol K
Hiilimonoksidi (CO)			28.93	28.75	31.52		J/mol K
Ilma			29.11	28.99	31.32	30.38	J/mol K
Vesihöyry (H ₂ O)			33.48	33.22	37.98	36.11	J/mol K
Vesi (H ₂ O)							kJ/kg K
Uunijauhe	0.89				1.02		kJ/kg K
Suodinpöly					1.02		kJ/kg K
Klinkkeri		0.80					kJ/kg K
Kivihiili							kJ/kg K

Ominaislämpökapasiteetit	Kivihiili/ petrokoksi	Referenssi (25 °C)	Referenssi (0 °C)	Yksikkö	Viite
Lämpötila	60	25	0	°C	
Happi (O ₂)		29.25	28.96	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Typpi (N ₂)		28.78	28.55	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Rikkidioksidi (SO ₂)		40.29	39.44	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Hiilidioksidi (CO ₂)		37.49	36.53	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Hiilimonoksidi (CO)		28.87	28.71	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Ilma		29.07	28.96	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Vesihöyry (H ₂ O)		33.40	33.16	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Vesi (H ₂ O)	4.18	4.18	4.22	kJ/kg K	Tables of Physical and Chemical Constants
Uunijauhe		0.87	0.86	kJ/kg K	F.L.Smidth: Lecture 5.13 A, Heat balances
Suodinpöly		0.87	0.86	kJ/kg K	F.L.Smidth: Lecture 5.13 A, Heat balances
Klinkkeri		0.78	0.78	kJ/kg K	F.L.Smidth: Lecture 5.13 A, Heat balances
Kivihiili	1.19	1.14	1.10	kJ/kg K	F.L.Smidth: Lecture 5.13 A, Heat balances

Ilman koostumus	Yksikkö	
Happi (O ₂)	20.8	%
Typpi (N ₂)	79.2	%

Normaalitila	Yksikkö	
Vesihöyryn tiheys	0.8038	kg/m ³
Kaasun lämpötila	273.15	K
Kaasun paine	101.325	kPa

Atomimassat	Yksikkö	
Hiili (C)	12.011	g/mol
Vety (H)	1.0079	g/mol
Rikki (S)	32.0600	g/mol
Happi (O)	15.9994	g/mol
Typpi (N)	14.0067	g/mol
Ilma	28.8424	g/mol

ENERGIATASELASKUJEN LASKUARVOT, UUNI 5 13.10.1999

Massavirrat		Yksikkö
Polttoaineen syöttö	3.86	t/h
Tuhka hiilenpoltosta	0.35	t/h
Uunijauhe	46.36	t/h
Klinkkerintuotanto	29.58	t/h
Jäähdytystornipöly	1.00	t/h
Sähkösuodinpöly	7.07	t/h

Hehkutushäviö		Yksikkö
Uunijauhetta	67.12	%
Hiilidioksidia	32.88	%

Tilavuusvirrat		Yksikkö
Ensiöilma kompressorilta	1600	m ³ /h
Ensiöilma puhaltimelta	8596	m ³ /h
Sekundääri-ilma	26624	m ³ /h
Ilma hiilimyllylle	9176	m ³ /h
CO ₂ kalsinoinnista	7761	m ³ /h
Savukaasut uunista	42733	m ³ /h
Vuotoilma uunin perältä ja sykloneista	5070	m ³ /h
Savukaasut jäähdytystornille	55564	m ³ /h
Vuotoilma sykloneiden ja piipun väliltä	35642	m ³ /h
Savukaasut piippuun	91206	m ³ /h

Pitot-mittauksen laskut	Ensiöilma	Savukaasut	Ilma hiilim.	Yksikkö
Kuivan kaasun tiheys normaalitilassa	1.29	1.38	1.29	kg/m ³
Kostean kaasun tiheys normaalitilassa	1.28	1.38	1.28	kg/m ³
Kuivan kaasun tiheys kanavassa	1.18	0.82	0.97	kg/m ³
Kuivan kaasun nopeus kanavassa	20.8	12.8	12.0	m/s
Kuivan kaasun tilavuusvirta kanavassa	9411	157887	12217	m ³ /h
Kuivan kaasun tilavuusvirta normaalitilassa	8596	93242	9176	m ³ /h

Lämpötilat	Yksikkö
Ensiöilma	34 °C
Sekundääri-ilma	6 °C
Kivihiili/ petrokoksi	60 °C
Savukaasut hiilimyllylle	290 °C
Savukaasut jäähdytystornille	455 °C
Savukaasut piipussa	173 °C
Uunijauhe	66 °C
Klinkkeri jäädyttäjiltä	78 °C

HIILENPOLTON SAVUKAASULASKUT, UUNI 5 13.10.1999

SAVUKAASULASKUT (T _{ref.} = 25 °C)	Suure	Arvo	Yksikkö
Polttoon tarvittava hapen stokiometrinen ainemäärä	n _{O₂} /h	295.6	kmol/h
Polttoon tarvittava kuivan ilman stokiometrinen ainemäärä	n _{ki,o} /h	1421.2	kmol/h
Kuivan ilman määrä polttoainekiloa kohti	n' _{ki,o}	368.3	mol/kg pa
Stokiometrisen polton savukaasumäärä polttoainekiloa kohti	n' _{ks,o}	449.0	mol/kg pa
Polton ilmakerroin	λ	1.15	-
Palamiseen käytetty kuivan ilman määrä polttoainekiloa kohti	n' _{ki}	423.7	mol/kg pa
Palamisilman mukana tuleva vesihöyry polttoainekiloa kohti	n' _{vi}	2.0	mol/kg pa
Kokonaisilmavirta	n _i	1643.0	kmol/h
Ilman tilavuusvirta	V _i	38546	m ³ /h
Palamisilman entalpiavirta polttoainekiloa kohti	H' _i	-248.5	kJ/kg pa
Hiilidioksidin määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti	n' _{CO₂}	66.0	mol/kg pa
Rikkidioksidin määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti	n' _{SO₂}	1.1	mol/kg pa
Hapen määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti	n' _{O₂}	11.5	mol/kg pa
Typen määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti	n' _{N₂}	392.1	mol/kg pa
Vesihöyryn määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti	n' _{H₂O}	23.4	mol/kg pa
Savukaasun ainemäärä polttoainekiloa kohti	n' _{sk}	494.1	mol/kg pa
Savukaasun ainevirta	n _{sk}	1906.9	kmol/h
Savukaasun tilavuusvirta piipussa	V _{sk}	116497	m ³ /h
Savukaasun entalpiavirta piipussa polttoainekiloa kohti	H' _{sk}	7966.7	kJ/kg pa
Savukaasun entalpiavirta piipussa	H _{sk}	30743	MJ/h

MASSATASE, UUNI 5**Jari Koskinen, 13.10.1999**

TULEVAT VIRRAT	t/h
Polttoaine	3.51
Polttoaineen tuhka	0.35
Ensiöilma	13.12
Sekundääri-ilma	46.08
Ilman sisältämä vesihöyry	0.20
Uunijauhe	46.36
Vuotoilma uunin perältä ja sykloneista	6.53
Yhteensä	t/h
Tulevat virrat yhteensä	116.14

POISTUVAT VIRRAT	t/h
Palamistuotteet (O ₂ , N ₂ , CO ₂)	50.01
CO ₂ kalsinoitumisesta	15.24
Vesihöyry poltosta ja ilmaylimäärästä	1.48
Vesihöyry vuotoilmasta	0.02
Vuotoilma uunin perältä ja sykloneista	6.53
Pöly	8.07
Klinkkerituotanto	29.58
Ilma hiilimyllylle	11.81
Yhteensä	t/h
Poistuvat virrat yhteensä	122.75

EROTUS	t/h
Tulevien ja poistuvien virtojen erotus	-6.61

ENERGIATASE, UUNI 5**Jari Koskinen, 13.10.1999**

TULEVAT VIRRAT			MJ/h	kJ/kg kl.
Polttoaine (sis. tuhkan)	3.86	t/h	122899	4154.3
Ensiöilma	10196	m ³ n/h	468	15.8
Sekundääri-ilma	35800	m ³ n/h	306	10.4
Ilman sisältämä vesihöyry	245	m ³ n/h	2	0.1
Uunijauhe	46.36	t/h	3067	103.7
Vuotoilma uunin perältä ja sykloneista	5070	m ³ n/h	43	1.5
Yhteensä			MJ/h	kJ/kg kl.
Tulevat virrat yhteensä			126786	4286

POISTUVAT VIRRAT			MJ/h	kJ/kg kl.
Palamistuotteet (O ₂ , N ₂ , CO ₂)	40614	m ³ n/h	30564	1033.1
CO ₂ kalsinoitumisesta	7761	m ³ n/h	9120	308.3
Vesihöyry poltosta ja ilmaylimäärästä	2212	m ³ n/h	1817	61.4
Vuotoilma uunin perältä ja sykloneista	5070	m ³ n/h	3368	113.9
Vesihöyry vuotoilmasta	24	m ³ n/h	20	0.7
Pöly	8.07	t/h	4108	138.9
Uunin manttelin lämpöhäviöt	-	-	15490	523.6
Syklonien lämpöhäviöt	-	-	1760	59.5
Klinkkerituotanto	29.58	t/h	1971	66.6
Satelliittijäähdyttäjien lämpöhäviöt	-	-	7610	257.3
Ilma hiilimyllylle	9176	m ³ n/h	3767	127.3
Klinkkerin reaktioenergia	-	-	43251	1462.0
Yhteensä			MJ/h	kJ/kg kl.
Poistuvat virrat yhteensä			122846	4153

EROTUS	MJ/h	kJ/kg kl.
Tulevien ja poistuvien virtojen erotus	3940	133.2

ENERGIATASELASKUJEN MITTAUSTULOKSET, UUNI 4

11.11.1999

Massavirrat		Yksikkö
Polttoaineen syöttö	3.51	t/h
Unijauhe	39.63	t/h
Klinkkerituotanto	24.02	t/h
Jäähdytystornipöly (arvio)	0.60	t/h
Sähkösuodinpöly (arvio)	4.20	t/h
NO _x -vesi	0.63	m ³ /h

Lämpötilat		Yksikkö
Savukaasut jäähdytystornille	446	°C
Savukaasut sähkösuodattimelle	218	°C
Klinkkeri jäähdyttäjiltä	120	°C
Kivihili/ petrokoksi	62	°C
Unijauhe	66	°C
NO _x -vesi	8	°C

Ulkoilma		Yksikkö
Lämpötila	3.5	°C
Kosteus	0.004	kg H ₂ O/kg ki
Ilmapaine	750	mmHg

Pintalämpötilat		Yksikkö
Skannerin kattama alue	200	°C
Muu osa uunista	149	°C
Satelliittijäähdyttäjät	265	°C

Savukaasuanalyysit	Uuni	Jäähd. torni	Sähkösuodin	Piippu	Yksikkö
Happi (O ₂)	2.2	4.0	6.0	11.3	t-%
Typpi (N ₂)	-	68.2	68.7	72.8	t-%
Hiilidioksidi (CO ₂)	-	27.8	25.3	15.9	t-%

Pitot-putki ja lämpötilamittaukset	Ensiöilma	Savukaasut	Yksikkö
Dynaaminen paine	394	77	Pa
Staattinen paine	4163	-255	Pa
Lämpötila	26	160	°C
Putken pinta-ala	0.080	2.738	m ²

Unijauheen kemiallinen analyysi							
Aika	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	SO ₃	MgO
9:30	13.17	2.62	1.65	43.85	0.40	0.96	1.10
11:30	13.24	2.64	1.65	43.92	0.39	0.95	1.08
13:30	13.15	2.61	1.65	43.97	0.39	0.95	1.11
15:30	13.08	2.60	1.67	43.96	0.39	0.95	1.13
17:30	13.47	2.66	1.67	43.66	0.38	0.94	1.13

Polttoaineen analyysi	Yksikkö
Hiili (C)	78.0 %
Vety (H)	4.1 %
Rikki (S)	3.4 %
Happi (O)	3.0 %
Typpi (N)	1.8 %
Kosteus	1.4 %
Tuhka	9.7 %
Kalorimetrisen lämpöarvo	31300 kJ/kg

Klinkkerianalyysi		Yksikkö
SiO ₂	20.97	%
Al ₂ O ₃	4.64	%
Fe ₂ O ₃	2.65	%
Na ₂ O	1.15	%
K ₂ O	0.53	%
MgO	1.69	%
CaO	64.86	%

Laatu ja moduulit	Laatu	VapCaO	CaStd	SiM	AIM
Unijauhe	2 (yleis)	-	101.5	3.2	1.7
Klinkkeri	2 (yleis)	1.1	98.4	2.9	1.8

Unijauheen laadunvaihtelu tasemittauksen aikana			
Aika	CaStd	SiM	AIM
9:30	106.85	3.08	1.59
11:30	106.45	3.09	1.60
13:30	107.32	3.09	1.58
15:30	107.80	3.06	1.56
17:30	104.10	3.11	1.59

ENERGIATASELASKUISSA KÄYTETTÄVIÄ VAKIOITA, UUNI 4

11.11.1999

Ominaislämpökapasiteetit	Uunijauhe	Klinkkeri	Ensiöilma	Sekundääri-ilma	Savukaasut	Kivihiihi/ petrokoksi	Yksikkö
Lämpötila	66	120	26	4	446	62	°C
Happi (O ₂)			29.26	29.00	33.09		J/mol K
Typpi (N ₂)			28.78	28.58	31.67		J/mol K
Rikkidioksidi (SO ₂)			40.33	39.56	50.87		J/mol K
Hiilidioksidi (CO ₂)			37.52	36.67	49.69		J/mol K
Hiilimonoksidi (CO)			28.87	28.73	31.47		J/mol K
Ilma			29.07	28.98	31.27		J/mol K
Vesihöyry (H ₂ O)			33.40	33.20	37.87		J/mol K
Vesi (H ₂ O)						4.18	kJ/kg K
Uunijauhe	0.89				1.02		kJ/kg K
Suodinpöly					1.02		kJ/kg K
Klinkkeri		0.81					kJ/kg K
Kivihiihi						1.20	kJ/kg K

Ominaislämpökapasiteetit	NO _x -vesi	Referenssi (25 °C)	Referenssi (0 °C)	Yksikkö	Viite
Lämpötila	8	25	0	°C	
Happi (O ₂)		29.25	28.96	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Typpi (N ₂)		28.78	28.55	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Rikkidioksidi (SO ₂)		40.29	39.44	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Hiilidioksidi (CO ₂)		37.49	36.53	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Hiilimonoksidi (CO)		28.87	28.71	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Ilma		29.07	28.96	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Vesihöyry (H ₂ O)		33.40	33.16	J/mol K	Prosessilaskennan matemaattiset apuneuvot
Vesi (H ₂ O)	4.20	4.18	4.22	kJ/kg K	Tables of Physical and Chemical Constants
Uunijauhe		0.87	0.86	kJ/kg K	F.L.Smidth: Lecture 5.13 A, Heat balances
Suodinpöly		0.87	0.86	kJ/kg K	F.L.Smidth: Lecture 5.13 A, Heat balances
Klinkkeri		0.78	0.78	kJ/kg K	F.L.Smidth: Lecture 5.13 A, Heat balances
Kivihiihi		1.14	1.10	kJ/kg K	F.L.Smidth: Lecture 5.13 A, Heat balances

Ilman koostumus	Yksikkö
Happi (O ₂)	20.8 %
Typpi (N ₂)	79.2 %

Normaalitila	Yksikkö
Vesihöyryn tiheys	0.8038 kg/m ³
Kaasun lämpötila	273.15 K
Kaasun paine	101.325 kPa

Atomimassat	Yksikkö
Hiili (C)	12.011 g/mol
Vety (H)	1.0079 g/mol
Rikki (S)	32.0600 g/mol
Happi (O)	15.9994 g/mol
Typpi (N)	14.0067 g/mol
Ilma	28.8424 g/mol

ENERGIATASELASKUJEN LASKUARVOT, UUNI 4

11.11.1999

Massavirrat		Yksikkö
Polttoaineen syöttö	3.51	t/h
Tuhka hiilenpoltosta	0.34	t/h
Uunijauhe	39.63	t/h
Klinkkerintuotanto	24.02	t/h
Jäähdytystornipöly (arvio)	0.60	t/h
Sähkösuodinpöly (arvio)	4.20	t/h
NO _x -vesi	0.63	m ³ /h

Hehkutushäviö		Yksikkö
Uunijauhetta	67.10	%
Hiilidioksidia	32.90	%

Tilavuusvirrat		Yksikkö
Ensiöilma kompressorilta	1627	m ³ /h
Ensiöilma puhaltimelta	6940	m ³ /h
Sekundääri-ilma	24259	m ³ /h
CO ₂ kalsinoimista	6640	m ³ /h
Savukaasut uunista	39102	m ³ /h
Vuotoilma uunin perältä	4908	m ³ /h
Savukaasut jäähdytystornille	50649	m ³ /h
Vuotoilma jäähdytystornista	6567	m ³ /h
Savukaasut sähkösuodattimelle	57217	m ³ /h
Vuotoilma sähkösuodattimesta	34138	m ³ /h
Savukaasut piippuun	91354	m ³ /h

Pitot-mittauksen laskut	Ensiöilma	Savukaasut	Yksikkö
Kuivan kaasun tiheys normaalitilassa	1.29	1.38	kg/m ³
Kostean kaasun tiheys normaalitilassa	1.28	1.38	kg/m ³
Kuivan kaasun tiheys kanavassa	1.21	0.86	kg/m ³
Kuivan kaasun nopeus kanavassa	25.6	13.4	m/s
Kuivan kaasun tilavuusvirta kanavassa	7398	132399	m ³ /h
Kuivan kaasun tilavuusvirta normaalitilassa	6940	81862	m ³ /h

Lämpötilat	Yksikkö	
Ensiöilma	26	°C
Sekundääri-ilma	4	°C
Kivihili/ petrokoksi	62	°C
Savukaasut jäähdytystornille	446	°C
Savukaasut sähkösuodattimelle	218	°C
Savukaasut piipussa	160	°C
Uunijauhe	66	°C
Klinkkeri jäädyttäjiltä	120	°C
NO _x -vesi	8	°C

HIILENPOLTON SAVUKAASULASKUT, UUNI 4

11.11.1999

SAVUKAASULASKUT (T _{ref.} = 25 °C)	Suure	Arvo	Yksikkö
Polttoon tarvittava hapen stokiometrinen ainemäärä	n _{O₂} /h	264.1	kmol/h
Polttoon tarvittava kuivan ilman stokiometrinen ainemäärä	n _{ki,o} /h	1269.6	kmol/h
Kuivan ilman määrä polttoainekiloa kohti	n ['] _{ki,o}	361.7	mol/kg pa
Stokiometrisen polton savukaasumäärä polttoainekiloa kohti	n ['] _{ks,o}	437.6	mol/kg pa
Polton ilmakerroin	λ	1.15	-
Palamiseen käytetty kuivan ilman määrä polttoainekiloa kohti	n ['] _{ki}	414.7	mol/kg pa
Palamisilman mukana tuleva vesihöyry polttoainekiloa kohti	n ['] _{vi}	2.7	mol/kg pa
Kokonaisilmavirta	n _i	1464.8	kmol/h
Ilman tilavuusvirta	V _i	33718	m ³ /h
Palamisilman entalpiavirta polttoainekiloa kohti	H _i	-280.2	kJ/kg pa
Hiilidioksidin määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti	n ['] _{CO₂}	65.0	mol/kg pa
Rikkidioksidin määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti	n ['] _{SO₂}	1.1	mol/kg pa
Hapen määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti	n ['] _{O₂}	11.0	mol/kg pa
Typen määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti	n ['] _{N₂}	396.3	mol/kg pa
Vesihöyryn määrä savukaasussa polttoainekiloa kohti	n ['] _{H₂O}	23.8	mol/kg pa
Savukaasun ainemäärä polttoainekiloa kohti	n ['] _{sk}	497.1	mol/kg pa
Savukaasun ainevirta	n _{sk}	1744.8	kmol/h
Savukaasun tilavuusvirta piipussa	V _{sk}	104340	m ³ /h
Savukaasun entalpiavirta piipussa polttoainekiloa kohti	H ['] _{sk}	7817.5	kJ/kg pa
Savukaasun entalpiavirta piipussa	H _{sk}	27440	MJ/h

MASSATASE, UUNI 4**Jari Koskinen, 11.11.1999**

TULEVAT VIRRAT	t/h
Polttoaine	3.17
Polttoaineen tuhka	0.34
Ensiöilma	11.03
Sekundääri-ilma	31.22
Ilman sisältämä vesihöyry	0.19
Uunijauhe	39.63
Pöly (arvio)	4.80
Vuotoilma uunin perältä	6.32
NO _x -vesi	0.63
Yhteensä	t/h
Tulevat virrat yhteensä	97.33

POISTUVAT VIRRAT	t/h
Palamistuotteet (O ₂ , N ₂ , CO ₂)	45.36
CO ₂ kalsinoitumisesta	13.04
Vesihöyry poltosta ja ilmaylimäärästä	1.36
Vesihöyry vuotoilmasta	0.03
Vuotoilma uunin perältä	6.32
Vesihöyry NO _x -vedestä	0.63
Pöly (arvioitu)	4.80
Klinkkerintuotanto	24.02
Yhteensä	t/h
Poistuvat virrat yhteensä	95.55

EROTUS	t/h
Tulevien ja poistuvien virtojen erotus	1.78

ENERGIATASE, UUNI 4**Jari Koskinen, 11.11.1999**

TULEVAT VIRRAT			MJ/h	kJ/kg kl.
Polttoaine (sis. tuhkan)	3.51	t/h	108681	4525.2
Ensiöilma	8567	m ³ n/h	300	12.5
Sekundääri-ilma	24259	m ³ n/h	114	4.8
Ilman sisältämä vesihöyry	241	m ³ n/h	1	0.1
Uunijauhe	39.63	t/h	2632	109.6
Pöly (arvio)	4.80	t/h	319	13.3
Vuotoilma uunin perältä	4908	m ³ n/h	23	1.0
NO _x -vesi	0.63	m ³ /h	17	0.7
Yhteensä			MJ/h	kJ/kg kl.
Tulevat virrat yhteensä			112088	4667

POISTUVAT VIRRAT			MJ/h	kJ/kg kl.
Palamistuotteet (O ₂ , N ₂ , CO ₂)	37147	m ³ n/h	27298	1136.6
CO ₂ kalsinoitumisesta	6640	m ³ n/h	7626	317.5
Vesihöyry poltosta ja ilmaylimäärästä	1932	m ³ n/h	1689	70.3
Vuotoilma uunin perältä	4908	m ³ n/h	3189	132.8
Vesihöyry vuotoilmasta	31	m ³ n/h	25	1.1
Vesihöyry NO _x -vedestä	788	m ³ n/h	2221	92.5
Pöly (arvio)	4.80	t/h	2389	99.5
Uunin manttelin lämpöhäviöt	-	-	19496	811.8
Klinkkerintuotanto	24.02	t/h	2504	104.3
Satelliittijäähdyttäjien lämpöhäviöt	-	-	8041	334.8
Klinkkerin reaktioenergia	-	-	35112	1462.0
Yhteensä			MJ/h	kJ/kg kl.
Poistuvat virrat yhteensä			109590	4563

EROTUS	MJ/h	kJ/kg kl.
Tulevien ja poistuvien virtojen erotus	2498	104.0