

# **Autonpaloittelujätteen ja rengasromun terminen konversio energiaksi ja raaka-aineeksi**

Jussi Ranta

VTT Energia



ISBN 951-38-5442-6 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5443-4 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1999

#### JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Energia, Uudet energiatekniikat, Biologinkuja 3-5, PL 1601, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 460 493

VTT Energi, Nya energiteknologier, Biologgränden 3-5, PB 1601, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 460 493

VTT Energy, New Energy Technologies, Biologinkuja 3-5, P.O.Box 1601, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 460 493

Toimitus Leena Ukoski

Libella Painopalvelu Oy, Espoo 1999

Ranta, Jussi. Autonpaloittelujätteen ja rengasromun terminen konversio energiaksi ja raaka-aineeksi [Thermal conversion of automotive shredder residue into energy and raw materials]. Espoo 1999, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1960. 81 s. + liitt. 19 s.

**Avainsanat** automobiles, tyres, residues, shredders, wastes, conversion, energy, raw materials, gasification, combustion

## Tiivistelmä

Esitutkimuksessa selvitettiin autonpaloittamojätteen (ASR) ja kumiromun termistä konversiota energiaksi ja raaka-aineeksi. Suomessa syntyvät jätemäärä on yhteensä noin 50 000 t/a. Jätevirtana se on marginaalinen, mutta käyttö energiaksi on herättänyt kaikkialla kiinnostusta, koska nämä jätejakeet ovat energiantensiivisiä (kumiromun lämpöarvo yli 30 MJ/kg ja paloittamojätteenkin 10 - 20 MJ/kg) ja erityisesti kumiromu on varsin puhdasta polttoainetta. Tutkimus tehtiin pääosin kirjallisuusselvityksenä, mutta alustavia kokeita tehtiin laboratoriomittassa erityisesti autonpaloittamojätteellä. Lisäksi kartoitettiin tilanne Suomessa ja arvioitiin, mitkä toimenpiteet voisivat jatkossa olla potentiaalisimmat. Liitteissä esitellään lyhyesti kumin historiaa, renkaiden materiaalikäyttöä, vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöä sementtitehtaalla ja kuvaliitteenä materiaalinäytteitä (ASR) ja kumiromun käsittelyn tilannetta Suomessa.

Rengasromua on varsin yleisesti käytetty sementtiuunien polttoaineena, joko kokonaisina tai murskana. Sementtiuunin olosuhteet ovat niin ankarat, että renkaiden epäorgaaninen osa sitoutuu sementtiklinkkeriin. Suomessa syntyvää rengasromua (30 000 t/a, 250 GWh/a) on mahdollista käyttää lisäpolttoaineena Finnsementti Oy:n Paraisten tehtailla, jossa koetoiminta on aloitettu. Renkaiden polttoa on kokeiltu myös lisäpolttoaineena (10 - 30 %) kattilalaitoksilla, esimerkiksi Enso Yhteispalvelut Oy:n Anjalankosken laitoksella, Lahden Lämpövoima Oy:ssä ja Ekokem Oy:ssä. Tällöin rengasmurskan on yleensä oltava tasalaatuista. Murskaus varsinkin pieneen kappalekokoon vaatii runsaasti energiaa. Laitoksilla on havaittu teräslangoista aiheutuvia syöttölaiteongelmia joko polttoaineen syötössä tai tuhkanpoistossa. Teräslangat ovat erityisen ongelmallisia isokokoisissa renkaissa. Renkaiden muu epäorgaaninen faasi (ZnO) sekoittuu laitoksilla yleensä pääpolttoaineen tuhkaan ja voi myös tätä kautta aiheuttaa lisäongelmia.

Maailmalla on tutkittu paljon myös rengasromun pyrolyysiä eri ratkaisuin. Tällöin tuotteina ovat pyrolyysiöljy, pyrolyysihiili (sisältää myös epäorgaanisen faasin) ja teräs. Öljy voi toimia prosessin polttoaineena, mutta pyrolyysihieille on vaikeampi löytää muuta kuin polttoainekäyttöä, vaikka on esitetty, että se voisi korvata neitseellistä nokea kumiteollisuudessa.

Autonpaloittamojäte (ASR) on ei-metallisten, auton valmistuksessa käytettävien materiaalien seos, tyypillisinä esimerkkeinä muovit, tekstiilit ja kumit. Meillä syntyvä määrä

on 20 000 - 30 000 t/a (85 GWh/a). Tällaisen jätteen haitta-ainepitoisuudet ovat suurempia kuin kumiromun kohdalla. Tyypillistä on esimerkiksi noin 1 %:n klooripitoisuus. On esitetty, että melko yksinkertaisen mekaanisen käsittelyn avulla autonpaloittamojätteen haitta-ainepitoisuutta voitaisiin alentaa ja polttoainearvoa nostaa. Tällöin 1/3 - 1/2 paloittamojätteestä voitaisiin polttaa esimerkiksi sementtiuunissa ja metallien talteenottoastetta voitaisiin samalla nostaa prosessista riippuen. Toinen mahdollisuus on polttaa luokiteltu paloittamojäte seospolttona muun polttoaineen joukossa. ASR:n osuuden tulisi olla riittävän pieni tuhkan laadun ja päästöjen kannalta. Luokitellun paloittamojätteen käsittely ja syöttö eivät aiheuttane siinä määrin ongelmia kuin kumiromun käsittely.

Myös paloittamojätteen osalta on selvitetty pyrolyysivaihtoehtoa. Tällöin on mahdollista sopivassa ympäristössä nostaa materiaalien kierrätysastetta: pyrolyysikaasut voidaan jalostaa poltto- tai synteesikaasuksi, öljy hydrata synteesiöljyksi ja hiili käyttää koksauksprosessissa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että Suomessa on hyvät tekniset edellytykset käyttää suurin osa mainituista jätejakeista energiaksi sementtiteollisuudessa ja energiantuotannossa. Kehitystyötä vaativat kuitenkin mm. toimintavarman tuhkanpoiston kehittäminen rengasromun kohdalla tai metallin osuuden vähentäminen syötössä. ASR:n osalta olisi selvitettävä mm. mekaanisella käsittelyllä saavutettava parannus polttoainelaadussa. Saadun tuotteen käyttäytymistä tulisi selvittää sementtiuunissa ja energian tuotannossa mm. polttoaineen oikean seossuhteen määrittämiseksi.

Ranta, Jussi. Autonpaloittelujätteen ja rengasromun terminen konversio energiaksi ja raaka-aineeksi [Thermal conversion of automotive shredder residue into energy and raw materials]. Espoo 1999, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1960. 81 p. + app. 19 p.

**Keywords** automobiles, tyres, residues, shredders, wastes, conversion, energy, raw materials, gasification, combustion

## Abstract

This pre-study discusses thermal conversion of automotive shredder residue (ASR) and rubber waste into energy and raw materials. The total amount of these wastes in Finland is about 50 000 t/a. Hence, the waste flow is marginal, but the use as energy has generally arosen interest as these waste fractions are energy-intensive (calorific value of rubber waste >30 MJ/kg, and of shredder residue 10 - 20 MJ/kg, and especially the rubber waste is fairly clean. The study was carried out mainly as literature review, but preliminary laboratory-scale experiments were also made, especially with automotive shredder residue. The situation in Finland was surveyed, and the most potential further measures assessed. In addition, history of rubber, material use of tyres, use of alternative fuels in cement kilns and figures on material samples (ASR) and on handling rubber waste in Finland are presented in appendices.

Tyre scrap has generally been used as fuel in cement kilns, either as whole or shredded. The conditions in the cement kiln are so severe that the inorganic constituents of tyres are bound in cement clinker. Tyre scrap formed in Finland (30 000 t/a, 250 GWh/a) can be used as additional fuel at the Parainen Works of Finnsementti Oy, where the test activity has been started. Combustion of tyres as additional fuel (10 - 30%) in conventional boiler plants has also been tested, for example, at the Anjalankoski plant of Enso Yhteispalvelut Oy, by Lahden Lämpövoima Oy and Ekokem Oy. In these types of test, tyre scrap must be usually homogeneous. Crushing especially to a small lump size is energy-intensive. Problems due to steel wires have been observed at plants either in fuel feed or ash removal equipment. Steel wires of large tyres are of special concern. The other inorganic phase (ZnO) is usually mixed in the ash of the main fuel and may cause additional problems in ash utilisation.

Pyrolysis of tyre scrap with different methods has also been studied elsewhere in the world, the products being pyrolysis oil, pyrolysis char (incl. inorganic phase) and steel. Oil can be used as fuel in the process, while it is more difficult to find other than fuel use for pyrolysis char, although its use as substitute for virgin carbon black has been suggested.

Automotive shredder residue (ASR) is a mixture of non-metallic materials used in car manufacture, plastics, textiles and rubber being typical examples. In Finland, 20 000 - 30 000 t/a (85 GWh/a) of ASR is formed. The content of harmful substances in unclassified ASR is higher than in rubber waste. For example, the chlorine content of about 1% is typical of this waste. It has been suggested that the content of harmful substances in automotive shredder residue could be reduced by simple mechanical treatment and hence its fuel value would increase. Then it would be possible to burn 1/3 - 1/2 of residue, e.g., in a cement kiln, and the recovery ratio of metals could be increased depending on the process applied. Another alternative is to burn automotive shredder residue in co-combustion with other fuels. Treatment and feed of classified shredder residue may not cause problems to such an extent as that of rubber waste.

Application of pyrolysis to automotive shredder residue has also been assessed. This procedure would offer a possibility of increasing the recovery ratio of materials: pyrolysis gases can be converted into synthesis gas and oil into synthesis oil, and char can be used in a coking process.

It may be concluded that there are good technical possibilities in Finland to utilise the major part of these waste fractions as energy in the cement industry and for energy generation. However, the ash removal in the combustion of rubber waste or the reduction of the metal fraction in the feed still require development work. As regards ASR, i.e., improvement of fuel quality achieved by mechanical handling should be studied. The behaviour of the product in the cement kiln and in energy production should also be studied, i.e., to determine the correct fuel mixture ratio.

# Alkusanat

Tutkimus autonpaloittelujätteen ja rengasromun termisestä konversiosta energiaksi ja raaka-aineeksi alkoi toukokuussa 1997 ja päättyi toukokuussa 1998. Sen tavoitteena oli kartoittaa tilanne näiden kahden jättemateriaalin osalta maailmassa ja Suomessa. Hanke toteutettiin pääosin kirjallisuuskatsauksena, keskusteluin suomalaisten ja ulkomaalaisten asiantuntijoiden kanssa sekä tutustumisvierailuin. Hankkeen päärahoittajat olivat Tekes, VTT Energia, Nokian Renkaat Oy, Rengaskierrätys Oy ja Kuusakoski Oy. Myös Autotuojat ry. ja FinReci Oy ovat rahoittaneet työtä. Projektin vastuullisena johtajana ja pääasiallisena tekijänä toimi erikoistutkija Jussi Ranta VTT Energiasta. Hankkeen taustaryhmään kuuluivat seuraavat henkilöt, joille tekijät lausuu parhaat kiitokset:

Lassi Hietanen, VTT Energia  
Hannu Laaksonen, ympäristöministeriö  
Kari Mäkelä, FinReci Oy,  
Tarja-Liisa Perttala, Tekes  
Pekka Puputti, Autotuojat ry.  
Kai Sipilä, VTT Energia  
Harry Sjöberg, Rengaskierrätys Oy  
Pia Tirronen, Nokian Renkaat Oy  
Antero Vattulainen, Kuusakoski Oy.

Espoossa 17. elokuuta 1998

Jussi Ranta

# Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	5
ALKUSANAT	7
1. JOHDANTO	11
2. AUTONPALOITTELUJÄTE	13
2.1. ASR:n synty paloitteluprosessissa	13
2.1.1. ASR:n koostumus ja ominaisuudet	15
2.1.2. ASR:n määrän ja haitallisuuden vähentäminen	18
2.2. ASR:n terminen käsittely	22
2.2.1. Poltto	23
2.2.2. Kaasutus	24
2.2.3. Pyrolyysi	26
2.2.4. Muut kemiallis-termiset prosessit	37
2.3. Autopaloittamojäte Suomessa (Kuusakoski Oy)	39
2.3.1. Fluffin ja UK-kumin ominaisuudet	39
2.3.2. Muita esikokeita laboratoriossa	41
2.4. EU-lainsäädäntö	43
3. KUMIROMU	45
3.1. Kumiromun määrä	45
3.1.1. Kumiromun määrän minimointi	47
3.2. Kumiromun hyödyntäminen	47
3.2.1. Kumiromun hyödyntäminen Suomessa	48
3.3. Renkaan koostumus ja kumiromun ominaisuudet energiakäytön kannalta	49
3.3.1. Polttoaineominaisuudet	50
3.4. Rengasromun ja muun kumiromun terminen käsittely	51
3.4.1. Poltto	51
3.4.1.1. Sementtiuunit	52
3.4.1.2. Selluteollisuuden kattilat ja muut kattilalaitokset	54
3.4.1.3. Erilliset kumiromun polttolaitokset	56
3.4.1.4. Kokeet Suomen kattilalaitoksissa	57
3.4.2. Kaasutus	58
3.4.3. Pyrolyysi	58
3.4.3.1. Pyrolyysihiilen sopivuus eri käyttökohteisiin	60
3.4.3.2. Muut pyrolyysin sivutuotteet	64
3.4.3.3. Pyrolyysilaitoksia	65



3.4.4. Hydraus	67
3.4.5. Kumin regenerointi eli devulkanointi	67
<b>4. KUMIROMUN JA ASR:N KÄYTTÖ POLTTOAINEENA SUOMESSA</b>	<b>69</b>
4.1. Yleistä	69
4.2. Sementtiunit	70
4.3. Kiinteän polttoaineen kattilat	71
4.4. Kaasutus	72
4.5. EcoMaken kumiromun polttolaitos	73
4.6. Taloudellista tarkastelua	73
4.7. Yhteenveto	74
<b>LÄHDELUETTELO</b>	<b>75</b>
<b>LIITTEET</b>	
Liite A: Kumin lyhyt historia	
Liite B: Kumiromun raaka-ainekäyttö	
Liite C: Sliten sementtitehdas - kokeilut vaihtoehtoisilla polttoaineilla	
Liite D: ASR:n ja rengasromun materiaalinäytteet, kuvaliite	



# 1. Johdanto

Tässä tutkimuksessa selvitetään vähemmän tunnettujen ”ajoneuvopäästöjen”, nimittäin rengasromun ja autojen purkuromun, hyödyntämistä termisin menetelmin.

Autojen määrä on kasvussa ja elintason nousun myötä auton ”elinkaari” on mitä ilmeisimmin lyhenemässä. Autoissa käytetään yhä enemmän uusia materiaaleja, ja näin romutettavien ajoneuvojen kierrätys on koko ajan uusien haasteiden edessä. Renkaiden osalta ollaan hiukan toisenlaisessa tilanteessa, sillä niiden ”elinkaari” saattaa pidentyäkin mm. uusien materiaalien ja parempien teiden vuoksi. Kuitenkin myös romutettavat renkaat muodostavat yhdessä muun kumiromun kanssa jätevirran, jossa materiaalit muuttuvat ja uudet kierrätykseenkin liittyvät ratkaisut ovat mahdollisia ja välttämättömiä.

Erityisesti rengasromun ja kumipulverin osalta on Suomessakin etsitty materiaalikäyttöä mm. geoteknisissä sovelluksissa (esim. Repo 1997, Peltonen 1996). Päätoimijana alueella on ollut Suomen Rengaskierrätys Oy. Euroopassa ja Yhdysvalloissa on tavallista polttaa renkaat sementtiuuneissa tai kattilalaitoksissa. Euroopassa noin 40 % romurenkaista päätyykin sementtiuuneihin. Sementtiprosessissa jätteen mineraaliaines sitoutuu klinkkeriin ja periaatteessa esim. klinkkerin rautaa voidaan korvata jätteen sisältämällä raudalla. Tavanomaisilla polttolaitoksilla tuhka sekoittuu muun polttoaineen tuhkaan ja voi tätä kautta muodostua ongelmaksi.

Autonpurkujäte menee sen sijaan tänä päivänä pääsääntöisesti kaatopaikoille. Poikkeuksiakin on, kuten Sveitsi, jossa tämäkin jäte pyritään muuhun polttoaineeseen seostettuna käsittelemään polttolaitoksilla. Myös Yhdysvalloissa on autonpurkujätteen polttamista kokeiltu, mutta hankkeet ovat päättyneet taloudellisista tai ympäristösyistä.

Em. erityisjätteiden käsittelyssä on pitkään tutkittu polton ohella muita termisiä prosesseja, joissa energiahyötykäytön ohella pyrittäisiin maksimoimaan materiaalien hyödyntäminen ja minimoimaan kaatopaikalle joutuvan fraktion osuus. Näissä prosesseissa voi syntyä tuotteita tai välituotteita, joita voidaan hyödyntää. Tyypillisiä tällaisia prosesseja ovat:

- pyrolyysi, jossa päätuotteina ovat hiili, metallit ja lasi (hidas pyrolyysi)
- pyrolyysi, jossa päätuotteina ovat öljy ja inertit materiaalit (nopea pyrolyysi)
- pyrolyysi, jossa päätuotteina ovat kemikaalit (esim. vakuumpyrolyysi)
- kaasutus, jossa päätuotteena on kaasu (joko synteesikaasu tai polttokaasu)
- hydraus
- hydrolyysi, joka soveltuu lähinnä tietyille muoveille ja
- vitrifiointi, jossa päätuotteena on inertti jäännös.

Yksinkertaisimpana lähtökohtana on käyttää nykyistä infrastruktuuria ja konversiolaitoksia, kuten sementtiuuneja, jätteiden käsittelyyn. Näin on meneteltykin monissa maissa, mutta pyrkimys kaikkialla on siihen suuntaan, että yhä suurempi osa näistä jätemateriaaleista kierrätetään tulevaisuudessa pikemminkin materiaalina kuin energiana. Kaatopaikoille vieminen pyritään estämään kokonaan. Suora energiaksi käyttö on perusteltua tapauksissa, joissa jätteen energiapotentiaali on huomattava ja haitallisten aineiden pitoisuus pieni. Osittainen energiaksi konversio, kuten pyrolyysi, voi olla perusteltua, jos jätteellä tai sen fraktiolla on muuta taloudellista hyötykäyttöpotentiaalia.

## 2. Autonpaloittelujäte

### 2.1. ASR:n synty paloitteluprosessissa

Auton elinkaari on 10 - 15 vuotta, jonka jälkeen se romutetaan. Ajoneuvojen romutus on maailmanlaajuisesti pitkälle etabloitunutta metallien kierrätystekniikkaa. Noin 95 % autoromujen metalliosista pystytään kierrättämään. Tämä vastaa noin 75 % auton kokonaispainosta. Kun ajoneuvo joutuu romutukseen, hajottamot poistavat siitä ensiksi käytökelpoiset tai haitalliset komponentit. Hajottamoista jäljelle jäänyt ”raato” puristetaan paaliksi ja kuljetetaan paloittelulaitokselle, jossa se vasaramyllyillä pilkkotaan yleensä 25 - 50 mm:n palakokoon metallien tehokkaaksi erottamiseksi (autonpaloittelujäte, engl. Auto Shredder Residue, ASR, Auto Fluff). Rauta erotetaan magneettisesti ja kevytjäte, ”fluffi”, poistetaan tuuliseulan avulla. Teräksen osuus on noin 70 % ja fluffin 25 %. Jäljelle jäänyt 5 - 8 %, raskas, ei-magneettinen jätte käsitellään erikseen mm. alumiinin, sinkin, magnesiumin, kuparin, ruostumattoman teräksen ja messingin erottamiseksi. Toinen lähinnä kumi- ja muovipitoinen jätte syntyy raskaan fraktion käsittelyssä (Sendjarevic ym. 1997, Hamm 1993). Kuvassa 1 on kaavio (tulevaisuuden) auton romutusprosessista. Taulukossa 1 esitetään eri fraktioiden erotusasteet ja osuudet tyypillisessä autoromussa.

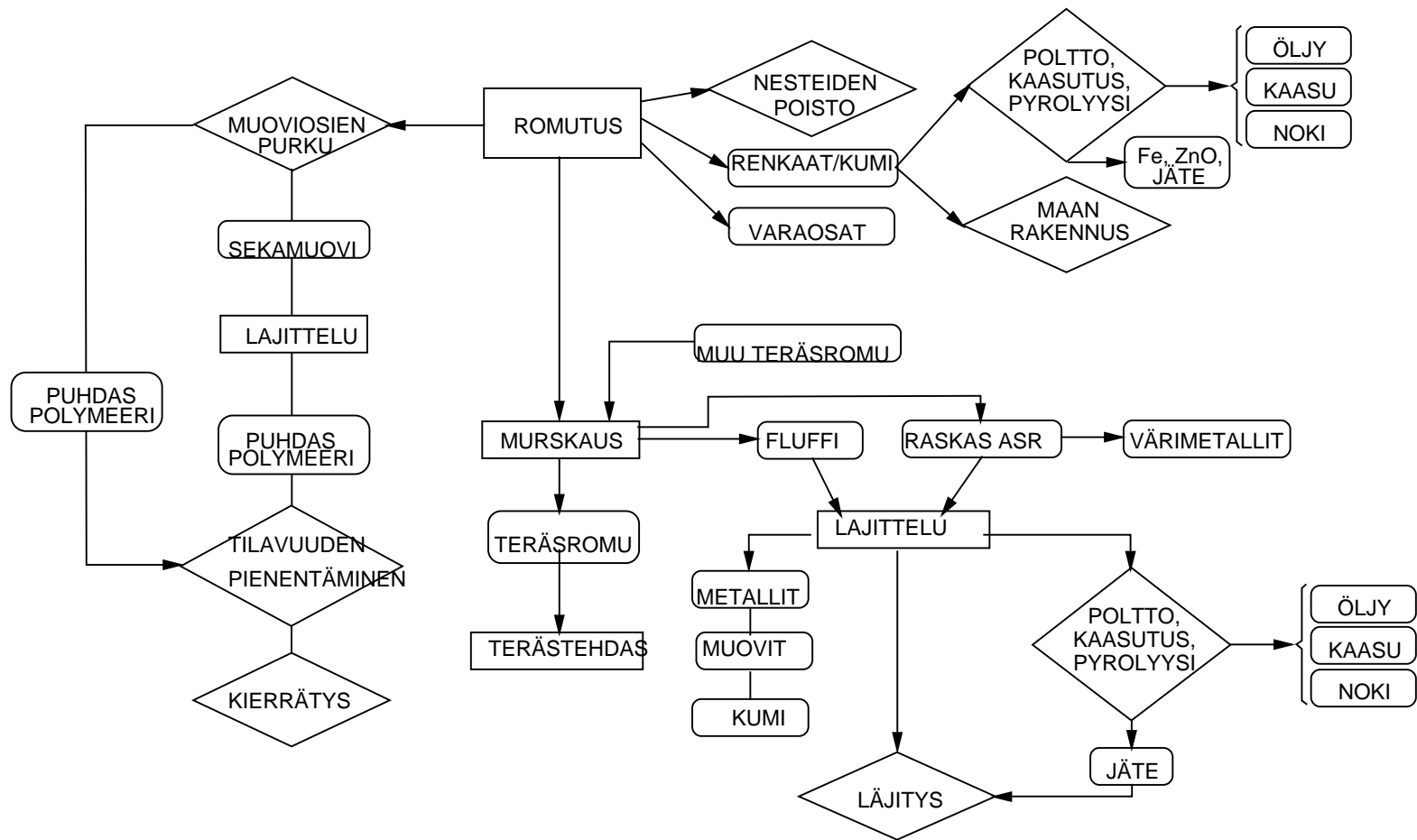
ASR:n määrä ajoneuvoa kohti on 250 - 300 kg ja sen arvellaan edelleen kasvavan, kun teräksen käyttö ajoneuvoissa vähenee. Muovien osuus ajoneuvojen painosta on noussut 1960-luvun alun 2 %:n tasosta yli nelinkertaiseksi vuoteen 1988 (Hamm 1993).

Ei-metallisen purkujätteen eli ASR:n kohdalla ei kunnollista hyötykäyttöä ole kehitetty, vaan jätte vietään yleensä kaatopaikalle. Ongelma on yleinen kaikissa kehittyneissä teollisuusmaissa. Kaatopaikkasijoittaminen kallistuu kuitenkin jatkossa ja muutenkin hankaloituu mm. päästönormien kiristymisen myötä, joten edellytykset myös tämän fraktion hyödyntämiselle paranevat.

Useat autonvalmistajat ovat myös käynnistäneet omat ”design”-ohjelmansa ASR:n määrän vähentämiseksi. Esimerkiksi Renault kehittää ajoneuvoa ”2002”, jonka kierrätettävyyttä olisi 90 %. Nämä autot lienevät romutuskunnossa vuosina 2010 - 2015. Toisena ongelmana romutuksen tehostamisessa eurooppalaisella tasolla on mm. autonromutusyritysten suuri määrä (10 000 - 20 000) ja täten logistiset ongelmat. Ajoneuvojen kierrätyksen tehostamisessa on havaittavissa kolme pääsuuntausta:

- muoviosien erottelun tehostaminen ja fluffin määrän vähentäminen (samanaikaisesti kun ASR:n määrä/auto kasvaa)
- fluffin käsittely termisesti tai mekaanisesti ja jätteen määrän vähentäminen
- auton suunnittelun tehostaminen tavoitteena ”fluffiton” tuote, vuoden 2015 tienoilla.

ASR:N JA KUMIROMUN KÄSITTELY TULEVAISUUDESSA



Kuva 1. Autopaloittamojätteen (ASR) käsittely tulevaisuudessa.

Taulukko 1. Eri materiaalien osuus ja kierrätyspotentiaali autopaloittamon raaka-aineessa (Hamm 1993).

	Raaka-aine	Paino-osuus, %	Kierrätysaste, %
Rauta	Teräs	57,0	78 - 90
	Valurauta	8,4	
Ei-rautametallit	Alumiini Al	4,4	>90
	Kupari Cu	1,0	60
	Lyijy Pb	0,4	90
	Sinkki Zn	0,4	20 - 30
Jalometalli	Platina Pt	0,4	20 - 30
Polymeerit	Muovi	7,6	vähäinen
	Kumi	6,4	vähäinen

Fluffin määrä esimerkiksi Saksassa on tällä hetkellä 250 000 - 500 000 t/a ja Yhdysvalloissa noin 3 milj. t/a (Sendijarevich ym. 1997, Pöttinger 1995). Suomen autopaloittamoista syntyy metallien talteenottoprosesseissa 20 000 - 30 000 t/a muovi-, kumi- ja kuitupitoista jätettä (ASR), joka tällä hetkellä menee kokonaisuudessaan kaatopaikoille. Materiaali on seos, joka koostuu mm. muovista, eristevaahdosta, kumista, lasista ja metallista. Jätteessä on luonnollisesti myös pölymäistä materiaalia (ruostetta hiekkaa, täyteaineita), öljyjäämiä ja kosteutta. Jätettä käsitellään maailmalla yleensä erityisjätteenä mahdollisten ympäristöhaittojen, kuten lyijy-, kadmium- ja PCB-jäämien, vuoksi. Samasta syystä maailmalla on tutkittu ASR:n hyödyntämistä varsin paljon (Day ym. 1996).

### 2.1.1. ASR:n koostumus ja ominaisuudet

Eri tahoilla tehtyjen mittausten mukaan autonpurkujätteen karkea koostumus energia-käyttöä ajatellen on seuraava (suluissa vaihteluväli):

- kosteus 6 % (1 - 25)
- orgaaninen osa 45 % (30 - 60)
- inerttipitoisuus 50 - 60 %
- lämpöarvo 10 - 14 MJ/kg
- tilavuuspaino 300 - 400 kg/m<sup>3</sup>
- rikkipitoisuus 0,3 - 0,8 %
- klooripitoisuus 1 - 2 %.

Alkuainekoostumus vaihtelee, mutta tyypillisiä pitoisuuksia ovat: C 30 %, H 3,7 %, O 7 %, N 1,7 %, S 0,3 %, Cl 1,4 %, Fe 13 % ja Si 9,5 %.

Ennen metallien erottamista materiaalista poistetaan ns. fluffi esimerkiksi ilmaluokittimella ja seulomalla. Fluffi sisältää mm. seuraavia materiaaleja:

- polyuretaanivaahtoa
- kuituja
- vinyyliverhoilun
- pehmusteita
- kumia
- muovia
- komposiitteja
- lasia
- soraa/hiekkaa/puuta/maata/ruostetta (alite)
- öljy-, maali- ja nestejämiä
- pahvia ja paperia
- erottumattomia metalleja.

Saksalaisen tutkimuksen (Rudolph ym. 1997) mukaan ASR:n koostumus oli taulukon 2 mukainen.

*Taulukko 2. ASR:n koostumus.*

Materiaali	Paino-%
Rauta	13
Alumiini	3
Kupari	2
Muovit ja komposiitit	41
Puu/paperi	4
Kuidut ja muut senkaltaiset materiaalit	9
PUR-vaahto	6
Lasi ja keramiikka	13
Hiekka, maali	9

Magneettierotuksen ja ilmaluokituksen jälkeen jäljelle jäänyt fraktio sisältää mm. sinkin, alumiinin ja kumin. Fraktio jatkokäsitellään edelleen esimerkiksi upotus-kellutuslaitoksella, jolloin syntyy toinen jätejäte, joka sisältää mm. kumia, raskaampia muovilaituja ja lasia. Fluffi, johon kumipitoinen jae yhdistetään (ASR), viedään tällä hetkellä useimmissa maissa kokonaan kaatopaikoille. Eräissä maissa kaatopaikkakustannukset ovat niin korkeita, että vaihtoehtoja etsitään kiivaasti. Joillakin paloittamoilla jopa 50 % käyttökuluista voi syntyä kaatopaikkakustannuksista (Sendijarevic ym. 1996).

Autoissa käytettäviä polymeereja ja elastomeereja ovat:

- polyuretaani, PUR, esimerkiksi istuimissa, voidaan kierrättää ja käyttää esimerkiksi mattojen alusrakenteissa



- polypropyleeni, PP/EPDM, esimerkiksi puskureissa, voidaan kierrättää ja käyttää uusien puskurien valmistukseen
- polyvinyylikloridi, PVC, esimerkiksi johtimien eristeet ja putket, voidaan kierrättää ja käyttää esimerkiksi letkujen valmistukseen
- ABS, voidaan käyttää uudelleen
- polyesteri (tyydyttymätön)
- nailon
- polyetylenei, PS, voidaan käyttää uudelleen
- kumituotteet (muu kuin rengaskumi), voidaan jauhaa kumijauheeksi ja käyttää kumituotteissa.

Nämä käsittivät 87 % Yhdysvalloissa vuonna 1990 ajoneuvoissa käytetyistä poly- ja elastomeereista (Sendijarevic ym. 1996).

### **ASR:n PCB-pitoisuus**

Yhdysvalloissa on autonpaloittamojätteistä lähes aina löytynyt PCB:tä enemmän tai vähemmän. Pitoisuudet ovat olleet erityisen korkeita, jos käsiteltävänä on ollut ns. valkea romu eli jääkaapit ja muut kotitalouskoneet (Sendijarevic ym. 1996). Yhden jääkaapin kondensaattorit voivat sisältää jopa 146 g PCB-öljyä (Hamm 1993). Myös ne jättejakeet, jotka prosessoitaessa joutuivat veden kanssa kosketuksiin, sisälsivät vähemmän PCB:tä. Pitoisuudet olivat yleensä <100 mg/kg, mutta vaihtelu oli 10 - 400 mg/kg.

Euroopassa tehdyissä mittauksissa PCB-pitoisuudet olivat huomattavasti alemmat, yleensä alle 10 mg/kg (Hamm 1993). Vaikka öljyt ja muut nesteet on periaatteessa poistettu, ASR-jätteessä esiintyy PCB:tä ja polyaromaattisia hiilivetyjä (PAH) (kuva 2). Tämä selittyy mm. muovien pehmitinaineiden, pienkondensaattorien ja vaimennusmateriaalien sisältämistä epäpuhtauksista. PAH-jäämät tulevat mm. kumifraktiosta.

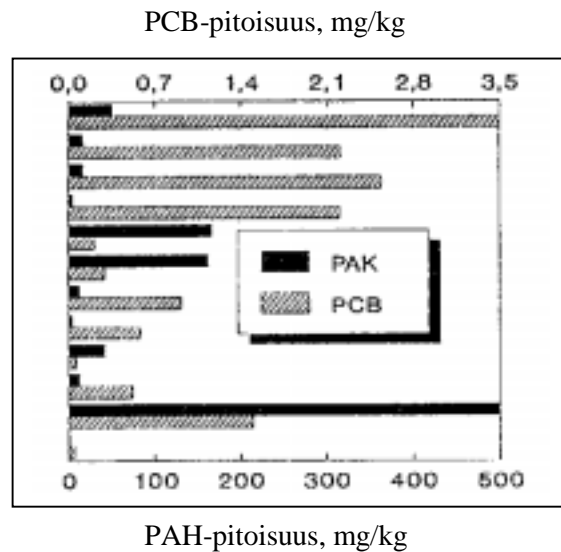
### **ASR:n raskasmetallit ja liukenevat metallit**

Taulukossa 3 on Yhdysvalloissa tyypillisiä ASR:n metallipitoisuuksia ja metallien liukoisuuksia (Sendijarevic ym. 1996). Liukoisuusraja (TCLP = Toxicity Characteristic Leaching Procedure) ylitettiin vain lyijyn osalta. Tutkittujen näytteiden lyijypitoisuudet olivat varsin korkeita, mutta vain 2 - 5 % liukeni tehdyssä kokeessa.

### **ASR:n kloori**

ASR:n kloori on pääosin peräisin fluffin sisältämästä PVC:stä. Termisessä prosessissa tämä vapautuu vetykloridina, joka voidaan tehokkaasti pestä pois savukaasuista. Jopa 3,5 %:n klooripitoisuuksia on raportoitu (Lanoir ym. 1997).

Tekstiilit (istuin)  
 Jouhet (istuin)  
 Vaahтомуovi (istuin)  
 Metallilakat  
 Autonrenkaat  
 Tiivisteet  
 Normaali autolakka  
 Elektroniikka  
 Iskunvaimenninöljy  
 Hydraulikkaöljy  
 Äänenvaimenninmatto  
 Vaihdelaatikkoöljy



Kuva 2. Eräiden ajoneuvokomponenttien PCB/PAH-pitoisuuksia (Hamm 1993).

Taulukko 3. Eräiden raskasmetallien määrä ja liukoisuus kahdessa autopalattamojätteenäytteessä (Sendijarevic ym. 1996).

Metalli	ASR-7B		ASR-8B		Liukoisuus- raja mg/l
	Metallien kok.määrä mg/kg	Liukoiset metallit mg/l	Metallien kok.määrä mg/kg	Liukoiset metallit mg/l	
Arseeni	2,7	<0,1	13,8	<0,1	5,0
Barium	553,2	<1,0	3 872,7	<1,0	100,0
Kadmium	24,6	0,7	34,8	0,6	1,0
Kromi	58,9	0,3	83,7	<0,1	5,0
Kupari	2 858,4	<1,0	11 529,0	6,6	100,0
Lyijy	3 487,9	12,9	3 543,4	30,8	5,0
Elohopea	0,1	<0,05	0,8	<0,05	0,2
Seeleni	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	1,0
Hopea	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	5,0
Sinkki	8 185,4	337,2	3 631,9	305,7	500,0

### 2.1.2. ASR:n määrän ja haitallisuuden vähentäminen

Autopalattamotoiminnasta syntyy Euroopassa muovijätettä noin 0,9 milj. tonnia, josta 93 % meni vuonna 1994 kaatopaikoille. Vain hyvin pieni osa kierrätettiin raaka-aineeksi tai energiaksi (Plastics recovery 1996). Kaatopaikkakustannukset ovat monessa maassa vahvin kannustin fluffin määrän vähentämiseksi. Toisaalta kaatopaikkakustannukset vaihtelevat voimakkaasti eri maissa ja vaikuttavat siten maakohtaisiin ratkaisuihin, mahdollisesti myös romutettavan materiaalin liikkumiseen markkinoilla. Kaatopaikkakustannuksia eri maissa: Yhdysvallat 12 - 15 USD/t, Ranska 250 - 450 RFR/t, Saksa 400 - 600 DEM /t, Suomi 300 FIM/t.

Ei-metallisen purkujätteen määrää ja haitallisuutta voidaan parhaiten vähentää seuraavin toimenpitein:

- tehokkaampi purku ja kierrätys *ennen* palottamoprosessia
- ASR:n luokittelu paloittamoprosessin *jälkeen*
- terminen käsittely paloittamoprosessin *jälkeen*
- em. toimenpiteiden yhdistäminen.

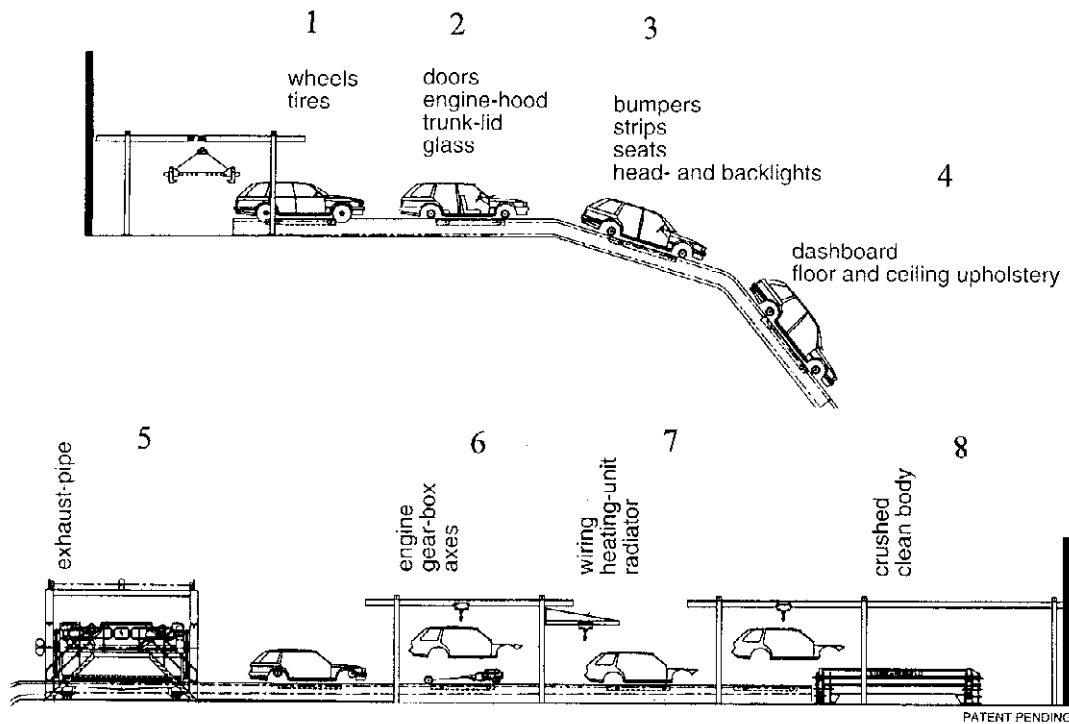
Autonpurkujätettä hyödyntävien laitosten kannalta on ongelmallista, että muovin määrä autossa lisääntyy (Wallentowitz 1997) ja siten ”fluffin” määrä tulevaisuudessa kasvaa, elleivät hyötykäyttö ja kierrätys samanaikaisesti lisäänty. ASR:n energiakäytön lisääminen tulevaisuudessa minimoi haittoja ja kaatopaikkakustannuksia ja parantaa siten metallien kierrätyksen taloutta.

### **Purkuprosessin tehostaminen**

Purkuun liittyvät vaiheet tehdään romutusketjun alkupäässä. Toisin sanoen autojen purkuvaiheessa yhä suurempi osuus fluffia muodostavista komponenteista yritetään saada talteen. Kehitystä tapahtuu paitsi palottamoprosesseissa myös autojen suunnittelun ja valmistamisen sektorilla siten, että eri komponenttien kierrätys tulee jatkossa nykyistä helpommaksi. Tällöin on romutettavista autoista mahdollista poistaa yhä suurempi osa esimerkiksi muovi-, lasi- yms. komponentteja ja välttää niiden joutuminen varsinaiseen metallien talteenottoonprosessiin. Eri muovilaatujen kierrätettävyyttä edellyttäisi tunnistusmerkintöjä ja helppoa poistoa. Istuimien vaahtomuovi voidaan periaatteessa ottaa talteen ja kierrättää, samoin lasi ja kumiosat. Kumikomponentit voitaisiin jauhettuna käyttää sekundäärisissä tuotteissa, kuten kumiharkoissa. Esimerkki tällaisesta fluffittomasta prosessista on kuvassa 3.

Ongelmana on, että purku on työvoimaintensiivistä ja siis kallista. On laskettu, että eurooppalaisella palkkatasolla muoviosien purkunopeuden olisi oltava vähintään 2 - 3 kg/min ollakseen kannattavaa (Cortesi 1997). Yhdysvalloissa on nykyisenä tavoitteena poistaa 95 % nesteistä alle 20 min:ssa. Käyttämällä paineilma-vakuumisysteemiä voidaan nesteiden poistoa edelleen tehostaa. Taulukossa 4 on verrattu vakuumisysteemiä ja konventionaalista nesteiden poistoa (Astl 1997). Lisäksi erilaiset komposiittirakenteet vaikeuttavat kierrätystä. Ongelmana on myös se, että uusille purun yhteydessä syntyville materiaaleille ei useinkaan ole kysyntää.

Tyypillisiä poistettavia (hyödyllisiä tai haitallisia) materiaaleja ovat varaosiksi kelpaavat komponentit, renkaat, polttoainesäiliö, akku, nesteet (öljy, jarruneste, jäähdytinneste, CFC:t), turvatyynyjen laukaisupanokset, katalysaattorit, vanhojen mallien mahdolliset Hg-kytkimet ja PCB-kondensaattorit. Tässä vaiheessa saadaan siis talteen materiaaleja,



Kuva 3. Car Recycling systems B. V. (Hollanti). Komponenttien purkujärjestys: 1. Renkaat ja levytyöt, 2. Ovet ja luukut, 3. Puskurit, listat, istuimet, valot, 4. Kojetaulu, verhoilu, 5. Pakoputki, 6. Moottori, vaihteisto, akselit, 7. Johdot, lämmityslaitte, jäähdytin, 8. Kori.

Taulukko 4. Eri nesteiden poistoaajat ja -osuudet käytettäessä tavanomaisia (\*) menetelmiä ja paineilma-vakuumitekniikkaa (Astl 1997).

	Poistettu määrä, %	Aika, min
Moottoriöljy	93,7 *	4,8 *
Voiteluöljy	86,4 *	7,8 *
Jarruneste	92,7	2,5
Jäähdytysneste	86,0 *	7,7
	91,3	3,9
	84,4 *	6,6 *
	93,0	3,5

joita menevät osittain kierrätykseen. On suunnitelmia, että alkuvaiheessa suuret muovikomponentit (puskurit, kojetaulut) lasi jne. Poistetaan ja kierrätetään. Suurilla valmistajilla (Fiat, Renault, BMW, Volvo, jne.) on omat ohjelmansa autojen kierrätettävyyden parantamiseksi (esim. Pöttinger 1995, Hernborg 1995, Froelich ym. 1995, Volvo 1994). Esimerkiksi Volvolla on menossa projekti, jossa 3 000 autoa puretaan ja kaikille Volvon autotyypeille valmistetaan mm. purkumanuaalit. Uusissa malleissa on purku otettu huo-

mioon jo suunnitteluvaiheessa. Esimerkiksi Volvo S40 -mallin purku 85 %:n kierrätysasteeseen kestää 45 minuuttia. Uusissa malleissa on kiinnittimien lukumäärä pienempi ja kombinoitujen materiaalien määrä pienempi. Volvo on myös julkaissut vuonna 1996 tuotannossa käytettävien kemikaalien ”mustan” ja ”harmaan” listan. Mustalla listalla olevia yhdisteitä ei käytetä Volvossa ja harmaalla listalla olevien kemikaalien käyttöä vältetään tai vähennetään.

### **ASR:n luokittelu paloittamoprosessin jälkeen**

Nykyaikaisesta autopaloittamosta syntyy useita jätevirtoja, jotka tavallisesti yhdistetään ja viedään kaatopaikalle. Nämä jakeet ovat koostumukseltaan usein varsin erilaisia, ja hyötykäytön kannalta tulisi ensi vaiheessa harkita jakeiden hyödyntämistä erikseen.

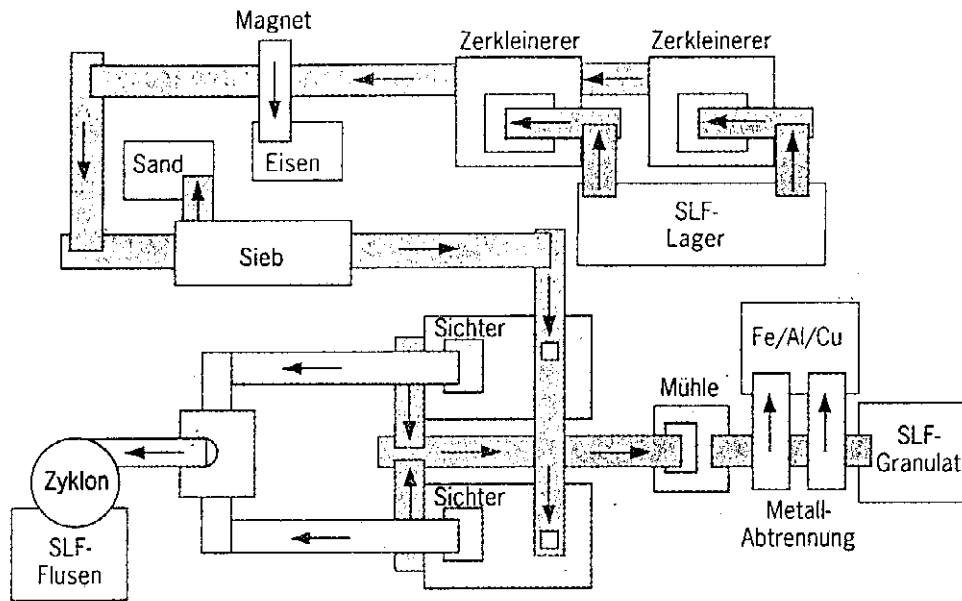
Joissakin tapauksissa jätteiden hyödyntämistä vaikeuttaa haitallisten epäpuhtauksien (raskasmetallit ja PCB) korkea pitoisuus ja toisaalta epäorgaanisen aineksen suuri osuus. Hajottamoissa sovelletaan erilaisia jauhatus- ja erotustekniikoita ja käsiteltävien jakeiden määrä voi vaihdella. Tämän vuoksi myös ASR:n laatu vaihtelee laitoskohtaisesti.

Tehokkain tapa ASR:n kierrättämisen ja energiakäytön kannalta on varmistaa, etteivät haitalliset ja haitattomat jätevirrat tarpeettomasti sekaannu. Prosessissa, jossa on alkuvaiheessa tuuliseula ja myöhemmin UK-laitos, muodostuu toisistaan selkeästi erottuvat jätevirrat. Alkuvaiheessa erottuva kevytjäte, fluffi, on yleensä melko haitatonta ja sen ominaisuuksia voidaan edelleen parantaa esimerkiksi seulomalla. Raskasmetallien ja kloorin määrä voidaan saada sopivalla esikäsitteilyllä sellaiseksi, että fluffi voidaan polttaa esimerkiksi sementtiuunissa. Ranskassa tehtyjen kokeilujen perusteella 20 % ASR:stä voitiin näin hyödyntää energiana (Froelich ym. 1995).

Fluffin PVC-pitoisuutta voidaan alentaa ominaispainoon perustuvalla erotustekniikalla, esimerkiksi upotus-kellutustekniikalla tai hydro syklonilla. Tämä edellyttää kuitenkin ASR:n jauhatusta sopivaan partikkelikokoon. On esitetty myös, että kloori voitaisiin ottaa talteen esipyrolyysillä 250 - 350 °C:ssa vetykloridin muodossa (Hamm 1993).

ASR:n tilavuuden pienentäminen on mahdollista ekstruuderitekniikalla, jossa muovifraktio plastisoituu ja tuloksena on brikettejä. Niiden ominaispaino voi olla 2 500 kg/m<sup>3</sup>, joten tilavuus on vain 1/7 alkuperäisestä (Rudolph ym. 1997). Tällä tekniikalla voidaan säästää käsittelykustannuksissa ja kaatopaikan tilavuudessa. Sveitsiläisen Dobex AG:n laitteiston investointi (10 000 t/a) olisi noin SFR 480 000. Tuotantokustannus olisi noin SFR 115/t.

ASR:n luokitteluprosessi esitetään kuvassa 4 (Rudolph ym. 1997).



Kuva 4. ASR:n luokitteluprosessi (Rudolph ym. 1997).

## 2.2. ASR:n terminen käsittely

Termisellä prosessoinnilla voidaan energiaintensiivisin osa fluffista hyödyntää energiana ja samalla parantaa materiaalien kierrätystä. Haitallinen fraktio voidaan inertisoida ja hyödyntää sopivassa kohteessa. Tavallisimmat prosessointimenetelmät luetellaan taulukossa 5.

Taulukko 5. Jätteiden termiset käsittelymenetelmät.

Menetelmä	Raaka-aineen ominaisuus	Tavoite
Poltto	Korkea lämpöarvo	Hyödyntäminen energiana
Kaasutus	Korkea lämpöarvo	Polttokaasun tai synteesikaasun valmistus
Pyrolyysi	Hiilivetypitoinen	Materiaalin talteenotto / hyödyntäminen energiana
Hydraus	Homogeeninen, pieni inerttipitoisuus	Materiaalin talteenotto
Hydrolyysi	Puhdas polymeeri	Materiaalin talteenotto

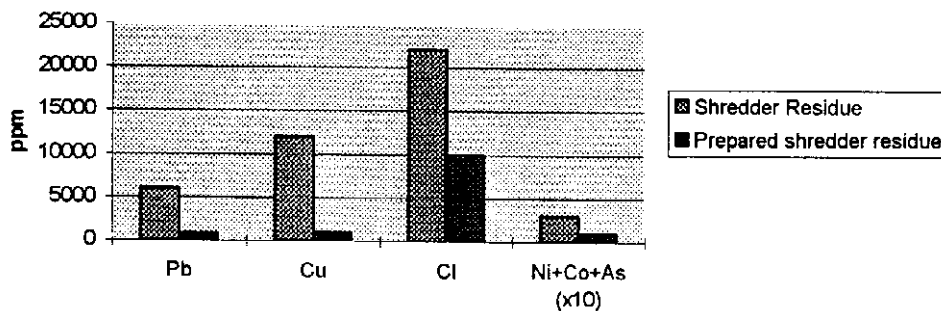
### 2.2.1. Poltto

ASR:n lämpösisältö vaihtelee laajoissa rajoissa riippuen erotusprosessista, fraktioinnista, ASR-jakeesta jne. Lajittelemattoman ASR:n keskimääräinen arvo on noin 12,5 MJ/kg. Yhdysvalloissa on rakennettu useita ASR:ää polttavia laitoksia, jotka kuitenkin on kaikki suljettu joko taloudellisista tai ympäristösyistä (Sendjarevic ym. 1997). Yksi ongelma on epäorgaanisen aineen suuri osuus, jopa yli 50 %, mikä johtaa huomattaviin tuhkamääriin. Tuhka puolestaan sisältää konsentroituneena raskasmetalleja ja vaatii vitrifiointin ennen lopullista sijoittamista. Yhdysvalloissa fluffi menee käytännössä sellaisenaan kaatopaikoille.

Sveitsissä (Disler & Keller 1997), jossa jätteenpoltto kattaa 75 % MSW:stä, fluffi poltetaan jätteenpolttolaitoksilla. Noin 50 % ASR:stä poltetaan jätteenpolttolaitoksilla sekoitettuna kotitalousjätteeseen, jolloin materiaalin lämpösisältö tulee hyödynnetyksi (Arnaud 1997). Sekoitussuhde on noin 7,5 % ASR:ää. Sveitsissä kertyvä jätteen määrä on noin 50 000 t/a eli kaksi kertaa enemmän kuin Suomessa. Autontuojat ovat Sveitsissä keränneet vuodesta 1992 rahastoa, 75 SFR/auto (n. 280 FIM/auto, 11/97), ASR:n loppusijoittamisen ratkaisemiseksi asetettujen tavoitteiden mukaisesti. Myös Hollannissa on käytössä uusien autojen ”scrapping fee” (Rydén 1995).

Saksassa on kokeiltu ASR:n polttoa leijukerroksessa (850 °C) yhdessä puhdistamolietteen kanssa. Samoin polttoa sementtiuunissa on kokeiltu. Koepoltoissa saatiin optimiksi 4 % sementtiuunin polttoainetarpeesta (Hamm 1993). Korkeahkon klooripitoisuuden vuoksi (1,5 - 1,9 %) klinkkerin klooripitoisuus pyrki nousemaan yli tavoitteen. Samalla aiheutui kuonaantumista esilämmittimessä (sykloneissa). Päästörajat alitettiin kuitenkin selvästi, joten johtopäätös oli se, että ASR:ää voidaan hyvin käyttää sementtiuunin polttoaineena. Määrärajoitus tuli kokonaisklooripitoisuudesta (raaka-aineet, polttoaineet).

Ranskassa kokeiltiin lajitellun ASR:n polttoa sementtiuunissa. Yksinkertaisella käsittelyllä pystyttiin olennaisesti vaikuttamaan epäpuhtaustasoon ja nostamaan ASR:n lämpöarvoa (kuva 5).



Kuva 5. Mekaanisen käsittelyn vaikutus ASR:n koostumukseen (Froelich ym. 1995).

Ruotsissa tehdyissä pilottikokeissa (ECRIS 1998) sekoitettiin 20 % lajiteltua ASR:ää kotitalousjätteeseen. Polttokokeissa ei havaittu päästömuutoksia.

Saksassa tehtiin pilottikokeita sementtitiivissä 1980-luvulla (Rudolph ym. 1997). Ongelmana olivat lähinnä metallilankojen aiheuttamat häiriöt syöttö- ja kuljetusjärjestelmissä. ASR:n PAH ja PCB eivät aiheuttaneet ongelmia. Sen sijaan alkalikloridien kertyminen voi olla ongelmallista, jos laitoksella ei ole bypass-järjestelmää.

### 2.2.2. Kaasutus

MSW:n kaasutuksen kehittäjistä (esim. Rensfelt & Östman 1996) pieni osa on pyrkinyt joko soveltamaan prosessia ASR:lle tai lähtenyt liikkeelle kehitystyössä käyttäen erityisjätteitä. Kaasutuksessa on tavoitteena muuttaa jäte kaasumaiseen muotoon säilyttäen mahdollisimman suuri osa energiasta tuotekaasussa. Tuotekaasu voidaan sitten polttaa joko kaasumoottorissa tai kaasuturbiinissa sähkön tuottamiseksi tai käyttää synteetikaasuna prosessiteollisuudessa. Jätelämpö voidaan edelleen hyödyntää höyrykattilassa lisäsähkön tuottamiseksi. Tuotekaasun lämpöarvon perusteella voidaan puhua (Niessen ym. 1996)

- laihasta kaasusta, lämpöarvo 4 - 12 MJ/Nm<sup>3</sup>
- keskilihavasta kaasusta, lämpöarvo 12 - 24 MJ/Nm<sup>3</sup>
- lihavasta kaasusta, lämpöarvo >24 MJ/Nm<sup>3</sup>.

Seuraavassa tarkastellaan eräitä kaasutusprosesseja, joita on sovellettu ASR:lle kohtuullisen suuressa, >1 t/h, mittakaavassa. Varsinaiset MSW:n kaasutuskonseptit (Niessen ym. 1996) on rajattu pois.

#### **Bioneer-vastavirtakaasutin** (Ståhlberg ym. 1989)

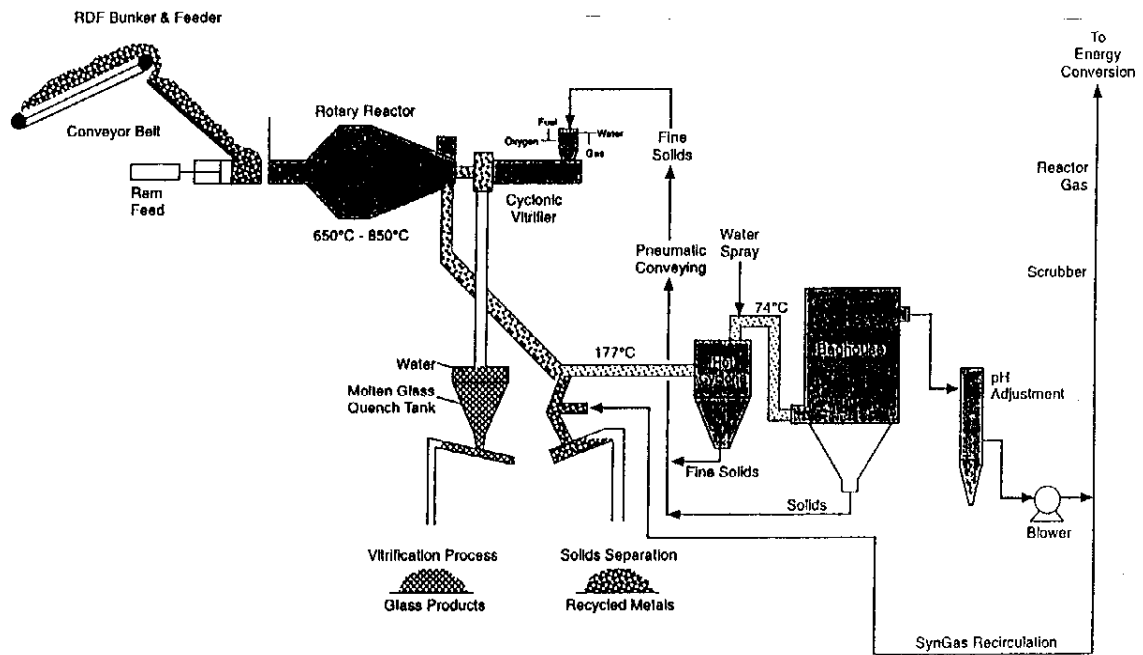
Suomalaisella Bioneer-kaasuttimella tehtiin ASR:n kaasutuskokeita 1980-luvun lopulla. Jäte oli lajiteltu siten, että muodostui kaksi fraktiota. Toisen lämpöarvo oli noin 10 MJ/kg ja toisen noin 20 MJ/kg. Palamattomia oli vastaavasti 64 % ja 38 %. Laitos toimi palottamojätteellä hyvin, kun palakoko oli riittävän suuri, >20 mm. Tuotekaasun lämpöarvo oli 8 - 9 MJ/Nm<sup>3</sup>.

#### **Proler International Inc.** (Day & Shen 1997, Niessen ym. 1996)

Menetelmä on patentoitu ja sitä markkinoidaan ”synteetikaasun” valmistusmenetelmänä. Reaktorin ensimmäinen osa on rumpu-uuni (kaasutin), jossa lämpötila on 650 - 850 °C. Rummun pyörimisnopeus on 1 - 2 rpm. Kaasujen viipymäaika on 1 - 2 s ja kiinteän materiaalin 40 - 80 min. Tuotekaasun lämpöarvo on 14,4 MJ/m<sup>3</sup>. Tuotekaasua



syntyy 1 000 - 1 100 Nm<sup>3</sup>/t jätettä. Kaasu puhdistetaan letkusuodattimessa, jossa talteen otettu hiili käytetään vitrifiointisysteemin polttoaineena. Toisessa vaiheessa tapahtuu kiinteän faasin vitrifiointi lasimaiseksi tuotteeksi. Vitrifiointireaktorista kaasut johdetaan kaasutusprosessin lämmittämiseen. Materiaali syötetään kaasuttimeen mäntäsyöttimellä, joka toimii ilmatiiwiisti. Menetelmän talous perustuu jätemaksuun, jonka suuruudeksi on esitetty 75 USD/t. Tuotekaasun hinnaksi on arvioitu 7 - 8 c/m<sup>3</sup> ja jäännöksestä saatavien metallien arvoksi (jätteestä riippuen) 100 USD/t. Prolerin laitoksen virtauskaavio on kuvassa 6. Äskettäin saadun tiedon mukaan yhtiö on lopettanut toimintansa.



Kuva 6. Proler Inc:n prosessikaavio (Niessen ym. 1996).

## Muita prosesseja

Useita muita MSW:lle käytettyjä kaasutinprosesseja voitaisiin periaatteessa soveltaa ASR:lle. Ne keskittyvät kuitenkin pääosin suuriin materiaalivirtoihin.

USF Smokeless SpA (Day & Shen 1997) on kehittänyt ASR:lle Sky Gas -kaasuttimen, joka perustuu valokaaren tuottamiseen reaktorissa vesihöyrykaasutuksen avulla. Sekundäärireaktorissa hiilidioksidi ja vesi konvertoidaan edelleen vedyksi ja häkäkaasuksi. Jälkimmäinen reaktori on täytetty koksilla. Panos lämmitetään sähköisesti vastusefektin avulla. Italiassa on kaksi pilottilaitosta, joiden kapasiteetti on 0,5 - 3 t/h.

Saksalaisessa SVZ Schwarze Pumpen -laitoksessa tehdään jätteen ja ruskohiilen seoskaasutusta metanolin valmistamiseksi (Rudolph ym. 1997). Tavoitteena on kaasuttaa 40 000 t/a erilaisia jätefraktioita. Käsittelykustannus on luokkaa 250 - 350 DEM/t.

## Kustannuksia

Menetelmä	Kapasiteetti t/a	Kiinteät kulut, USD	Käyttökulut, USD
Proler Inc	16 000	48 milj.	1,8 milj.

### 2.2.3. Pyrolyysi

Pyrolyysi on materiaalin termistä käsittelyä hapettomassa tilassa. Lämpötilan on oltava yleensä yli 300 °C. Pyrolyysia pidetään sopivana käsittelymenetelmänä heterogeenisille materiaaleille, joissa orgaanisen aineksen osuus on riittävän suuri. Pyrolyysi soveltuu jätteiden käsittelyyn, jos

- orgaanisen osuus on riittävän suuri, jolloin tuotesaanto voi olla kiinnostava
- kyseessä on niin heterogeeninen raaka-aine, että lajittelu on kannattamatonta
- materiaali sisältää arvokkaita aineita (esim. hopea filmimateriaalissa, jalometallit piirilevyissä).

Erityisesti 1970-luvulla, energian hinnan noustessa, pyrolyysin kehitystyö sai ilmaa siipien alle ja maailmalla oli yli 50 pyrolyysiprosessia kehitteillä. 1980-luvun alkupuolella oli parikymmentä jätteiden pyrolyysiprosessia päässyt demonstraatiovaiheeseen. Pyrolyysiprosesseja on siis monenlaisia ja ne voidaan luokitella esimerkiksi seuraavasti:

#### Ryhmä I

Prosessit, joissa tuotekaasu poltetaan välittömästi (esim. BKMI-menetelmä).

#### Ryhmä II

Prosessit, joissa tuotekaasu jalostetaan moottori- tai kattilakäyttöön (esim. KPA-menetelmä).

#### Ryhmä III

Prosessit, joissa on yhdistetty pyrolyysikaasun ja -hiilen poltto (esim. KWU-menetelmä).

#### Ryhmä IV

Prosessit, joissa on tuotekaasujen kondensaatio ja pyrolyysiöljyn talteenotto (esim. ABB-menetelmä).

Luokitteluperusteena voidaan käyttää myös reaktoriyyppiä (rumpu-uuni, ruuvipyrolysaattori, leijukerrosreaktori, flash-pyrolysaattori jne.), mutta on luontevampaa katsoa kokonaisuutta ja luokitella prosessit *lopputuloksen* perusteella, kuten edellä olevassa luokittelussa on tehty (Hamm 1993).

Pyrolyysiprosessissa syntyy vetyä runsaasti sisältäviä hajoamistuotteita (nesteet ja kaasut) ja pääasiassa hiiltä oleva kiinteä jäännös. Taulukossa 6 esitetään orgaanisen (jäte)materiaalin pyrolyysin vaiheet lämpötilan funktiona.

Taulukko 6. *Orgaanisen materiaalin pyrolyysin vaiheet (Kaminsky ym. 1991).*

Lämpötila-alue, °C	Fysikaaliset / kemialliset vaiheet
100 - 120	Terminen kuivuminen
250	Depolymerisaatio Pelkistys Reaktioveden, CO:n, CO <sub>2</sub> :n ja H <sub>2</sub> S:n vapautuminen
300	Cl:n vapautuminen HCl:n muodostuessa
340	Alifaattisten sidosten murtuminen CH <sub>4</sub> :n vapautuminen
400	C-O- ja C-N-sidosten murtuminen
<600	Bitumiaineiden krakkautuminen termodynaamisesti stabiilimmeiksi aineiksi. Aromaattien muodostuminen hydroaromaateista
>600	Olefiinien muodostuminen Dimerisoituminen buteeniderivaateiksi ja välitön dehydratoituminen butadieeneiksi Dienenreaktiot eteenin kanssa syklohekseniderivaateiksi, terminen aromatisoituminen bentseeniksi ja korkeammiksi aromaateiksi.

Prosessi pystyy hyödyntämään ASR:n orgaanisen osuuden, mutta reagoimatta voi jäädä jopa 70 % materiaalista. Ongelmana on myös syntyneiden tuotteiden, öljyn, kaasun ja hiilen epäpuhtaudet (aromaatit, raskasmetallit) sekä mahdollinen prosessin jätevesi, joka vaatii erityiskäsittelyn. Pyrolyysin etuna on, että helposti kaasuuntuva jae voidaan käyttää laitoksen omaan energiantuotantoon ja samalla saada steriili jäännös, joka mahdollisesti voidaan käyttää polttoaineena esimerkiksi sementtitiunissa.

Pyrolyysikokeita ASR:n käsittelemiseksi on tehty monilla laitoksilla, joiden primaarinen tavoite on ollut jokin muu kuin ASR:n käsittely. Nämä koelaitokset sijaitsevat pääasiassa Yhdysvalloissa, mutta myös Euroopassa on useita kokeiluja meneillään.

Pyrolyysin ainetase hitaassa pyrolyysissa riippuu lähinnä pyrolyysilämpötilasta. Lämpötilan noustessa jäännöshiilen ja öljyn määrät laskevat ja kaasumaisia komponentteja syntyy enemmän. Myös aromaattisten hiilivetyjen määrä nousee pyrolyysilämpötilan noustessa (van Heek ym. 1994).

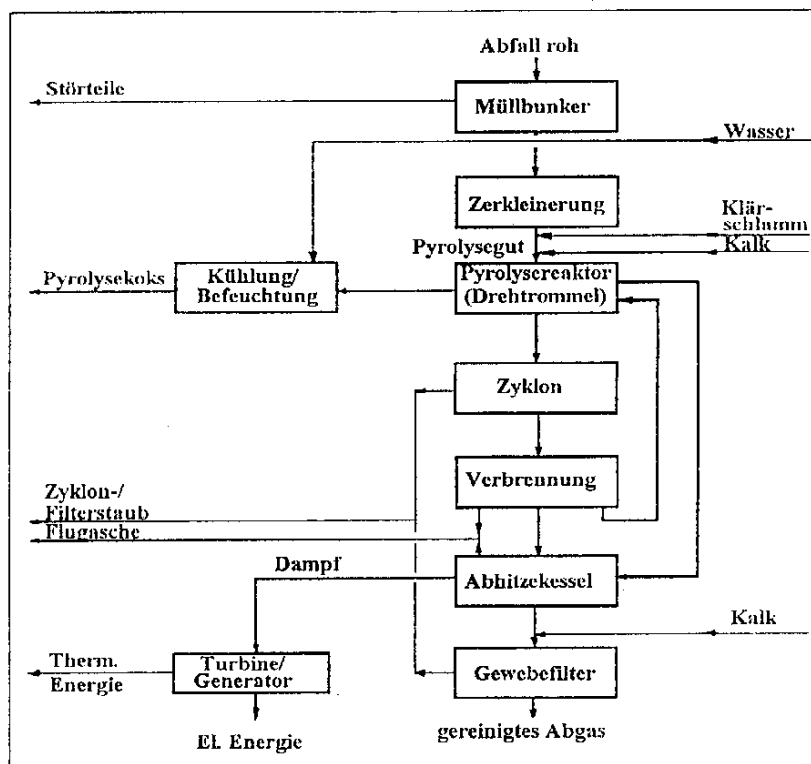
Seuraavassa esitellään mielenkiintoisimpia pyrolyysikonsepteja. Mukaan on pyritty otamaan lähinnä ne, jotka toimivat ”käytännön” mitassa, ts. vähintään satoja kiloja/h,

mieluummin yli 1 t/h. Esitettyjä prosesseja on kokeiltu ASR:lle, mutta myös suurelle joukolle muuntopyyppisiä jätteitä, kumiromu mukaan lukien.

### Babcockin BKMI-prosessi (Hamm 1993)

Tähän ryhmään kuuluu Babcockin BKMI-laitos (Babcock Krauss-Maffei Industrieanlagen GmbH). Laboratoriovaiheen jälkeen rakennettiin 2 x 3 t/h demolaitos Burgahun. Tavoitteena oli jätteen terminen hajottaminen ja haitta-aineiden erottaminen polttoaineista ja muista arvokkaista jakeista. Pyrolyysin merkitys oli savukaasuvolyymien pitämisessä minimissään, jolloin yksinkertaiset puhdistustoimenpiteet olisivat mahdollisia. Tavoitteena oli myös raskasmetallien sitominen kiinteään jäännökseen. Laitoksen toimintaperiaate esitetään kuvassa 7.

Laitoksessa käytettiin syötettävänä jätteenä kotitalousjätettä, joka oli jauhettu <30 cm:n kappalekokoon. Jauhamisen jälkeen virtaan syötetään kalkkia ja puhdistamolietettä happamien kaasujen sitomiseksi. Sekoitus tapahtuu rumpu-uuneissa (pituus 20 m, halkaisija 1,2 m), joiden lämmitys tapahtuu epäsuorasti. Vaipan lämpötila on 600 °C. Viipymäaika kahdessa rinnakkaisessa rumpussa on noin 1,5 h. Rumpujen kallistus on noin 1°. Kiinteä jäännös sammutetaan vedellä.



Kuva 7. BKMI-laitoksen toimintaperiaate (Hamm 1993).

Tuotekaasusta poistetaan karkeat hiukkaset (sykloni) ja kaasu poltetaan 1 200 °C:ssa, jolloin orgaaniset komponentit hajoavat tehokkaasti. Osa savukaasusta käytetään rummun lämmitykseen, osa hyödynnetään jätelämpökattilassa (28 bar, 350 °C).

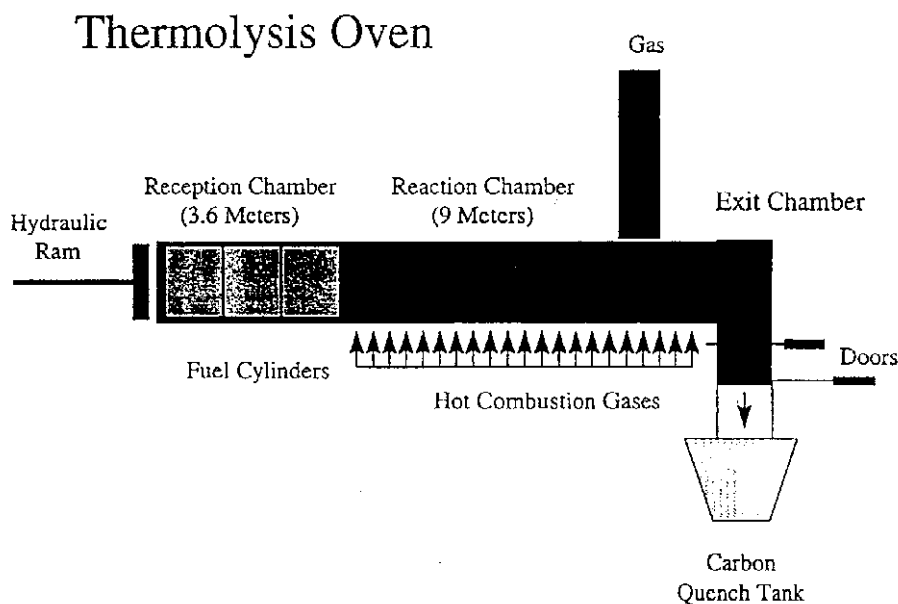
Prosessille on ominaista jätevedetön savukaasujen puhdistus ja pyrolyysiprosessi. Laitoksen toiminnasta on julkaistu laaja ympäristöraportti. Se oli edelleen toiminnassa vuonna 1993.

Siemens KWV (Hamm 1993, Rudolph ym. 1997) on tutkinut vastaavaa rumpupyrolyysikonseptia. Kapasiteetiltaan 5 t/h:n laitoksen investointi oli 50 - 70 milj. DEM ja keskimääräiset käsittelykustannukset 300 - 400 DEM/t.

### Engineering Separation and Recycling N.V. (NSR) (Day & Shen 1997)

Belgialaisen yhtiön termolyysi-vitrifointiprosessi muodostuu kahdesta pääkomponentista: putkimaisesta termolyysi-uunista, jossa orgaaninen materiaali hajoaa kaasuiksi kiinteäksi (epäorgaaniseksi) faasiksi, ja vitrifointiosasta, jossa epäorgaaninen aines käsitellään.

Täyden mitan prosessissa (kuva 8) on alussa murskaus- ja erotteluvaihe, joka jälkeen tapahtuu kompaktointi paaleiksi, joiden halkaisija on 1,8 m ja paksuus 0,3 m. Paalien



Kuva 8. Engineering Separation and Recycling N.V:n (NSR) täyden mitan termolyysi-vitrifointiprosessi.

paino on 200 kg/kpl. Seuraavassa vaiheessa paalit työnnetään reaktoriin, jossa lämpötila vähitellen nostetaan 500 °C:seen. Uusi paali syötetään systeemiin kolmen minuutin välein. Putkeen ruiskutetaan myös jäteöljyä kitkan pienentämiseksi. Viipymäaika reaktorissa on noin 150 min. Tuotekaasut poltetaan kattilalaitoksessa tai kaasuturbiinissa. Kiinteä jäännös on ”aktivoitunutta” hiiltä, joka sisältää metalleja ja halogeeneja. Se käsitellään korkeassa lämpötilassa (1 300 - 1 400 °C:ssa) haitta-aineiden sitomiseksi. Lopputuote voidaan käyttää seosaineena sementin valmistuksessa.

### **Entropic Technologies Corporation (Day & Shen, 1997)**

Prosessin perustana on kaksoisruuvi-ekstruuderi-sekoitintekniikkaan perustuva menetelmä, jossa lopputuotteena on kiinteä polttoaine. Kyseessä on lievissä olosuhteissa (270 - 290 °C) tehty pyrolyysi, jossa vain kaikkein helpoimmin reagoiva osuus materiaalista pyrolysoidaan. Pyrolyysikaasut ja öljymäinen fraktio voidaan polttaa prosessin energian tuottamiseksi. Kiinteä polttoaine sopii sementtiteollisuuden seos- ja polttoaineeksi. Viipymäaika reaktorissa on vain 1,5 minuuttia. Prosessin talous perustuu jätemaksuun, joka ASR:n tapauksessa on noin 25 USD/t. Tuotetusta polttoaineesta saadaan lisäksi 10 USD/t.

### **Otto -pyrolyysiprosessi (Hamm 1993)**

Ensimmäinen tutkimuslaitte rakennettiin Bochumiin, Saksaan, vuonna 1974. Vuosien kokeilujen jälkeen seurasi demonstraatiovaihe, jolloin rakentajana oli Salzgitter Pyrolyse GmbH. Laitoksen operaattorina on Noell GmbH. Laitoksen kapasiteetti on 6 t/h ja sitä on kokeiltu laajalla kirjolla erilaisia jätteitä, mukaan lukien autopaloittamojäte, ASR, ja rengasromu.

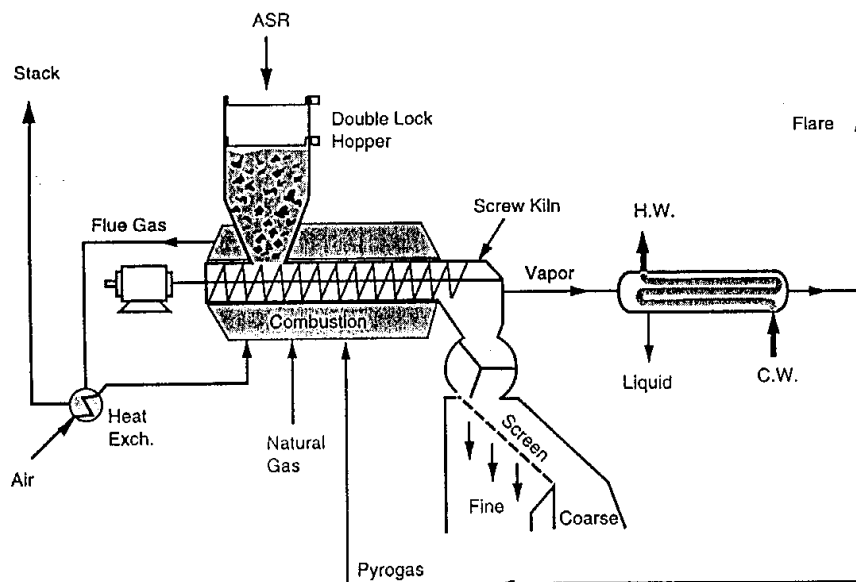
Jäte syötetään inerttikaasulla suojattuna rumpu-uuniin (pituus 28 m, halkaisija 2,8 m). Lämmitys tapahtuu epäsuorasti savukaasuilla lämmitettävän vaipan avulla. Kiinteän aineksen ulosotossa on vesisammutus. Tuotekaasu käsitellään (jäähdytetään ja pestään) kahdessa vaiheessa. Osa puhdistetusta pyrolyysikaasusta käytetään reaktorin lämmittämiseen, osa poltetaan jälkipolttimessa.

Kiinteä pyrolyysijäte ei sisältänyt polyaromaattisia hiilivetyjä. Raskasmetallien liukeneminen oli alle talousjätteelle asetetun rajan. Bentso-a-pyreenipitoisuus oli sen verran korkea, että kaatopaikkaluokitus vastasi teollisuusjätteen luokitusta. Kondensaatissa (öljyssä) ei ollut mitattavia määriä PCB:tä, PCDD:tä tai PCDF:tä, vaikka ASR sisälsi PVC:tä. Sen sijaan pyrolysoitavassa materiaalissa olleet klooratut hiilivedyt eivät täysin hajonneet em. pyrolyysiolosuhteissa, vaan tuotekaasussa oli 40 mg/m<sup>3</sup> kloorimetaania ja 704 mg/ m<sup>3</sup> dikloorieteeniä.

## Tire Energy Inc., aiemmin NATRL Inc., ruuvipyrolysaattori (Day ym. 1996)

Ruuvipyrolysaattoria on kokeiltu ASR:n käsittelyyn. Tekijän mukaan kyseessä on kaupallinen ruuvipyrolysaattori, jolla ASR:n orgaaninen ja epäorgaaninen osa voidaan tehokkaasti erottaa toisistaan. Periaate on esitetty kuvassa 9. Laitoksen kapasiteetti on noin 200 kg/h ja viipymäaika noin 15 min. Ajatuksena on, että pyrolyysituote seulottaisiin pariin hiukkaskokoluokkaan ja tuotteelle tehtäisiin vielä metallien erotus. Tuotekaasut ja nesteet käytetään periaatteessa prosessin tai muuksi lämpöenergiaksi. Pyrolyysin loppulämpötila (materiaalissa) oli arviolta 500 °C. Raaka-aineena käytettiin tyypillistä ilmaluokituksesta saatua ASR:ää, josta jäännösmetallit oli poistettu käsin. ASR jauhettiin vielä alle 50 mm:n hiukkaskokoon ennen pyrolyysia. Koko prosessin kaupallistaminen edellyttää kuitenkin jatkoselvityksiä mm. siitä, miten saadut tuotteet kelpaavat raaka-aineiksi ajateltuihin kohteisiin. Lähinnähän kysymys olisi metallien talteenotosta pyrolyysihiiilestä. Uusi omistaja (Tire Energy Inc., suullinen tiedonanto) jatkaa kokeita laitteella 1997 - 1998. Dayn ym. (1996) kokeiden mukaan mainitulla ruuvipyrolysaattorilla (15 min n. 500 °C) saatiin seuraava saanto:

- pyrolyysikaasuja 26 %
- pyrolyysiöljyä 21 %
- vettä 10 %
- metallia 11 %
- muuta 32 %.



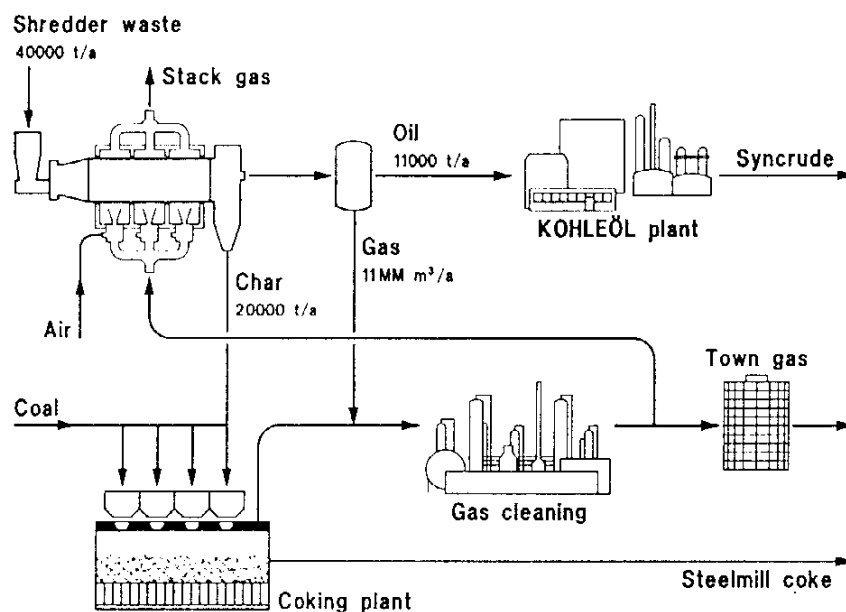
Kuva 9. Tire Energy Inc., aiemmin NATRL Inc., ruuvipyrolysaattori (Day ym. 1996).

### Ruhrkohle AG:n ASR:n pyrolyysi (van Heek ym. 1994)

SAKSALAINEN ratkaisu, jossa ASR:n käsittely on integroitu sopivaan ympäröivään teollisuuteen, on mielenkiintoinen. Laitoksen oli määrä valmistua vuoden 1995 alkupuolella. Prosessi käsittelee 40 000 t/a ASR:ää epäsuorasti lämmitetyssä pyrolyysirummussa. 11 000 t/a pyrolyysiöljyä menee hydrauslaitokselle jalostettavaksi ja kaasu puolestaan yhdessä koksaaomon kaasujen kanssa puhdistettavaksi ja hyödynnettäväksi. Pyrolyysihiili menee koksien joukkoon, metallurgisen koksien valmistukseen. Raskasmetallit ja hivenalkuaineet päätyvät lopulta masuunin kuonaan. Pyrolyysihiilen osuus on alle 1 % koksien määrästä, joten tällä ei ole vaikutusta koksien laatuun. Integraation periaate on kuvassa 10.

### ABB:n pyrolyysimenetelmä (Hamm 1993)

Alun perin Hampurin yliopistossa on kehitetty leijukerrostekniikkaan perustuva menetelmä, jossa on pyrolyysiöljyn talteenotto. Deutsche Reifen- und Kunststoffpyrolyse -niminen yritys rakensi alun perin 1,2 t/a demonstraatiolaitoksen Ebenhauseniin. Laitos oli toiminnassa kaikkiaan 700 tuntia, pisimmillään 70 tuntia yhtäjaksoisesti. Reaktorissa käytettiin kalkin (CaO) syöttöä siten, että pesuöljyn pH pidettiin 7 - 8:ssa. Tällöin klooripitoisten hiilivetyjen määrä saatiin savukaasuissa pudotetuksi 1 %:n tasosta alle mittausrajan. Haittapuolena oli mineraalisen kloorin (CaCl<sub>2</sub>) synty kaasufaasissa ja kertyminen pesuöljyyn.



Kuva 10. Ruhrkohle AG:n ASR:n pyrolyysi (van Heek ym. 1994).



Vuonna 1986 ABB hankki laitokseen haltuunsa tavoitteena kaupallistaminen. Reaktorin toiminnassa esiintyi edelleen vaikeuksia. Leijukerrokseen muodostui epäreaktiivisia alueita. Seurauksena oli petimateriaalin sitoutuminen sulavan jätteen, mm. muovin, kanssa. Rengaspyrolyysin osalta oli ongelmia teräslankojen poistossa. Lopulta (vuoden 1990 vaiheilla) laitos suljettiin, koska kaikkia ongelmia ei pystytty ratkaisemaan.

### **Pyrovac Inc.:n vakuumpyrolyysi (Day & Shen 1997)**

Lavallin yliopistossa tehtyyn kehitystyöhön perustuen rakennettiin pilottilaitos, jonka kapasiteetti on 0,15 t/h. Systeemissä on sähköisesti lämmitetty horisontaaliuuni, joka toimii alipaineessa. Reaktorin lämpötila on 500 - 530 °C ja materiaalin viipymäaika noin 20 min. Kaasujen viipymäaika on noin 20 s. Vakuumireaktorissa voidaan minimoida sekundäärireaktioiden määrä. Tuotteena saadaan kevyt ja raskas öljyfraktio. Tuotekaasut poltetaan kuivaus- ja lämmitysenergian tuottamiseksi. Tuotekaasun lämpöarvo on noin 18 MJ/m<sup>3</sup> ja öljyn lämpöarvo noin 41 MJ/kg. Laitoksen talous perustuu ”gate feediin”, joka ASR:lle olisi 15 USD/t. Öljyn hinnaksi on arvioitu 0,085 USD/l ja kaasun 6 c/m<sup>3</sup>. Taulukossa 7 esitetään saannot ja arvioidut markkinahinnat Pyrovac-esityksen mukaan.

*Taulukko 7. Pyrovac-vakuumpyrolyysin saannot ja arvioidut markkinahinnat.*

Tuote	Saanto paino-%	Arvioitu markkinahinta USD
Pyrolyysiöljyt	20	12 - 18 /bbl
Rautametallit	10	38 - 42 /t
Metalli- ja kirjometallit ja -seokset (Cu, Al, Zn, Sn, jne.)	7	600 - 780 /t
Inertit (multa, hiekka)	3	-
Hiili	5	-
Pyrolyysivesi	17	-
Kaasu	6	lisälämmönlähde

### **GM:n ruuviropyrolysaattori**

Ford, Chrysler ja GM tutkivat Yhdysvalloissa pyrolyysin tarjoamia mahdollisuuksia ASR:n käsittelyssä. Tulokset ovat kuitenkin vasta hyvin alustavia. Nykyisestä statuksesta ei ole tietoa (Poston 1995).

### **Advanced Refinery Technology Inc. (Day & Shen 1997)**

Kanadalainen yhtiö on kehittänyt ruuviropyrolyysiin perustuvaa ASR:n käsittelylaitteistoa vuodesta 1994. Prosessin alkuosa on epäsuorasti lämmitetty. Systeemissä on useita re-

aktiovaiheita. Pyrolyysi tapahtuu 320 - 370 °C:ssa ja loppukuumennus 450 - 480 °C:ssa. Viipymäaika reaktorissa on 12 minuuttia. Tuotteena saadaan 20 % kaasua, 27 % nesteitä ja 53 % kiinteää materiaalia. Tuotekaasu käsitellään kloorin poistamiseksi ja varastoidaan.

### Pyrolyysiprosessien kustannuksia

Seuraavassa on joitakin tietoja eräiden pyrolyysiprosessien kustannuksista.

Prosessi	Kapasiteetti t/a	Investointi milj.	Käyttökulut milj. USD
ESR N.V.	100 000	2 USD	0,7
Entropic. Tech.	65 000	5,8 “	0,18
Pyrovac	16 000	5 “	0,16
Siemens kWV	35 000	50 - 70 DEM	

### ASR:n pyrolyysin tuotteet

#### Pyrolyysikaasu

Pyrolyysikaasu voi sisältää yli sata eri komponenttia, mutta pääosan muodostavat ”tavalliset” pyrolyysikaasut, ts. metaani, vety, häkä, etyleeni, asetyleeni ja hiilidioksidi, jotka ovat 80 % kaasusta. Kaasun lämpöarvo on maakaasun luokkaa, 37 - 44 MJ/m<sup>3</sup>. Kaasua voidaan siis hyvin käyttää reaktorin lämmittämiseen ainakin apupolttoaineena. Taulukossa 8 on kaasun koostumus Dayn ym. (1996) mukaan.

#### Pyrolyysiöljy

Pyrolyysiöljy voi olla vedetöntä tai sisältää vettä 20 - 30 %. Varsinainen öljy muodostuu haihtuvista alkyylibentseeneistä ja C<sub>3</sub> - C<sub>6</sub>-alkeeneista. Nestefaasi sisältää lähes 300 komponenttia. Keskeisimmät komponentit ovat aromaattisia, joten tällaisen öljyn käyttö voi olla ongelmallista, ellei sitä suoraan syötetä laitoksen omaan polttimeen (Taulukko 9) (Day ym. 1996). Ulkoinen käyttö edellyttäisi suodattamista ja stabilointia, minkä jälkeenkin käyttö saattaisi olla ympäristösyistä hankalaa.

#### Kiinteä pyrolyysijäännös

Pyrolyysijäännös muodostuu metalli-, hiili- ja mineraalifraktioista. Metallifraktio voidaan ainakin osittain palauttaa talteenottoon ja hiilifraktio mahdollisesti käyttää polttoaineena tai läjittää yhdessä mineraalifraktion kanssa. Ongelmana on lähinnä pidetty raskasmetalleja (Zn, Pb, Cd, Cr ja Cu) ja niiden mahdollista liukenemistä ympäristöön. Taulukossa 10 annetut liukoisuudet on määritetty EPA TCLP -testin kaltaisella menetelmällä, jossa pH 4,5:een puskuroidulla liuksella S/L-suhteella 1/10 näytettä ravistellaan 24 h ja suodatetusta liuksesta määritetään pitoisuudet.

Taulukko 8. ASR-pyrolyysikaasun koostumus (Day ym. 1996).

Komponentti	Kaava	Molekyylipaino	Tilavuus-%
<i>GC/TCD:llä havaitut komponentit</i>			
Metaani	CH <sub>4</sub>	16	85
Vety	H <sub>2</sub>	2	25
Hiilimonoksidi	CO	28	18
Eteeni/asetyleeni	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	28/26	18
Hiilidioksidi	CO <sub>2</sub>	44	13
Etaani	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30	7
			4
<i>GC/MS:llä havaitut komponentit</i>			
Propyleeni	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42	2,26
Bentseeni	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78	1,55
2-metyyli-1-propeeni	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56	1,43
1,2-butadieeni	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54	0,73
Metyylibentseeni (tolueeni)	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92	0,71
3-penteeni	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	66	0,51
Pentaani	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72	0,30
Styreeni	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	104	0,37
Isosyaanimetaani	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	41	0,33
2-metyylibenteni	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	84	0,31
2-metyyli-1,3-butadieeni	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70	0,28
1-buteeni	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56	0,21
1-penteeni	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70	0,19
1-kloori-3-metyylibutaani	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> Cl	127	0,18
Etyylibentseeni	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106	0,14
Metyyli-2-metyyli-2-propenoaatti	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	100	0,12
1,2-dimetyylibentseeni (o-ksyleeni)	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106	0,11
Muita			5,17
Yhteensä			100,00

Taulukko 9. ASR-pyrolyysiöljyn fysikaaliset ominaisuudet (Day ym. 1996).

Ominaisuus	Arvo	Lämpötila, °C
Tiheys, g/cm <sup>3</sup>	0,95	22,0
Viskositeetti, m <sup>2</sup> /s	8,06 x 10 <sup>-6</sup>	22,8
Lämpöarvo, MJ/kg	41,0	25,0
Tuhkapitoisuus, paino-%	<0,01	750

Taulukko 10. ASR-pyrolyysin kiinteän jäännöksen raskasmetallipitoisuudet ja liukoisuus (Day ym. 1996).

	Kokonaispitoisuus paino-%	Liukoisuus mg l <sup>-1</sup>	Raja-arvot mg l <sup>-1</sup>
Hieno aines			
Zn	1,62	<1	10
Pb	0,25	<2	5
Cd	0,003	<0,05	2
Cr	0,02	<0,2	5
Cu	0,27	<0,1	10
Karkea aines			
Zn	0,61	20	10
Pb	0,56	<2	5
Cd	0,006	<0,05	2
Cr	0,05	<0,2	5
Cu	6,78	<0,1	10

### Kloorin käyttäytyminen pyrolyysissä

Fluffissa oleva kloori on pääosin peräisin PCV:stä. Termisessä prosessissa klooriyhdisteet alkavat pilkkoutua 200 - 300 °C:n yläpuolella. PVC:n konversio vetykloridiksi ja hiilivedyiksi oli 83 % 300 °C:ssa 30 minuutin viipymäajalla. Koska kiinteässä jäännöksessä on mm. kalsiumoksidia täyteaineiden muodossa ja metalleja, voi pyrolyysin lopputuotteessa olla vastaavia klorideja. Hammin (1993) mukaan vielä 800 °C:ssa tapahtuneessa pyrolyysissä oli kiinteään jäännökseen sitoutunut yli 60 % kloorista.

### PCB:n käyttäytyminen pyrolyysissä

Halogenoidut hiilivedyt ovat ASR:n potentiaalisia haitta-aineita. Ne ovat toksisia ja biologisesti kumuloituvia. ASR:n termisen käsittelyn ollessa kyseessä PCB-yhdisteet ovat mielenkiintoisia siksi, että PCB-yhdisteet ovat palonkestäviä, kemiallisesti stabiileja ja niiden dielektrisyysvakio on korkea. Näiden ominaisuuksien vuoksi yhdisteitä käytetään tai on käytetty mm. kondensaattoreissa, muuntajissa ja öljyissä. Esimerkiksi Länsi-Saksassa PCB:n valmistus lopetettiin vuonna 1983 ja vuonna 1987 laaditun säädöksen mukaan vain sellainen öljy on uudelleen käytettävissä, jonka PCB-pitoisuus (tällaisen öljyn valmistaminen sekoittamalla ei ole sallittua) on alle 4 mg/kg ja klooripitoisuus alle 0,2 %.

Saksalaisen tutkimuksen mukaan (Hamm 1993) pyrolyysin kiinteän jäännöksen PCB-pitoisuus pysyi alle havaitsemisrajan (0,05 mg/kg) mutta ylitti kondensaatissa selvästi käytetylle öljylle asetetun rajan.

## 2.2.4. Muut kemiallis-termiset prosessit

### ASR:n lajittelu ja jakeiden hyödyntäminen glykolyysin ja hydrolyysin avulla

AR voitaisiin teoriassa hyödyntää tehokkaammin lajittelemalla se kolmeen fraktioon: polyuretaanivaahtoon, muihin muoveihin ja hienoainekseen. Ongelmana tässäkin on se, että jakeet sisältävät liikaa epäpuhtauksia ja jatkokäsittely on välttämätön kierrätystä ajatellen. Jatkojalostus voi tapahtua hydrolyysin tai glykolyysin avulla, jolloin tuotteena saatavat polyolit ja polyamiinit voidaan käyttää vaahtomuovikomponenttien valmistukseen. Teollisuudessa on kuitenkin tarjolla jätevahtomuovia, joka ei vaadi erottelua tai puhdistusta, ts. tuotantojätettä, joten ASR:stä erotetun polyuretaanin glykolyysi tuskin on kannattavaa tällä hetkellä. On kuitenkin mahdollista, että ASR:stä erotettu polyuretaani voitaisiin syöttää lisänä teollista polyuretaanijätettä kierrättävään laitokseen. Myös eri muovityyppien lajittelua on kokeiltu raskasväliainekennoissa. Vaikka muovien erottaminen puhtaana ei näin onnistuisikaan, voisi PVC:n alentaminen halutulle tasolle olla mahdollista.

### ASR:n jalostus komposiittimateriaaliksi

ASR:n jalostamista komposiittimateriaaleiksi on jonkin verran tutkittu. Käyttämällä isosyanaattipohjaisia sideaineita on koemielessä valmistettu mm. vaimentavia materiaaleja autoteollisuudelle ja pakkausteollisuudelle (Sendijarevic ym. 1995a, Sendijarevic ym. 1995b, Frisch ym. 1995). Etuna on se, että ASR:n määrä komposiitissa voi olla jopa 90 % ja tuotteet voivat olla kovia, elastisia ta jopa vaahtoja. Metallien liukeneminen aleni kertaluokkaa pienemmäksi lyijyä lukuun ottamatta. Hankaluuksia ovat kovien partikkelien läsnäolo ja materiaalin heikot juoksevuusominaisuudet.

### Hydraus

Saksassa (Hamm 1993) on kokeiltu ASR:n ”ylitteen” hydrausta. Kokeissa todettiin kuitenkin, että vaikka fluffi oli esilajiteltu (75 % fluffista oli poistettu alitteena), hydrauksen kautta muodostuvien hiilivetyjen suhde inerttiin materiaaliin oli aivan liian pieni, ts. noin 1. Hydraukseen soveltuvilla materiaaleilla tämän suhteen tulisi olla >2. Esimerkiksi pakkausjätteen tapauksessa on suhde tyypillisesti 8 - 47.

### Sulatus

Molten Metal Technology Inc. (Day & Shen, 1997)

MMT on kehittänyt menetelmän, jossa jäte injektoidaan sulaan metallikylypyyn (induktiouuni). Menetelmää kutsutaan nimellä CEP (Catalytic Extraction Process). Tuloksena

saadaan haluttujen metallien ja muiden tuotteiden talteenotto. Tuote-esimerkkeinä ovat vety, hiilimonoksidi, vetykloridi ja metalliseokset. Kuonasta voidaan valmistaa rakennusmateriaaleja (sementin täyteaine, asfaltin runkoaine, puhallushiekka jne). Kaupallisen kokoluokan (1 - 6 t/h) protolaitos sijaitsee Fall Riverissä, Massachusettsissa. Laitoksen kylvyn koko on 4 t sulaa metallia. Systemissä on jätteen injektio sekä ylhäältä että pohjahormin kautta. Keraaminen ja metallinen tuote poistetaan reaktorista porttien kautta ja kaasut käsitellään pesulinjalla. Pesun jälkeen on vielä tarvittaessa hiukkasten erotus ja aktiivihiilisuodatus. Kaasu voidaan käyttää suoraan energiantuotantoon tai varastoida. Menetelmän talous perustuu korkeisiin jätemaksuihin, 50 - 350 USD/t, uotteiden arvoon (keraaminen tuote 15 USD/t) ja kaasusta saatavan energian hintaan.

Sveitsissä on käynnistetty (Seiler AG) ASR:n käsittelylaitos, Pyrec, jossa energiaosa hyödynnetään ja epäorgaaninen osa vitrifoidaan hyötykäyttöön soveltuvaksi materiaaliksi (AMM 1997).

### **Käyttö masuuneissa ja kupoliuuneissa**

Saksassa tehdyissä kokeissa (Rudolph ym. 1997) havaittiin ASR-granulaattien soveltuvan masuunikaasun tuottamiseen. Käyttö masuuniprosessissa luokitellaan lisäksi raaka-ainekäytöksi. Emissioiden kannalta prosessi on ihanteellinen, sillä noin 2 100 °C:n lämpötilassa kaikki kemialliset sidokset häiväivät ja dioksiinien ja furanien de-novo-synteesi on termodynaamisesti mahdotonta.

Myös ASR:n puhaltamista kupoliuunissa on kokeiltu Saksassa. Kokeiden johtopäätökset olivat:

- ASR:n puhalluksen aikana ei esiintynyt käyttöhäiriöitä.
- Kuona ja tuote pysyivät ennallaan.
- Kupoliuunikaasun lämpöarvo nousi noin 30 % kaasun korkean CO- ja H<sub>2</sub>-pitoisuuden ansiosta.
- Kloori kertyi alkaliklorideina pölynpistoon.

Taulukossa 11 on masuunipolttoaineen laatukriteerejä ja vastaavia luokitellun ASR:n ominaisuuksia.

### **ASR:n muu käyttö**

Aivan samoin kuin kumijätteen kohdalla, on ASR:ää ehdotettu käytettäväksi lisäaineena betonissa tai asfaltissa. Tulokset ovat olleet lupaavia. Voidaan kuitenkin kysyä, onko asfaltti tai betoni oikea paikka sijoittaa tämäntapaisia jätteitä. Näistä aikanaan muodostuvien jätemateriaalien käsittely voi tulevaisuudessa aiheuttaa isoja ongelmia.

Taulukko 11. Masuunipolttoaineen laatukriteerit ja vastaavia luokitellun ASR:n ominaisuuksia.

Parametri	ASR-granulaatti	ASR-pöly	Masuunipolttoaineen laatukriteeri <sup>1</sup>
Kosteus, paino-%	0,5 - 1,0	0,5 - 1,5	< 2,0
Lämpöarvo, MJ/kg	25 - 32	22 - 26	>20 MJ
Tuhka, paino-%	15 - 25	10 - 20	< 30
Hiili ja vety, paino-%	55 - 65	50 - 60	> 45
Rikki, paino-%	< 0,4	< 0,4	< 0,8
Kloori, paino-%	0,6 - 1,8	0,7 - 1,3	< 2,0
Fluori, paino-%	< 0,06	< 0,06	< 0,1
Sinkki, paino-%	0,1 - 0,5	0,2 - 0,4	< 0,8
Kupari, paino-%	0,1 - 0,3	0,2 - 0,4	< 0,3
Kromi, paino-%	0,01 - 0,02	0,02 - 0,03	< 0,1
Nikkeli, paino-%	0,02 - 0,04	0,02 - 0,06	< 0,1
Tina, paino-%	0,01 - 0,02	0,008 - 0,02	< 0,2

<sup>1</sup> Eri masuunilaitosten vaatimusprofiili

## 2.3. Autopaloittamojäte Suomessa (Kuusakoski Oy)

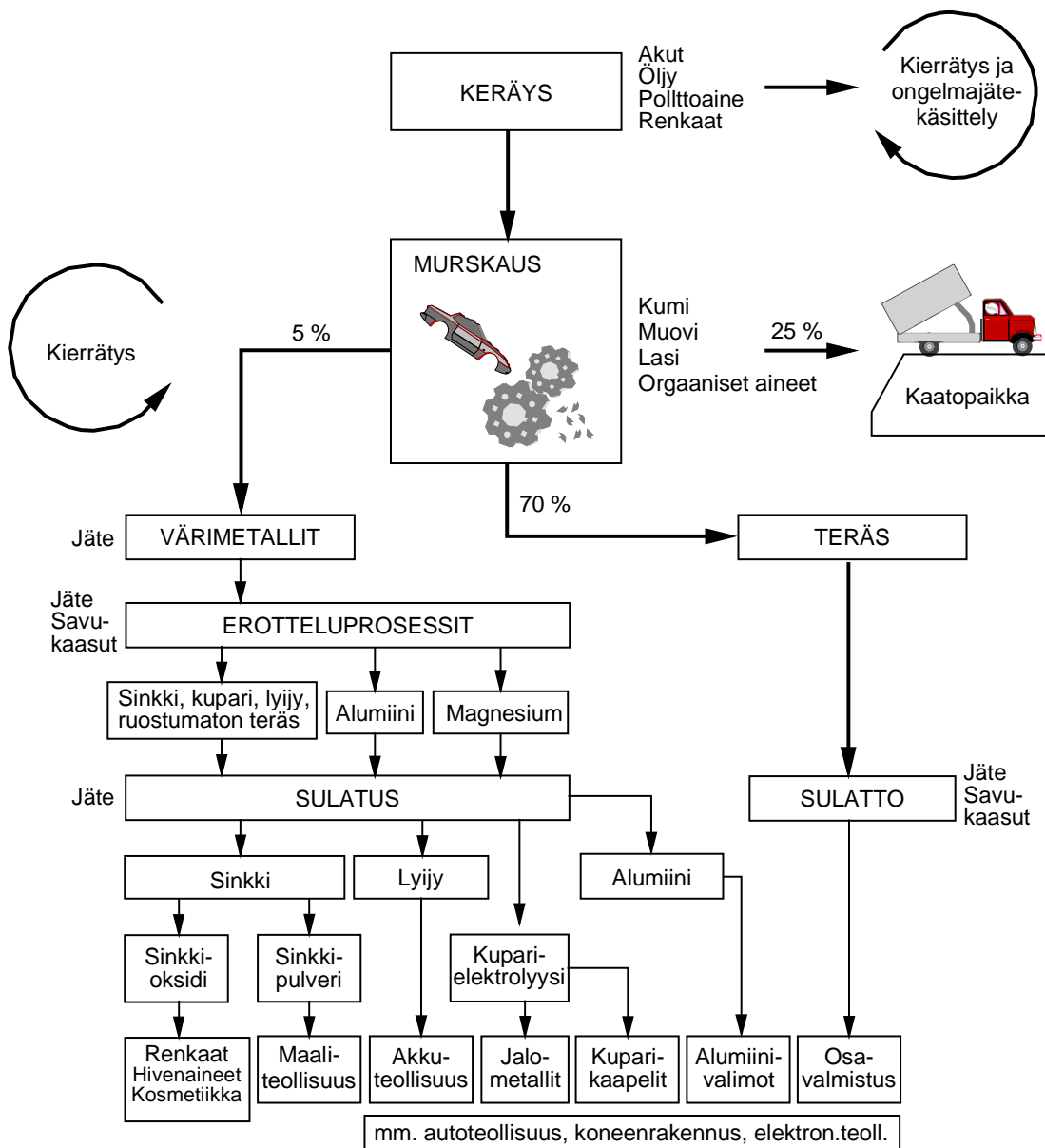
Kuusakoski Oy:n prosessi esitetään kuvassa 11. ASR:n muodostavat kaksi jätevirtaa:

- ilmaluokittelijan fluffi
- UK-kumi, upotus-kellutuslaitokselta.

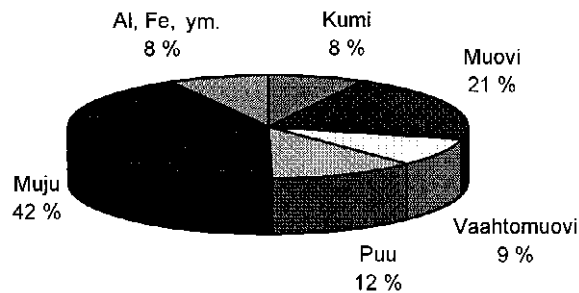
Normaalitapauksessa jakeet yhdistetään ja viedään kaatopaikalle. Fluffin määrä on noin 10 000 t/a ja UK-kumin noin 8 000 t/a.

### 2.3.1. Fluffin ja UK-kumin ominaisuudet

Näytteet otettiin 20.8.1997 Kuusakoski Oy:n Heinolan laitoksella siten, että n. 0,5 - 1 m<sup>3</sup> kerättiin kauhakuormaajalla kummassakin tapauksessa hihnan päästä tippuvasta materiaalivirrasta kokonaisnäytteenä. Neliöimällä näyte jaettiin sopivan kokoiseksi (30 l). Fluffin kokonaisnäytteen määrä oli noin 230 kg. Käsien lajittelemalla tästä valmistettiin joukko erillisfraktioita, joita olivat kumi, muovi, vaahtomuovi, puu, metalli ja ”muju”. Suurimman fraktion muodosti tässä tapauksessa epämääräinen ”muju”, jota manuaalisesti ei pystytty luokittelemaan. ”Muju” koostuu kuitenkin pääasiassa hiekasta, lasista, ruosteesta, kalkista jne. Ainejakauma esitetään kuvassa 12.



Kuva 11. Kuusakoski Oy:n prosessi.



Kuva 12. ASR:n ainejakauma.



Lajittelematon fluffinäyte jauhettiin Kamas-hakkurilla ensin noin 10 mm:n palakokoon. Näyte pienennettiin tämän jälkeen jakolaitteella noin kahden litran laboratorionäytteenä, josta tehtiin analyysit. Vertaileva analyysi tehtiin yhdistämällä käsin lajitellut näytteet prosentiosuuksien suhteessa takaisin kokoomanäytteeksi.

Materiaalien polttoaineominaisuudet esitetään taulukossa 12. Yksinkertainen tapa parantaa fluffin polttoaineominaisuuksia on seuloa se kahteen fraktioon. Taulukoissa 12 ja 13 esitetty tulos saatiin 8 mm:n seulalla.

Taulukko 12. ASR:n ja vertailupolttoaineiden polttoaineominaisuudet.

Materiaali	Lämpöarvo MJ/kg	Kosteus %	“Tuhka” %	S %	Cl %	Til.paino kg/m <sup>3</sup> *
Fluffi, >8 mm	13,7	10	50	0,3	0,8	150
Fluffi, <8 mm	0	12	80	0,4	0,5	
UK-kumi	21,2	7	24	0,7	3,2	380
Turve	19	40	5	0,1	0	350
Kivihiili	25	5	15	1	0,1	

\* Jauhettujen näytteiden (<10 mm) tilavuuspainot olivat vastaavasti fluffille 280 kg/m<sup>3</sup> ja UK-kumille 465 kg/m<sup>3</sup>.

Taulukko 13. Fluffin luokittelu seulomalla.

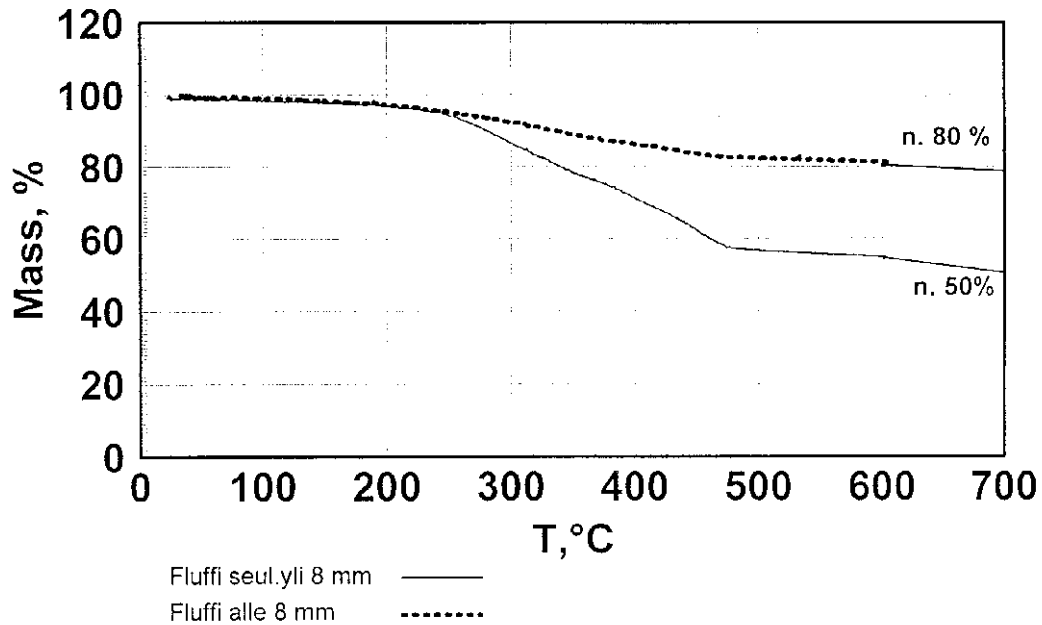
	Paino-%	Tilavuus-%
>8 mm	40	70
< 8 mm	60	30

Mekaanisella erotuksella fluffista voidaan siis helposti erottaa energiaintensiivinen osa, jonka polttoainekäyttö on mahdollista. On kuitenkin huomattu, että fluffin laatu voi vaihdella melkoisesti. Toisessa näytteenotossa luokittelemattoman näytteen lämpöarvo oli sama kuin luokitellun näytteen taulukossa 12. UK-kumin lämpöarvo on korkea, mutta kloorin suuri määrä edellyttäisi joko savukaasujen käsittelyä tai jätteen laadun parantamista.

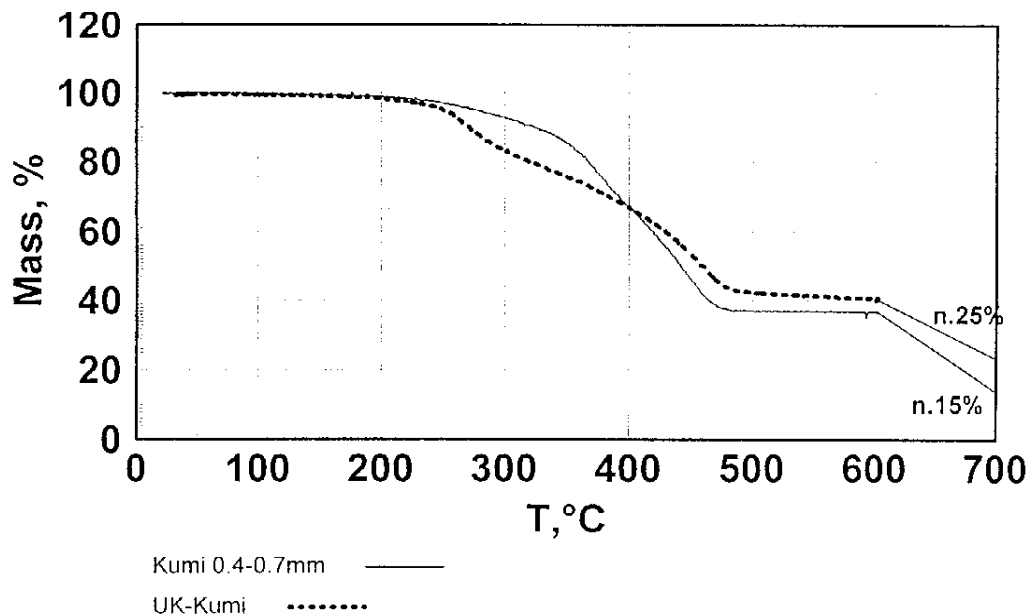
### 2.3.2. Muita esikokeita laboratoriossa

Näytteille tehtiin TGA-mittauksia sekä inertissä (N<sub>2</sub>) kehässä että ilmassa. Tulokset esitetään kuvissa 13 - 15. Kuvassa 13 nähdään kahden fluffijakeen käyttäytyminen pyrolyysissä. Reaktio on käytännössä päättynyt 450 °C:ssa. Massahäviö on tässä lämpötilassa käytännössä sama kuin tuhkauksessa (80 % ja 50 %). Tämä osoittaa sitä, että pyrolyysihiiltä syntyy vain vähän. UK-kumin käyttäytymistä on verrattu puhtaaseen kumi-

fraktioon. Reaktion loppulämpötila on molemmissa tapauksissa sama, noin 470 °C. UK-kumin tapauksessa nähdään muovien aiheuttama 'notkahdus' 250 - 300 °C:ssa. UK-kumin tapauksessa syntyy pyrolyysihiiltä, jonka hapettumista on kuvattu kuviin piirretyillä suorilla lämpötilavälillä 600 - 700 °C.

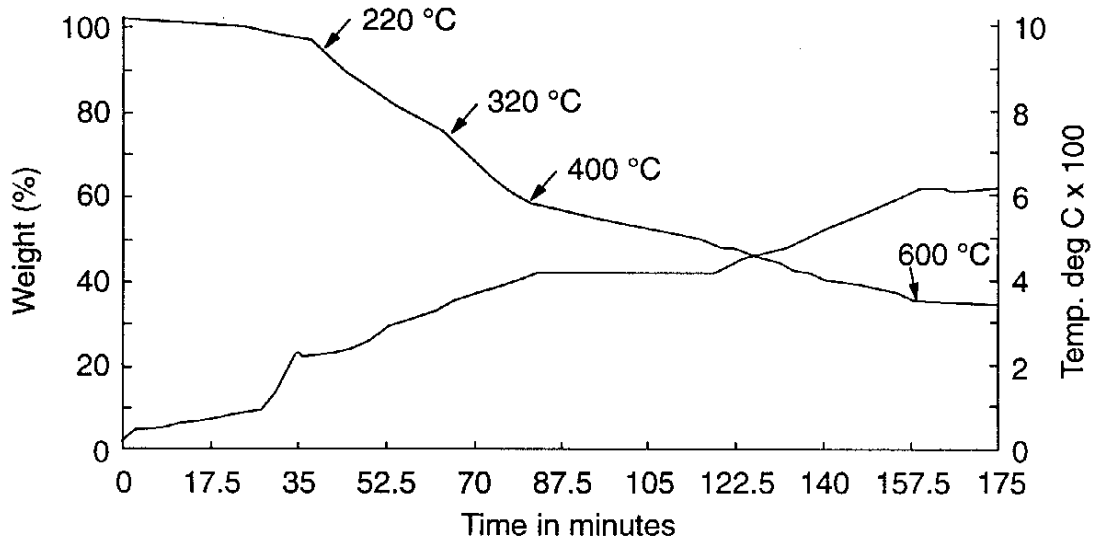


Kuva 13. Fluffin käyttäytyminen pyrolyysissä,  $N_2$ , 5 °C/min.



Kuva 14. Kumin ja UK-kumin käyttäytyminen pyrolyysissä,  $N_2$ , 5 °C/min.

Hapettavassa ajossa (kuva 15) nähdään, että tässä tapauksessa pääreaktio on päättynyt jo 400 °C:ssa. Tämän jälkeen hapettuminen jatkuu aina 600 °C:seen, mikä viittaa esimerkiksi puumaisen materiaalin läsnäoloon näytteessä.



#### AUTO-FLUFF

	W-loss in pyr %	Residue %	End of pyr. °C	Loss-in burning-%
Fluff	43	57	400	24

Kuva 15. Fluffin käyttäytyminen hapettavassa ajossa.

## 2.4. EU-lainsäädäntö

Euroopan Unionin alueella poistuu käytöstä vuosittain 8 - 9 miljoonaa ajoneuvoa, joista syntyvästä jätemäärästä, 8 - 9 milj. tonnista, on noin 25 % eli 1,9 milj. tonnia autonpa-loittelujätettä, jota EU:n direktiiviehdotuksessa (Proposal... 1997) pidetään ongelmajätteenä. Ongelmajätteenä se vastaa noin 10 % EU:n alueella syntyvästä määrästä. EU:n direktiiviluonnoksen mukaan ajoneuvoromutuksen kierrätysasteen tulisi nousta nykyisestä noin 75 %:sta ajoneuvon massasta 85 %:iin vuoteen 2005 ja 95 %:iin vuoteen 2015 mennessä. Mikäli direktiivi astuu sellaisenaan voimaan, kaatopaikalle vietävän ASR:n määrä putoaisi 40 % nykytilanteesta vuoteen 2005 ja kaikkiaan 80 % vuoteen 2015.

Direktiivissä todetaan:

Jäsenvaltioiden on toteutettava tarvittavat toimenpiteet sen varmistamiseksi, että taloudelliset toimijat saavuttavat seuraavat tavoitteet:

- a) Viimeistään 1 päivänä tammikuuta 2005 kaikkien loppuun käytettyjen ajoneuvojen uudelleenkäyttöä ja hyödyntämistä lisätään vähintään 85 painoprosenttiin ajoneuvoa kohti. Samassa määräajassa uudelleenkäyttöä ja kierrätystä lisätään vähintään 80 painoprosenttiin ajoneuvoa kohti.
- b) Viimeistään 1 päivänä tammikuuta 2015 kaikkien loppuun käytettyjen ajoneuvojen uudelleenkäyttöä ja hyödyntämistä lisätään vähintään 95 painoprosenttiin ajoneuvoa kohti. Samassa määräajassa uudelleenkäyttöä ja kierrätystä lisätään vähintään 85 painoprosenttiin ajoneuvoa kohti.

## 3. Kumiromu

### 3.1. Kumiromun määrä

Suomessa kertyy käytöstä poistettuja renkaita noin 2,5 milj. kappaletta vuodessa. Määrä, 25 000 - 30 000 t/a, vastaa energiasisällöltään noin 20 000 toe. Kyse on energiantuotannon kannalta marginaalisesta määrästä, mutta mielenkiintoiseksi kumiromun polttoaineena tekee energiasta maksettava hinta, joka parhaimmillaan voi olla hyvin kilpailukykyinen pääpolttoaineeseen nähden. Renkaiden energiakäyttöön liittyy kuitenkin lähes aina lisäinvestointeja varastojen, kuljettimien, syöttimien tai jopa reaktorien muodossa.

Käytettyjen renkaiden lisäksi kumiromua syntyy mm. renkaiden valmistuksessa Nokian Renkaat Oy:ssä. Yhtiöllä on tuotantojätteestä syntynyt, noin 10 000 tonnin jätekumivarasto. Varastossa on myös vulkanoimatonta tuotantojätettä. Tuotantojätettä kertyy noin 650 t/a (1996) <sup>1</sup>. Pieniä määriä kumijätettä syntyy lisäksi monissa kumialan yrityksissä ja rengaspinnoittamoissa.

Puhtaan kumiromun ohella syntyy julkaisun alkuosassa käsiteltyä kumipitoista romua Kuusakoski Oy:ssä. Jos palavan aineksen osuus on riittävän suuri eikä haitallisia aineita ole päästöjen kannalta liikaa, kumipitoinen romu voidaan hyödyntää energiantuotannossa kumiromun tavoin.

EU:n alueella muodostui vuonna 1990 noin 1,5 - 2 miljoonaa tonnia rengasromua (Schnecko 1994, Williams ym. 1995), Yhdysvalloissa 2,5 Mt/a ja Japanissa 0,5 Mt/a. Ruotsin rengaskertymä on 6 milj. kpl/a (de Val 1994). Teollistuneissa maissa rengasromua syntyy karkeasti arvioituna 0,5 - 1 kpl/henkilö/a. Taulukossa 14 esitetään tarkemmin renkaiden kierrätystilanne eri Euroopan maissa. Esimerkiksi Hollannissa, jossa hyötykäyttöaste on käytännössä 100 %, renkaiden kierrätys on hoidettu konventionaalisin ratkaisuin. Vaikka romurenkaat edustavat kokonaisjätevirroista vain pientä osaa (yleensä 1 % massasta ja 2 % tilavuudesta), jäte on varsin näkyvää ja hyötykäyttöaste on toistaiseksi ollut vähäinen. Maailmanlaajuisesti renkaiden tuotanto on ollut laskussa (1 %/a), mikä johtunee renkaiden käyttöiän pitenemisestä ja joissakin tapauksissa auton käytön vähenemisestä (Ahmed ym. 1996), vaikka samanaikaisesti autojen tuotanto lisääntyy 2,5 - 3 %/a.

Rengasromun sijoitusmahdollisuuksista tärkein on ollut joko varastointi erikoiskaatopaikalle (ts. varastoon) tai ajo yleisille kaatopaikoille. Suomessa ja useimmissa muissakin Euroopan maissa renkaiden dumpkaus yleisille kaatopaikoille on lailla kielletty. Kaatopaikkojen ongelmat ovat olleet huomattavat: tilanpuute, paloriski, pitkäaikais-

---

<sup>1</sup> Tirronen, P. Henkilökohtainen tiedonanto, 1998

Taulukko 14. Renkaiden määrä ja käyttö eri maissa, t/a (Bressi 1995).

	Maa								
	Tanska 1991	Ranska 1)	Englanti 1990	Italia 2)	Norja 1993	Espanja 1991	Sveitsi 1990	Saksa 1994	Suomi 1997
Pinnoitukseen	8 300	192 000	84 000	76 000	7 400	34 000	5 500	110 000	3 000
Kumijauheen valmistus	3 000	19 000	28 000	10 000				60 000	0
Poltto	0	39 000	42 000				10 000	210 000	5 000
Vienti	1 000		19 000	19 000			34 500		0
Kaatopaikka (sis. kai- ken kumijätteen	24 200	180 000	293 000	227 000	21 300	191 000	10 000	270 000	
Muu käyttö					4 860				19 000
Yhteensä	36 500	430 000	466 000	332 000	33 560	225 000	60 000	650 000	27 000

1) Pinnoituksen määrät ja kaatopaikkamäärät arvioitu

2) Kaatopaikkamäärä laskettu

käyttäytyminen (renkaiden biologinen hajoamisaika on yli 100 vuotta), renkaat muodostavat ilma- ja vesiloukkuja, renkaat pyrkivät nousemaan pinnalle jne (Ahmed ym. 1996). Maissa, jossa kaatopaikkasijoitus on vielä sallittua, saatetaan vaatia kaatopaikalle vietävien renkaiden murskaamista tilan säästämiseksi ja paloriskin pienentämiseksi.

Käytettyjen autonrenkaiden joutuminen kaatopaikoille on epätoivottavaa monesta syystä. Kumi on käytännössä biologisesti hajoamatonta, ja renkaat muodostavat huomattavan ympäristöriskin mahdollisen tulipalon sattuessa. Rengaspalot ovat vaikeita sammuttaa, varsinkin jos renkaat on varastoitu kokonaisina, jolloin palamisilman pääsy rengaskasaan on tehokasta. Esimerkiksi 1983 Virginiassa paloi yhdeksän miljoonan renkaan kaatopaikka kahdeksan kuukautta (Liaskos 1994). On todettu myös, että renkaiden varastointi on hygieeninen ongelma, sillä rotat ja hyönteiset viihtyvät hyvin tässä ympäristössä. Tämä on erityinen ongelma lämpimässä ilmastossa. Hollantilaisen tutkimuksen mukaan renkaiden varastointi on kaksi kertaa kalliimpaa kuin energiakäyttö. Varastoinnin kustannuksiksi arvioidaan 55 ECU/t.

### **3.1.1. Kumiromun määrän minimointi**

Kumiromun määrän vähentämiseen pyritään mm. seuraavilla keinoilla:

- Paremmalla tekniikalla vähennetään jäterenkaiden määrää, ts. uusien renkaiden käyttöikä pitenee. Tähän voidaan vaikuttaa lisäksi erilaisilla kampanjoinneilla oikeista rengaspaineista, ajotavoista, ajoneuvon kunnosta jne.
- Pinnoitettujen renkaiden valmistuksen lisääminen.
- Käyttö kokonaisina (uusiokäyttö) mm. keinoriutoissa, eroosion ehkäisyssä ja muissa maarakennuskohteissa.
- Renkaiden murskaus tai jauhatus ja uusiokäyttö: räjäytysmatot, äänieristykset, kumi-asfaltti, muovikomposiitit, erilaiset valutuotteet.
- Käyttö maarakennuskohteissa, kuten tienpohjissa.
- Materiaalien talteenotto. Noki, kuidut ja teräs.
- Energiakäyttö kokonaisena tai murskattuna.
- Läjittäminen murskattuna erillisvarastoon, jolloin myöhempi käyttöönotto on mahdollista.

### **3.2. Kumiromun hyödyntäminen**

Tärkeimmät kerättyjen renkaiden ja kumiromun hyötykäyttömuodot ovat:

- pinnoittaminen (myös uudelleen uurtaminen erityisesti kehitysmaissa (Ahmed ym. 1996 ym.), EU:ssa sallittua vai rajoitetusti (Kursawe 1995))
- muu uusiokäyttö
- kumijauheen ja -murskan valmistus

- energiakäyttö tavallisesti sementtiuuneissa, murskana tai kokonaisina
- muu energiakäyttö.

Renkaat ovat vaikeasti hyödynnettävä materiaali: pilkkominen ja jauhaminen vaatii runsaasti energiaa, ja kumiromusta valmistettujen sekundääristen tuotteiden markkina-arvo ja -volyymi on pieni. Esimerkiksi EU:ssa on hyvänä pyrkimyksenä lisätä renkaiden uusiokäyttöä. Asiaa vaikeuttaa yhä uusien materiaalien käyttö renkaiden valmistuksessa. Toisaalta ongelmana on markkinoiden löytyminen valmistetuille tuotteille, kuten kumi-  
purulle.

### 3.2.1. Kumiromun hyödyntäminen Suomessa

Valtioneuvoston päätöksen 1246/95 (Valtioneuvosto 1995) mukaan vastuu käytöstä poistettujen renkaiden keräyksestä, kuljetuksesta, varastoinnista, uudelleen käytöstä tai muusta hyödyntämisestä tai käsittelystä sekä niihin liittyvästä tiedotuksesta ja valistuksesta on 1.6.1996 lähtien ollut renkaan tuottajalla. Renkaiden myyjät ovat samasta ajankohdasta lukien olleet velvolliset ottamaan käytöstä poistetut renkaat vastaan ilmaiseksi. Kuluttajan on puolestaan huolehdittava siitä, että hän toimittaa renkaat tuottajan järjestämään vastaanottopaikkaan.

Kaatopaikoilla renkaita ei enää tarvitse ottaa vastaan. Renkaan kuluttaja ja kunta vapautuvat jätehuollon järjestämisvastuusta, kun rengas on toimitettu renkaan myyjän tai tuottajan järjestämään keräykseen.

Päätös koskee myös niitä renkaita, jotka on poistettu käytöstä ennen 1.6.1996 ja varastoitu puhtaana hyödyntämistä varten. Suomen Rengaskierrätys Oy on renkaiden suurimpien maahantuojien ja kotimaisten valmistajien perustama yhtiö, joka huolehtii renkaiden hyödyntämisestä ja keräilystä yhteistyössä Säkkipäline Puhtaanapito Oy:n kanssa.

Kierrätysmaksu henkilöauton, pakettiauton ja moottoripyörän renkaista on 9,50 mk/kpl. Kierrätysmaksu aleni vuoden 1998 alussa (taulukko 15). Romurenkaat kerääntyvät nyt erillisvarastoihin, joista ne voidaan ottaa hyötykäyttöön sopivana ajankohtana. Tässä vaiheessa tehdään asiantunteva renkaiden lajittelu, jolloin pinnoitettavaksi kelpaavat rungot poistetaan materiaalivirrasta. Renkaiden kierrätystase esitetään kuvassa 16. Energiakäyttö (noin 4 500 t/a) on toistaiseksi ollut koetoimintaluonteista lukuun ottamatta FinRecin Nokian Renkaat Oy:n rengasvarastosta Paraisten sementtitehtaalle toimittamaa polttoainetta. Viimeksi mainittu käyttö alkoi keväällä 1998 ja sen tavoitekapasiteetti on noin 6 000 t/a.

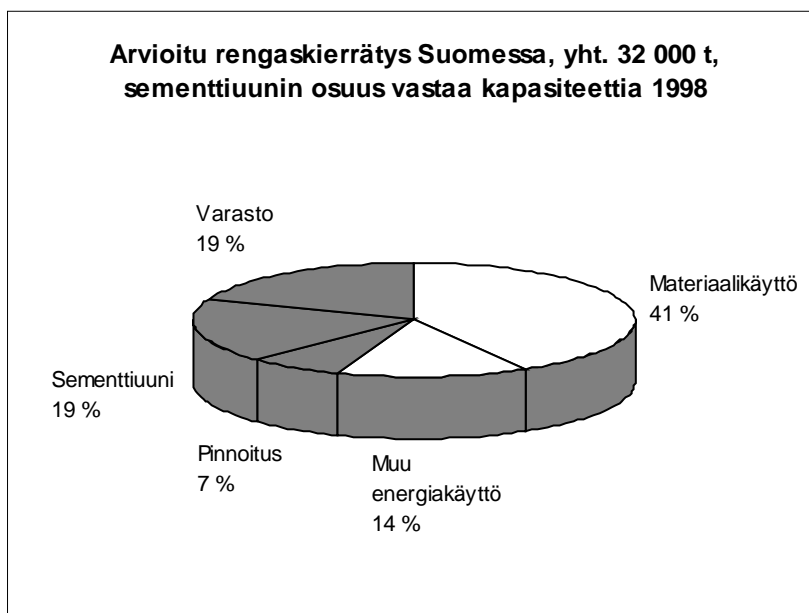
Ongelmana meillä tässäkin on renkaiden pieni määrä. Esimerkiksi Yhdysvalloissa on yrityksiä, jotka lajittelevat 20 000 rengasta päivässä, joka on kolme kertaa enemmän



kuin meillä poistuu renkaita päivässä koko maassa (de Val 1994). Vaikka huomattava-kin osa renkaista päätyisi hyötykäyttöön, muualla saatujen kokemusten perusteella va-rastoihin jää edelleen suuria määriä. Esimerkiksi Euroopassa poltetaan sementtiuuneissa noin puolet renkaista, mutta hyötykäyttöasteen nostaminen korkeaksi on vaikeaa, koska sementtiuunien kapasiteetista on huomattava osa käytetty (Bressi 1995).

Taulukko 15. Renkaiden kierrätysmaksut Suomessa eri rengastyypeille 1998.

Kierrätysmaksut renkaista	mk/kpl
Henkilö-, pakettiauton ja moottoripyörän	9,50
Kuorma-auton ja vastaavan	45,00
Muut (työkoneet yms.)	250,00
Henkilöauton pinnoitetut	5,80
Kuorma-auton ja vastaavan pinnoitetut	10,00



Kuva 16. Rengaskierrätyksen arvioitu tase 1997 - 1998.

### 3.3. Renkaan koostumus ja kumiromun ominaisuudet energiakäytön kannalta

Renkaiden koostumus riippuu tyypistä ja valmistuspaikasta. Länsimaisissa renkaissa on synteettisten kumilaatujen (butaanidieenikumi, styreeni-butadieenikumi) osuus korkea. Talvirenkaissa taas luonnonkumia on enemmän kuin kesärenkaissa. Rengas koostuu yli 20 komponentista (kulutuspinna, runko, jne.). Taulukossa 16 esitetyt luvut ovat saksalaisesta tutkimuksesta (Stark 1995).

Taulukko 16. Renkaan koostumus ja valmistukseen käytetty energia (Stark 1995).

1. Materiaalivaatimukset	kg	%
Raaka-aineet rengasta kohti		
Luonnonkumi	1,165	18
Synteettinen kumi	1,553	24
Aktiiviset täyteaineet	1,618	25
Öljyt	0,518	8
Kemikaalit	0,582	9
Teräs	0,776	12
Raion	0,226	3,5
Polyamidi	0,032	6,5
Yhteensä	6,470	100
2. Energiankulutus		
Lämpöenergia	5,815 MJ/kg rengasta	
Sähköenergia	3,771 MJ/kg rengasta	
Lisätyn energian kokonaismäärä	9,586 MJ/kg rengasta	

### 3.3.1. Polttoaineominaisuudet

Tyypillisiä rengasromun analyysiarvoja ovat:

- lämpöarvo noin 33 MJ/kg
- tuhkipitoisuus 12 - 15 %
- tilavuuspaino kokonaisina noin 150 kg/m<sup>3</sup>, murskattuina noin 450 kg/m<sup>3</sup>
- rikkipitoisuus noin 1 %.

Renkaiden (kumin) korkean lämpöarvon takia energiakäyttö on hävittämismuotona houkutteleva. Kumin polttoon liittyy seuraavia yleisiä näkökohtia (Ahmed ym. 1996):

- Ilmantarve on suuri voimakkaan nokisavun muodostuksen takia (nokipartikkelit ovat varsin epäreaktiivisia).
- Syntyvä liekki on erittäin kuuma, joten polttolaitteen on kestettävä tavallista korkeampi lämpötila (2 000 °C).
- Laitos on varustettava savukaasujen rikinpoistolla ja tehokkaalla hiukkassuodatuksella.
- Renkaiden syöttö, metallin poisto ja tuhkan käsittely on ratkaistava.

Kumiromun ja vertailupolttoaineiden polttoaineominaisuuksia on taulukossa 17.

Taulukko 17. Rengasromun ja vertailupolttoaineiden polttoaineominaisuuksia.

Materiaali	Lämpöarvo MJ/kg	Kosteus %	“Tuhka” %	S %	Cl %	Tilavuuspai- nokg/m <sup>3</sup>
Kumirouhe	39	0,5	4,3	1,9	0,03	390
Rengasmurska	32	1	12	1,2		400
Turve	19	40	5	0,1	0	350
Kivihiili	25	5	15	1	0,1	

### 3.4. Rengasromun ja muun kumiromun terminen käsittely

#### 3.4.1. Poltto

Kumiromun lämpöarvo vastaa parhaimmillaan lähes polttoöljyä. Eurooppalaisessa ja amerikkalaisessa ympäristössä sementtiuunit ovat tyypillinen ympäristö kumiromun hyötykäytölle: tehtaat säästävät energiakuluissa ja ympäristöongelma tulee samalla hoidettua. Etuna on mahdollisuus syöttää renkaat kokonaisina tai vain karkeasti murskattuna. Myös renkaiden teräs- ja mineraaliaines sitoutuvat klinkkeriin. Renkaiden määrä voi myös vaihdella.

Energialaitossektorilla renkaiden hyödyntäminen on jo hankalampaa: kumin palamisominaisuudet ja lämpöarvo voivat poiketa liikaa pääpolttoaineen ominaisuuksista, kapalekoolle asetetaan suurempia vaatimuksia, mineraaliaines ja teräs on mahdollisesti kerättävä erikseen jne. Polton ohella on tutkittu muita vaihtoehtoja, kuten kaasuttamista ja seoskaasuttamista ja tuotekaasun polttoa kattilalaitoksessa. Pyrolyysi voisi toimia samaan tapaan; tällöin olisi mahdollista vielä lisätä erikoistapauksessa metalli-mineraalifraktion hyötykäyttöä.

Poltto on todennäköisin käsittelytapaa erityisesti silloin, kun renkaiden käytöstä saadaan selvää säästöä polttoainekustannuksissa. Yhdysvalloissa (de Val 1994) ja Englannissa (Williams ym. 1995) voi renkaita energiantuotannossa käytävä saada sähköstä erityishinnan tai rakennettavat laitokset voivat saada muuta tukea. Renkaista valmistettu sähkö ei sellaisenaan, ilman subventiota, voi kuitenkin tarvittavien lisäinvestointien takia olla kilpailukykyistä, vaan on jopa 50 % kalliimpaa kuin hiilisähkö.

Rengasromun käyttö polttoaineena esimerkiksi sementtiuuneissa tai selluteollisuuden kattiloissa (syklonipesät ja leijukerroskattilat) on mahdollista ja varsin yleistäkin sekä Yhdysvalloissa että Euroopassa, mutta siihenkin liittyy lisäkustannuksia, kuten kumin murskaus, kuljetus ja varastointi, mahdolliset päästöongelmat, prosessin säätöongelmat ja esimerkiksi tuhkan laatuongelmat ja siitä aiheutuvat ympäristöhaitat.

### 3.4.1.1. Sementtiuunit

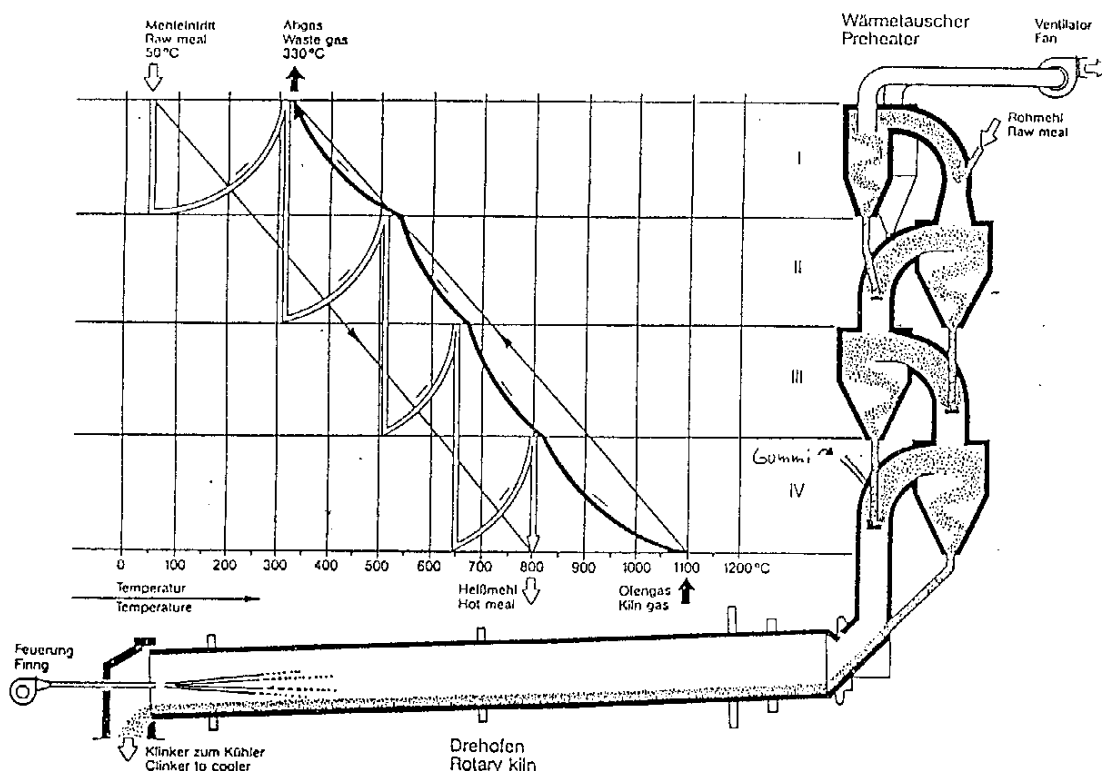
Sementtiuuni on pitkä, jopa yli 200 m, halkaisijaltaan 5 - 7 m rumpu-uuni. Raaka-aineet (kalkkikivi, savi, hiekka, rauta) ja osa polttoaineesta syötetään ns. kalsinointitorniin. Uunin kuumassa päässä on kivihiilipölypoltin (1 400 - 1 500 °C). Materiaali valuu hitaasti rummun läpi sintraantuen vähitellen klinkkeriksi. Klinkkeri jäädytetään ja jauheetaan sementiksi. Jauhatuksen yhteydessä lisätään seosaineita (masuunikuona, lentotuha, kipsi, kalkkikivi), jolloin saadaan valmis tuote. Kuvassa 17 on eräs sementtiprosessi, johon syötetään rengasromua.

Monissa Euroopan maissa (mm. Saksassa, Sveitsissä, Itävallassa, Ranskassa, Ruotsissa, Norjassa) on kumiromuun käyttö sementtiuunien polttoaineena tavallinen vaihtoehto. Menetelmä on otettu käyttöön Suomessakin Paraisten tehtaalla vuoden 1998 aikana. Kumiromun lisäksi on sementtiuuneissa tavallista polttaa liuottimia, jäteöljyä tai muoviruuhetta. Suomessa on sementtitehtaat Paraisilla ja Lappeenrannassa. Tavoitteena on vuoteen 2000 mennessä tuottaa sementtiteollisuudessa vähintään 50 % energiasta muilla kuin fossiililla polttoaineilla. Myös Lappeenrannan osalta tutkitaan mahdollisuutta renkaiden polttoon.

Sementtiuuneissa ei synny sekundäärisiä jätteitä, sillä korkean lämpötilan vuoksi (noin 1 450 °C) epäorgaaninen aines sitoutuu klinkkeriin. 1 kg klinkkeriä vaatii noin 3 350 kJ energiaa. Pitkä viipymäaika (4 - 12 s) ja korkea lämpötila takaavat myös sen, ettei prosessissa synny nokisavua tai hajua, joka on tyypillistä epätäydellisessä poltossa. Koska rauta ja muu epäorgaaninen hyödynnetään prosessissa, ei sementtiuunisovelluksessa ole kysymyksessä enää puhdas energiakäyttö vaan osa sementin raaka-aineista voidaan korvata renkaista saatavalla raudalla. Tältä osin on siis kysymys materiaalin uudelleenkäytöstä. Etuna sementtiuunikäytössä on myös se, että pitkään maastossakin olleet, epäpuhtauksia sisältävät renkaat voidaan hyödyntää. Alkalinen prosessi sitoo tehokkaasti myös happamat päästöt.

Yli sata sementtiuunia maailmassa käyttää romurenkaita polttoaineena: 23 Japanissa, 20 Saksassa, 29 Yhdysvalloissa, 3 Kanadassa jne. (Blumenthal 1996b). Kumiromua voidaan käyttää parhaimmillaan 15 % konventionaalisesta polttoaineesta. Saksassa 50 % romurenkaista hävitetään sementtiuuneissa ja Itävallassa jopa 85 % (Bressi 1995). Kaikkiin sementtiuuneihin (esilämmittimien tai kalsinointitornin rakenteesta riippuen) renkaiden syöttö ei onnistu yhtä helposti. Itse asiassa renkaiden hyvä syöttömahdollisuus ratkaisee usein käytön talouden sementtiuuneissa. Jos rengasromu syötetään kalsinointitorniin, ongelmia voi syntyä teräslankojen tai muiden kertymien suhteen.

Tarvittavat investoinnit muodostuvat puskurivarastosta (katettu), jolla taataan raaka-aineen saanti, murskausasemasta ja syöttö- ja annostelulaitteista. Vaikka kokonaisten renkaiden syöttölaitteisto on investoinniltaan kalliimpi, se on todettu kokonaisuudessaan



Kuva 17. Rengasromun käyttö sementtiprosessin lisäpolttoaineena (LIEKKI 1997, s. 899).

paremmaksi (Blumenthal 1996b). Aiempi syöttömäärä (1 rengas/kierros) on pystytty lisäämään 2 - 3-kertaiseksi, ja sementtiuuni voi tuottaa renkaista 25 % energiatarpeestaan. Mekaanisen syöttöjärjestelmän kustannukset ovat 0,25 - 0,5 milj. USD, kun vastaavan pneumaattisen järjestelmän hinta on 60 000 - 100 000 USD. Takaisinmaksuaika Yhdysvaltojen oloissa on yleensä 18 kk (Blumenthal 1993). Usein tällaisen laitoksen toiminta miehittämättömänä on hankalaa ja käyttökulut nousevat myös hiukan. Mikäli sementtiuunissa poltetaan myös ongelmallisia jätteitä, tarvitaan mahdolliset lisäinvestoinnit päästöjen rajoittamiseen.

Hankaluutena sementtiuunikäytössä mainitaan myös mahdolliset vaikeudet prosessin hallinnassa mm. ylimääräisen kuonaantumisen vuoksi. Hankaluudet ovat pienempiä, jos kumin partikkelikokoa pienennetään, mutta tämä puolestaan lisää käsittelykustannuksia. Rikkipäästöt voivat alentua renkaiden suhteellisen pienen S/MJ-arvon ansiosta.

Sliten sementtitehtaalla (Scancem-konsernia) meneillään olevaa kokeilutoimintaa esitellään tarkemmin liitteessä C. Norjaan valmistuu 1998 Brevikin sementtitehtaan (Norcem) yhteyteen sementtitehtaalle vaihtoehtoisia polttoaineita valmistava laitos. Norjassa on jo yli kymmenen vuoden ajan poltettu (ongelma)jätteitä sementtiuuneissa, ja tätä menettelyä pidetään edelleenkin parempana vaihtoehtona kuin erillistä polttolaitosta (Karstensen & Ingebrigtsten 1997).

Yhteenvetona eduista, joita saadaan rengasromun (sama koskee muitakin polttoaineita, kuten fluffia, muovijätettä, jäteliuottimia jne.) poltosta sementtiuunissa voidaan mainita (Karstensen & Ingebrigtsten 1997, Balbo ym. 1997):

- jätteen energian talteenotto
- sementin tuotantokustannusten aleneminen (polttoaineen hintakysymys)
- hyvät prosessiolosuhteet jätteiden käsittelemiseksi (viipymäaika, palamislämpötila, sekoittuminen ja alkalinen ympäristö)
- ei kiinteää jäännöstä, vaan epäorgaaninen aines sitoutuu klinkkeriin
- CO<sub>2</sub>-päästöjen aleneminen sopivilla polttoaineilla
- käyttää saatavilla olevaa teknologiaa energiapitoisten ja hankalien jätteiden hyödyntämiseen
- vähentää fossiilisten polttoaineiden tarvetta
- jätteiden polton kannalta yhtä luotettava, mutta edullisempi kuin varsinaiset jätteenpolttolaitokset (edellyttää savukaasujen käsittelyä).

Rajoittavana tekijänä rengasromun sementtiuunikäytölle on kilpailu muiden polttoaineiden kanssa. Monet sementtiuunit on lisensoitu polttamaan myös ongelmajätteitä, jotka luonnollisesti ovat sementtitehtaille taloudellisesti houkuttelevampia kuin rengasromu (de Val 1994).

Yhteenvetona voidaan sanoa, että sementtiuunit ovat osoittautuneet varsin tehokkaiksi tiettyjen jätetyyppien, mm. kumiromun ja muoviroimun, hävittämisessä. Sementtiuunien etuna on se, että tuhkia ei synny, vaan epäorgaaninen aines sitoutuu sulamisprosessin kautta sementtiklinkkeriin. Kun vaihtoehtoisten polttoaineiden sisältämän epäorgaanisen aineen määrä on monesti jopa alempi kuin kivihiilen, hivenainemäärät ovat lopputuotteessa samalla tasolla tai alemmat kuin kivihiiltä käytettäessä. Myös savukaasupuolella on vaihtoehtoisten polttoaineiden kohdalla mahdollista päästä alemmalle tasolle kuin kivihiilen tapauksessa.

### Kustannukset

Menetelmä	Investointi, milj.USD	Käyttökulut
Mekaaninen syöttö	0,25 - 0,5	?
Pneumaattinen syöttö	0,06 - 0,1	?

#### 3.4.1.2. Selluteollisuuden kattilat ja muut kattilalaitokset

Vaikka selluteollisuuden kattilat ovat pääsääntöisesti energiaomavaraisia, käytetään fossiilisia polttoaineita mm. stabiloimaan poltto-olosuhteita. Rengasromun käyttö korvaa-

maan kivihiiltä on periaatteessa mahdollista. Renkaiden korkean lämpöarvon vuoksi käyttö sivupolttoaineena on herättänyt mielenkiintoa. Polttaminen on helpompaa arina- tai leijukerroskattiloissa. Pölypolttokattiloissa tarvittavat muutokset ovat suurempia, tai tarvitaan erillinen kaasutin, jonka tuotekaasu poltetaan kattilassa.

Käyttö selluteollisuuden kattiloissa on erityisesti Yhdysvalloissa koeteltua tekniikkaa. Tällä hetkellä 21 kuorikattilassa (hog fuel) käytetään 40 - 50 milj. rengasta vuodessa (Blumenthal 1996a). Käyttöä selluteollisuudessa rajoittavat lähinnä

- marginaalinen etu polttoainekustannuksissa
- tarvittavat lisäinvestoinnit
- mahdolliset päästökysymykset (vaikutus tuhkan hyötykäyttöön, savukaasupäästöt)
- heikko sijainti (renkaiden saatavuus)
- käsittely- ja kuonaantumisongelmat.

Mikäli kappalekoko on liian suuri, voi lähinnä teräslangoista syntyä erilaisia käsittelyongelmia polttoaineen syöttölaitteissa, arinalla ja tuhkanpoistolaitteissa. Leijukerrosreaktoreissa lankavyyhdyt voivat aiheuttaa pahimmillaan petin alaschenon. Myös renkaiden (mahdollinen) lasikuitu voi aiheuttaa kuonaantumista tai agglomeraatiota. Useimmiten leijukerroskattilat ovat ns. kupliva peti -kattiloita, mutta Foster-Wheeler (Anthony 1995) on tehnyt kokeita myös kiertopetikattiloissa, joissa kappalekoko oli noin 1 x 1. Kokeissa käytettiin enimmillään 20 % TDF:a (Tyre Derived Fuel).

Tuhkien sinkkikontaminaatio (jätevedet, kuonat, tuhka) on huolenaiheena eräissä paikoissa. Viranomaispuolelta on ongelmana se, että jätehuollon ja ilmansuojelun viranomaisten suositukset voivat olla erisuuntaiset (USA). Jotkut laitokset saavat huomattavaa (20 USD/t) tukea rengasromun käytöstä.

Illinoisissa tehdyissä kokeissa (Stopek 1996) syklonipolttimilla varustetulla laitoksella poltettiin renkaita (kappalekoko 1 - 2") siten, että hiilen joukkoon lisättiin kumimurskaa 1,5 % massavirrasta ja 2 % tilavuusvirrasta. Kokeet onnistuivat hyvin, mutta tuhka aiheutti ongelmia. Joukossa oli palamatonta kumia (nokea), ja erityisen ongelman aiheuttivat renkaiden palleraudat, jotka haittasivat tuhkan käyttöä soran korvikkeeksi. Laitos päätti käyttää vain renkaita, joista palteet on poistettu, ja lisätä tuhkan käsittelyyn magneettierottimen.

Toisessa Illinoisissa tehdyssä kokeessa poltettiin 5 x 5" kumirouhetta kuplivassa leijupetikattilassa 10,9 t/h (Dervin ym. 1997). Kokeessa mitattiin teräslankojen pituuksia 50 - 200 mm ennen polttoa. Prosessissa langat lyhenivät ja ongelmia ei esiintynyt koejaksolla.

### 3.4.1.3. Erilliset kumiromun polttolaitokset

ELM Energy Englannissa (Wolverhampton) on vuonna 1993 käynnistetty voimalaitosprojekti, jossa on tarkoituksena käyttää polttoaineena 20 % maassa syntyvästä kumiromusta eli noin 94 000 t/a. Laitoksen nettosähköteho on 25 MW ( 53 000 lbs/h, 40 bar) ja investointi noin 366 Mmk (49 milj. puntaa). Laitos käyttää renkaat kokonaisina ja poltto tapahtuu useassa vaiheessa, ensin ali-ilmaisena ja lopuksi yli-ilmaisena. Sinkkipitoinen lentotuhka menee sinkkiteollisuudelle, savukaasun rikinpoistotuote (kalsiumhydroksidi, -sulfaatti, -sulfiitti) menee maatalouteen tai jäteveden käsittelyyn sekä keskilaatuinen teräsromu terästeollisuudelle. Vaikka laitos saa renkaista käsittelymaksua (n. 188 mk/t), tuloa saadaan pääosin sähkön myynnistä. Samankaltaisia hankkeita on Englannissa viireillä Skotlannissa ja Etelä-Englannissa. Vastaava Saksassa suunnitella ollut laitos on kohdannut vastustusta (Uder 1995). ELM Energyn laitos on kuitenkin tällä hetkellä taloudellisissa vaikeuksissa. Vaikka käsittelymaksu on kaksinkertaistettu, ei suunniteltua kapasiteettia ole saavutettu. Sähköä on tuotettu 10 MW:n tasolla. Laitosta uhkaa sulkeminen (Scrap Tire News 1998).

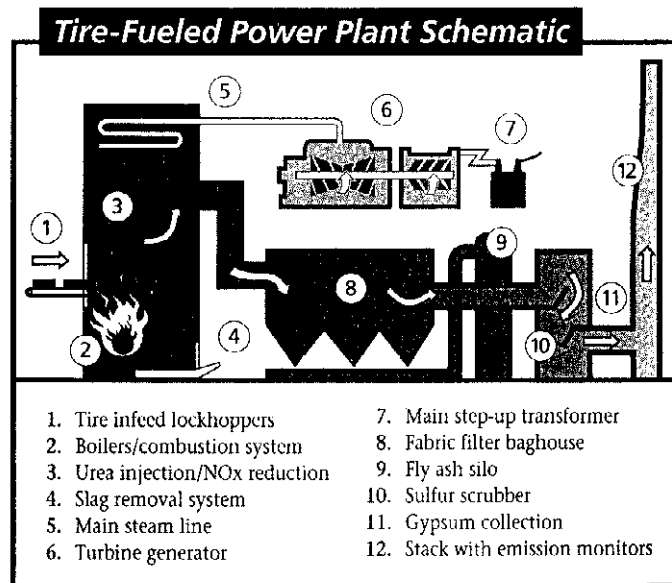
Koska renkaiden kemiallinen koostumus tunnetaan tarkasti, voidaan savukaasujen käsittely optimoida tarkasti. Sekundäärisinä päästöinä syntyy rautapitoista arinatuhkaa, sinkkipitoista lentotuhkaa sekä kipsiä ja suolaa savukaasujen puhdistuksesta. Periaatteessa nämä ovat hyödyntämiskelpoisia.

Muita polttolaitoksia Euroopassa on mm. Saksassa, Ranskassa, Italiassa ja Espanjassa. Laitokset ovat tyypillisesti pieniä. Esimerkiksi Italiassa oleva Eneal/Marangoni-laitos käsittelee 4 000 t/a kumiromua. Laitoksen investointikustannukset olivat 18 - 27 Mmk, johon sisältyy savukaasujen käsittely. Marangonin laitoksessa on itse asiassa pyrolyysirumpu esikäsittelevaiheena mutta tuotteet menevät terästä lukuun ottamatta suoraan polttoon.

Yhdysvalloissa otettiin vuonna 1988 käyttöön kokonaisia renkaita polttava laitos Modestossa, Kaliforniassa (kuva 18). Laitos polttaa noin 5 milj. rengasta vuodessa, ja sähköteho on 14 MW (Lantner 1995). Toinen laitos (24 MWe) sijaitsee Sterlingissä Connecticutissa ja polttaa noin 9 miljoonaa rengasta vuodessa. Savukaasut puhdistetaan typen ja rikin oksideista ja partikkeleista. Kiinteät jätteet (kuona ja teräs, sinkkioksidipitoinen tuhka ja savukaasukipsi) pyritään mahdollisimman pitkälle hyödyntämään.

Renkaan hinta laitokselle toimitettuna on -60 USD/t, jauhettuna -20 USD/t (de Val 1994). Toimittajien on siis maksettava tämä summa päästäkseen eroon renkaistaan. Kyseisissä osavaltioissa on sähkön hinta korkeimmalla tasolla Yhdysvalloissa. Myös Yhdysvalloissa voivat pelkästään rengasromua polttavat laitokset saada sähköstään erityishinnan.





Kuva 18. Sterlingin laitoksen periaatekuva (de Val 1994).

#### 3.4.1.4. Kokeet Suomen kattilalaitoksissa

Suomessa on rengasmurskan polttamisesta seospolttoaineena kokemusta ainakin Enson Anjalankosken laitoksella. Laitoksella on ns. palkkiarina, jossa karkean aineksen poisto on erityisen tehokasta. Normaaliin arinaan verrattuna tuhkanpoistoaukkojen pinta-alaa on suurennettu 3 %:sta 30 %:iin.

Poltettavalle materiaalille on asetettu seuraavat laatuvaatimukset <sup>1</sup>:

- S < 1 %
- Cl 0,1 - 0,5 %
- Al < 0,1 %
- palakoko 50 x 50 x 50 mm
- tuhkan sulamispiste > 1 100 °C (puolipallo)
- tasalaatuisuus
- ei pöly- tai hajahaittoja
- ei työsuojeluvateita
- ei saa työllistää
- osuus energiasta < 20 %.

Renkaiden osuus oli kokeissa 20 - 28 % energiasta. Raudan osuus oli huomattava, 20 - 25 %, mikä johtui ilmeisesti siitä, että murskan raaka-aineessa oli huomattavasti kuorma-autojen renkaita. Tehdyissä kokeissa rautaa kertyi 7,5 t/d. Materiaalin syötössä, poltossa

<sup>1</sup> Frantsi 1998, suullinen tiedonanto.

tai päästöjen hallinnassa ei ollut ongelmia. Sen sijaan rautalankojen (pituus 5 - 20 cm) poisto petistä aiheutti ongelmia. Ratkaisuna on raudan poisto materiaalista ennen syöttöä ja murskauksen tehostaminen tai raudan poiston tehostaminen petistä.

Muita kokeiluja on tehty Imatran Voima Oy:n Kauttuan laitoksella ja UPM Kymmnen Voikkaan tehtaalla (Rengaskierrätys 1997).

Yhteenvetona voidaan todeta, että rengasromua voidaan polttaa seospolttoaineena selluteollisuuden kattiloissa tai muissa sopivissa polttolaitoksissa. Ongelmia saattaa kuitenkin syntyä, jos pääpolttoaine on kovin erityyppistä, esimerkiksi kuorta, jolloin kattilan tuhkan laatu voi olennaisesti muuttua, mikäli seospolttoaineen osuus on korkea.

### **3.4.2. Kaasutus**

Renkaiden kaasuttaminen pienessä määrin esimerkiksi biopolttoaineen joukossa on mahdollista ilman suurempia ongelmia (Niessen ym. 1996, Rensfelt & Östman 1996). Kumin kappalekoon olisi oltava vain samaa luokkaa tai pienempi kuin muun kaasutettavan materiaalin. Tuotekaasu voidaan sen jälkeen polttaa kattilalaitoksessa. Etuna on, että tarvittavat muutokset itse kattilalaitoksessa ovat pienet ja tuhka jätefraktiosta ja pääpolttoaineesta saadaan erilleen. Haittana on investointi, joka on korkeampi kuin pelkät syöttölaitemuutokset. Tässä ei tarkemmin käydä läpi kaasutusprosesseja. Suomessa on vuoden 1998 alussa otettu käyttöön tällainen laitos Kymijärven voimalaitoksen yhteydessä Lahdessa (esim. Energia 1997). Laitoksessa on tarkoitus kaasuttaa myös rengasmurskaa. Kokeiden alkuvaiheessa oli vaikeuksia eri pisteissä metallilangoista muodostuneiden kertymien vuoksi.

### **3.4.3. Pyrolyysi**

Pyrolyysiuuni voi olla suoraan tai epäsuoraan lämmitetty rumpu-uuni, ruuvipyrolysaattori, leijukerrosreaktori tai panosreaktori. Tuotejakauma riippuu mm. pyrolyysin loppulämpötilasta ja pyrolyysinopeudesta. Pyrolyysi on sikäli mielenkiintoinen, että siinä tarjoutuu mahdollisuus erottaa ja hyötykäyttää suurempi osa kumiromun komponenteista. Pyrolyysi ratkaisuna käytettyjen autojen renkaiden hyötykäyttämiseksi on ollut pitkään esillä potentiaalisena vaihtoehtona. Pyrolyysissa saadaan energian lisäksi tuotteina mm. öljyä, hiiltä ja terästä (Kaminsky ym. 1991). Öljy voidaan haluttaessa erottaa prosessissa ja käyttää polttoöljyn korvikkeena (pyrolyysilaitoksella), hiiltä voidaan käyttää energiana, sekundäärisissä aktiivihiilisovelluksissa (jätevedet, savukaasut) ja mahdollisesti synteettisen noen lisänä kumiteollisuudessa. Teräs ja sinkkipitoinen tuhka voidaan kierrättää. Pyrolyysi voidaan tehdä myös muiden materiaalien, kuten jäteöljyn, kanssa (Ksai-bati ym. 1995, Hakes ym. 1993, Schmidt & Kreipe 1995).

Pyrolyysin tuotteet ovat hiili tai noki, teräsromu, öljy ja kaasu. Ongelmana ovat näiden tuotteiden laatu ja markkinat. Hiilipöly kelpaa mahdollisesti sekundäärisiin kumituotteisiin, kuten kuljetinhihnoihin, öljy puolestaan paikalliskäyttöön polttoöljyn rinnalla tai joukossa.

Pyrolyysi tehdään normaalisti ilmanpaineisena, mutta esimerkiksi Kanadassa (Darmstadt ym. 1994a, Roy & Unsworth 1989) on tutkittu paljon vakuumpyrolyysia, joka on rajattu tämän katsauksen ulkopuolelle. Englannissa toimivassa kaupallisessa panostoisessa renkaiden pyrolyysilaitoksessa saatiin suunnilleen seuraavat saannot: hiiltä 45 - 59 %, öljyä 24 - 32 % ja kaasua 13 - 27 % (Williams ym. 1995).

Sopivissa oloissa öljyn saanto voi olla huomattavasti korkeampi. Saksalaisessa lähteessä (Kursawe 1995) annetaan seuraavat saannot yhdestä tonnista kumiromua:

- 115 kg polttokaasua prosessiin
- 121 kg ylimääräistä kaasua
- 28 kg liuottimia
- 18 kg kevyttä öljyä
- 186 kg raskasta öljyä
- 358 kg hiiltä (nokea)
- 113 kg terästä.

Pyrolyysiprosessien ongelmana on monimutkaisuuden lisäksi talous, sillä tuotteiden markkina-arvo on heikon (tai erilaisen) laadun takia pieni. Tuotteet eivät yleensä sellaisenaan korvaa kaupallisia tuotteita, vaan ominaisuudet poikkeavat hieman ja yleensä epäedulliseen suuntaan. Tuotteiden laatua pitäisi siis kysynnän aikaansaamiseksi parantaa, mikä tulee kalliiksi. Toistaiseksi ei ole pystytty osoittamaan, että pyrolyysiprosessi tuottaisi taloudellisesti laadullisesti korkeatasoisia tuotteita, joiden kilpailukyky on hyvä. Day ja Shen (1997) arvioivat kuitenkin, että jo 20 - 40 USD/t kaatopaikkamaksu tekisi pyrolyysin käytön kannattavaksi. Pyrolyysin kannattavuus riippuu siis siitä, millaiset markkinat valmistetuille tuotteille ovat olemassa. Ilmeistä on, että nämä markkinat ovat tällä hetkellä kehittymässä.

Edellä mainituista syistä pyrolyysivaihtoehto ei ole kaupallistunut missään monista yrityksistä huolimatta (tällä hetkellä ei ilmeisesti ole käytössä taloudellisesti toimivaa pyrolyysilaitosta).

Renkaiden valmistus on lisäksi viime vuosikymmeninä kehittynyt siihen suuntaan, että kierrätysmateriaalin käyttö on vaikeutunut, mutta kehitys tässäkin on todennäköisesti se (kuten autojen osalta yleensäkin), että tuotteita suunnitellaan jatkossa siten, että kierrättämisen mahdollisuus parane. Esimerkiksi Yhdysvalloissa on jo nyt mahdollista sisällyttää kierrätysmateriaali uuden renkaan teknisiin tietoihin (Rubber World 1994). Käytännössä tämä ei silti toistaiseksi näy.

On myös esitetty (Wójtowicz & Serio 1996), että pyrolyysiprosessin öljystä valmistettaiisiin edelleen kumilaadun nokea ja aktiivikoksin sijasta valmistettaisiin aktiivihiihtä. Tuotteiden jalostusarvoa nostamalla saadaan lähteen mukaan taloutta parannetuksi. Tällaisen laitoksen taloudelliseksi kooksi arvioidaan 100 t renkaita/d eli noin 30 000 t/a. Laitoksen periaate esitetään kuvassa 19.

Yhdysvalloissa Virginian Charles Cityssä, lähellä Richmondia, on hiljattain käynnistetty pyrolyysiin perustuva laitos, jonka kapasiteetiksi ilmoitetaan 4,5 milj. rengasta vuodessa. Tuote (öljyn ja noen seos) käytetään asfaltin lisäaineena (Tire Recyclers 1998).

#### 3.4.3.1. Pyrolyysihiilen sopivuus eri käyttökohteisiin

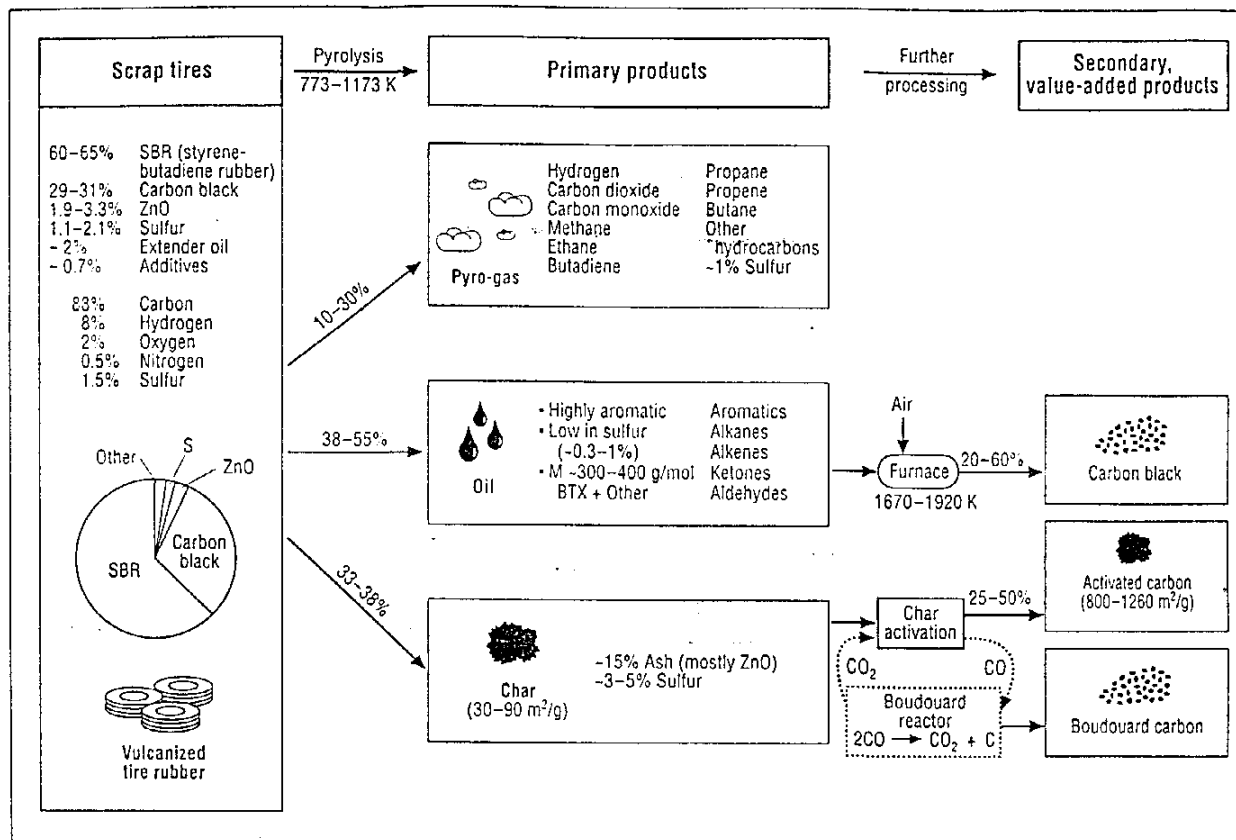
##### **Aktiivikoksi**

Aktiivikoksi on hiihtä, jonka huokosrakenne on kehittynyt mutta ei kuitenkaan samalle tasolle kuin aktiivihiihellä. Aktiivikoksin mikrohuokostilavuus on luokkaa  $0,1 \text{ cm}^3/\text{g}$  ja ominaspinta-ala (BET) 300 - 400  $\text{m}^2/\text{g}$ . Rengashiiltä voidaan käyttää aktiivikoksin (tai jopa aktiivihiihen) raaka-aineena.

Euroopassa käytetään aktiivikoksisuodattimia lähinnä jätteenpolttolaitosten suodattimisissa, mutta jossain määrin myös savukaasujen rikinpoistossa (Rheinbraun; Esser-Schmittmann & Peters 1992). Raaka-aineena käytetään mm. ruskohiihtä. On vaikea sanoa, min-kälaisia markkinoita pölymäiselle rengashiilestä valmistetulle aktiivikoksille löytyisi.

Kirjallisuudessa mainitaan useita menetelmiä pyrolyysihiilen valmistamiseksi. Hiilen tuhkapitoisuus on korkea,  $>10 \%$  ja rikkipitoisuus  $2,4 \%$  (Williams & Besler 1995). Tekijät ehdottivat tämän hiilen soveltamista jätevesien puhdistamiseen. Bilitewskin ym. mukaan (1989) hyvän noen valmistaminen renkaista maksaisi 200 - 350 DEM/t (1985) ja aktiivihiihen vastaavasti 1 200 - 1 400 DEM/t (1985).

Cypres & Bettens (1989) käyttivät kaksivaiheista pyrolyysia, matalalämpötilapyrolyysia renkaille ja korkealämpötilapyrolyysia tuotekaasuille ( $>700 \text{ }^\circ\text{C}$ ), jolloin tapahtuu aromatisoituminen ja bentseenin saanto minimoituu. Aktivointi tehtiin noin  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ :ssa aktivointiajan ollessa 30 min. Näissä olosuhteissa saavutettiin 30 - 40 %:n aktivointiaste.  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ :ssa pyrolysoitu rengas tuotti parhaan aktiivihiihen. Ominaspinta-ala ennen aktivointia oli noin  $60 \text{ m}^2/\text{g}$  ja aktivoinnin jälkeen noin  $390 \text{ m}^2/\text{g}$ . Williams ym. (1990) raportoivat pyrolyysihiilen ominaispinta-alaksi 20 -  $80 \text{ m}^2/\text{g}$ .

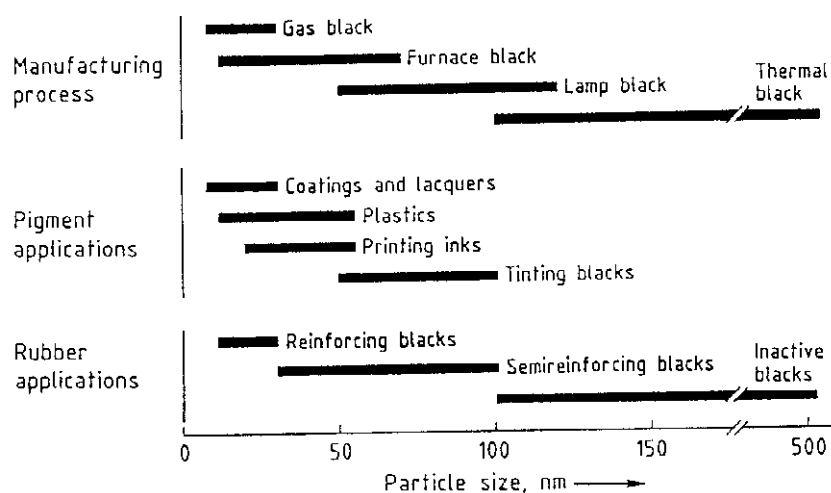


Kuva 19. Romurenkaiden pyrolyysi korkeampiavoiseksi tuotteiksi (Wójtowicz & Serio 1996).

## Pyrolyysihiilen käyttö kumituotteiden valmistukseen

Nokilaatuja on kaupallisesti saatavissa 50 - 100, jotka jakautuvat pääasiassa kovettimiin (renkaiden valmistus) ja pigmentteihin (Pehlergård 1995). Jo tämä seikka osoittaa noki-laaduille asetettavat kovat laatuvaatimukset. Esimerkiksi renkaanvalmistaja Goodyear on toistaiseksi luopunut ajatuksesta käyttää pyrolyysinokea renkaiden valmistuksessa. Tuote ei laadullisesti vastaa tarpeita (de Val 1994). Kuvassa 20 nähdään eri nokilaatujen hiukkaskokoalueet ja valmistustekniikat (Ullmann's 1996).

Williamsin & Beslerin (1995) mukaan kumin orgaanisesta osasta (luonnonkumi, styreenibutadieeni, polybutadieeni) muodostuu hiiltä hyvin vähän, alle 4 %, joten pääasiallinen pyrolyysihiilen lähde on renkaassa oleva noki. Aiemmissa tutkimuksissa, mm. Bilitewski ym. (1989), pyrolyysinoken käyttö on mahdollista renkaiden ja muiden kumituotteiden valmistuksessa, erityisesti fillerinä. Pyrolyysinoki korvasi tiettyjä kaupallisia nokilaatuja. Kaupallisiin nokiin verrattuna mm. tuhkapitoisuus ja rikkipitoisuus ovat erittäin korkeat. Tuhkapitoisuutta voidaan alentaa uuttamalla (Chaala ym. 1996), mutta prosessi on kallis ja vain suuressa mitassa järkevä. Rikki on rengasnoessa usein kiteistä sinkkisulfidia (Darmstadt ym. 1994b). Myöskään hiukkaskoossa ei päästä lähellekään kaupallisen noen tasoa (Williams ym. 1990). Pyrolyysinokea ei voida ilman merkittävää lisäprosessointia hyödyntää kumiteollisuudessa, paitsi tuotteissa, joiden laatutaso on matala. Tällaisina mainitaan mm. kuljetinhihnat, saappaat ja roiskeläpät (Williams ym. 1990). Piskorz ym. (1996) ovat esitelleet nestefaasiprosessin, jossa liuotin kierrätetään. Tuotenoki on eri nokilaatujen ja epäorgaanisen faasin seos. Sen sanottiin vastaavan kaupallista N-400-nokilaatua.



Kuva 20. Eri nokilaatujen hiukkaskokoalueet ja valmistustekniikat (Ullmann's 1996).

Renkaiden valmistus on noen laadun suhteen vaativa sovellus. Esimerkkinä voidaan mainita, että renkaiden valmistuksessa käytetään renkaan eri osissa eri nokilaatuja riippuen kullekin osalle asetettavista laatuvaatimuksista (de Val 1994, Uder 1995). On todennäköistä, etteivät renkaiden valmistajat ole lähitulevaisuudessa kiinnostuneita pyrolyysinoen käytöstä renkaiden valmistuksessa. Japanilaisen Kobe Steelin pilottitutkimuksessa (Kawakami ym. 1980) tehtiin pyrolyysin ja metallinpoiston jälkeen jälkipyrolyysi haihtuvien eliminoimiseksi, hiili jauhettiin ja pelletoititiin kaupallista nokea vastaavaksi. Tutkitun pölyn lujittamisominaisuudet olivat paremmat kuin kaupallisen GPF-laadun noen, mutta tuhkapitoisuus oli korkea, samoin pH. Pyrolyysinoen laatu riippui myös käytettyä kumilaadusta ja erityisesti pyrolyysilämpötilasta. Pyrolyysinokea kokeiltiin mm. turvasaappaissa ja kuorma-auton sisärenkaan suojusnauhassa (10 - 40 % pyrolyysinokea kokonaismäärästä) hyvin tuloksin. Kobe Steelin pyrolyysilaitoksen toiminta on kuitenkin kannattamattomana lopetettu.

Darmstadtin ym. (1995) ja Royn ym. (1995) mukaan pyrolyysinoki poikkesi spektroskooppisissa vertailuissa kumin valmistuksessa käytettävästä noesta. Tekijöiden mukaan selityksenä on pyrolyysinoen muodostuminen nokipartikkelien pinnalle. Vakuumi-pyrolyysin tuotteessa pyrolyysinokea muodostui vähemmän. Epäorgaanisista reaktiotuotteista tärkeimmät olivat ZnO ja ZnS ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), joita havaittiin kiteisinä materiaalin pinnalla.

Yhteenvetona voidaan todeta, että regeneroidun noen valmistus renkaista on mahdollista, mutta laadullisesti saatu tuote ei pysty kilpailemaan neitseellisen noen kanssa. Väitettään jopa, ettei pyrolyysinoella ja varsinaisella synteettisellä noella ole laadullisesti enää mitään tekemistä toistensa kanssa (Schnecko 1994).

### **Muut sovellukset**

Mielenkiintoisimpia ovat kokeilut tienrakennussektorilla. Hiiltä on käytetty bitumin lisäaineena kestopäällysteissä ja betonin lisäaineena (Ksaibati ym. 1995). Pyrolyysinoen oletetaan toimivan näissä olosuhteissa samaan tapaan kuin renkaiden valmistuksessa, ts. lujittavan materiaaleja. Betonisovelluksissa saadaan lisäksi parempi metallin tarttuminen ja tummemman värin vuoksi mm. jään parempi sulaminen betonipinnoista.

Pyrolyysihiiltä voidaan käyttää polttoaineena, mutta ongelmana on hienojakoisen pölyävän materiaalin käsittely.

### 3.4.3.2. Muut pyrolyysin sivutuotteet

#### **Pyrolyysiöljy**

Renkaiden pyrolyysistä saatavalla öljyllä on pieni viskositeetti ja korkea lämpöarvo, noin 42 MJ/kg. Usein pyrolyysiöljyn talteenotolle on perusteena mahdollisuus käyttää öljyä muualla kuin itse kierrätyslaitoksella. Öljyn rikkipitoisuus on kuitenkin melko korkea, noin 1 %. Mikäli öljy puhdistetaan, syntyy lisäksi jätevesiongelmia (Schmidt & Kreipe 1995). Kumin pyrolyysiöljy on vedetöntä ja ilmeisesti varsin stabiilia, mutta pitkäaikaismuutoksista ei ole tietoa.

Matalalämpötilapyrolyysi tuottaa pääasiassa alifaattisia yhdisteitä. Korkeassa lämpötilassa tuote on lähes täysin aromatisoitunut. Pääkomponentit ovat naftaleeni, metyyli-naftaleenit, ksyleeni, tolueni ja trimetyylibentseenit (Conesa ym. 1996). Kirjallisuudessa on raportoitu 23 - 61 %:n öljysaantoja (Mirmiran ym. 1992) riippuen reaktorityypistä ja reaktiolämpötilasta.

Pyrolyysiöljyä voitaneen käyttää paikallisesti polttoöljyn korvikkeena. Öljy sisältää arvokkaita kemikaaleja, kuten bentseeniä, ksyleeniä, tolueniä, styreeniä ja limoneeniä, ja periaatteessa taloutta voitaisiin parantaa öljyä jalostamalla. On myös esitetty, että öljy kelpaisi syötteenä öljynjalostukseen (Benallal ym. 1995). Aromaattisuuden vuoksi öljyn käyttö muualla on ilmeisen hankalaa.

Öljyä voidaan valmistaa kumirouheesta myös hydraamalla. Tuote on laadullisesti hyvää mutta kallista, joten on mielekkäämpää polttaa renkaat suoraan (Uder 1995).

#### **Pyrolyysikaasu**

Pyrolyysikaasun lämpöarvoksi on kirjallisuudessa raportoitu 35 - 40 MJ/m<sup>3</sup>, mutta se voi olla pienempikin riippuen inerttikaasujen määrästä. Kaasujen muodostuminen kasvoi 600 - 800 °C:n välillä 6,3 %:sta 37,1 %:iin (Conesa ym. 1996). Maksimisaannon lämpötilassa kaasun koostumus (tärkeimmät komponentit) oli seuraava: metaani 6,1 %, etaani 0,4 %, etyleeni 5,8 %, propyleeni 0,7 %, butyleeni 0,1 %, butaani 0,2 %, pentaani 0,4 %, bentseeni 6,8 %, tolueni 5 %, ksyleeni ja styreeni 3,2 %, vety 0,3 %, häkä 1 %, hiilidioksidi 3,6 % ja rikkivety 0,6 %. Kaasuja voidaan käyttää pyrolyysiprosessin lämpöenergiana. Kumin pyrolyysin tuloksia on kirjallisuudessa verrattu myös muovin pyrolyysin tuloksiin (Kaminsky & Sinn 1980).

Saksassa on kokeiltu myös kumirouheen kaasutusta ruskohiilen kanssa kiinteäkerroskaasuttimessa (Uder 1995). Tulosten mukaan pieni määrä (20 %) kumia ei kiinteäkerroskaasutuksessa tuottanut ongelmia.



### 3.4.3.3. Pyrolyysilaitoksia

Viimeisten 25 vuoden aikana on rakennettu lukuisa määrä pyrolyysilaitoksia eri puolille maailmaa. Yksikään niistä ei ole osoittautunut taloudellisesti kannattavaksi (Schnecko 1994). Taulukossa 18 on lähinnä pilottimitan romurenkaiden pyrolyysilaitoksia. Englannissa on panostoiminen laitos ja pilotti- ja laboratoriomitassa on käynnissä useita laitoksia eri maissa (Aurich 1994).

Taulukko 18. Pyrolyysilaitoksia maailmassa.

Prosessi tai yhtiö	Kapasiteetti	Sijainti	Käynnistys
Hypen Recycler <sup>1)</sup>	Panos	UK, Japani	1977
Kobe Steel <sup>1)</sup>	1t/h	Aioi/Japani	1978
Onahama Smelting and Refining <sup>1)</sup>	4t/h	Iwaki/Japan	1981
Kleenair <sup>1)</sup>	1t/h	Centralia/Wash	1986
Goodyear/Interco <sup>2)</sup>	37,5 t/d	USA	1977
Foster-Wheeler <sup>2)</sup>			
Deutsche Reifenpyrolyse <sup>2)</sup>	15 t/d	Saksa/Hampur	1982
Mannesmann Veba <sup>2)</sup>	48 t/d	Saksa	
Energy recovery	20 t/d	Japani/Osaka	
Vakuumi <sup>1)</sup>	0,25t/h	Kanada/Saint-Amable	1987
Beven Recycling <sup>3)</sup>	2 t/d (panos)	UK	1995

<sup>1)</sup> Roy & Unsworth (1989), <sup>2)</sup> Cypres & Bettens (1989). <sup>3)</sup> Williams ym. (1995)

Saksalainen Deutsche Reifenpyrolyse GmbH:n laitos oli leijukerrosreaktori. Laitos rakennettiin Hampurin yliopiston kehitystyön pohjalta. Myöhemmin rakennettiin laitos Ingostadtiin ABB:n alaisuudessa (Aurich 1994). Mannesman Veban rumpu-uuni oli 1989 suunnitteilla (Cypres & Bettens 1989). Vanhemmista pyrolyysilaitoksista on luetelo (Reforsk 1985). Ne ovat kaikki kokeiluluontoisia, pienen mitan laitoksia.

#### Tire Transformation Systems (TTS) (Tire Recyclers 1998)

TTS väittää olevansa ensimmäinen suuren mitan renkaiden pyrolyysilaitos maailmassa. Tavoitteena on käyttää 4,5 miljoonaa rengasta vuodessa eli noin 600 rengasta tunnissa. Renkaat syötetään rumpu-uuniprosessiin, jonka maksimilämpötila on noin 1 000 °C. Tavoitteena on käyttää pääosa tuotteista asfaltin lisäaineena. Renkaiden "gate-fee" on noin 45 USD/t.

#### TiRec-prosessi<sup>1)</sup>

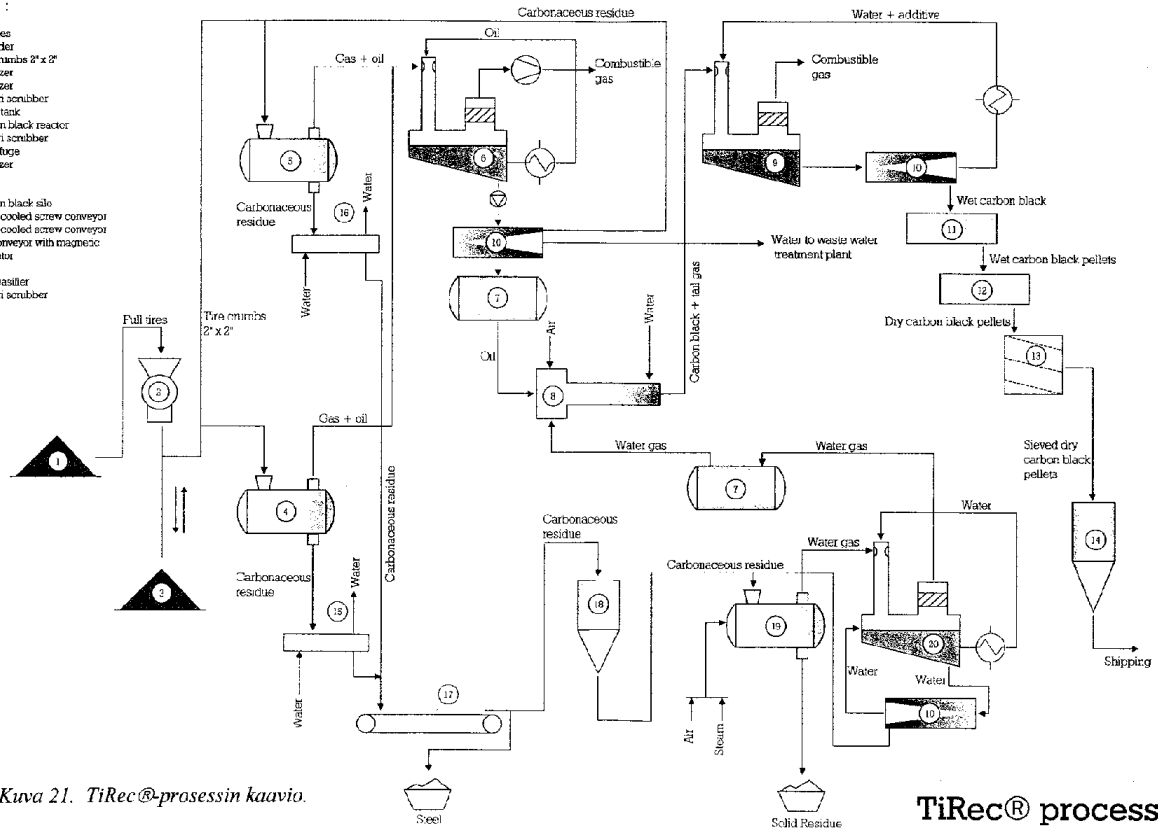
Prosessi on panostoiminen alipainereaktori. Laitoksen periaatekaavio on kuvassa 21. Kiinteät tuotteet, teräs ja hiili, erotetaan. Tuotekaasu kondensoidaan ja saatu öljy käyte-

<sup>1)</sup> Liederwald, 1998. Henkilökohtainen tiedonanto.

Legend :

1. Full trees
2. Shredder
3. Two crumbers 2' x 2'
4. Pyrolyser
5. Pyrolyser
6. Ventum scrubber
7. Buffer tank
8. Carbon black reactor
9. Ventum scrubber
10. Centrifuge
11. Pelletizer
12. Dryer
13. Sieve
14. Carbon black silo
15. Water cooled screw conveyor
16. Water cooled screw conveyor
17. Belt conveyor with magnetic separator
18. Bin
19. Coal casidier
20. Ventum scrubber

99



Kuva 21. TiRec®-prosessin kaavio.

TiRec® process flow  
18'000 tons/year

© by ALCTON ENGINEERING S.A., 1986

Note: The combustible gas from 6 and 3 is burned in a furnace (not shown), and the generated heat converted to steam and electricity.

tään noen valmistukseen. Noki on tarkoitus käyttää rengasnokena. Lähteen mukaan ensimmäinen tuotantolaitos (18 000 t/a) on perustettu Taiwaniin.

#### 3.4.4. Hydras

Jauhettu kumi voidaan hydrata 400 °C:ssa 300 barin paineessa. Näin saadaan korkealaatuisia synteesiöljyä, joka laadullisesti vastaa raakaöljyä ja voidaan syöttää öljynjalostusprosessiin. Kivihiilen hydrausta on tehty suuremmassakin mitassa (Veba Oel, Ruhrkohle Oel und Gas), mutta taloudellista kilpailukykyä ei normaalioloissa ole. Kivihiilen hydrauksesta saadun öljyn hinta lienee noin 35 USD/barrel. Erityisesti Yhdysvalloissa on panostettu jätteen (kumi, muovi) ja hiilen yhteisnesteytykseen. Kumin on sanottu parantavan hiilen hydrausominaisuuksia ja nesteytyksen taloutta (Ibrahim & Seekra 1995, Zmiersczak ym. 1996, Mostral ym. 1997, Tang & Curtis 1996).

Saksalaisessa menetelmässä (Kursawe 1995) kumirouhe liuotetaan 390 - 430 °C:ssa korkealla kiehuvaan fraktioon. Tämä sekoitetaan raakaöljytisleeseen (kp. <350 °C) ja hydrataan sen kanssa hydrokrakkerissa. Tuloksena on kolme tislettä:

- C<sub>1</sub> - C<sub>4</sub>-hiilivedyt
- C<sub>5</sub>-hiilivedyt, kp. <140 °C
- hiilivetyfraktio, kp. 140 - 250 °C.

Rikkivedyn vuoksi kaasu on johdettava pesuun ja rikinpoistoon. Keskimäinen tisle käsitellään katalyyttisesti reformerissa ja aromaattiset yhdisteet uutetaan. Kolmas fraktio voidaan jatkojalostaa etyleenilaitoksella ja sen jälkeen butadieeniutolla. Reaktorikuona voidaan käsitellä koksitehtaalla. Termisen krakkauksen kautta fraktio jakautuu bensiiniin, polttoöljyyn ja petrolikoksiin. Prosessissa saadaan talteen myös käytetty teräs, aktivaattorit (ZnO) sekä täyteaineet.

Prosessin etuna on elastomeerin nopea liukeneminen. Liukenemisnopeus on noin 10 kg kumia/m<sup>2</sup> s. Tämä mahdollistaa reaktorille huomattavan kapasiteetin. Yksi reaktori voisi käsitellä 120 000 t/a. Laitos pystyisi käyttämään öljynjalostamon hukkalämpöä ja toisaalta tuotteet voitaisiin syöttää oleviin prosessiyksiköihin.

#### 3.4.5. Kumin regenerointi eli devulkanointi

Kumin devulkanointi oli käytössä jo 1800-luvulla. Vanhoissa devulkanointimenetelmissä kumin annettiin reagoida pitkään aikaa korkeassa lämpötilassa kemikaalien (happo, emäs) kanssa, jolloin polymeeriketjut osittain pilkkoutuivat. Vuonna 1953 kehitettiin ensimmäinen jatkuvatoiminen devulkanointiprosessi (MacKillop & Myhre 1996). Taloudellisista ja ympäristösyistä nämä laitokset ovat nykyään lähes täysin hävinneet. Uusia myrkyttömiä ja matalassa lämpötilassa toimivia devulkanointitekniikoita on kehit-

teillä (MacKillop & Myhre 1996), joissakin tapauksissa sovelletaan mikroaaltoja, ultraääntä tai biologista hajotusta. On myös kokeiltu paisuttamista tolueenissa, minkä jälkeen jauhatusergian tarve on pienempi (Leca & Runcan 1996).

Kumin regeneroinnissa jättekumi saatetaan plastiseen muotoon tietyn käsittelyn avulla. Prosessissa tapahtuu kuitenkin molekyylipainon alenemista, ja tuotteiden fysikaaliset ominaisuudet ovat heikommat kuin uudella kumilla. 5 - 10 %:n kumiregeneraatin käyttö ei kuitenkaan sanottavasti vaikuta tuotteiden laatuun. Regenerointiprosesseja on useita, mutta kaikissa kumi on ensin jauhettava hyvän kemikaalien sekoittamisen ja lämmönsiirron vuoksi. Samoin kuidut ja metalli on poistettava. Kumityypistä riippuen energian kulutus on noin 1,7 kWh/kg (Kursawe 1995).

Seuraavat devulkanointiprosessit voidaan mainita:

- Autoklaaviprosesseissa kumijauhe ja kemikaalit (sinkki- ja kalsiumkloridit, pehmitinöljy, terva, katalyytti, jne.) kuumennetaan höyryllä (180 °C, 15 bar) 8 - 12 tuntia. Kuidut liukenevat ja kumi pehmenee. Vesifaasi erotetaan ja regeneraatti kuivataan jatkokäsittelyä varten.
- Mekaanisissa prosesseissa, jotka ovat jatkuvatoimisia, kumi syötetään extruuderiin kemikaalien kanssa (205 °C, 5 min). Kumi saadaan kuivana jatkokäsittelyä varten.
- Mikroaltondevulkanoinnissa kumirouhe (6 - 10 mm) syötetään mikroaltonuuniin (260 - 350 °C) noin viideksi minuutiksi.

Devulkanoitu tai regeneroitu kumi sekoitetaan öljyjen ja täyteaineen kanssa ja kalantroidaan. Hankaluutena regeneroinnissa on luonnollisesti kumien nykyinen laaja kirjo. Luonnonkumi on suhteellisen helppo regeneroida, mutta synteettinen kumi ja usean kumilaadun sekoitus käyttäytyvät ongelmallisemmin. Devulkanoidun kumin käyttö on laskenut jyrkästi toisen maailmansodan jälkeen, jolloin 32 % kumista oli devulkanoitua, nykyisin noin 1 %. Syynä ovat paitsi kumilaatujen suuri määrä ja renkaiden laatuvaatimusten kohoaminen myös taloudelliset ja ympäristöseikat. Yhteenvetona devulkanoinnin ongelmista voidaan todeta:

- Renkaiden käytössä regeneroidun kumin käyttö on vaikeutunut yhä kovempien laatuvaatimusten vuoksi.
- Muovi on pitkälti syrjäyttänyt monet perinteiset kumituotteet, joihin devulkanoitu kumi voisi soveltua (anturat, matot, akut jne.).
- Regenerointilaitokset eivät täytä nykypäivän ympäristö- ja työsuojeluvaatimuksia.
- Kumipurun valmistus on halvempaa (300 - 550 USD/t) kuin regeneraatin (550 - 1 200 USD/t) ja sitä voidaan periaatteessa käyttää vastaavissa kohteissa, ts. regenerointilaitoksen talous on heikko.

Poikkeuksena edellä kerrotusta ovat eräät kehitysmaat, kuten Brasilia, Intia ja Kiina.

## 4. Kumiromun ja ASR:n käyttö polttoaineena Suomessa

### 4.1. Yleistä

Suomessa syntyvän kumiromun ja ASR:n määrä on yhteensä noin 50 000 t/a. Rengasromua syntyy 30 000 t/a (250 GWh/a) ja ASR:n määrä on 20 000 - 30 000 t/a (85 GWh/a). Rengasmurska käytetään tällä hetkellä suurimmaksi osaksi tienrakennuksen raaka-aineena ja sementtiuunin polttoaineena. Muut keskeiset käyttömuodot ovat muu energiakäyttö ja pinnoittaminen. Autonpaloittamojäte menee kokonaisuudessaan kaatopaikalle. Rengasromun vieminen yleiselle kaatopaikalle on kielletty, ja ASR:n osalta erikoiskaatopaikoillekin tulee jatkossa lisää kustannuspaineita. Koska jätefraktiot ovat erilliskerättyjä ja lämpöarvo on korkea, käyttö energiaksi on herättänyt meilläkin kiinnostusta. Kumiromun lämpöarvo on yli 30 MJ/kg ja paloittamojätteenkin 10 - 20 MJ/kg, ja erityisesti kumiromu on varsin puhdasta polttoainetta. Kumiromun ja vertailupolttoaineiden polttoaineominaisuuksia on taulukossa 19.

Taulukko 19. Rengasromun, ASR:n ja vertailupolttoaineiden polttoaineominaisuuksia.

Materiaali	Lämpöarvo MJ/kg	Kosteus %	“Tuhka” %	S %	Cl %	Tilavuuspaino kg/m <sup>3</sup>
Kumirouhe	39	0,5	4,3	1,9	0,03	390
Rengasmurska	32	1	12	1,2	0,8	400
ASR (fluffi) > 8 mm	14	10	50	0,3	0,5	150
ASR (fluffi alite) < 8 mm	0	12	80	0,4	3,2	
ASR, UK-kumi	21	7	24	0,7	0	380
Turve	19	40	5	0,1	0,1	350
Kivihiili	25	5	15	1		

Muualla saatujen kokemusten perusteella kumiromu kelpaa murskauksen jälkeen sellaiseen polttoaineeksi. Käytännössä on Suomessa kuitenkin kohdattu erilaisia hankaluuksia pitempiäaikaisessa käytössä. Hankaluudet ovat yleensä liittyneet metallilankoihin ja niiden aiheuttamiin häiriöihin syöttölaitteissa. ASR on haitta-ainepitoisuuden vähentämiseksi ja lämpöarvon nostamiseksi luokiteltava ainakin kattilalaitoskäytössä. Autonpaloittamojätteen (ASR:n) haitta-ainepitoisuutta voitaisiin alentaa ja polttoainearvoa nostaa melko yksinkertaisen mekaanisen käsittelyn avulla. Tällöin 1/3 - 1/2 paloittamojätteestä voitaisiin polttaa esimerkiksi sementtiuunissa. Kattilakäytössä ASR:n osuuden tulee olla riittävän pieni tuhkan laadun ja päästöjen kannalta. Luokitellun paloittamojätteen käsittely ja syöttö ei aiheuttane siinä määrin ongelmia kuin kumiromun käsittely.

## 4.2. Sementtiuunit

Suomessa on mahdollista käyttää kumiromua ja ASR:ää lisäpolttoaineena lähinnä Finnsementti Oy:n Paraisten tehtaalla, jossa koetoiminta on aloitettu<sup>1</sup>. Paraisten tehtaalle on rakennettu syöttölaite ja koetoiminta käynnistyi keväällä 1998. Tavoitteena on noin 1 t/h kapasiteetti, joka korvaa 15 % esilämmittimen polttoainevirrasta. Pieniä käynnistymisvaikeuksia on ollut hihnavaa'an ja kuljetinhihnan käytössä. Tavoitteena oli saada syöttö toimintaan kesäkuun 1998 aikana. Paraisten tehtaan potentiaalinen kapasiteetti on noin 6 000 t/a<sup>2</sup>. Pohjoismaisia markkinoita ajatellen esimerkiksi Sliten sementtiuuni voi tällä hetkellä ottaa 6 t/h kumirouhetta, ja jatkossa on tarkoitus vielä nostaa vaihtoehtoisten polttoaineiden osuutta. Paraisten uunin raaka-aine on toistaiseksi tullut Nokian Renkaat Oy:n romurengasvarastolta. Sementtiuunissa prosessiolosuhteet (viipymäaika, palamislämpötila, sekoittuminen ja alkalinen ympäristö) ovat hyvät jätteiden käsittelemiseksi.

Yhteenvedona eduista, joita saadaan rengasromun tai muiden jättepolttoaineiden (ASR, muovijäte, jäteliuottimet jne.) poltosta sementtiuunissa, voidaan todeta:

- jätteen energian talteenotto (kaatopaikkasijoittaminen ja -kustannus vältetään)
- sementin tuotantokustannusten aleneminen (polttoaineen hintakysymys)
- ei kiinteää jäännöstä, vaan epäorgaaninen aines sitoutuu klinkkeriin
- CO<sub>2</sub>-päästöjen aleneminen sopivilla polttoaineilla
- saatavilla olevan teknologian käyttö energiapitoisten ja hankalien jätteiden hyödyntämiseen
- fossiilisten polttoaineiden tarve pienenee
- jätteiden polton kannalta yhtä luotettava (edellyttää savukaasupäästöjen hallintaa) mutta edullisempi kuin varsinaiset jätteenpolttolaitokset.

Kun vaihtoehtoisten polttoaineiden sisältämän epäorgaanisen aineen määrä on usein jopa alempi kuin kivihiilen, hivenainemäärät ovat lopputuotteessa samalla tasolla tai alemmat kuin kivihiieltä käytettäessä. Myös savukaasupuolella on vaihtoehtoisten polttoaineiden kohdalla mahdollista päästä alemmalle tasolle kuin kivihiilen kohdalla, erityisesti rikin osalta. Rajoittavana tekijänä rengasromun sementtiuunikäytössä on kilpailu muiden polttoaineiden kanssa.

Mikäli Lappeenrannan uuniin rakennetaan myös renkaiden syöttö, yhtenä skenaariona on, että Etelä-Suomessa kertyvät renkaat poltetaan suurimmaksi osaksi kahdessa sementtiuunissa.

---

<sup>1</sup> Ralf Ek, tehtaanjohtaja, suullinen tiedonanto, 1998

<sup>2</sup> Kari Mäkelä, FinReci, toimitusjohtaja, suullinen tiedonanto, 1998

### 4.3. Kiinteän polttoaineen kattilat

Käyttö kiinteiden polttoaineiden kattiloissa on yleistä muualla, ja Suomessakin on jonkin verran kokemusta. Käyttöä selluteollisuudessa rajoittavat lähinnä

- marginaalinen etu polttoainekustannuksissa
- mahdollisesti tarvittavat investoinnit
- mahdolliset päästökysymykset (vaikutus tuhkan hyötykäyttöön, savukaasupäästöt)
- heikko sijainti (renkaiden tai muun romun heikko saatavuus)
- käsittely- ja kuonaantumisongelmat.

Suomessa on rengasmurskan polttamisesta seospolttoaineena kokemusta mm. Enson Anjalankosken laitoksella. Laitoksella on leijukerroskattilassa ns. palkkiarina, jossa kärkeän aineksen poisto on erityisen tehokasta. Normaaliin arinaan verrattuna tuhkanpoistaukkojen pinta-alaa on suurennettu 3 %:sta 30 %:iin.

Enson Anjalankosken laitoksella on poltettavalle materiaalille asetettu seuraavat laatuvaatimukset<sup>1</sup>:

- $S < 1 \%$
- Cl max 0,1 - 0,5 %
- Al < 0,1 %
- palakoko 50 x 50 x 50 mm
- tuhkan sulamispiste > 1 100 °C (puolipallo)
- tasalaatuisuus
- ei pöly- tai hajuhaittoja
- ei työsuojeluvaateita
- ei saa työllistää
- osuus energiasta < 20 %.

Renkaiden osuus oli kokeissa 20 - 28 % energiasta. Raudan osuus oli huomattava, 20 - 25 %, mikä johtui ilmeisesti siitä, että murskan raaka-aineessa oli huomattavasti kuorma-autojen renkaita. Tehdyissä kokeissa rautaa kertyi 7,5 t/d. Materialain syötössä, poltossa tai päästöjen hallinnassa ei ollut ongelmia. Sen sijaan rautalankojen (pituus 5 - 20 cm) poisto petistä aiheutti ongelmia. Ratkaisuna on raudan poisto materiaalista ennen syöttöä ja murskauksen tehostaminen tai raudan poiston tehostaminen petistä, jolloin petimateriaalin kiertoa lisätään ja lisäksi se seulotaan raudan poistamiseksi <sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Ari Frantsi, tuotantopäällikkö, suullinen tiedonanto, 1998

<sup>2</sup> Jouni Kinni, tuotepäällikkö, suullinen tiedonanto, 1998

Kvaerner Pulpingilla on Yhdysvalloissa (Champion Inc. Sheldon, TX) pitkäaikaisia kokemuksia vastaavasta selluteollisuuden kattilasta. Renkaiden määrä on ollut 10 - 20 % polttoainevirrasta. Renkaista on poistettu palleraudat ennen murskausta.

Muita kokeiluja on tehty Imatran Voima Oy:n Kauttuan laitoksella ja UMP Kymmenen Voikkaan tehtaalla (Rengaskierrätys 1997).

Yhteenvedon voidaan todeta, että rengasromua voidaan polttaa seospolttoaineena selluteollisuuden kattiloissa tai muissa sopivissa polttolaitoksissa. Ongelmia saattaa syntyä mm. syötössä ja tuhkanpoistossa. Jos pääpolttoaine on kovin erityyppistä, esimerkiksi kuorta, myös tuhkan laatu voi olennaisesti muuttua, mikäli seospolttoaineen osuus on korkea. Lisäksi rengasmäärä on Suomessa niin pieni, että voimalaitokset joutuvat tarkkaan punnitsemaan renkaiden käyttöä polttoaineena.

#### 4.4. Kaasutus

Polton ohella on tutkittu muita vaihtoehtoja, kuten kaasuttamista ja seoskaasuttamista sekä tuotekaasun polttoa kattilalaitoksessa. Tällainen koe on tehty Lahden Lämpövoima Oy:n keväällä 1998 käyttöönotetulla laitoksella<sup>1</sup>. Kevään aikana tehtiin ensimmäinen kahden viikon koejakso syöttämällä kaikkiaan 200 t murskattua rengasromua puuhakkeen joukossa kaasuttimeen. Aluksi tavoitteena oli 10 %:n (4 - 5 m<sup>3</sup>/h) materiaalivirta (kumin osuus kierrätyspolttoaineesta), mutta ongelmien vuoksi syöttöä on jouduttu alentamaan noin 1 m<sup>3</sup>/h tasolle. Hankaluutena on ollut teräslankojen ja lahkavyyhtien kertyminen, josta on aiheutunut sulkusyöttimien häiriöitä sekä polttoaineen syötössä että tuhkanpoistossa. Ongelman ratkaisuksi on esitetty:

- Palakoko pienennetään kahdesta tuumasta puoleentoista.
- Käytetään vain henkilöauton renkaita murskan raaka-aineena.
- Käytetään magneettierottimia teräksen määrän alentamiseksi.

Renkaiden tai ASR:n kaasuttaminen pienessä määrin esimerkiksi biopolttoaineen joukossa on mahdollista ilman suurempia ongelmia. Kumin kappalekoon olisi oltava vain samansuuruinen tai pienempi kuin muun kaasutettavan materiaalin. Tuotekaasu voidaan sen jälkeen polttaa kattilalaitoksessa. Etuna on se, että tarvittavat muutokset itse kattilalaitoksessa ovat pieniä ja jätefraktiosta ja pääpolttoaineesta saadaan tuhka erilleen. Pölypolttokattilassa polttoaineen kaasuttaminen on käytännössä ainoa tapa hyödyntää rengasmurskaa.

---

1 Olavi Lindholm, voimalaitospäällikkö, suullinen tiedonanto, 1998



## 4.5. EcoMaken kumiromun polttolaitos

EcoMake on rakentanut Siilinjärvelle ensimmäisen pelkästään autonrenkaita polttavan laitoksen, joka otettiin käyttöön noin vuosi sitten (5/97). Laitoksen lämpöteho on noin 0,5 MW, ja se voi polttaa noin 600 t/a rengasromua, mikä vastaa noin 100 000 asukkaan vuotuista kertymää. Renkaat pilkotaan vain kahdeksaan osaan. Esikammiossa tapahtuu pyrolyysi tai kaasutus sekä metallin ja tuhkan erotus. Kaasut poltetaan erillisessä kammiossa. Tämän jälkeen on vielä kaasun pesu. Laitosta on tarkoitettu markkinoida myös muille jätteille, kuten muoville, jättepuulle ja pelleteidulle yhdyskuntajätteelle. Tarkempaa tietoa laitteen toimivuudesta ei ole. Koska metallilangat ovat suurillakin laitoksilla ongelma, ne aiheuttanevat myös tällä laitoksella vaikeuksia.

## 4.6. Taloudellista tarkastelua

ASR:n kohdalla kaatopaikkakustannukset ovat tällä hetkellä 50 - 250 mk/t. Lajitellun ASR:n lämpöarvo vastaisi noin puolta kivihiilen lämpöarvosta. Kumiromun lämpöarvo on parempi kuin kivihiilen, ja polttoaineena sen arvo vastaa teoriassa kivihiiltä:

Polttoaine	mk/t	mk/MWh
Kivihiili, verollinen (12/97), sisämaassa/rannikolla	472/437	67/62
Kivihiili, veroton	192	27
Turve, jyrshinturve		45
Rengasromu, teoreettinen	240	27
ASR, lajiteltu, teoreettinen	105	27

Koska sementtiuunin lisäpolttoaineiden käyttö vaatii lisäinvestointeja, käytännössä ollaan tilanteessa, jossa jätteen tuottaja on joko maksajan roolissa tai saa jättepolttoaineesta selvästi sen teoreettista arvoa alemman korvauksen. Sementtitehdas joutuu tekemään investoinnin, johon kuuluvat mm. vastaanottotasku vaakoineen ja varsin kallis kuljetin, joka siirtää polttoaineen syklonitorniin (esilämmittimeen), lisäksi mahdollisesti varastotilaa jne. Investointina tämä on 0,5 - 2 milj. mk. Vuotuinen käyttömäärä on lisäksi rajoitettu, joten investointi on suhteellisen kallis.

VOIMALAITOSKÄYTÖSSÄ rengasromu joudutaan murskaamaan hiukan pienempään kappalekokoon kuin sementtiuunin tapauksessa, jolloin murskauskulut nousevat. Karkean murskauksen kustannukset ovat yli 100 mk/t. Mikäli voimalaitoksella tehostetaan petimateriaalin kierrätystä ja järjestelmään lisätään rautalankojen poisto, investointi on 0,5 - 0,7 milj. mk<sup>1</sup>. Rengasromun energiakäytön kilpailijana on Suomessa ollut maanrakennuskäyttö. Laskennallinen arvo maatäytössä on ollut 75 mk/m<sup>3</sup> eli 190 - 300 mk/t.

---

<sup>1</sup> Olavi Lindholm, voimalaitospäällikkö, suullinen tiedonanto, 1998

Tämä ylittää todennäköisen polttoainehinnan sementtitehtaalla, mutta voimalaitoksella (verollinen polttoaine) tilanne on energiakäytön kannalta edullisempi, jos laitoksella ei tarvita mitään lisäinvestointeja. ASR:n laatu on vaihteleva, ja sen valmistus polttoaineksi vaatii vielä lisäselvityksiä. Todennäköistä on, että myös Suomessa ainakin osa ARS:ää voidaan hyödyntää energiana.

#### **4.7. Yhteenveto**

Suomessa on hyvät tekniset edellytykset käyttää suurin osa rengasromusta energiaksi sementtiteollisuudessa ja energiantuotannossa. Kehitystyötä vaativat kuitenkin mm. toimintavarman tuhkanpoiston (rautalangat) kehittäminen rengasromun kohdalla tai metallin osuuden vähentäminen syötössä. ASR:n osalta olisi selvitettävä mm. mekaanisella käsittelyllä saavutettava polttoainelaadun parannus ja arvioitava sitä kautta, mikä osuus olisi hyödynnettävissä energiaksi. Saadun tuotteen käyttäytymistä sementtiuunissa tulisi ensisijaisesti selvittää mm. oikean käyttömäärän määrittämiseksi. Jatkossa tulisi selvittää myös sivupolttoaineiden tuhkien vaikutus pääpolttoaineen tuhkan laatuun ja hyötykäyttöön.

## Lähdeluettelo

- Ahmed, R., van de Klundert, A. & Lardinois, I. (toim.). 1996. Rubber waste. Options for small scale resource recovery. 126 s.
- AMM. 1997. American Metal Market, Seiler in Swiss venture, July 31, s. 7.
- Arnaud, A. 1997. Elimination of automobile shredder residue in Switzerland. Recovery, Recycling, Re-integration, Geneva, 4 - 7 Feb. 1997. Vol. V. S. 11 - 13.
- Astl, A. 1997. Car recycling in practice. Different ways to drain a car efficiently. ISWA Yearbook. S. 216 - 217.
- Aurich, H.-P. 1994. Pyrolyse, Hydrierung, Gaserzeugung. KGK Kautchuk Gummi Kunststoffe, vol. 47, no. 8, s. 596 - 601.
- Balbo, M., Francois, A., deLadebat, H. & Mosnier, F. 1997. Cement kiln incineration, a viable waste management solution. ISWA Yearbook 1997. S. 123 - 127.
- Benallal, B., Roy, C., Pakdel, H., Chabot, S. & Poirier, M.A. 1995. Characterization of pyrolytic light naphtha from vacuum pyrolysis of used tyres. Comparison with petroleum naphtha. Fuel, vol.74, no. 11, s. 1589 - 1594.
- Bilitewski, B., Hädtle, G. & Marek, K. 1989. Usage of carbon black and activated carbon in relation to input and technical aspects of the pyrolysis process. Julkaisussa: Ferrero, G. L., Maniatis, K., Bekens, A. & Bridgwater, A. V. (eds.). Pyrolysis and gasification. London: Elsevier Applied Science. S. 98 - 105.
- Blumenthal, M. 1993. The growing use of scrap tires in cement kilns. Resource Recycling, Dec., s. 21 - 26.
- Blumenthal, M. 1996a. Use of scrap tires as a supplemental fuel in pulp and paper mill boilers. Rubber Association of Canada Symposium on Scrap Tires, Toronto, 6 March 1996.
- Blumenthal, M. 1996b. Use of scrap tires as a supplemental fuel in cement kilns. Rubber Association of Canada Symposium on Scrap Tires Toronto, 6 March 1996.
- Bressi, G. (toim.). 1995. Recovery of materials and energy from waste tyres. ISWA Working Group Report. 94 s.
- Chaalal, A., Darmstadt, H. & Roy, C. 1996. Acid-base methods for the demineralization of pyrolytic carbon black. Fuel Processing Technology, vol. 46, s. 1 - 15.

- Conesa, J. A., Font, R. & Marcilla, A. 1996. Gas from the pyrolysis of scrap tires in a fluidised bed reactor. *Energy & Fuels*, vol. 10, s. 134 - 140.
- Cortesi, P. 1997. Recycling of plastics from cars: proposals from the RECAP project. *Recovery, Recycling, Re-integration*, Geneva, 4 - 7 Feb. 1997.
- Cypres, R. & Bettens, B. 1989. Production of benzoles and active carbon from waste rubber and plastic materials by means of pyrolysis with simultaneous post-cracking. *Julkaisussa: Ferrero, G. L., Maniatis, K., Bekens, A. & Bridgwater, A. V. (eds.). Pyrolysis and gasification*. London: Elsevier Applied Science. S. 209 - 229.
- Darmstadt, H., Roy, C. & Kaliaguine, S. 1994a. Inorganic components and sulphur compounds in carbon blacks from vacuum pyrolysis of used tires. *KGK Kautchuk Gummi Kunststoffe*, vol. 47, no. 12, s. 891 - 895.
- Darmstadt, H., Roy, C. & Kaliaguine, S. 199b. Esca characterisation of commercial carbon blacks and of carbon blacks from vacuum pyrolysis of used tires. *Carbon*, vol. 32, no. 8, s. 1399 - 1406.
- Darmstadt, H., Roy, C. & Kaliaguine, S. 1995. Characterisation of pyrolytic carbon blacks from commercial tire pyrolysis plants. *Carbon*, vol. 33, no. 10, s. 1449 - 1455.
- Day, M., Cooney, J. D. & Shen, Z. 1996. Pyrolysis of automobile shredder residue: an analysis of the products of a commercial screw kiln process. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 37, s. 49 - 67.
- Day, M. & Shen, J. 1997. Automobile shredder residue. An assessment of thermal recycling as a recovery option. Ottawa: NRC. 180 s.
- Dervin, C., Waldron, D. J. & Haas, J. 1997. Waste tyre energy recovery saves disposal costs. *Modern Power Systems*, March, pp. 35 - 28.
- Disler, W. & Keller, C. 1997. Co-incineration of non-metallic automobile shredder waste (RESH) in solid waste incineration plants. *Recovery, Recycling, Re-Integration*, Geneva, 4 - 7 February 1997.
- ECRIS. 1998. Ett forskningsprojekt för miljöanpassad bilåtervinning 1994 - 1998. (ECRIS Rapport 98.17.)
- Energia. 1997. Lahden Lämpövoima aikoo rakentaa kaasutuslaitoksen. Yhdyskuntajätettä hyödynnetään sähköksi ja lämmöksi. *Energia*, no. 6 - 7, s. 32 - 33.
- Esser-Schmittmann, W. & Peters, K. 1992. Waste gas cleanup with activated lignite coke. *ENTSORGA Magazinen*, no. 10/92.

Frisch, K. C., Sendijarevic, A., Sendijarevic, V. & Klempner, D. 1995. Utilization of polymeric isocyanate-based binders in recycling of automobile shredder fluff. Cellular polymers III, Coventry, 27 - 28 April 1995. S. 1 - 8.

Froelich, D., Correc, Y., Kassamaly, A. & Meny, H. 1995. Set up of plastic recycling networks for end of life vehicles. Auto Recycle '95, Dearborn, Michigan, 15 - 16 Nov. 1995. S. 301 - 307.

Hakes, S., Cha, C. Y. & Plancher, H. 1993. Recycling scrap tires and waste oil. Proc. Energex'93, 5th International Energy Conference, 21 - 22 Oct. 1993, Seoul, Korea. Vol. 5. S. 166 - 180.

Hamm, M. 1993. Stoffliches Recycling von Shredderleichtgut durch Pyrolyse im Drehrohrföfen. Dissertation. Essen. 125 s.

van Heek, K. H., Strobel, B. O. & Wanzl, W. 1994. Coal utilization processes and their application to waste recycling and biomass conversion. Fuel, Vol. 73, no. 7, s. 1135 - 1143.

Hernborg, N. 1995. Research into future car recycling, Auto Recycle '95, Dearborn, Michigan, 15 - 16 Nov. 1995. S. 289 - 298.

Ibrahim, M. M. & Seekra, M. S. 1995. Free radical monitoring of the coprocessing of coal with chemical components of waste tires. Fuel Processing Technology, vol. 45, s. 213 - 219.

Kaminsky, W. & Sinn, H. 1980. Pyrolysis of plastic waste and scrap tires using a fluidized-bed process. ACS Symp. Ser., vol. 130, s. 421 - 439.

Kaminsky, W., Rössler, H. & Sinn, H. 1991. Pyrolyse von Elastomeren und Gummi zur Wertstoffrückgewinnung. Kautschuk Gummi Kunststoffe. Vol. 44, no. 10, s. 846 - 851.

Karstensen, K. H. & Ingebrigtsen, N. 1997. Utilisation of wastes as co-fuel in cement kilns - An alternative to dedicated incinerators? 3rd Int. Management Conf. Waste to Energy, Copenhagen, 4 - 5 Dec. 1997.

Kawakami, A., Inoue, K., Tanaka, H. & Sakai, T. 1980. Pyrolysis process for scrap tires. ACS Symp. Ser., vol. 130, s. 557 - 572.

Ksaibati, K., Cha, C. Y. & Plancher, H. 1995. A new bitumen modifier produced by co-retorting scrap tyres and waste oils. Road & Transport Research, vol. 4, no. 2, s. 46 - 59.

Kursawe, L. 1995. [Http://www.fh-wolfenbuettel.de/fb/p/RE/arbeiten/reifen.html](http://www.fh-wolfenbuettel.de/fb/p/RE/arbeiten/reifen.html).

- Lanoir, D., Trouve, G., Delfosse, L., Froelich, D. & Kassamaly, A. 1997. Physical and chemical characterization of automotive shredder residues. *Waste Management & Research*, vol. 15, s. 267 - 276.
- Lantner, J. S. 1995. Low-temperature pyrolysis for scrap tire reclaim. *Auto Recycle '95*, Dearborn, Michigan, 15 - 16 Nov. 1995, s. 277 - 287.
- Liaskos, J. 1994. Rubber tyre recycling. *UNEP Industry and Environment*, July-September, s. 26 - 29.
- LIEKKI-projekti Y 45. 1997. Sementtiteollisuuden vaihtoehtoiset polttoaineet. Julkaisu: LIEKKI-vuosikirja 1997. Åbo: Åbo Akademi. S. 899 - 911.
- MacKillop, D. & Myhre, M. J. 1996. Devulcanization of scrap rubber. *Rubber Association of Canada Symposium on Scrap Tires*, Toronto 6 March 1996.
- Mirmiran, S., Pakdel, H. & Roy, C. 1992. Characterization of used tire vacuum pyrolysis oil: nitrogenous compounds from the naphtha fraction. *J. of Anal. and Appl. Pyrolysis*, vol. 22, s. 205 - 215.
- Mostral, A. M., Murillo, R., Palacios, J. M., Mayoral, M. C. & Callén, M. 1997. Iron-catalyzed coal-tire coprocessing. Influence on conversion products distribution. *Energy & Fuels*, vol. 11, s. 813 - 818.
- Niessen, W. R., Marks, C. H. & Sommerland, R. E. 1996. Evaluation of gasification and novel thermal processes for the treatment of municipal solid waste. Golden, CO: NREL. (NREL Report.).
- Peltonen, P. 1996. Rengasjauheen uusiokäyttö asfaltissa ja muiden käyttömuotojen tarkastelu. Espoo: VTT Yhdyskuntatekniikka. 43 s. (Tutkimusraportti 325.)
- Piskorz, J., Majerski, P. & Radlein, D. 1996. A new recycling technology for scrap rubber and tires. The Waterloo Carbon Black (WB) Process. *Proc. 76<sup>th</sup> Annual Meeting of the Rubber Association of Canada, Rubber Recycling Symposium & Exhibition*, Toronto, 6 - 7 March 1996.
- Plastics recovery in perspective. 1996. Plastic consumption and recovery in Western Europe 1994. Association of Plastic Manufacturers in Europe. Brochure 2002/GB/06/96. 10 s.
- Poston, I. E. 1995. An update on VRP programs at the vehicle recycling development center. *Auto Recycle '95*, Dearborn, Michigan, 15 - 16 Nov. 1995. S. 13 - 26.
- Proposal for a Council Directive on End of Life Vehicles. 1997. COM (97) 358.

Pöttinger, W. 1995. Automobile recycling in Europe - The BMW concept. Auto Recycle '95, Dearborn, Michigan, 15 - 16 Nov. 1995. S. 231 - 263.

Reforsk-projekt rapport. 1985. Gummidäcksåtervinning i Sverige FoU Nr. 1. 125 s.

Rengaskierrätys 2/1997.

Rensfelt, E. & Östman, A. 1996. Gasification of waste. Summary and conclusions of twenty-five years of development. IEA Biomass Agreement Task X. Gasification of Waste. 62 s. (TPS Report 96/19.)

Repo, A. 1997. Renkaiden hyödyntäminen tierakenteissa. Helsinki: Tielaitos. 67 s.

Rheinbraun Information: Utilisation of lignite coke in flue gas purification.

Roy, C., Rastegar, A., Kaliaguine, S., Darmstadt, H. & Tochev, V. 1995. Physico-chemical properties of carbon blacks from vacuum pyrolysis of used tires. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, vol. 23, s. 21 - 30.

Roy, C. & Unsworth, J. 1989. Pilot plant demonstration of used tires vacuum pyrolysis. *Julkaisussa: Ferrero, G. L., Maniatis, K., Bekens, A. & Bridgwater, A. V. (eds.). Pyrolysis and gasification. London: Elsevier Applied Science. S. 180 - 189.*

Rubber World. 1994. Vol. 210, no. 2 (Editorial).

Rudolph, K. V., Passvoss, T., Gotthelf, H. & Wilms, H. F. 1997. Stand der Behandlung und Verwertung von Shredderrückständen aus Altautos. *Müll und Abfall*, vol. 12, s. 745 - 755.

Rydén, E. 1995. Bilskrot - Möjlighet eller miljöhot? Lund: IIIIEE, University of Lund. 109 s. (RR 1:1995.)

Schmidt, U. & Kreipe, E. 1995. Möglichkeiten zur thermischen Verwertung von Altgummi. *KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe*, vol. 48, no. 4, s. 244 - 253.

Schnecko, H. 1994. Rubber recycling. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, vol. 47, no. 12/94, s. 885 - 890.

Scrap Tire News, November 1998.

Sendijarevic, V., Pokorski, B., Klempner, D. & Frisch, K. C. 1997. Recent developments in shredder downstream separation processes and recycling options for automotive shredder residue. Warrendale: SAE. (SAE Technical Paper Series, 970663.)

- Sendijarevic, V., Sendijarevic, A., Chen, Z., Ullah, H., Klemner, D. & Frisch, K. C. 1995a. Recycling of automotive shredder residue using isocyanate-based binders. *Polyurethane*, 26 - 29 Sep., s. 397 - 405.
- Sendijarevic, V., Sendijarevic, A., Ullah, H. M., Frisch, K. C. & Klemner, D. 1995b. Utilisation of automotive shredder residue in composite applications. *Advanced Composites*, Dearborn, Michigan, 6 - 9 Nov. 1995. S. 617 - 627.
- Sendijarevic, V., Sendijarevic, A., Ullah, H., Ghazi, S., Pokorski, B., Klemner, D. & Frisch, K. C. 1996. Recycle of automotive shredder residue. *Automotive & Transportation Interiors Expo Conf.* 1996. S. 70 - 80.
- Stark, R. 1995. Environmental impact of a tire. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, vol. 48, no. 6, s. 448 - 453.
- Ståhlberg, P., Simell, P., Wihersaari, M. & Filen, H. 1989. Jätepolttoaineiden vastavirta-  
takaasutus. Espoo: VTT. 60 s. + liitt. 7 s. (VTT Tiedotteita 967.)
- Stopek, D. J. 1996. Co-firing tire-derived fuel. *Rubber Association of Canada Symposium on Scrap Tires*, Toronto, 6 March 1996.
- Tang, Y. & Curtis, C. W. 1996. Thermal and catalytic coprocessing of waste tires with coal. *Fuel Processing Technology*, vol. 46, s. 195 - 215.
- Tire Recyclers, Inc. 1998. [Http://pages.prodigy.com/tire/home.htm](http://pages.prodigy.com/tire/home.htm).
- Uder, H.-P. 1995. Altgummi-Ververtung. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, vol. 48, no. 12/95, s. 909 - 912.
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 1996. 5. painos. Vol. A 5. S. 152 - 157.
- de Val, D. 1994. Återvinning av däck i USA. *Utlandsrapport. USA 9502*. 43 s.
- Valtioneuvosto. 1995. Valtioneuvoston päätös 1246/95 käytöstä poistettujen renkaiden hyödyntämisestä ja käsittelystä. Helsinki: Valtioneuvosto.
- Volvo Car Corporation. 1994. Environmentally compatible car scrapping. *Environmental report Nr. 47*. 8 s.
- Wallentowitz, H. 1997. Anforderungen an das Automobil der Zukunft. *KGK-Kautschuk-Gummi-Kunststoffe*, vol 50, no. 1, s. 48 - 56.
- White, L. 1995. Rubber is fine for sheeting. *European Rubber Journal*, Feb., s. 20 - 21.



Williams, P. T., Belser, S. & Taylor, D. T. 1990. The pyrolysis of scrap automotive tyres., *Fuel*, vol. 69, Dec., s. 1474 - 1482.

Williams, P. T., Belser, S., Taylor, D. T. & Bottrill, R. P. 1995. The pyrolysis of automotive tyre waste. *J. of the Inst. of Energy*, vol. 68, March, s. 11 - 21.

Williams, P. T. & Belser, S. 1995. Pyrolysis thermogravimetric analysis of tyres and tyre components. *Fuel*, vol. 74, no. 9, s. 1277 - 1283.

Wójtowicz, M. A. & Serio, M. A. 1996. Pyrolysis of scrap tires: Can it be profitable, *Chemtech*, Oct 1996, s. 48 - 53.

Zmiersczak, W., Xiao, X. & Shubtai, I. 1996. Depolymerization - liquefaction of plastics and rubbers. *Fuel Processing Technology*, vol. 47, s. 177 - 194.

### **Muuta aiheeseen liittyvää kirjallisuutta**

Anthony, E. J. 1995. Fluidized bed combustion of alternative solid fuels; Status, successes and problems of the technology, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 21, s. 239 - 268.

Braes, H. H., Franze, H., Naudorf, H. & Ziese, J. 1988. Das Automobil und seine Werkstoffe im Spannungsfeld zwischen Wunsch, Wissenschaft und Wirklichkeit. *Automobiltechnische Zeitschrift*, vol. 90, no. 6, s. 339 - 348.

Ekoasiaa. 1996. Renkaat hyödynnettävä aineena tai toissijaisesti energiana. Hyödyntämisaste 90 % vuoteen 2000 mennessä. *Ekoasiaa*, no.1/96.

Khan, M. R. (toim.). 1996. Conversion and utilisation of waste materials. 286 s.

Leca, M. & Runcan, I. F. 1996. Reclaiming of rubber from waste tyres by physical methods. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, vol. 39, no. 12, s. 855 - 858.

Pehlergård, P.-O. 1995. Carbon black and tyres...the past, present and where are we heading. *Rubber SA*, March/April, s. 8 - 12.

Peuch, P. 1997. Car evolution end-of-life vehicles treatment and recovery technologies in Europe 1995 - 2015. *Proc. Recovery, Recycling, Re-Integration*, Geneva, 4 - 7 Feb. 1997.

# Liite A:

## Kumin lyhyt historia

- 1495 Kolumbus tutustui tähän materiaaliin Haitissa toisella matkallaan Uuteen Maailmaan. Kumi (engl. rubber, ransk. caoutchouc, saks. der Gummi (vulk.); das Gummi) on siis ollut Euroopassa tunnettu Etelä-Amerikan löytämisen jälkeen.
- Ensimmäinen kirjallinen viittaus on Pietro Martire d'Anghieran (1457 - 1526) vuonna 1513 kirjassaan ”De Orbe Novo”. Hän kuvaa atsteekkien leikkiä, jossa ”erään puun nesteestä tehtyä palloa heitettiin maahan, jolloin se hämmästyttävällä tavalla ponnahti takaisin ilmaan”. Lateksista tehtiin alkuasukaskansojen keskuudessa erilaisia hyödyllisiä esineitä. Sana kautsu(kki), *Caao-Chu*, tulee intiaanikielistä ja tarkoittaa itkevää puuta.
- 1736 Charles Marie de la Condamine raportoi Ranskan tiedeakatemialle tietojaan kumipuusta ja lateksista ja toimitti Eurooppaan ensimmäisen lateksinäytteen tutkittavaksi.
- 1700-luvun lopulla kumin ominaisuudet tunnettiin jo kaikkialla Euroopassa. Sen englanninkielinen nimi ”rubber” (alkuaan *Indian Rubber*) syntyi materiaalin sattumalta havaitusta mainiosta soveltuvuudesta lyijykynän jälkien pyyhkimiseen (rub out). Ensimmäinen kumiputki ja kumisaapas tehtiin 1765, kun lateksi onnistuttiin liuottamaan eetteriin ja tärpättiin.
- 1791 Samuel Peal sai ensimmäisen patentin kumitetun kankaan valmistamiseksi liuottamalla kautsua tärpättiin.
- 1803 perustettiin Pariisiin ensimmäinen kumituotteita (housunkannattimet ja sukkanauhat) valmistava tehdas.
- 1823 havaitsi skotlantilainen kemisti Charles Macintosh, että kivihiihiliterva (bentseeni) soveltui hyvin raakakumin liuotukseen. Kumitetun kankaan teollinen vaihe alkoi. Tämä saavutti suosion sadeviittoina, jotka siitä lähtien on brittiläisessä maailmassa tunnettu ”mackintosh”-nimellä.
- 1824 Thomas Hancock kehitti ensimmäisen mastikaattorin.
- 1826 M. Farady havaitsi, että kumin perusaine on hiilivety, jossa oli 5 atomia. Myöhemmin tämä yhdiste nimettiin isopreeniksi.
- 1830 maailman lateksinkulutus oli 150 t/a.
- 1839 amerikkalainen Charles Goodyear keksi sattumalta lateksin makromolekyylien ristiinliittämisen rikillä. Vaadittavan korkean lämpötilan takia menetelmää ruvettiin kutsumaan vulkanoinniksi (kreikk. *Vulcan*, tulen jumalan mukaan). Tästä alkoi kumituotteiden aikakausi.

- 1845 Robert W. Thompson haki patenttia ilmatäytteiselle kumirenkaalle. Keksintö unohdettiin.
- 1852 Nelson Goodyear, vulkanoinnin keksijän veli, kehitti ensimmäisen kovakumitotten (sarvikumi, eboniitti) - kamman.
- 1856 maailman kuminkulutus oli 7 000 t/a.
- 1870 valmistettiin ensimmäiset umpikumirenkaat polkupyörään.
- 1876 Henry Wickham salakuljetti 70 000 kumipuun (*Hevea brasiliensis*) siementä Brasiliasta Eurooppaan. Brasilialla oli kumin maailmanmonopoli ja kumin hinta ylitti hopean hinnan. Taimet istutettiin Kew Gardenin kasvitieteelliseen puutarhaan, Lontoon lähelle. 2 600 tainta kuljetettiin Aasiaan (Intiaan, Ceyloniin, Singaporeen ja Malesiaan), joissa ne istutettiin. 1 800 taimea menestyi ja näistä kasvoi 5 - 7 täysikasvuista yksilöä. Nämä puut olivat lähtökohtana Etelä-Aasian kumiteollisuudelle.
- 1878 ensimmäinen kuminen tennispallo valmistetaan.
- 1888 irlantilainen eläinlääkäri John. B. Dunlop ”keksi” ilmarenkaan uudelleen. Tällä kertaa se tapahtui oikeaan aikaan.
- 1891 valmistettiin ensimmäinen sisäkumirengas (Continental).
- 1894 velj. Michelin kehittivät ensimmäisen kelvollisen konseptin vaihdettaville ilmarenkaille.
- 1900 venäläinen kemisti J. Kondakov valmisti ensimmäisenä synteettistä kumia dimetyylibutadieenistä.
- 1904 Suomen Gummitehdas Oy:n tehtaot Nokialle perustettiin.
- 1909 Friz Hoffmann patentoi synteettisen kumin valmistuksen.
- 1910 kuminkulutus oli 100 000 t/a.
- 1914 Aasia ohitti Etelä-Amerikan lateksintuotannossa.
- Kumin kierrättäminenkin on vanha asia 1900-luvun alussa kumin kierrätysaste oli noin 50 %, mutta oli vuoteen 1960 mennessä laskenut 2 %:iin. Synteettisen kumin ja teräsvyörenkaiden käytön myötä kumin kierrätys on entisestään vaikeutunut.
- 1929 styreenibutadieenikumin (Buna) emulsiopolymerointi kehitettiin. Synteettisen kumin kaupallisteollinen vaihe käynnistyi.
- 1932 kehitettiin sulfenamidi kiihdytin, joka mahdollisti nykyaikaisen teollisen renkaanvalmistuksen.
- 1932 ensimmäinen autonrengas valmistui Nokian tehtailla.
- 1936 ensimmäinen Bunaa valmistava tuotantolaitos käynnistyi Saksassa. Buna on edelleen tärkein synteetikumilaatu.

- 1942 Saksassa valmistettiin ensimmäiset 100 % BUNA-autonrenkaat.
- 1942 silikonikumi kehitettiin Yhdysvalloissa.
- 1955 maailman kuminkulutus  $2,88 \cdot 10^6$  t/a.
- 1960 synteettisen kumin tuotanto (2,65 milj.t) ylitti luonnonkumin (2,08 milj.t) tuotannon.
- 1968 kulutus 7,65 milj. t, 65 % synteettistä kumia.
- 1960 - 1990 yhä uusi synteettisiä kumilaatuja kehitettiin.
- 1994 maailman kuminkulutus oli  $14,4 \cdot 10^6$  t/a, josta 63 % oli synteettistä kumia.
- 1997 luonnonkumi on yhä tärkein yksittäinen kumilaatu, eikä sen ominaisuuksia ole saavutettu synteettisillä kumilaaduilla.

## Lähteet

Ahmed, R., van de Klundert, A. & Lardinois, I. (toim.). 1996. Rubber waste. Options for small scale resource recovery. 126 s.

Giersch, U., & Kubisch, U. (toim.). 1995. Gummi, die elastische Faszination. NICOLA. 384 p.

Palo-oja, R. & Willberg, L. 1982. Kumi. Kumin historiaa. Suomen kumiteollisuus ja kumijalkineen vaiheet. Tampere: Tampereen kaupunki. 119 s. (Tampereen kaupungin museolautakunnan julkaisuja 13.)

Schidorowitz, P. & Dawson, T. R. (eds.). 1952. History of the rubber industry. 390 s.

Ullmann's Eyclopedia of Chemical Technology. 1996. 5. painos. Vol. A23, s. 222.

## **Liite B:**

### **Kumiromun raaka-ainekäyttö**

Rengasromun energiakäytön vaihtoehtona on raaka-ainekäyttö. Renkaiden käyttöä kumirouheena eri tarkoituksiin on paljon tutkittu, mutta renkaiden käsittely ja jauhaminen (ks. jauhatusenergian tarve taulukossa B1) on kallista ja kumirouheen käyttöön liittyy jonkin verran ongelmia. Sanotaan, että 1 %:n kumirouheen lisäämien tuotteeseen laskee sen arvoa 1 %:lla. Toisaalta monissa tutkimuksissa esitetään, että kumirouhetta voitaisiin renkaiden valmistuksessa käyttää 10 % kumin määrästä ja alempilaatuisissa kumituotteissa jopa 50 % (Liaskos 1994).

#### **Kumin granulointi eli jauhatus**

##### **Pilkkominen tai karkea jauhatus**

Kumin karkea murskaus tehdään yleensä kuljetukseen, varastointiin, maanrakennus- tai energiakäyttöön liittyen. Karkean murskauksen kustannukset ovat noin 112 mk/t (Arnaud 1995). Murskaimien kapasiteetti on tyypillisesti 0,6 - 1,2 t/h - 10 t/h. Ongelmana on, että useat murskauslaitokset ovat osoittautuneet epäluotettaviksi. Karkeassa jauhatuksessa energiankulutus on tasolla 0,6 - 0,7 kWh/kg romua. Lisäksi huonona puolena on ollut tuotteen heikko kysyntä markkinoilla. 8 000 t/a käsittelevän laitoksen investointi on noin 6,8 Mmk. Lisäksi karkeasta murskauksesta syntyvän jätteen osuus on melko suuri, 30 %:n luokkaa. Myllyjen huoltokulut ovat luokkaa 3 mk/t (35 - 40 ITL/kg) (Bressi 1995). Karkean jauhatuksen etuja ovat

- vähäiset päästöt
- pieni tilantarve
- selvästi alemmat kustannukset kuin hienojauhatuksessa.

Haittapuolina mainitaan taas

- suuri energiankulutus
- korkeat käyttökulut (terien kunnostus ja vaihtaminen)
- tuotteen heikot markkinat.

Karkean kumirouheen käyttökohteet ovat

- läjittäminen (tilantarve pienenee)
- energiakäyttö
- maarakennus (mm. lämpöeristyskerros tienrakennuksessa).

Suomessa on tällä hetkellä ainakin kahdella yrityksellä rengasmurskaimia. Säkkiväline Oy hankki ensimmäisenä Shred-Tech-murskaimen, jonka maksimikapasiteetti on 10 - 15 t/h. FinReci Oy:llä on käytössään Columbus McKinnonin laite, jonka kapasiteetti on samaa luokkaa.

## Suurikokoisten renkaiden ja vulkanoimattoman kumin käsittely

E erityisen ongelman muodostavat suurikokoiset renkaat ja vulkanoimaton kumi, jota syntyy hyllyn muodossa mm. renkaiden valmistuksesta. Normaalien murskainten kita ja teho eivät riitä suurille renkaille, vaan ne täytyy ensin pilkkoa erityislaitteilla tai käsitellä jyrsimillä, joissa syöttö säätyy jyrsimistehon perusteella. Yhdysvalloissa käytetään leikkureita, joissa rengas leikataan ensin pituussuunnassa, jolloin palteen teräkset, jotka voivat olla hyvin vahvoja, saadaan pois. Tämän jälkeen rengas leikataan vielä toiseen suuntaan ennen syöttämistä murskaimeen. Vulkanoimattoman kumin käsittelystä on vain vähän tietoa, koska ongelma liittyy lähinnä juuri renkaiden valmistukseen. Vulkanoimaton kumi on takertuvaa ja voi sisältää paljon terästä (kumitettua lankaa). Pieniä määriä voidaan käsitellä muun rengasromun tai esimerkiksi hakkeen joukossa.

## Kumin hienojauhatus

Kumin hienojauhaminen on varsin energiantensiivistä (taulukko B1). Kumin jauhatus on myös pölyävää, ja hienon kumipölyn työhygieeninen merkitys on osittain epäselvä.

*Taulukko B1. Henkilöautonrenkaiden jauhatuksen energiantarve. Energiankulutus mk/t (oletus: rengas painaa keskimäärin 6 kg).*

Käsittelyprosessi	MJ/rengas	MWh/t
Karkea pilkkominen	0,5	0,02
5x5 cm kappaleet	2,5	0,12
2,5x2,5 cm kappaleet	16	0,74
0,6-1,2 cm granuli	40 - 50	2,09
Gryogeeninen jauhatus	>100	>4,61

Granulointilaitokset voidaan karkeasti jakaa kahteen luokkaan: kylmä jauhatus ja lämmin jauhatus. Tyypillinen kumipurua valmistavan laitoksen kapasiteetti on 5 000 - 12 000 t/a, kun Suomeen tuodun kumijauhon määrä oli noin 300 t vuonna 1995. Suomen olosuhteissa (kuten muuallakin) on ongelmana siis paikallisten markkinoiden pienuus. Granulointilaitoksissa on yleensä useita myllyjä sarjassa, jotka valmistavat eri hiukkasfraktioita. Teräs ja kuitu voidaan erottaa.

Ensimmäisessä vaiheessa saadaan noin 14 mm:n granuleja. Teräs erotetaan toisen vaiheen jälkeen. Kolmannessa vaiheessa päästään hiukkaskokoon 1 - 6 mm. Neljännessä vaiheessa tapahtuu ilmaluokittelu tai seulonta, jossa mm. kuitu erotetaan.

## Kylmäjauhatus

Hienojauhatus on yleensä kryogeeninen prosessi, mutta käytössä on myös ns. supersoinen prosessi (Tanskassa). Kumin jauhaminen hienoksi on huomattavasti kalliimpaa, mutta mahdollista nopean faasierottelun (kumi, teräs, kuitu). Kryogeenisessä prosessissa rengas jäädytetään nestetyypellä  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ :seen ja jopa  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :seen, jolloin rengas haurastuu ja jauhaminen on tehokkaampaa. Saatavat hiukkaset ovat sileitä ja niukasti huokoisia, jolloin lisäaineiden tarve käyttökohteessa kasvaa (Kursawe 1995). Typen nesteyttäminen vaatii noin  $0,8\text{ kWh/kg}$ . Yleensä murskauslaitoksessa on sekä normaali-lämpötilaosa että kryogeeniosa, jolloin kryogeenivaihetta käytetään vain erittäin hienon kumijauheen valmistukseen. Kylmäjauhatuksen etuna on puhtaampi prosessi ja hieman tehokkaampi (nopeampi) jauhatusprosessi. Haittapuolena on, että kryogeenijauhatus tuottaa pinnan morfologialtaan epäedullista purua.

Kryogeenisen laitoksen kustannukset Italiassa ovat seuraavat (Arnaud 1995): Investointi  $6\ 000/10\ 000\ \text{t/a}$  laitokselle  $18 - 32\ \text{milj. mk}$  ( $4 - 7\ \text{milj. USD}$ ). Typen kulutus  $1\ \text{kg/kg}$  kumiromua.

Tanskassa on Viborgissa uusi laitos, Genana A/S, joka käsittelee vuosittain  $1,5\ \text{milj. rengasta}$  eli noin  $8\ 000\ \text{t/a}$  (Arnaud 1995). Laitos on periaatteessa mekaaninen murskaamo, mutta loppukäsittely tapahtuu supersonisessa ilmapirrassa, jonka energiankulutus on suhteellisen pieni ( $1\ \text{kWh/kg}$  lopputuotetta). Tuotejakauma on seuraava:

- $<0,4\ \text{mm}$                        $20 - 30\ \%$
- $0,4 - 0,7\ \text{mm}$                  $20 - 30\ \%$
- $0,7 - 1,0\ \text{mm}$                  $20 - 30\ \%$
- jätefraktio                         $10 - 40\ \%$

Laitoksen investointikustannus oli noin  $40\ \text{Mmk}$  ( $50\ \text{milj. DEK}$ ). Tuotantokapasiteetti on  $5\ 000\ \text{t/a}$  kumijauhetta, joka myydään kumiteollisuudelle. Kumijauheen arvo Tanskassa on lähteen mukaan  $1\ 400 - 2\ 400\ \text{mk/t}$  ( $1\ 800 - 3\ 100\ \text{DEK/t}$ ) (Suomen tullitilaston mukaan 1995 maahantuodun kumijauheen tuontihinta oli keskimäärin  $2\ 200\ \text{mk/t}$  ja tuontimaita Englanti ja Saksa). Jauhatuslaitoksen käyttökulut olivat noin  $600\ \text{mk/t}$  ( $750\ \text{DEK/t}$ ).

Norjassa on suunnitteilla laitos, joka käsittelee  $1 - 2\ \text{milj. rengasta}$  (n.  $8\ 000\ \text{t/a}$ ) vuodessa. Laitoksen investointi olisi noin  $20\ \text{milj. NOK}$  ( $14\ \text{mmk}$ ). Kumijauhe on suunniteltu

myytäväksi kansainvälisille markkinoille (Bressi 1995). Sveitsiläisen arvion mukaan kumipulverin teko ei markkinoiden pienuuden takia ole kiinnostavaa.

Hienojauhatuksessa kumipurun saanto on noin 78 %, metalli (12 %) saadaan erotetuksi, ja jätettä muodostuu noin 10 %. Hienojauhatuksen etuina mainitaan, että

- laitos tuottaa eri purulaatuja joustavasti paikallisen tarpeen mukaan
- kumin kierrätysaste on korkea, 90 - 95 %
- kumirouhe on puhdasta, metalli ja kuitu on poistettu
- ei päästöjä ilmakehään.

Haittapuolina mainitaan puolestaan:

- investointi on 2 - 3-kertainen karkeaan jauhatukseen verrattuna
- kumiromun käsittelykustannus on noin kaksinkertainen karkeaan jauhatukseen verrattuna
- rouheen markkinoiden vakiintumattomuus (esimerkiksi Yhdysvalloissa kumipurun markkinat vain 50 000 t/a)
- suhteellisen korkeat käyttökulut (nestetyypen kulutus 0,45 - 1,0 kg/kg).

Aktivoimalla kumijauheen pinta saadaan tuote, jonka tarttumisominaisuudet ovat paremmat kuin tavallisen kumijauheen. Purun osuutta lopputuotteessa voidaan täten lisätä.

## Muu kumipuru

Kumipurua syntyy myös rengaspinnoittamoissa. Tämä puru muodostuu neulamaisista hiukkasista pinnan raspaustavan takia. Se ei sisällä metallia tai kuituja. Puru voidaan edelleen jauhaa ja luokitella eri kokofraktioihin. Esimerkiksi Italiassa kumipuru on markkinoitavissa paikallisille kuminvalmistajille hintaa 100 - 150 IL/kg (30 - 45 p/kg).

## Kumijauheen käyttö

Koska kumi on *termosetti* materiaali, ei sen käyttö jauhamisen jälkeenkään ole ongelmatonta. Se ei sellaisenaan sekoitu tai tartu kovin helposti muihin polymeereihin, vaan käyttäytyy pikemminkin inertin täyteaineen tavoin. Yksi tapa korjata asiaa on modifioida kumijauheen pintaa (pinnan hapetus kaasufaasissa esimerkiksi fluorikaasulla), jolloin voidaan säästää kalliiden sideaineiden määrässä. Samalla voidaan kumipurua käyttää sovelluksissa, jotka aiemmin eivät olleet mahdollisia. Näistä voidaan mainita pyörätuolien renkaat, kumisaappaiden pohjat (US Army) seostettuna nitrilikumin kanssa,



PU-vaaho-kumikomposiitti mattojen alusrakenteessa ja kumi-epoksi, kumi-PU-liimat (Bauman 1995, deVal 1994). Kumijauheen muita käyttökohteita ovat mm. (White 1995)

- mattoteollisuus (mattojen runkoaine)
- joustavat alustat sideainetta (polyuretaani) käyttäen (urheilupaikat), kumilevyt esim. betonin päällystys (kevyen liikenteen väylät, sillat)
- umpikumirenkaat (maatalouskoneet, erikoistuotteet)
- kumin seosainekäyttö sekundäärisissä tuotteissa (kumipäällysteet, puskurit, jne)
- käyttö asfaltin lisäaineena
- jarrulaitteet
- kumi/muovikomposiitit (kasteluputket, tavarapeitteet)
- äänieristysmatot (ajoneuvot)
- vesieristys (tasakatot)
- laatat/tiilet esim lasten leikkikentät.

### **Kumigranulaatin käyttö tavanomaisissa kumituotteissa**

Kumin seosainekäyttö sekundäärisissä tuotteissa riippuu ratkaisevasti valmistetavan tuotteen laadusta. Kumipurun hiukkaskoon tulisi olla <0,8 mm (Ahmed ym. 1996). Kumijauhetta käytetään taloudellisista syistä, mutta yleensä enintään 30 %. Vaikutukset tuotteen laatuun ovat sitä vähäisemmät, mitä hienempi on jauheen hiukkaskoko. Kumijauheen käsittely vulkanointiaineella ennen sekoittamista parantaa myös tuotteen laatua. Tyypillisiä sovelluksia ovat

- auton kumimatot (50 % jauhetta, 25 % regeneraattia, 25 % neitseellistä kumia)
- kumianturat (jopa 50 % kumijauhoa).

Pelkän kumigranulaatin käyttö (lisäämättä luonnonkumia) on mahdollista lisäämällä vulkanoitavaan seokseen prosessiöljyä. Tuote on huokoista ja lujuudeltaan heikkoa, mutta soveltuu esim. ääni- tai lämmöneristyslevyiksi.

Granulaattia voidaan käyttää myös sideaineen kanssa (esim. nestemäinen polyuretaani joka aktivoituu kosteuden vaikutuksesta tai muu reaktiivinen nestemäinen polymeeri), jolloin tuotteina ovat tyypillisesti kumimatot (urheilusalit), kumitiilet ja laatat sekä eläinten alustat (navetat).

Granulaatin käyttö seoksissa synteettisten materiaalien kanssa vaikuttaa taloudellisessa mielessä mielenkiintoiselta käyttömuodolta. Periaate on seuraava: granulaatit sekoitetaan, seos kuumennetaan, jolloin suulakepuristaminen on mahdollista. Tuote jossa on 30 % PE:tä, muodostaa lujan tuotteen. Kasteluletkuja valmistetaan tällä tavoin jo kaupallisesti. Tyypillisiä tuotteita ovat letkut, levyt sekä tiivistysnauhat ja profiilit.

## Kumirouheen käyttö tienrakennuksessa

### Hienon kumipulverin käyttö

Kumirouhetta voidaan käyttää tienrakentamisessa (asfaltissa) periaatteessa kahdella tapaa. Ns. märkäprosessissa kumijauhe, jonka partikkelikoko on <1 mm, lisätään bitumiin. Bitumin kumipitoisuus on tavallisesti 15 - 25 %. Tuotetta (*asphalt rubber*) voidaan käyttää lukuisissa asfalttituotteissa. Kerrospaksuudesta riippuen kuluu 1 000 - 3 000 rengasta/km.

Ns. kuivamenetelmässä lisätään kumirouhe seokseen myöhäisessä vaiheessa. Partikkelikoko voi tällöin olla 8 mm:iin saakka ja asfastin kumipitoisuus voi olla 3 - 4 %. Tällöin kuluu 5 000 - 7 000 rengasta/km.

Mikäli uusissa päällystyskohteissa Yhdysvalloissa käytettäisiin kumiasfalttia, rengasromuongelma olisi kerralla ratkaistu. Kustannussyistä näin ei kuitenkaan ole tapahtunut.

Erityisesti käyttö asfaltin lisäaineena on herättänyt kiinnostusta Yhdysvalloissa. Kumirouhe parantaa asfaltin ominaisuuksia monin tavoin: Hiushalkeamien muodostuminen vähenee, rengasmelu vähenee, vesiliirtoherkkyys vähenee jne. Käyttö asfaltin täyteaineena on sikäli kiinnostava, että menekki tähän tarkoitukseen voisi olla huomattava. Kumirouheen jatkokäytön hankaluutena on mm. huokoisuudesta johtuva suuri sideaineen kulutus. Lisäksi kumin tuomat edut menetetään varsin nopeasti Suomen ilmasto-olosuhteissa ns. kuivakäytössä, jossa granulaatti sekoitetaan runkoaineeseen (Peltonen 1996).

On myös epäilty, että kumiasfaltista voisi liueta metalleja ja polyaromaatteja ja tämän vuoksi on joissakin Yhdysvaltojen osavaltioissa suositeltu, ettei kumiasfalttia käytetä pohjavesialueiden läheisyydessä.

Yhdysvalloissa saadun kokemuksen mukaan ovat kumiasfaltin alkukustannukset 20 - 100 % korkeammat kuin konventionaalisen asfaltin. Suurin lisäkustannus muodostuu renkaiden jauhamisesta. Kumiasfaltin sekoitus ja varstointi on myös kalliimpaa kuin tavanomaisen asfaltin (de Val 1994).

### Karkean kumirouheen käyttö

Erittäin karkean kumirouheen käyttö on lisäksi mahdollista tien eri rakennekerroksissa mm. routaeristeenä. Tätä on Suomessakin kokeiltu mm. Ilola-Sannäs-tiellä Porvoon lähellä (Repo 1997). Yhdysvalloissa on jo pitkään käytetty kumirouhetta tierakentamisessa. Tärkein etu on keveys ja lämmöneristyskyky, joten tiettyjä etuja saavutetaan kohteissa, joissa tiepohjan kantavuus on heikko tai routavaaran takia tarvitaan lämmöneristystä. Meluvallin rakentaminen Lahden uudella moottoritillä on myös meneillään.

# Kokonaisten renkaiden uusiokäyttö

## Pinnoittaminen

Renkaiden pinnoittaminen on ylivoimaisesti tärkein uusiokäyttömuoto. Potentiaalia pinnoituksen lisäämiseen on, mutta rajoittavana tekijänä on mm. uskomus pinnoitettujen renkaiden heikommasta laadusta. Pinnoitus on aina yksilöllistä, sillä käsiteltävien renkaiden laatu vaihtelee, ja tuotannon tehostaminen on hankalampaa kuin uusien renkaiden valmistuksessa.

Pinnoitus voi olla kylmä- tai kuumamenetelmän mukainen. Kuumapinnoitus tapahtuu höyrynpaineessa noin 160 °C:ssa. Tätä menetelmää käyttävät isommat pinnoittamot. Pienemmissä yrityksissä on käytössä ”kylmämenetelmä”, jossa valmiiksi vulkanoitu pinta kiinnitetään runkoon noin 100 - 120 °C:ssa. Pinnoituksessa voidaan erottaa seuraavat vaiheet:

- Renkaiden keräys
- Renkaiden tarkastus ja valinta
- Aihion valmistus
- Uuden kulutuspinnan asennus
- Vulkanointi
- Tarkastus ja laadun varmistus

Henkilöauton renkaan pinnoitukseen tarvitaan uutta kumimassaa 2 - 3 kg/rengas, kuorma-auton renkaaseen 16 - 20 kg/rengas.

Yleensä yli viisi vuotta vanhoja renkaita ei pinnoiteta, ja sama rengas pinnoitetaan vain kerran (henkilöauton renkaat). Raskaan kaluston renkaita pinnoitetaan useita kertoja, sillä rungon ja pinnoituksen hintasuhte on korkea.

Pinnoituksesta syntyy hyvälaatuista kumipurua, joka voitaisiin käyttää kumituotteiden valmistuksessa tai energiana.

Pinnoittamista pidetään tehokkaimpana uusiokäytön muotona. Energiaa pinnoitukseen kuluu noin 1/3 uuden renkaan valmistukseen verrattuna (de Val 1994).

## Muu uusiokäyttö

- Keinotekoiset riutat. Näitä on rakennettu mm. Japanissa, Australiassa, Yhdysvalloissa ja Uudessa-Seelannissa. Renkaat joko sidotaan yhteen tai ne valetaan se-

mentillä. Riutta on veden vaihtumisen kannalta hyvä ja sen sanotaan edistävän kalakannan hyvinvointia.

- Yhdysvalloissa renkaita on käytetty aallonmurtajina, jolloin kustannus on vain murto-osa tavanomaisiin ratkaisuihin verrattuna.
- Laiturien lepuuttajina ja iskunvaimentimina.
- Suojavalleina esimerkiksi kilparadoilla. Periaatteessa tätä voitaisiin soveltaa myös vaarallisilla tieosuuksilla.
- Aumojen/siilujen painona /kansina esimerkiksi maataloudessa.
- Kuorma-auton renkaita, jotka on sidottu päällekkäin, on käytetty jopa kaivojen tekemisessä.
- Kehityksissä romurenkaista valmistetaan mm. astioita, jalkineita ja pintoja maatalouden kulkupelien pyöriin.
- Leikkipuistojen erilaiset tarvikkeet.
- Paalaamalla renkaat suuriksi blokeiksi ( $1,4 \text{ m}^3$ ,  $d = 700 \text{ kg/m}^3$ ) saadaan eroosion estoon soveltuva materiaali.

## Lähteet

Arnaud, A. 1997. Elimination of automobile shredder residue in Switzerland. Recovery, Recycling, Re-integration, Geneva, 4 - 7 Feb. 1997. Vol. V, s. 11 - 13.

Bauman, B. D. 1995. High value scrap tire recycle. Auto Recycle '95, Dearborn, Michigan, 15 - 16 November 1995. S. 209 - 215.

Bressi, G. (toim.). 1995. Recovery of materials and energy from waste tyres. ISWA Working Group Report. 94 s.

Kursawe, L. 1995. [Http://www.fh-wolfenbuettel.de/fb/p/RE/arbeiten/reifen.html](http://www.fh-wolfenbuettel.de/fb/p/RE/arbeiten/reifen.html).

Liaskos, J. 1994. Rubber tyre recycling. UNEP Industry and Environment, July-September, s. 26 - 29.

Peltonen, P. 1996. Rengasjauheen uusiokäyttö asfaltissa ja muiden käyttömuotojen tarkastelu. Espoo: VTT Yhdyskuntatekniikka. 43 s. (Tutkimusraportti 325).

de Val, D. 1994. Återvinning av däck i USA. Utlandsrapport, USA 9502. 43 p.

## Liite C:

# Sliten sementtitehdas - kokeilut vaihtoehtoisilla polttoaineilla

### Yleistä

Sliten tehdas on tällä hetkellä Euroopan suurimpia sementtitehtaita. Tuotanto oli 1996 1,9 milj. tonnia. Ruotsissa tuotannosta käytettiin 40 %. Tehdas saa raaka-aineensa paikallisesta kaivoksesta ja työllistää tehtaalla noin 230 henkilöä ja lisäksi merikuljetuksissa noin 70 henkilöä. Tehtaalla on pitkä historia, ensimmäinen sementtihuone rakennettiin 1919. Tehdasta on modernisoitu tehokkaasti ja menossa on kahdeksas uunisukupolvi. Polttoaine- ja päästösektorilla on tehty jo merkittäviä investointeja, ja tavoitteet ovat huomattavan kunnianhimoiset jatkossakin. Pyrkimyksenä on mm. muutamassa vuodessa nostaa vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttö 70 - 80 %:iin. Päästöpuolella on panostettu tai panostetaan erityisesti hiukkaspäästöihin, NO<sub>x</sub>-päästöihin ja SO<sub>2</sub>-päästöihin. Rikkidioksidiongelma syntyy paikallisen kalkkikiven sisältämästä pyriitistä. Lämmön talteenotto on toteutettu tehokkaasti tarjoamalla jätelämpö mm. Sliten kunnalle ja suurrehkolle kasvihuonekompleksille. Suunnitteilla on pienimuotoinen sähköntuotanto (omaan käyttöön) tulevaisuudessa.

Nykytilanne pähkinänkuoressa:

- Jätelämmön talteenotto, lämmittää Sliten kuntaa (1 800 as.) ja kasvihuonekompleksia.
- Useita sähkösuodattimia (vuosina 1995 - 1996 otettiin käyttöön klinkkerin jäähdyttimen sähkösuodatin) hiukkaspäästöjen minimoimiseksi.
- Termisen NO<sub>x</sub>:n reduktio (80 %) ammoniakksyötöllä 1996 - 1997 (kalsinointitornissa), päästö noin 200 mg/m<sup>3</sup>n.
- Useita kokeiluja vaihtoehtoisilla polttoaineilla.
- Pääpolttoaine kivihiili 177 500 t/a, öljykoksi 37 600 t/a.
- Päästöt 1996, SO<sub>2</sub> 4870 t/a, NO<sub>x</sub> 4 065 t/a ja pölypäästöt 663 t/a.

Tulevaisuudessa on tarkoitus

- rakentaa vielä jätelämpökattila kalsinointitornille, sähköteho noin 10 MW,
- rakentaa rikinpoistolaitos vuoden 1998 loppupuolella (90 %:n SO<sub>2</sub> reduktio, 50 %:n pölyreduktio), päästö <200 mg/m<sup>3</sup>n
- tehostaa edelleen typen oksidien reduktiota
- nostaa edelleen vaihtoehtoisten polttoaineiden osuutta
- vähentää edelleen melua.

## **Kumirouheen ja kuitulietteen syöttö kalsinointitorniin**

Kumirouhe syötetään vastaanottobunkkeriin etukuormaajalla. Syöttösuhde on normaalisti 1 osa lietettä ja 2 osaa kumirouhetta. Vastaanottobunkkerista tavara puretaan vaa'an kautta kuljettimelle. Kalsinointitornissa polttoaine painetaan kuumalla ruuvilla syklooniin. Täten estetään kylmän vuotoilman pääsy kalsinaattoriin. Syöttösystemin kapasiteetti on noin 6 t/h. Laitoksella on lupa tuottaa 25 % energiastaan rengasrouheesta. Kumiromu tulee laivalla valmiiksi palakokoon 50 x 50 mm<sup>2</sup> rouhittuna konsernin omalta tuotantolaitokselta (Euroc-Recycling). Rengasromu on tehtaalle selkeästi edullisempaa kuin kivihiihi, ja polttoainekustannuksissa säästetään huomattavasti. Kumiromun lämpöarvo on noin 33 MJ/kg ja rikkipitoisuus 1,8 %. Koeajoissa on kumiromulla tuotettu 26 % uunin koko polttoainetarpeesta.

## **Muovi-kumirouheen syöttö pääpolttimelle**

Muovijäte oli silputtua muovi- (ei PVC) ja kumiseosta. Se toimitetaan yhtiön omalta jätepolttoainetta tuottavalta laitokselta (Varberg). Tavarain tilavuuspaino oli noin 170 kg/m<sup>3</sup> ja lämpöarvo noin 34 MJ/kg. Tavara on hienonnettu noin 10 mm:n partikkelikokoon ja varastoitu kevytrakenteiseen ”teltaan”, jossa sijaitsee myös vastaanotto-tasku ja pneumaattinen syöttölaite. Syöttösystemissä on vaaka, komprimointiruuvi ja pneumaattinen syöttöasema. Tavara kulki putkea (läpimitta noin 150 mm) pitkin uunin pääpolttimelle. Matka oli useita kymmeniä metrejä. Muovia on koeajoissa syötetty polttimelle 7 t/h, joka vastaa 31 % pääpolttimen tehosta. Tällaisen (koe)laitoksen investoinnit ovat varsin pienet, ja kokemukset polttoaineesta olivat erittäin myönteiset. Ongelmana oli vain (eräiden) jätetyyppien korkea hinta.

On luonnollista, että vaihtoehtoisen polttoaineen hinnan on oltava pääpolttoaineen hintaa halvempi, jotta tehdyt investoinnit saadaan maksetuksi. Jatkossa on tarkoitus kokeilla muunkin tyyppisiä muoviseoksia, joita on tarjolla mm. Euroopan markkinoilla. Mikäli pidemmät koeajot jatkossa antavat edelleen positiivisia tuloksia ja polttoaine saadaan oikealla hinnalla, laitos rakennetaan kiinteäksi polttoainevarastoinneen.

## Kumirouheen polttokokeilu Sliten sementtitehtaalla



Kumirouheauma. Keskellä kuljetin polttoaineen siirtämiseksi kalsinointitorniin. Kuljettimen alla näkyy vastaanottotasku. Oikealla klinkkerisiilot.



Kumirouheen syöttökohta kalsinointitornissa (uusi putki kuvan keskellä).



Kuitulietettä polttokokeisiin.

**Liite D:**

**ASR:n ja rengasromun materiaalinäytteet,  
kuvaliite**



## Kuusakoski Oy:n jätevirrat



Upotus-kellutuslaitoksen UK-kumi.



ASR (fluffi) ilmaluokittimelta (käsittelemätön).



Seulottu (>8 mm) ja jauhettu ASR (Kamas).

## Renkaiden murskaus Nokian Renkaat Oy:n rengasvarastolla (FinReci Oy)



Renkaiden seulonta ylimääräisen maa-aineksen ja jään poistamiseksi.



Renkaiden syöttö murskaimeen, noin 10 t/h.



Tuote, noin 50 x 50 mm rengasmurske.





Suurikokoisten renkaiden esipilkkominen hydraulisilla saksilla.



Ongelmallinen vulkanoimaton tuotantojäte.



Haastavat olosuhteet.

## Keimolan terminaali (Säkkiväline Oy)



Tielaitoksen Sannäsin kumirouhetäyttökokeilu, syyskuu 1997.