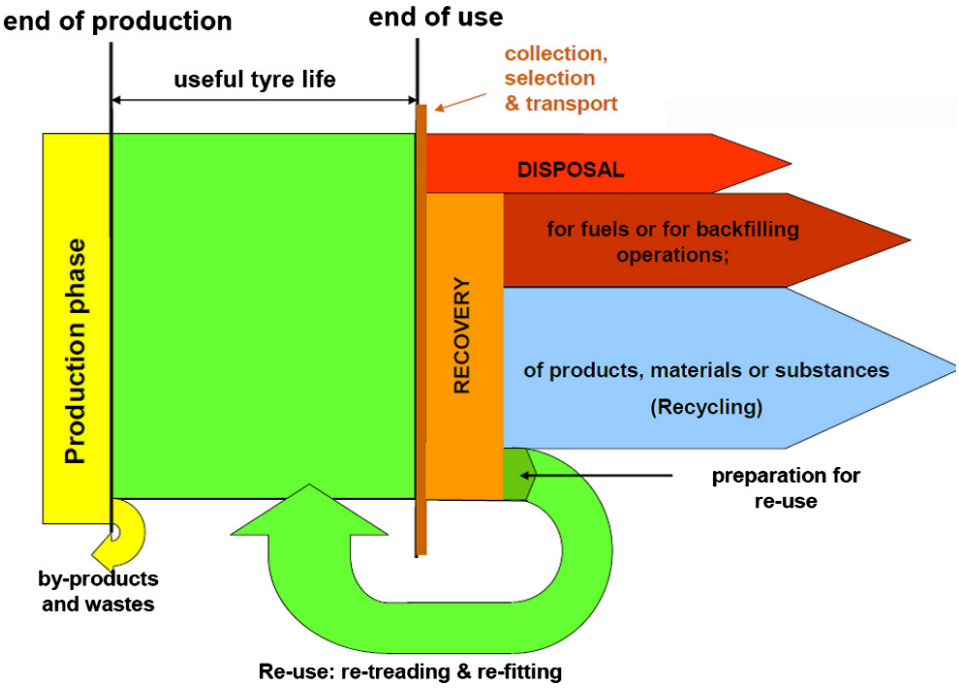
Hannu Aurinko

Selvitys kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin käyttämisestä RMB asfaltin sideaineena

Kirjallisuusselvitys



Laatuinsinöörit Oy

Oulu 2016

Kannen kuva: Davede Lo Presti.

ISSN-L
ISSN
ISBN

Verkkojulkaisu pdf (www.rengaskierratys.com)
ISSN-L
ISSN
ISBN

Painotalon nimi
Paikkakunta 2016

Julkaisua (myy)/saatavana
Painotalon nimi (jos myynnissä) tai vastuuyksikön nimi
Faksi <Kirjoita tähän>
Puhelin <Kirjoita tähän>

Laatuinsinöörit Oy
Tokkakuja 14
90650 OULU
Puhelin 0400 333 400

Hannu Aurinko: Selvitys Cryogeenitekniikalla valmistetun kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin käyttämisestä RMB asfaltin sideaineena. Liikennevirasto, xxxosasto. Helsinki 201x. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä nro/201x. xx sivua ja xx liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6656, ISBN 978-952-255-xxx-x, ISSN 1798-6664 (pdf), ISBN 978-952-255-xxx-x (pdf)

Avainsanat: rengasrouhe, rengasgranulaatti, RMB asfaltti, cryogeeni, ambient, kumijauhe, viskositeetti, bitumi, kumibitumi, kierrätysrengas

Tiivistelmä

Esipuhe

Selvitys valmistetun kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin käyttämisestä RMB (Rubber Modified Bitumen) asfaltin sideaineena toteutettiin Suomen Rengaskierrätys Oy:n ja Kuusakoski Oy:n toimeksiannosta Laatuinsinöörit Oy:ssä.

Raportin laati TkT Hannu Aurinko ja työtä ohjaavaan ryhmään kuuluivat Risto Tuominen Rengaskierrätys Oy:stä, Jyri Talja, Thomas Söderström ja Sofia Mattila Kuusakoski Oy:stä sekä Reijo Määttä Tutamen Oy:stä.

Oulussa huhtikuussa 2016

Sisällysluettelo

JOHDANTO 3

1 VALMISTUSMENETELMÄT 4
1.1 Yleistä 4
1.2 Ambienttekniikka 5
1.3 Cryogeenitekniikka 6
1.4 Muut tekniikat 7

2 KUMIJAUHEEN LAATUUN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ 8
2.1 Yleistä 8
2.2 Kumijauheen valmistustekniikka 8
2.3 Kumijauheen partikkelikoko 10

3 KIERRÄTYSRENGASMODIFIOIDUN KUMIBITUMIN LAATUUN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ 11
3.1 Kierrätysrenkaan määrän suhde bitumiin 11
3.2 Sekoituslämpötila ja aika 11
3.3 Viskositeetin vaikutukset 12

4 RMB ASFALTIN LAATUUN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ 14
4.1 Yleistä 14
4.2 Kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin laadunvarmistus (Hot Mix) 14
4.3 Kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin laadunvarmistus (Cold Mix) 15
4.4 RMB asfaltin laadunvarmistus 15

5 RMB ASFALTIN HYÖTYJÄ JA HAASTEITA 17
5.1 Hyötyjä 17
5.1.1 Kitka 17
5.1.2 Kylmäkestävyys ja elastisuus 17
5.1.3 Halkeamien väheneminen 18
5.1.4 Lajittumien väheneminen 18
5.1.5 Päällysteen ikä 18
5.1.6 Päällysteen paksuus 19
5.1.7 Melu 19
5.1.8 Muita hyötyjä 19
5.2 Haasteita 19
5.2.1 Bitumin valmistus 19
5.2.2 Sekoituslaitteiden puuttuminen 20
5.2.3 Laboratoriolaitteiden puuttuminen 20
5.2.4 RMB asfaltin käyttö- ja kestoikä 20
5.2.5 Yleisten ohjeiden puuttuminen (kansainväliset standardit) 21
5.2.6 Ympäristövaikutukset 22
5.2.7 Terveysvaikutukset 23

6 ESIMERKKIKOHTEITA 24
6.1 Yhdysvallat 24
6.2 Ruotsi 24
6.3 Muita kohteita 25

7 LCA 26

8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET 27

LÄHTEET 29

LIITTEET

Liite 1. Ruotsin ohjeistus asfalttimassan valmistukseen jossa käytetään kierrätys-rengasmodifioitua kumibitumia.

Liite 2. ERTMAn raportti 2016-04-04 Crumb Rubber from ELTs_vF.

Johdanto

Viimeisten tilastojen mukaan Euroopassa käytettyjen renkaiden kiertotalouden uusiokäyttö on kasvanut 95 % tasolle. Kierrätysrenkaita hyödynnetään erilaisten polttoaineiden korvaajana, uusiomateriaalina korvaamaan neitseellisiä raaka-aineita, erilaisissa rakentamisen sovelluksissa, muottiin valettujen kumituotteiden raaka-aineena, erilaisissa urheilurakenteiden sovellutuksissa kuten juoksuratojen ja tekonurmikenttien pinnoitteena sekä korvaamaan bitumia asfaltissa. Renkaiden sijoittaminen jätteeksi on näiden avulla pysytty lähes eliminoimaan.

Laajamittainen uusiokäyttö alkoi 1990-luvulla. Euroopan Unionin alueella vuosina 1999 ja 2000 astui voimaan direktiivejä, jotka velvoittivat rengasalan toimijat kierrättämään ja uusiokäyttämään käytetyt renkaat (EC 1999/31; EC 2000/53; EC 2000/76). Tämä on johtanut erilaisten sovellutuskohteiden testaamiseen ja tutkimiseen. Näiden tukemana tänä päivänä kierrätysrengasmateriaaleja käytetään varsin moniin eri käyttötarkoituksiin.

Tässä kirjallisuusselvityksessä käydään läpi erilaisia valmistustekniikoita, joiden avulla kierrätysrengasmateriaalista voidaan jalostaa bitumia korvaavaa raaka-ainetta eli bitumin lisäainetta. Työssä käsitellään bitumin yleisiä ja teknisiä ominaisuuksia sekä selvitetään kirjallisuudesta mitä vaikutusta kierrätysrengasmateriaalin käyttämisellä on ollut eri tilanteissa ja olosuhteissa bitumiin ja asfalttiin. Lisäksi työn tavoitteena oli kartoittaa mitä sovellutuksia voitaisiin käyttää suomalaisissa asfalttirakentamisen hankkeissa ja mitä hyötyjä sekä haasteita kierrätysrengasmateriaalin hyödyntämisellä voidaan saavuttaa. Kirjallisuusselvityksessä on tarkasteltu myös rengasrouheen soveltuvuutta ns. kylmämassojen toimintaan kuten sidottujen kerroksien rakentamiseen ja eri materiaalien yhteiskäyttöä sidotuissa rakenteissa.

Kumia on käytetty osana asfaltin sideainetta yli 40 vuoden ajan eri puolilla maailmaa. Kumin etuna bitumin lisäaineena on ollut mm. asfaltin kylmäkestävyyden parantaminen, halkeamien vähentäminen ja muodonmuutoskestävyyden parantaminen suhteessa normaalibitumiin. Kierrätysrenkaan hyödyntämisessä bitumin lisäaineena on ollut myös haasteita, kuten eri valmistustekniikoiden vaikutukset bitumiin lisättävään kierrätysrengasmassaan, valmistukseen liittyvät materiaaliominaisuuksien vaatimukset, kierrätysrengaskumibitumin käsiteltävyys ja säilyvyys.

Kierrätysrengaskumibitumille ei ole olemassa yhteisiä kansainvälisiä laatuvaatimuksia ja kansallisesti materiaalia ei ole edes mainittu asfalttialan ohjeissa ja normeissa. Eri valmistustekniikoiden välillä käydään kiistelyä niiden soveltuvuudesta ja paremmuudesta kierrätysrengaskumibitumiksi. Lisäksi eri puolilla maailmaa kiistellään menetelmän etujen soveltuvuudesta, terveysriskeistä ja saavutettujen etujen vaikutuksesta käytettyihin panoksiin. Nämä tekijät ovat todennäköisesti osaltaan vaikuttaneet, että menetelmä ei ole saavuttanut kaikenkattavaa hyödyntämistä ympäri maailmaa. Vastakkainasettelu on kuitenkin johtanut tutkimusmäärien huimaan kasvuun ja tällä hetkellä aiheesta, riippumatta tarkastelunäkökulmasta, on käytettävissä tuhansia tieteellisiä artikkeleita, joiden avulla tämä kirjallisuusselvitystä on laadittu.

Kirjallisuustietojen perusteella kierrätysrengaskumibitumiasfalttia on tutkittu laajasti ja sovellettavuudesta on tuotettu yllin kyllin tieteellistä aineistoa Euroopassa; Tanska, Puola, Unkari, Ranska, Italia, Espanja, Aasiassa; Kiina, Intia, Yhdysvalloissa, Australiassa ja Uudessa-Seelannissa. Aineistoa julkaistaan 1-2 tieteellistä artikkelia viikoittain eri puolilla maailmaa alan tieteellisissä ammattilehdissä, konferensseissa ja julkaisuissa. Kumin antama hyöty asfaltin pitkäaikaiskestävyyteen on lähes yhdenmukaisesti todennettavissa mistä tahansa julkaisusta, jonka osoittamiseen tässä kirjallisuusselvityksessä ei ole käytetty merkittäviä panoksia. Pääpaino on valmistustekniikassa, asfalttimateriaalin hyödyissä ja haasteissa, terveyteen liittyvissä tekijöissä ja elinkaaritarkastelun kautta saatavassa kustannustehokkuudessa.

1 Valmistusmenetelmät

1.1 Yleistä

Henkilöauton rengas painaa noin kahdeksan (8) kiloa siinä vaiheessa, kun rengas on loppuun kulunut. Henkilöauton ja raskaankaluston renkaiden koostumus jakautuu taulukon 1 mukaisesti ja jakaumasta on erimerkki kuvassa 1. Renkaiden koostumus poikkeaa toisistaan tekstiilin ja metallin osalta eniten, koska raskaan kaluston renkaissa ei käytetä tekstiiliä.

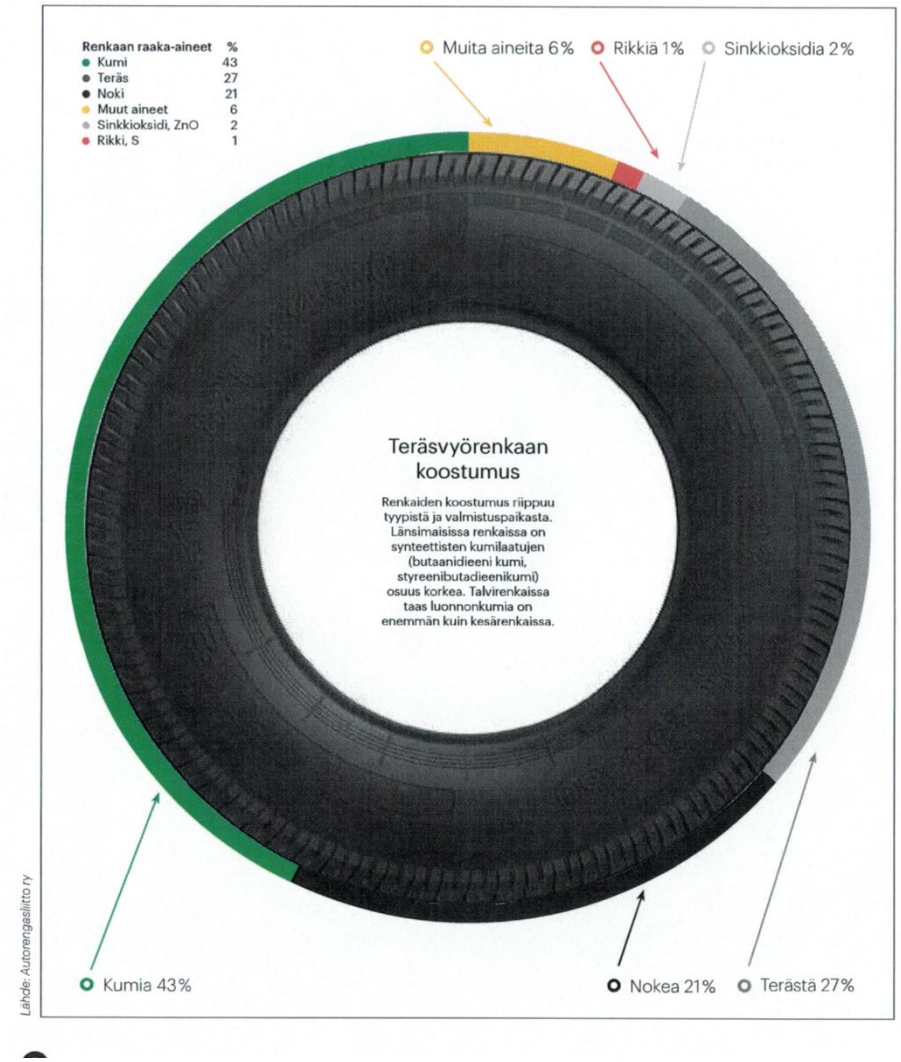
Taulukko 1. Henkilöauton ja raskaankaluston renkaiden koostumus. (Rahman, 2004)

Materiaali	Henkilöauto [%]	Raskas kalusto [%]
Kumi / elastomeeri	48	43
Teräs/metalli	15	27
Hiilimusta/noki	22	21
Tekstiili	5	0
Sinkkioksidi	1	2
Rikki	1	1
Muut aineet	8	6

Suomessa kierrätysrengasmateriaalista käytetään termejä rengasrouhe ja rengasgranulaatti. Rengasrouhe leikataan kokonaisista käytetyistä renkaista palasiksi, joiden palakoko vaihtelee välillä 50…300 mm^2. Tyypillisiä rengasrouheen palakokoja ovat 50*50 mm^2, 100*100 mm^2, 150*150 mm^2, 200*200 mm^2, 250*250 mm^2 ja 300*300 mm^2. Rengasrouheessa on mukana renkaiden teräsvöitä ja kuitukankaita, joita ei pystytä poistamaan kokonaan yli 50*50 mm^2:n kokoisista paloista. Rengasrouheen palakoko ilmoitetaan pinta-alana, jolloin leikatun palan paksuutta ei ilmoiteta.

Rengasgranulaatti on raekooltaan 0,5…25 mm:n välillä ja raekokoon numeraalista arvoa voidaan verrata kiviaineksen raekokoon. Granulaatissa ei ole enää mukana renkaassa olevia teräsvahvisteita eikä kuitukankaita, vaan granulaatti on puhdasta kumia. Rengasgranulaattijakeista tyypillisimmin Suomessa käytetään raekokoja 2, 4, 8, 14 ja 25 mm.

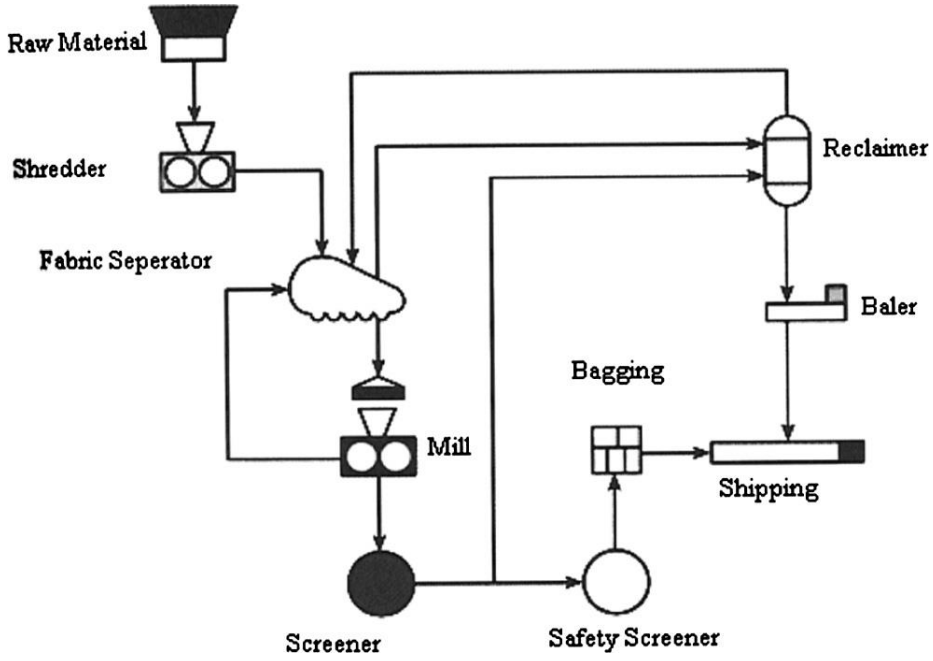
Bitumin lisäaineena käytetään hienompia raekokoja eli jauheita, joiden fraktiot vaihtelevat 200 µm ja 2 mm välillä. Niiden valmistamiseen käytetään pääsääntöisesti neljää eri tekniikkaa; Ambienttekniikka, Cryogeenitekniikka, märkä- tai vesijauhatusta sekä korkeapainevesiprosessia. Ambientmenetelmä on näistä neljästä menetelmästä tyypillisin jauhatusmenetelmä.



Kuva 1. Kuorma-auton teräsvyörenkaan koostumus. (ERTMA, 2011)

1.2 Ambienttekniikka

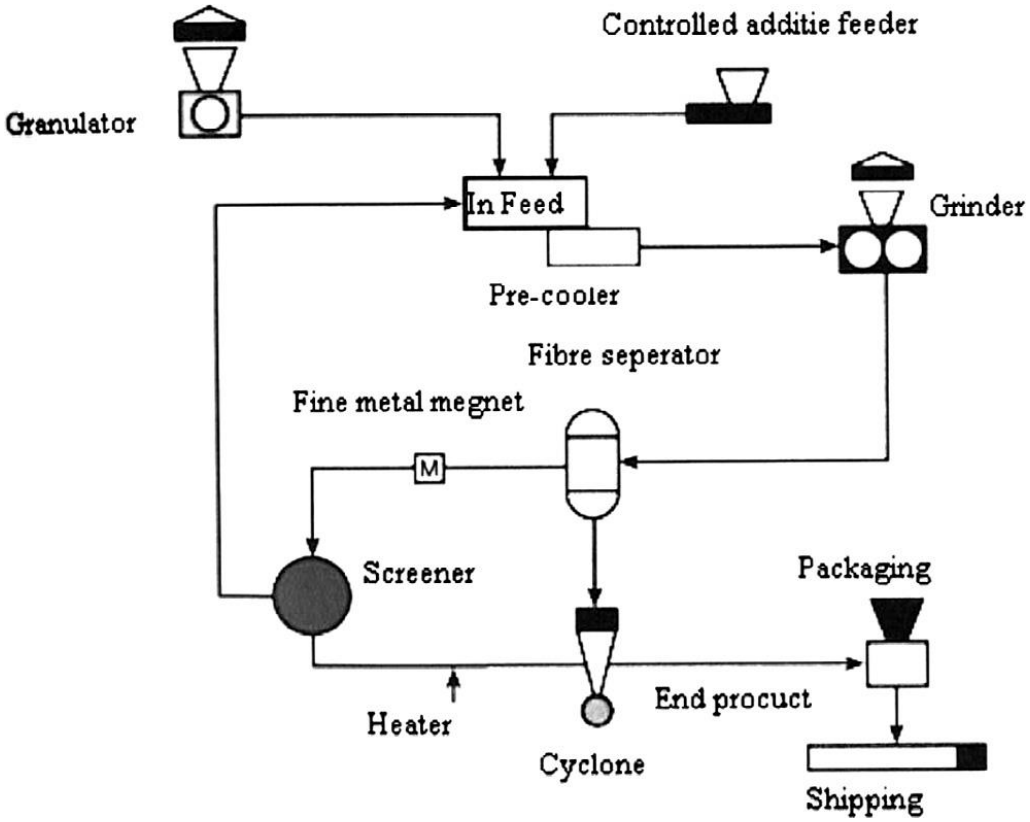
Ambienttekniikassa jauhatusprosessi toteutetaan normaalissa huoneen lämpötilassa, jossa rengasrouheeksi tai granulaatiksi leikattua rengasmassaa käsitellään pyörivien terien avulla siten, että kuidut ja teräkset erottuvat rakenteesta. Käsittelystä muodostunut jauhe on tyypillisesti 0.5-5 mm raekooltaan *(Rahman, 2004)*. Kuvassa 2 on tyyppikuva Ambient prosessista. Lo Prestin (2013) mukaan Ambientmenetelmä on kustannustehokkain tapa tuottaa kierrätysrengasmateriaalista bitumin lisäainetta.



Kuva 2. Ambient prosessin tyyppikuva. *(Rahman, 2004)*

1.3 Cryogeenitekniikka

Vastaavalla tavalla kuin Ambienttekniikassa, Cryogeenitekniikassa kierrätysrengas leikataan tai granuloidaan pienempään olomuotoon. Cryogeenitekniikassa nestemäisen typen avulla kierrätysrengasmateriaali jäädytetään -87–198 Celsius-asteen välille, jolloin renkaan rakenne muuttuu hauraaksi. Hauraassa olomuodossa oleva kumi sirpaloituu lasin tavoin hyvin pieniksi palasiksi, kun sitä "hakataan"/kun se käsitellään iskuvoimaan perustuvalla tekniikalla. Kumi ”hakataan” pieniksi paloiksi, joiden pinta jää tasaiseksi ja ominaispinta-ala on olennaisesti pienempi Ambienttekniikkaan verrattuna (Oliver, 1981). Kuvassa 3 on tyyppikuva Cryogeeni prosessista. Cryogeenijauhe tyypillisesti seulotaan haluttuun fraktioon valmistusprosessin jälkeen, jolloin materiaali on tasalaatuista. Yleisimmin käytetyt fraktiot ovat <200µm ja 200–400 µm.



Kuva 3. Cryogeeniprosessin tyyppikuva. *(Rahman, 2004)*

1.4 Muut tekniikat

Märkäjauhatustekniikka on patentoitu prosessi, jossa rengasgranulaattia hajotetaan vesisuihkun avulla kahden lähekkäin olevan jauhatusrenkaan välissä *(Memon, 2011).* Renkaasta ei pystytä poistamaan kuituja ja teräksiä täydellisesti tässä menetelmässä.

Korkeapainevesitekniikassa käytetään 55000 Psi (noin 4000 bar) vesipainetta, jolla rengasgranulaatista tai – rouheesta saadaan tuotettua kuitu ja teräs vapaata jauhetta. Menetelmä on kohtalaisen tuntematon eikä siitä ole merkittävää referenssitietoa käytettävissä *(Memon, 2011)*.

2 Kumijauheen laatuun vaikuttavia tekijöitä

2.1 Yleistä

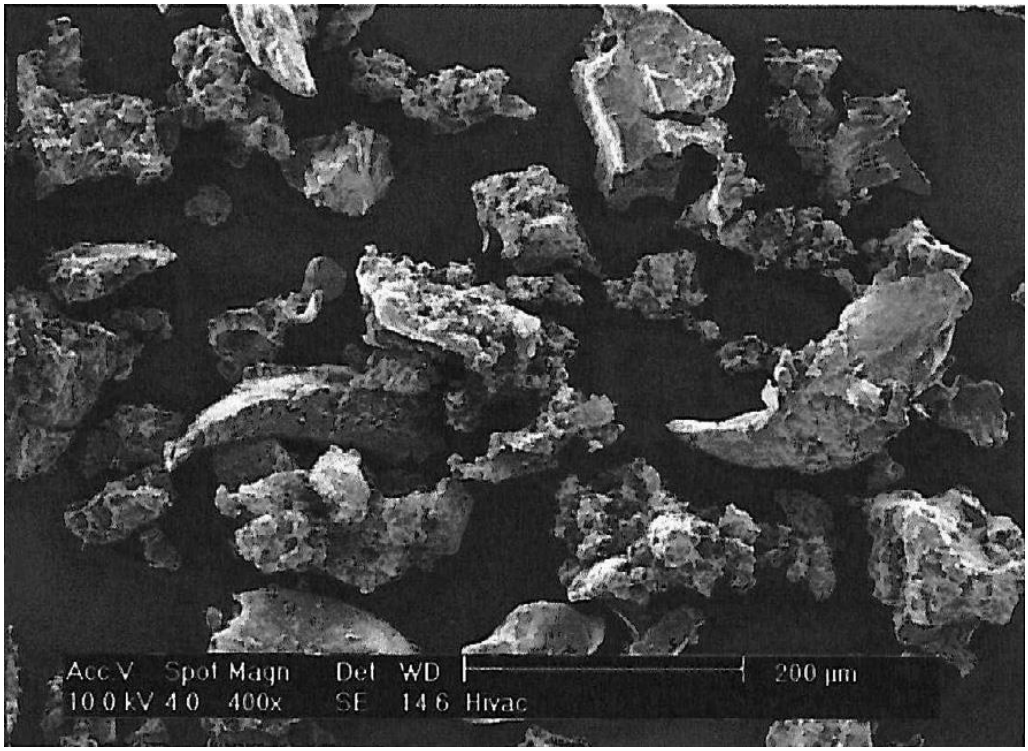
Kierrätysrenkaasta valmistetun kumin termistö vaihtelee maailmalla. Yleisesti käytössä on kombinaatioita termistöstä, jossa Recycled Tyre Rubber – Modified Bitumen (RTR-MB) tai Tyre Rubber – Modified Bitumen (TR-MB) ovat lyhenteessä mukaan. Yhdysvalloissa kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin asfalttimassasta käytetään yleisesti termiä Asphalt Rubber binder, Etelä-Afrikassa Bitumen Rubber binder ja Australiassa sekä Uudessa-Seelannissa termiä Crumb Rubber binder. (AsAc, 2007, Austroads, 2006; CalTrans, 2006). Näitä materiaaleja yhdistää ASTM D 6114 standardi, jonka mukaisesti kierrätysrengasmodifioitua kumibitumia testataan. Kuitenkin kaikissa näissä kolmessa eri ohjeistossa on toisistaan poikkeavat laatuvaatimukset kierrätysrengaskumin määrästä, fraktiokoosta, metallimäärästä ja sekoitustavasta. Tämä johtaa väistämättä hieman haasteelliseen tulkintaan erimateriaaleilla tehdyistä tutkimuksista ja niiden tuloksista.

Keskeisimpiä kumijauheen laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat:

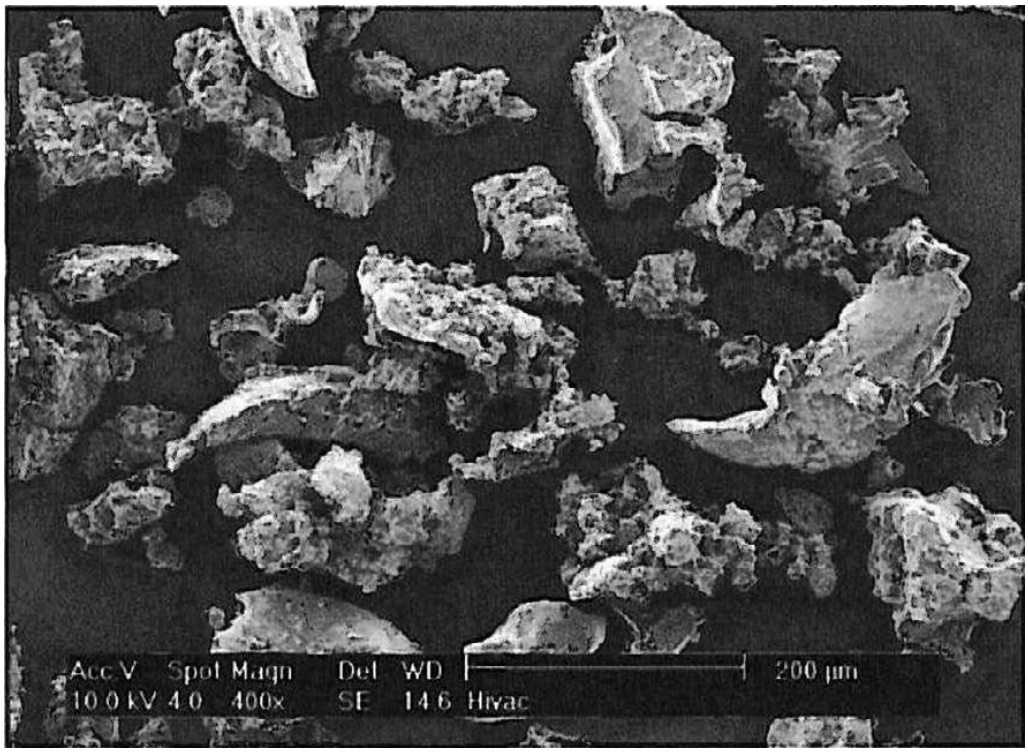
kumijauheen valmistustekniikka (partikkelien muoto)
kumijauheen partikkelikoko

2.2 Kumijauheen valmistustekniikka

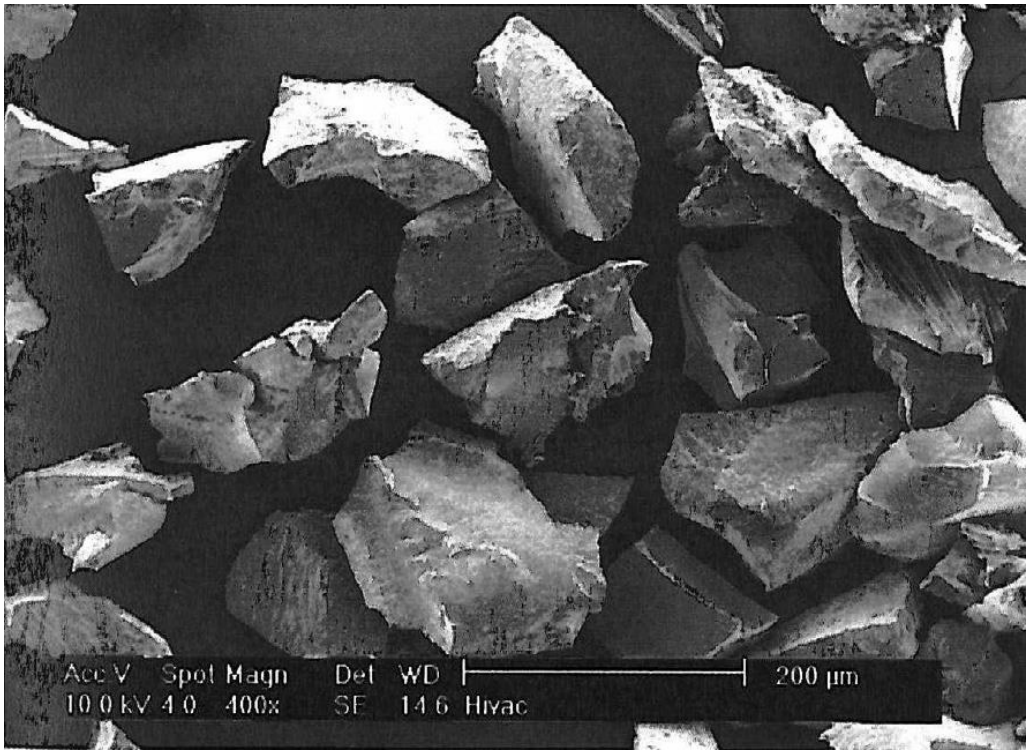
Valmistustekniikalla on vaikutus kumijauheen partikkelien muotoon ja partikkelien kokoon. Partikkelien muoto vaikuttaa hienojakoisten partikkelien liikkeeseen ja bitumin kulkeutumiseen kumijauheen pinnalle. Tämä ilmenee tarkastelemalla kuvien 4, 5 ja 6 eri valmistustekniikalla toteutettuja kumijauheita. Kuvan 4 kumijauhe on tehty Ambienttekniikalla, jossa pinnan muodot ovat epäsäännöllisiä ja vaihtelevat eri partikkelien välillä huomattavasti. Vastaavanlaiset pinnan muodot voidaan havaita kuvasta 5, jonka kumijauhe on valmistettu märkäjauhatustekniikalla. Kuvan 6 kumijauhe on tehty Cryogeenitekniikalla ja kappaleiden muodot ovat kooltaan samansuuruisia ja muodoltaan huomattavasti säännöllisempiä verrattuna kuvien 4 ja 5 partikkelien muotoon (Epps, 1994). Partikkelin pinnanmuodot vaikuttavat olennaisesti bitumista absorboituvien partikkelien määrään ja kokoon, joka vaikuttaa kierrätysrengasmodifioidun bitumin homogeenisuuteen, sekoitukseen ja ennen kaikkia viskositeetin hallintaan valmistusprosessissa. (Heitzman, 1992)



Kuva 4. Ambienttekniikalla valmistettua kumijauhetta. *(Memon, 2011)*



Kuva 5. Märkäjauhatustekniikalla valmistettu kumijauhe. *(Memon, 2011)*



Kuva 6. Cryogeenitekniikalla valmistettua kumijauhetta. *(Memon, 2011)*

Ambient – ja märkäjauhatustekniikalla valmistetuissa kumijauhe sisältää pieniä määriä renkaista peräsin olevia kuituja ja teräsvahvikkeita, jotka voidaan havaita kuvien 4 ja 5 pienistä partikkeleista. Vastaavasti Cryogeenitekniikalla valmistettu kumijauhe on kuitu ja teräs vapaata. (Lo Presti, 2013).

2.3 Kumijauheen partikkelikoko

Partikkelikoot vaihtelevat valmistustekniikasta riippuen jonkin verran. Maksimiraekoko on yleensä 800–1200 µm välillä. Cryogeenitekniikalla valmistettua kumirouhetta tyypillisesti seulotaan valmistuksen jälkeen, jolloin siitä voidaan erottaa haluttuja fraktioita eri käyttötarkoituksia varten. Muilla tekniikoilla valmistettuja kumijauheita voidaan vastaavalla tavalla seuloa, mutta pinnan muodoista johtuen lopputulos ei ole samanlainen kuin cryoneenikumijauheella. Mturi *et al.,* 2013). Nordgrenin (2016) mukaan partikkelikoko vaikuttaa suoraan kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin valmistukseen eli reseptiin, mutta ei suoranaisesti onnistuneen reseptionnin jälkeiseen lopputuotteeseen.

3 Kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin laatuun vaikuttavia tekijöitä

Kierrätysrengasmodifioitu kumibitumi sisältää bitumia ja kumijauhetta. Kierrätysrengasmodifioitu kumibitumi voidaan valmistaa jatkuvatoimisesti öljynjalostamolla tai asfalttiasemalla, joka on kirjallisuuden perusteella tyypillisin vaihtoehto (Lo Presti, 2013). Seoksen valmistuksessa bitumi ja kumijauhe lämmitetään ja mekaanisesti sekoitetaan lähtömateriaalien ominaisuuksista riippuen.

Keskeisimpiä kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat:

kierrätysrenkaan määrän suhde bitumiin
sekoituslämpötila ja aika
viskositeetti; muutokset sekoitusprosessin aikana, vaikutus penetraatioon, ominaispaino ja sen vaikutus säilyvyyteen

3.1 Kierrätysrenkaan määrän suhde bitumiin

Eri kirjallisuuslähteissä kumijauheen määrä vaihtelee suhteessa bitumiin 13–27 % välillä (Attia & Abdelrahman, 2009; TGI, 2007; Xiao *et al.,* 2006; COLTO 1998). Merkittävät poikkeamat eri maiden ohjeiden ja toteutettujen valmiiden massojen välillä johtavat siihen, ettei näiden perusteella voida määrittää yksittäistä valmista sekoitussuhdetta bitumin ja kumijauheen keskinäisen määrän suhteen. Nordgrenin (2016) mukaan valmistusresepti joudutaan tarkastelemaan aina kumijauhekohtaisesti suhteessa bituminlaatuun, joka vaikuttaa valmistuksen kustannuksiin.

3.2 Sekoituslämpötila ja -aika

Sekoituslämpötila on yksi keskeisimmistä tekijöistä, joka vaikuttaa sekä kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin että RMB asfaltin valmistukseen. Eri maiden ohjeistuksessa sekoituslämpötilan raja-arvot vaihtelevat 160–210 $^{\circ}$C välillä (AsAc, 2007, Austroads, 2006; CalTrans, 2006).

Sekoitusprosessissa kumipartikkelit alkavat sulaa ja absorboituvat bitumin öljyjen kanssa korkeissa lämpötiloissa 160–210 $^{\circ}$C välillä muodostaen polymeeriketjuja, jonka avulla kierrätysrengasmodifioidusta kumibitumista muodostuu geelimäistä/verkkomaista massaa. Kumijauheen ja öljyfraktion reaktion aikana kumijauheen partikkelikoko kasvaa, joka johtaa samalla partikkelien lähestymiseen toisiinsa nähden. Tämä ilmenee viskositeetin merkittävänä kasvuna. (Heitzman, 1992)

Kumijauheen reaktio on aika-ja lämpötilariippuvainen tapahtuma. Mikäli lämpötila on liian korkea tai sekoitusaika liian pitkä, partikkelikoko kasvaa siihen pisteeseen, että depolymerisaatio/devulkanisaatio aiheuttavat kumin dispersion eli hajautumisen bitumissa. Depolymerisaatio käynnistää kumin muodostumisen nesteeksi, joka vaikuttaa bitumin jäykkyyteen ja elastisuusominaisuuksiin. Mikäli lämpötila on liian korkea tai sekoitusaika on liian pitkä, depolymerisaatio aiheuttaa sideaineen (bitumin ja kumijauheen) geeliverkkorakenteen hajoamisen ja kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin rakenne menetetään. (Abdelrahman & Carpenter, 1999)

Kirjallisuuden perusteella kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin valmistusaika vaihtelee 30 – 240 minuutin välillä riippuen eri materiaalien ominaisuuksista (Mturi *et al.* 2013; Subhy *et al.* 2015; Lo Presto, 2013). Caltransin (2006) mukaan bitumiseosta tulee sekoittaa vähin-

tään 45 minuuttia, mikäli sitä ei ole käytetty viimeisen 4 tunnin aikana. Kierrätysrengasmodifioitua kumibitumia voidaan säilyttää myös pidempiä aikoja, mutta bitumin ja kumijauheen sidos kestää niin kauan kuin bitumiseos on nestemäistä, jonka jälkeen sidos purkautuu ja viskositeetti laskee.

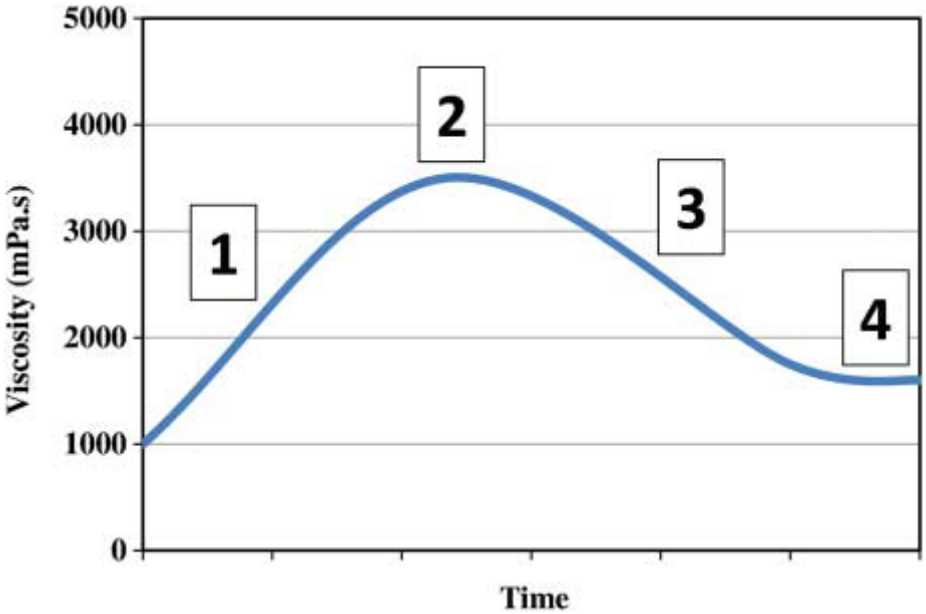
Kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin koostumus voi muuttua säilytyksen ja kuljetuksen yhteydessä. Tämä voi johtua mm. kumin ja bitumin ominaispainojen erosta, tiheyden muutoksesta paisumisen jälkeen sekä eri mekanismien vaikutuksesta partikkelit joutuvat epästabiiliin tilaan mm. lämpötilan muutoksista (Chaly, 2008; Perez-Lepe *et a.,* 2007; Navarro *et al.,* 2004).

3.3 Viskositeetin vaikutukset

Reaktiot bitumin ja kumijauhemateriaalin välillä ovat materiaalilähtöisiä ja riippuvat tyypillisesti seuraavista tekijöistä:

> Prosessin aikana tapahtuvista vaihteluista: lämpötila, aika ja sekoituslaitteisto.
> Sideaineen perusominaisuuksista: bitumin laadusta ja käytettävien lisäaineiden koostumuksesta.
> Kumijauheen ominaisuuksista: alkuperä (ominaispinta-ala), valmistusprosessi, partikkelikoko ja koostumus.

Nämä tekijät vaikuttavat viskositeettiin ja sitä kautta bitumin sekoittumiseen/tunkeutumiseen kiviaineksen kanssa eli penetraatioon. Kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin prosessin hallinta on kompleksinen eri komponenttien hallittu tapahtuma, jossa prosessissa tapahtuvat muutokset voivat vaikuttaa lopputuotteen eli RMB asfaltin laatuun merkittävästi. Viskositeetin seuraamisen avulla voidaan analysoida kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin käytettävyyttä asfaltissa. Kuva 7 esittää Mturin (2013) mukaan tyypillistä viskositeetin käyttäytymistä ajansuhteen sekoitusprosessin aikana.



Kuva 7. Kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin viskositeetin muutokset ja vaiheet ajan suhteen.

Mturin (2013) mukaan kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin viskositeetin alaraja on 2000 mPa s, jonka yläpuolella bitumiseos käyttäytyy vakaasti. Vaiheessa 3 geeliverkkorakenne alkaa rikkoutua depolymerisaation vaikutuksesta ja bitumin jäykkyys sekä elastisuus muut-

tuvat (Abdelrahman & Carpenter, 1999). Neljännessä vaiheessa kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin viskositeetti alittaa 2000 mPa s ja ei ole enää käytettävissä RMB asfaltin valmistukseen.

4 RMB asfaltin laatuun vaikuttavia tekijöitä

4.1 Yleistä

RMB asfaltin suunnittelu eli reseptointi poikkeaa normaaleista asfalttinormeissa mainituista asfalteista bitumin ja kiviaineksen välisen suunnittelun osalta. Nordgrenin (2016) mukaan kumijauhe on testattava ja suhteutettava ensin normaalibitumin kanssa kierrätysrengasmodifioiduksi kumibitumiksi, jonka jälkeen tulee varmistua koerakenteen avulla, että RMB asfaltti täyttää asfalttinormien mukaiset asfaltin vaatimukset. Tässä kirjallisuusselvityksessä ei tarkastella tyypillisiä asfalttinormien vaatimuksia vaan pelkästään mitä poikkeuksia RMB asfaltin reseptointi edellyttää.

4.2 Kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin laadunvarmistus (Hot Mix)

Luvuissa 2 ja 3 on kuvattu keskeisimpiä tekijöitä, jotka vaikuttavat RMB asfaltissa käytettävän kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin laatuun. Kirjallisuuden perusteella kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin käyttämiseen RMB asfaltissa ei ole yksiselitteisiä ja kaiken kattavia ohjeistuksia. Laadunvarmistuksessa käytetään kuitenkin pääsääntöisesti samoja toiminnallisia laatuvaatimuksia ja menetelmiä, joiden avulla laatua seurataan.

Taulukkoon 2 on koottu yleisimmät laadunvarmistuksessa käytetyt laatuvaatimukset ja tutkimusmenetelmät. Taulukon 2 aineisto perustuu ns. kuumasekoitusmenetelmään, jossa bitumimassa sekoitetaan nestemäisenä (wet process) kiviaineksen kanssa. Käytetty "normaali" bitumilaatu oli 50/70 bitumia (Celauro *et al.,* 2012).

Taulukko 2. Kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin yleisimpiä laatuvaatimuksia (Celauro *et al.,* 2012).

Laatuvaatimus	Raja-arvo/vaihteluväli	Tutkimusmenetelmä
Penetraatio [25 °C, mm]	30-51	EN 1426
Pehmenemispiste [°C]	61-84	EN 1426
Teräs/kuitujen määrä [%]	--	--
Kumijauheen rakeisuus [%/mm]	0-1	--
Kumijauheen määrä [%]	21-24	0
Viskositeetti 177 °C [mPa s]	3150	ASTM D 6114
Sekoituslämpötila [°C]	180	--
Sekoitusaika [min.]	< 40	--

Taulukon 2 aineistoa ei voi mitenkään yleistää, koska kumijauhe on esikäsitelty, jolloin rakeisuus, raemuoto, ja kuitujen määrä kumijauheessa, on muuttunut tuotantoprosessin jälkeen. Lisäksi kiviaineksen maksimiraekoko oli 8 mm, joka ei ole tyypillisesti Suomessa käytetty raekoko. Kirjallisuuden perusteella voidaan viskositeetin osalta todeta, että 2000 mPa s olisi yleisesti tunnistettu raja-arvo riippumatta kumijauheen valmistustavasta, koostumuksesta tai jauhemäärästä (Celauro *et al.,* 2013; Kamil & Krishna, 2010; Lo Presti *et al.,* 2009).

Muiden tekijöiden osalta kirjallisuudesta löytyvät tiedot vaihtelevat huomattavasti. Sekoituslämpötilan suhde bitumiin on kirjallisuuden perusteella erittäin merkityksellinen tekijä, mutta yksiselitteistä lämpötilaa ei voida tietojen hajanaisuuden osalta määrittää (Subhy *et al.* 2015:

Mturi *et al.* 2013; Lo Presto, 2013). Nordgrenin (2016) mukaan Ruotsissa sekoituslämpötila on 170 °C ± 5 °C. Tämä johtaa siihen, että osa kumijauheesta sulaa nesteeksi bitumin joukkoon ja osa muodostaa geelimäisenverkoston bitumin kanssa, joka vaikuttaa bitumin lujuusominaisuuksiin. Mikäli lämpötilaa nostetaan, kumijauhe sulaa sen ominaisuuksista riippuen kokonaan nesteeksi bitumin joukkoon, jolloin se alentaa nopeasti bitumin viskositeettia (Ghavibazoo & Abdelrahman, 2013; Attia & Abdelrahman, 2009).

Kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin valmistuksessa täytyy tunnistaa ja testata laboratoriossa kumijauheen ominaisuudet ja sen jälkeen kumijauheen sekoitusprosessi bitumin kanssa. Kirjallisuudesta tähän prosessiin löytyy spesifiset ohjeet vain tietyille bitumi- ja kumijauhelajikkeille, joita tutkijat ovat käyttäneet testauksessa. Luonnollisesti kokemuksen kautta nämä tiedot karttuvat ja niitä voidaan hyödyntää jatkosuunnittelussa. Nordgren (2016) on todennut, että aikaisempiin tietoihin luottaminen ilman vuosittaisia materiaalitestauksia ei ole riittävä tieto lopputuotteen laadunvarmistukselle.

4.3 Kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin laadunvarmistus (Cold Mix)

Kylmäpäällysteitä eli Cold Mix päällysteitä, joiden valmistuslämpötila on 100–130 °C, on testattu Yhdysvalloissa, Australiassa, Etelä-Afrikassa, Italiassa ja Tanskassa, joissa löytyy myös pitkäaikaista kokemusta kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin käytöstä ja ohjeistuksesta asfaltin valmistuksessa. Tutkimuksissa on käytetty sekä Ambient että Cryogeenikumijauhetta. Tutkimukset ovat painottuneet asfalttimassojen kylmäkestävyyteen, massan valmistukseen ja käytetyn kumijauheen eroihin (Ng Puga & Williams, 2016; Doyle *et al.,* 2013).

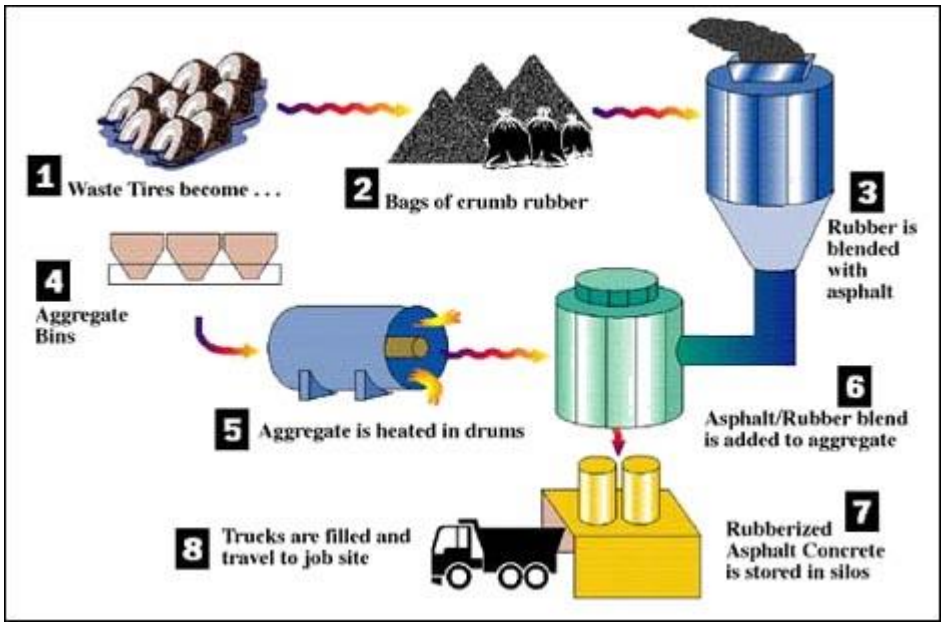
Tulokset perustuvat laboratoriossa ja kentällä tehtyihin määrityksiin, joissa on tarkasteltu kylmän ilmanalan olosuhteiden vaikutuksia pinnan karkeuteen, kylmän kestävyyteen ja menetelmä kylmän kestävyyden arviointiin (Doyle *et al.,* 2013). Ng Puga ja Willams (2016) tarkastelivat Ambient- ja Cryogeenijauheiden vaikutuksia asfalttiin ja kylmäkestoon. Molemmissa tutkimuksissa kierrätysmodifioitu kumibitumi oli valmistettu 180 °C lämpötilaan, jonka jälkeen kylmäsekoitusprosessi oli tehty asfalttiasemasekoitteisesti. Bitumin sekoituksessa ja seossuhteissa oli käytetty maakohtaisia ohjeistuksia, jotka poikkesivat kumijauheen määrän osalta 15-20 % toisistaan. Kylmäprosessissa kumijauheella ei tutkimuksien mukaan ollut vaikutusta RMB asfaltin laatuun.

Nordgrenin (2016) mukaan Ruotsissa on käytetty kylmäsekoitusprosesseja koeteillä, joissa liikemäärät vastaavat Suomen 3- tai 4-numeroista tiestöä. RMB asfaltin osalta lämpötilan merkitys vähenee massanvalmistuksessa, koska asfaltin sekoitusprosessin lämpötila ei vaikuta vielä kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin viskositeettiominaisuuksiin merkittävästi. Tämän mukaisesti massan valmistusprosessi ei ole niin merkittävästi sitoutunut lämpötilan ja viskositeetin vaikutukseen lopputuotteeseen (Pettinari *et al.,* 2014). Kylmäpäällysteillä kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin valmistuksessa sovelletaan taulukon 2 mukaista ohjeistusta ja maakohtaisia raja-arvoja.

4.4 RMB asfaltin laadunvarmistus

RMB asfaltin valmistus edellyttää ennakkokoepainotteista suunnittelua ennen varsinaisen tuotannon käynnistämistä. Nordgrenin (2016) mukaan Ruotsissa on ollut jo 10 vuoden ajan käytäntö, jossa laboratorio-olosuhteissa valmistetaan vähintään 3-5 toisistaan poikkeavaa reseptiä, joista tehdään koelaatta ja laatan porapaloista määritetään normaalit asfaltin laadunvarmistusmenetelmän mukaiset kokeet. Tämän jälkeen valitulla reseptillä tehdään koetien palanen, josta porapalojen avulla määritetään vähintään tyhjätila. Ruotsissa massatyyp-

pikohtaisesti on määritelty normeissa tyhjätila vaatimukset, mutta esimerkiksi kivimastiksi asfaltilla (SMA) tavoitteena on päästä mahdollisimman lähelle 2-% tyhjätilaa. Tyhjätilan seuraaminen on Ruotsissa keskeisin vaatimus RMB asfaltin työnaikaisessa seurannassa (Nordgren 2016). Kuvassa 8 on tyyppikuva RMB asfaltin valmistuksesta asfalttiasemalla.



Kuva 8. Tyyppikuva RMB asfaltin valmistuksesta asfalttiasemalla.

5 RMB asfaltin hyötyjä ja haasteita

Tässä osiossa kirjallisuusselvitystä on kerätty keskeisiä RMB asfaltin hyötyjä ja haasteita. Nämä tekijät eivät välttämättä suoranaisesti vaikuta kaikkeen Suomessa tehtäviin asfaltteihin ja osa tiedosta perustuu ruotsalaisten kokemuksiin, jolloin ne ovat ainakin olosuhteiden osalta rinnastettavissa Suomen oloihin. Tätä osiota ei kannata tarkastella siten, että kaikki hyödyt olisivat automaatioita RMB asfaltille ja vastaavasti haasteet on ratkaistu muualla maailmassa eikä meidän tarvitse toistaa samoja virheitä, mitä muut ovat joutuneet pioneerityössään tekemään. Tässä osiossa on tunnistettu mahdollisuudet ja vaikeudet, joita voidaan kohdata RMB asfalttia hyödynnettäessä suomalaisessa tierakentamisessa.

5.1 Hyötyjä

Kirjallisuuden perusteella voidaan kiistatta todeta, että laboratorio-olosuhteissa lisäämällä kumijauhetta bitumin lisäaineeksi pystyään RMB asfaltin laatuominaisuuksia parantamaan tai muuttamaan ainakin seuraavien ominaisuuksien osalta (Nordgren, 2016; Celauro *et al.*, 2012; Santagata *et al.*, 2008; CalTrans, 2006; Sousa, 2005; Bertollo, 2004;Potgieter, 2004):

Kitka
Kylmäkestävyys ja elastisuus
Halkeamien väheneminen
Lajittumien väheneminen
Päällysteen ikä
Käytettävän päällysteen paksuus
Melu
Muita hyötyjä

Näiden tekijöiden hyödyntäminen täysimääräisenä käytäntöön laboratoriosta ei ole yksiselitteisesti sama asia. Nordgrenin (2016) mukaan Ruotsissa tehdyt koetiekohteet tukevat hyötynäkökulmia selkeästi, mutta vaikutuksien suuruus on riippuvainen ympäristön ja ulkoisten tekijöiden vaikutuksista.

5.1.1 Kitka

Kierrätysrengasmodifioitu kumibitumi parantaa kitkaominaisuuksia asfaltissa, koska kumin vaikutus bitumissa lisää kitkaa, joka vaikuttaa tien ja renkaan väliseen kitkakertoimeen (Lo Presti *et al.*, 2013). Kirjallisuudesta ei voida vetää yksiselitteistä johtopäätöstä, että nastarengasta käyttävissä maissa kierrätysrengasmodifioitu kumibitumi säilyisi RMB asfaltin päällä pidempää kuin tavallinen asfaltti ja tällä perusteella kitkan lisäarvo voi olla lyhytaikainen, koska nastarenkaat ja märkätienpinta lisäävät päällysteen kulutusta merkittävästi.

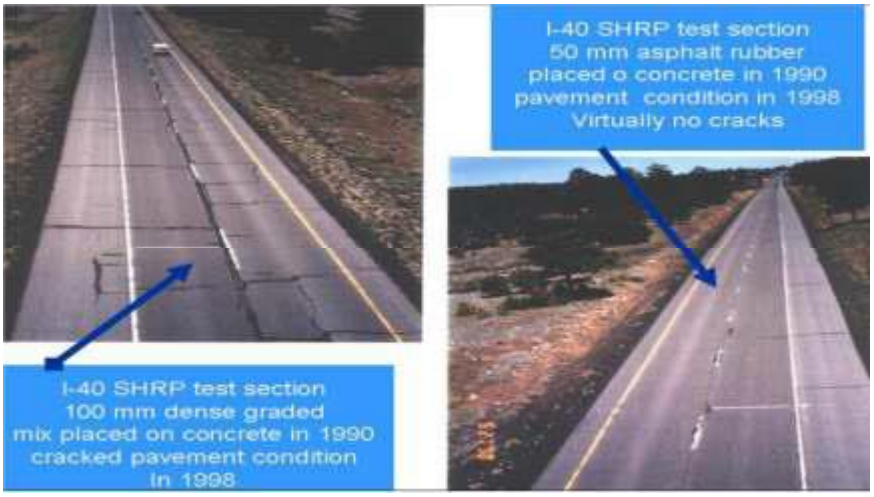
5.1.2 Kylmäkestävyys ja elastisuus

Kirjallisuuden perusteella kylmäkestävyys ja elastisuus on osoitettu olevan selkeästi parempi kierrätysrengasmodifioidulla kumibitumilla kuin normaalilla bitumilla (Doyle *et al.*, 2013). Tämä johtuu kumijauheen ja bitumin muodostamasta geelimäisestä verkosta, joka muodostuu, kun osa kumijauheesta sulaa bitumin sekaan nesteeksi ja osa jauheesta jää kiinteään muotoon muodostaen partikkeleista verkkorakenteen bitumin ja kiviaineksen väliin. Yksiselitteistä kvantitatiivista lukua on mahdoton esittää kirjallisuuden perusteella, koska ulkoiset olosuhteet, materiaalien koostumukset ja testausmenetelmät vaihtelevat, jolloin paremmuuden yksiselitteinen arviointi on haastavaa.

5.1.3 Halkeamien väheneminen

Halkeamien muodostumista on tarkasteltu Yhdysvalloissa useilla koetieosuuksilla. Nordgrenin (2016) mukaan RMB asfaltti vähentää halkeamien muodostumiseen, mikäli tien rakenne toimii suunnitellusti. Tyypillisesti näitä hyötyjä voidaan tarkastella vasta viidestä kymmeneen vuoden kuluttua päällystämisestä.

Kuvassa 9 on esimerkki Yhdysvalloista, jossa vasemman puoleisen kuvan tieosassa ei ole käytetty kumia asfaltin joukossa ja oikean puoleisessa kuvassa kumi kuuluu osaksi sideainetta. Tarkkailujakso kuvissa on 9 vuotta ja niiden perusteella voidaan visuaalisesti todeta halkeamien määrän olevan olennaisesti alhaisempi kumiasfalttimassalla. Kuvan perusteella ei voida vetää kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä, koska asfalttien koostumusta ei voitu aukottomasti selvittää, joka olisi ollut ehdoton edellytys tarkempien analyysien tekemiseen, mutta esimerkkinä erittäin mielenkiintoinen vertailukohde.



Kuva 9. Esimerkkikohde Yhdysvalloista, jossa vasemman puoleisessa tieosassa ei ole käytetty kumia asfaltin joukossa ja oikean puoleisessa kuvassa kumi kuuluu osaksi sideainetta.

5.1.4 Lajittumien väheneminen

Nordgrenin (2016) mukaan RMB asfaltilla on alentava vaikutus lajittumien muodostumiseen ja samalla vaikutus tienelinkaareen; homogeenisempi asfaltti pidempi elinkaari. Hänen arvionsa perustuu vain empiiriseen tarkasteluun ja yli 40 vuoden kokemukseen asfalttirakentamisesta. Lisäksi hän on Ruotsissa selkeästi eniten työskennellyt RMB asfaltin kanssa, mutta asiasta ei ole mitään tieteellistä näyttöä. Mikäli Nordgrenin arvio on oikea, on tällä tekijällä merkittävä osa asfaltin kestoon jatkossa.

5.1.5 Päällysteen ikä

Päällysteen iästä on erittäin vähän tieteellisiä julkaisuja, koska menetelmä ei ole täysimääräisesti lyönyt itseään maailmalla läpi ja liikennemäärästä sekä eri ulkoisista tekijöistä johtuen päällysteen iän tieteellinen tarkastelu voi viedä kymmeniä vuosia, ennen kuin niistä saadaan riittävästi tietoa. Yhdysvalloissa on tehty kustannustarkasteluja RMB asfaltin suhteen, joita tarkastelen tarkemmin kohdassa 7. Päällysteen käyttöikä on kuitenkin erittäin kompleksinen tekijä, johon vaikuttavat tilaajan ja urakoitsijan toimintatavat, takuuajat ja vastuut, liikenteen ja liikennerakenteen muutokset pitkällä aikavälillä. Suomessa tehtyjä painorajoitusmuutoksien vaikutuksia on täysin mahdotonta arvioida etukäteen ja niidenkin osalta viimeisen 20 vuoden aikana muutoksia on ollut useita, joilla voi olla suoravaikutus asfalttirakenteiden toiminnalliseen laatuun. Lisäksi sähköautot ja hybridiautot voivat painaa tulevaisuudessa vähemmän kuin nykyisten polttomoottoriautot, jolloin teiden kuluma tulevaisuudessa voi olla nykyistä pienempi

5.1.6 Päällysteen paksuus

Kirjallisuudesta nousi esiin myös päällysteen ohentaminen, kun käytetään RMB asfalttia. Kirjallisuudessa ei ollut kuitenkaan avattu aukottomasti tierakennetta ja mikä profiili tai rooli asfalttikulutuskerroksella oli tutkituilla tieosilla. Tämän on kuitenkin todennäköisimmin mahdollistanut kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin ominaisuudet, jotka parantavat RMB asfaltin muodonmuutosominaisuuksia.

5.1.7 Melu

Melun alentamiseen pelkän kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin lisääminen ei tutkimuksien mukaan vaikuta merkittävästi liikenteen aiheuttamaan meluun. Mikäli tarkasteluun lisätään kiviaineksen ominaisuuksien muuttaminen avoimempiin asfaltteihin, saadaan yhteisvaikutuksesta positiivisia tuloksia. Lisäksi tulee huomioida, että runkoaineen fraktiokoon ja tyhjätilan muutoksilla on vaikutusta päällysteen kestoikään mm. riippuen liikennemääristä.

5.1.8 Muita hyötyjä

RMB asfaltti voidaan valmistaa Suomessa käytössä olevilla asfalttiasemilla lisäsekoituslaitteiden asennuksen jälkeen. Kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin käyttäminen ei edellytä erillisiä varastoja tai tiloja asfalttiaseman alueella. Lämpötilat ovat sekoituksen, kuljetuksen ja levityksen osalta täysin samoja kuin nykyisillä asfalteillakin.

Kirjallisuuden perusteella RMB asfaltin sekaan on lisätty myös sementtiä lisäämään rakenteen kantavuutta ja jäykkyyttä. Tutkimusta on tehty pääosin kylmäpäällysteillä (Cold Mix), jolloin päällysteen vetolujuus, jäykkyys ja halkaisulujuus paranevat (Pettinari *et al.,* 2014).

5.2 Haasteita

Tässä kirjallisuusselvityksessä on ilmennyt seuraavia tekijöitä, jotka ovat olleet tai ovat haasteita RMB asfaltin tekemisessä (Nordgren, 2016; Celauro *et al.,* 2012; Santagata *et al.*, 2008; CalTrans, 2006; Sousa, 2005; Bertollo, 2004;Potgieter, 2004):

- Bitumin valmistus
  - Viskositeetin hallinta
  - Lämpötilan hallinta
- Sekoituslaitteiden puuttuminen
- Laboratoriolaitteiden puuttuminen
- RMB asfaltin käyttö- ja kestoikä
  - Remix-päällysteet
  - Nastarengaskäyttö
  - Teiden suolaus
- Yleisten ohjeiden puuttuminen (kansainväliset standardit)
  - Urakoitsijoiden osaaminen
  - Viranomaisten osaaminen
- Ympäristövaikutukset
- Terveysvaikutukset

5.2.1 Bitumin valmistus

Bitumin valmistus on RMB asfaltin valmistuksen selkeä kulmakivi. Mikäli bitumin ja kumijauheen sekoitusvaiheessa ei pystytä hallitsemaan lämpötilan ja viskositeetin keskinäistä suhdetta, voidaan joutua tilanteeseen, ettei sekoitettu bitumi vastaa vaadittuja laatuvaatimuk-

sia. Bitumin valmistamiseen kuuluvat myös sen kuljettaminen ja varastointi asfalttiasemalla. Varastointi tulee kysymykseen työvuorojen välillä ja viikonloppuisin, jolloin asfaltin valmistaminen joudutaan pysäyttämään.

Kumijauhepartikkeleista johtuen bitumin lämpötilamuutokset vaikuttavat sen homogeenisuuteen, jolloin bitumin viskositeetti muuttuu ja kumipartikkelit joko sulavat nesteeksi tai muodostavat bitumisiiloissa epähomogeenisuutta painumalla siilon pohjaan. Uudelleen sekoittaminen ja bitumin lämmittäminen on näissä tapauksissa normaalibitumia haastavampaa, koska bitumimassa täytyy saada lämmitettyä ja sekoitettua homogeeniseksi massaksi.

5.2.2 Sekoituslaitteiden puuttuminen

Suomessa ei ole käytettävissä toistaiseksi yhtään laitteistoa, joka olisi suunniteltu erityisesti bitumin ja kumijauheen sekoittamiseen. Tämä vaikuttaa laboratoriokokeiden ja esivalmistusmassojen tekemistä, joiden avulla voitaisiin testata laboratorio-olosuhteissa RMB asfaltin toimintaa. Laitteistoja on saatavilla materiaalitoimittajilta ja tämä tekijä voidaan eliminoida kohtalaisen helposti.

5.2.3 Laboratoriolaitteiden puuttuminen

Suomessa on karsittu erittäin paljon laboratoriokantaa viimeisten 10–15 vuoden aikana ja tästä johtuen PANK-hyväksyttyjen asfalttilaboratorioiden määrä on vähentynyt. Tämä johtuu osittain päällystysmäärien vähenemisenä, toimintojen keskittämisenä ja palvelutarpeen vähenemisenä. Esimerkiksi sivurullakulutuslaitteita (SRK) on enää muutamia käytössä ja ilmeisesti vain Aalto-yliopistolla sellainen on jonkin asteisessa toimintakunnossa. Esimerkkinä Pohjois-Suomessa oli vuosituhannen vaihteessa yhdeksän PANK-hyväksyttyä laboratoriota ja tänään enää kaksi.

5.2.4 RMB asfaltin käyttö- ja kestoikä

RMB asfalttia on valmistettu todennäköisesti Yhdysvalloissa ensimmäisen kerran 1980 – luvulla jossain muodossa, jota voidaan verrata nykymuotoiseen RMB asfalttiin. Käyttö- ja kestoikä ovat kuitenkin vielä varsin epämääräisiä käsitteitä, koska eri maissa fraktiokoot, bitumilaadut ja kumijauheiden laadut vaihtelevat huomattavasti, joka tekee materiaalien välisestä analyysistä haastavaa.

Suomessa teillä, joilla on suuret liikennemäärät, käytetään Remix-tyyppistä pintausta asfaltin uusimiseen, jossa vanha-asfaltti lämmitetään, kuumajyrsitään, sekoitettaan uudelleen ja levitetään uuden lisätyn massan kanssa tielle takaisin.. Tämä menettelytapa on käytössä myös muissa maissa, mutta menettelyt eivät ole välttämättä samanlaisia. Esimerkiksi Italiassa Remix tai Recycle-asfaltointi tarkoittaa tyypillisesti kylmäjyrsintää ja uudelleen sekoittamista asfalttiasemalla. Remix-asfaltoinnin haasteita on mm. Nordgrenin (2016) mukaan lämmitysvaiheessa asfaltin lämpötilan hallinta ennen jyrsintää. Lämmitysvaiheessa asfaltin pintaa lämmitetään kuvan 11 tyyppisillä yleensä propaania käyttävillä lämmitinyksiköillä.



Kuva 11. Asfaltin lämmitysyksiköitä ennen remix-sekoitusta.

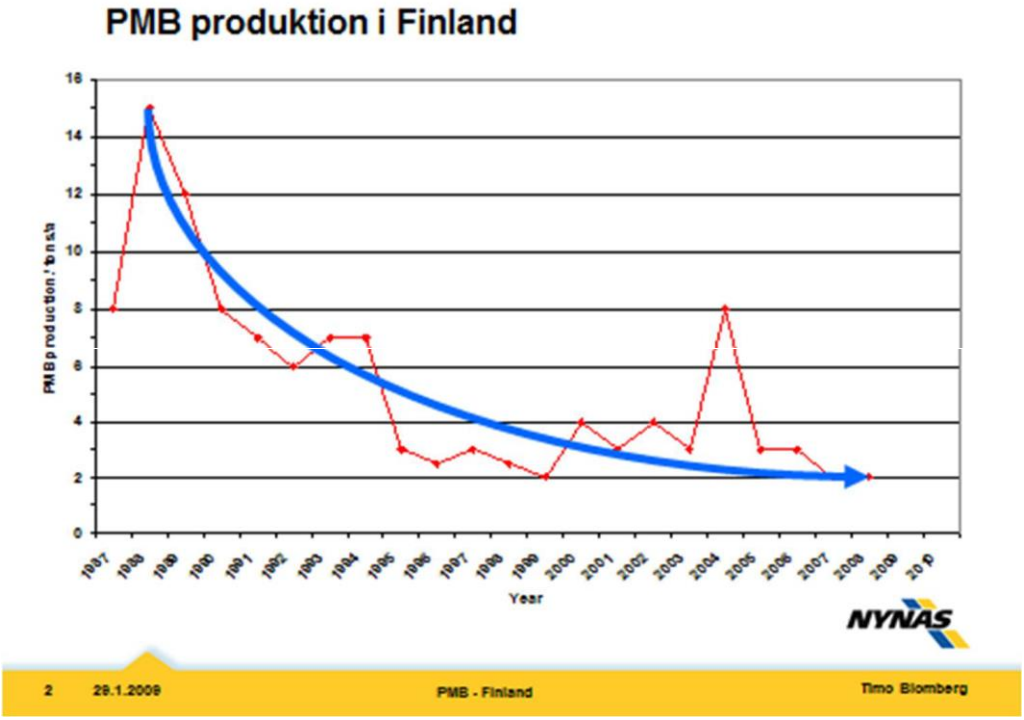
Kuvasta 11 voidaan todeta, että vanhan asfaltin pinta on lämmennyt niin paljon, että lämmitysyksiköiden kumipyörät ovat osittain painuneet asfaltin pintaan. Tämä johtaa kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin lämpötilan tarkastelemiseen, koska asfaltti ei ole koko jyrsintäkerroksen matkalta tasaisesti lämmennyt vaan pinta ja päällysteen keskiosa on kuumempi asfaltin reunoihin ja massakerroksen keskikohtaan nähden. Lisäksi jyrsittävän asfaltin sekaan sekoitetaan uutta asfalttimassaa, jolloin koko asfalttimassasta tulisi saada homogeeninen rakennekerros. Kirjallisuudessa tästä menetelmästä on varsin vähän kokemuksia. Voidaan kuitenkin olettaa, että menetelmää modifioimalla lämpötilan hallinta on mahdollista myös tienpäällä jatkuvatoimisesti.

Nastarenkaiden ja suolauksen vaikutuksista on muutamia kirjallisia julkaisuja tehty Ruotsissa. Tulokset perustuvat muutamien vuosien kokemukseen, mutta ovat luonnollisesti suuntaa-antavia (Carlsson, 2015). Kierrätysrengasmodifioidulla ja polymeerimodifioidulla kumibitumilla oli kuluma ollut kolmen talvijakson jälkeen vertailubitumia huomattavasti suurempi. Tutkimus perustuu vain yhdeksään noin 200 metrin koetieosuuteen Tukholman ja Uppsalan lähellä, joissa tienkäyttäjät olivat ajaneet normaalisti noin neljästä kuuteen kuukauteen vuodessa nastarenkailla ja tienpitäjä oli käyttänyt suolojen yhdisteitä liukkauden torjuntaan. Nordgrenin (2016) mukaan erityisesti suolan käyttö liukkauden torjuntaan vaikuttaa negatiivisesti modifioitujen kumibitumien käyttöön. Vastaavasti Göteborgin alueella kolmekaistainen kaupunkiin johtava sisäänajo tie oli säilynyt viiden vuoden jälkeen lähes virheettömässä kunnossa. Näiden tulosten perusteella pitkälle johtavien johtopäätöksien tekeminen ei ole mahdollista johtuen tietomäärän rajallisesta määrästä.

5.2.5 Yleisten ohjeiden puuttuminen (kansainväliset standardit)

Yksi keskeisimpiä haasteita RMB asfaltin laajamittaiselle hyödyntämiselle, ja sitä kautta myös hyväksymiselle, on yhtäläisten ja kaikenkattavasti hyväksyttyjen ohjeiden, laatuvaatimusten ja testausmenetelmien puuttuminen. Ruotsissa on laadittu jo vuosien ajan oma ohjeistus, jossa on hyödynnetty laajamittaisesti kansainvälistä tietämystä sekä omia kokemuksia viimeisen kymmenen vuoden ajalta, joka on tämän kirjallisuusselvityksen liitteenä 1 (Nordgren, 2015).

Ohjeistuksen lisäksi meillä tulisi olla koulutettua ja osaavaa henkilökuntaa niin tilaaja kuin urakoitsija organisaatioissakin. Kuvassa 12 on Nynäsin Timo Bloombergin tekemä kuvaaja polymeerimodifioidun bitumin käytöstä Suomessa.



Kuva 12. Polymeerimodifioidun kumibitumin käyttömäärät suomessa 1987–2010. (Bloomberg, 2012).

Käyttömäärät ovat alentuneet 1990 luvun alun huippuvuosista yhteen seitsemäs osaan ja vuonna 2012 käyttömäärä oli enää 500 tonnin tasolla. Tämä on johtanut väistämättä tilanteeseen, jossa materiaalin tilaajat ja urakoitsijat eivät ole käyttäneet kumibitumia asfaltissa, joka on voinut vaikuttaa siihen liittyvän tietotaidon alenemiseen.

5.2.6 Ympäristövaikutukset

Uuden henkilöauton rengas painaa noin kymmenen kiloa ennen käyttöönottoa ja siinä vaiheessa, kun rengas siirtyy kierrätettäväksi, sen paino on noin kahdeksan kiloa. Renkaasta kuluu kaksi kiloa painoa renkaan pinnoilta, jotka hankautuvat kitkan vaikutuksesta päällysteen pintaan tai murtuvat pieninä partikkeleina renkaan pinnasta renkaan ikääntymisen myötä. Näitä tekijöitä ei ole juurikaan käsitelty kansallisesti tai kansainvälisesti ympäristöä haittaavina tekijöinä.

Suomessa asfalttiin käytetään tyypillisesti neljän senttimetrin paksuiselle yhden neliönmetrin alueelle noin viisi kuusikiloa bitumia, josta kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin eli kumijauheen osuus olisi yhdestä puoleentoista kiloa. Oletetaan, että henkilöauton renkaan käyttöikä on keskimäärin 50000 tiekilometriä jokaista rengasta kohden. Tiellä, jonka liikennemäärä on 30000 ajoneuvoa vuorokaudessa, kuluu autojen renkaista kumia yhden neliömetrin alueella noin 2,4 milligrammaa vuorokaudessa, koska alueen ylittävät sekä ajoneuvon etu- ja takarengas.

Jos oletetaan, että RMB asfaltin käyttöikä on 5 vuotta, kuluu yhden metrin matkalla ajoneuvojen renkaista, jonka liikennemäärä on 30000 ajoneuvoa vuorokaudessa, yhteensä noin 4,5 kilogrammaa kumia. Tämä määrä on kaksi ja puolikertaa suurempi kuin kumijauheen osuus RMB asfaltissa.

RMB asfaltissa kierrätysrengasmodifioitu kumibitumi on sekoitettuna asfalttimassaan, jolloin RMB asfaltista poistuvan bitumin määrä on vain murto-osa ajoneuvojen renkaista poistuvaan kumimäärään tiestöllä. Tämän tarkastelun perusteella kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin ympäristölle aiheuttama kuormituksen suuruus ei ole merkityksellinen, kun tarkastellaan liikenteestä aiheutuvaa kuormitusta ympäristölle.

5.2.7 Terveysvaikutukset

Terveysvaikutuksien osalta on Ruotsissa Svenska Miljöinstitutet ja ERTMA (European Tyre & Rubber manufacturers´ association) ovat tutkineet ja keränneet maailman laajuisesti tietoa kierrätysrengasmateriaalien terveysvaikutuksista. ERTMA on julkistanut raportin 4. huhtikuuta 2016, johon on kerätty eripuolilta maailmaa tutkimustietoa mm. PAH yhdisteiden vaikutuksista ihmiseen ja terveyteen (liite 2). Svenska Miljöinstitutetin tutkimuksen raportti ei ole vielä julkinen, mutta ennakko tietojen perustella sen johtopäätökset ovat vastaavat kuin ERTMA raportissa.

Kierrätysrengasmodifioitu kumibitumi saattaa korkeissa lämpötiloissa aiheuttaa epämiellyttävää hajua, mutta tutkimuksien mukaan sillä ei ole terveyteen vaikutusta. Tämä ei poista kuitenkaan tosiasiaa, että haju on epämiellyttävä alueella työskentelemille työntekijöille.

6 Esimerkkikohteita

Kirjallisuusselvitykseen on valittu kuumapäällystyskohteita Ruotsista ja Yhdysvalloista sekä kylmäpäällystyskohteita Italiasta, Puolasta ja Tanskasta. Koekohteiden valinnassa on painotettu tuloksien vertailtavuutta, työtekniikoiden kokemusta ja työmenetelmien vastaavuutta Suomeen. Kumiasfaltin ensimmäiset ohjeistukset on tehty 1980-luvulla Arizonassa ADOT. Vastaavia ohjeistoja on mm. Kaliforniassa, Asphalt Rubber Usage Guide (2003).

Eri puolilla maailmaa kierrätysrengasmateriaalien hyödyntämiseen osana kiertotaloutta on liittynyt poliittisia ambiitioita, joiden perusteella niiden käyttöä on voitu kasvattaa merkittävästi ilman taloudellisia vaikutuksia. Tästä esimerkkinä ovat Kalifornian, Arizonan, New Jerseyn ja Floridan osavaltiot. Vuosittaisesta asfaltoinnista nämä osavaltiot käyttävät noin 30 % kumibitumia asfaltin sideaineena. Tämä perustuu heidän ympäristön suojaamiseen, jossa mm. kierrätysrenkaista valmistettua kumijauhetta hyödynnetään asfaltin lisäaineena bitumissa.

6.1 Yhdysvallat

Yhdysvalloissa kumiasfalttia on käytetty eri osavaltiossa moottoriteillä ja maanteillä, joissa päällysteiden käyttöikä on parhaimmillaan kaksinkertaistunut 8-10 vuodesta 16–20 vuoteen. Arizonassa nykyisin tehdään vuosittain noin 1 miljoona tonnia erilaisia kumibitumia asfaltteja erilaisiin käyttökohteisiin.

Lousianassa on tehty 2002 tutkimusartikkeli, jossa kahdeksaa eri moottoritiekohdetta verrattiin kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin ja vertailubitumin kesken laboratoriossa ja kenttämittauksin 5-7 vuoden liikenteen kulutuksen jälkeen. Asfalteista vertailtiin tyhjätilan, halkeaman syvyyden, pinnanavoimuuden ja visuaalisen halkeamien tuloksia keskenään. Vertailubitumi pärjäsi laboratoriotesteissä kierrätysmodifioitua kumibitumia paremmin, mutta liikenteen kulutuksen jälkeen kumibitumimassat olivat kokonaisuudessaan parempia kuin vertailubitumilla tehdyt asfalttimassat. (Huang *et al.*, 2002) Lousianan testien perusteella pelkkien laboratoriossa tehtyjen tulosten analysointi ei kuvaa lopputuotteen lopullista laatua.

6.2 Ruotsi

Ruotsissa kierrätysrengasmodifioidulla kumibitumilla on tehty viimeisen kymmenen vuoden aikana noin 3500 tiekilometriä RMB asfalttia. Nordgrenin (2016) mukaan tuona aikana on koerakenteista hankittu valtava tietomäärä, laadittu kansallinen ohjeistus ja opetettu urakoitsijoiden henkilöstöä toimimaan RMB asfaltin kanssa. Heidän kokemuksiensa perusteella RMB asfaltin valmistaminen edellyttää erityistä huolellisuutta bitumimassojen suhteutuksessa, ennakkokokeissa ja massojen valmistuksessa.

Ruotsin koetiet ovat pääsääntöisesti tehty Malmö Göteborg alueelle ja Tukholman läheisyyteen. Liikennemäärät ja tietyypit ovat vaihdelleet laidasta laitaan 10 vuoden aikana. Koeteissä on käytetty sekä Ambient että Cryogeenitekniikalla valmistettua kierrätysrengasmodifioitua kumibitumia. Ruotsissa toiminta on perustunut tiukkaan liikenneviraston johtamaan toimintaan, jossa bituminsekoituslaitteistosta ja ohjeistus on suhteutuksesta lähtien perustunut viranomaisohjaukseen. Tämä toiminta on Nordgrenin (2016) mukaan varmistanut, että RMB asfaltin laadunvarmistukseen käytetyt laboratorio- ja ennakkokokeet on tehty riittävän laajasti eri tekijät huomioiden. Tämän tyyppinen ohjaustoiminta on väistymässä ja tilalle on tulossa myös RMB asfaltinkin osalta tilaaja – tuottaja malli, jossa vastuu lopputuotteen laadusta on urakoitsijalla.

Koetieosuudet ovat tuottaneet merkittävästi tietoa, jota kannattaa ehdottomasti hyödyntää Suomessa koetieosuuksia toteutettaessa. Nastarengaskulutuksen vaikutukset ovat ilmeiset myös Ruotsissa vaikka eteläosissa nastarenkaiden käyttöaika on vain pari kuukautta. Toinen merkittävä tekijä Nordgrenin (2016) mukaan on liukkauden torjunnan ja nastarenkaiden kulutuksen yhteisvaikutus, joka ilmenee VTI:n (2015) tekemästä tutkimuksesta Tukholman ja Uppsalan alueen koeteistä. Suuret liikennemäärät ja nastarenkaan sekä liukkauden torjunnan aiheuttama märkäkuluma nopeuttavat geelimäisen verkkorakenteen purkautumista RMB asfaltin pinnasta. Tämä sama ilmiö tulee esille myös "normaaleilla" vertailurakenteiden bitumeilla, mutta VTI:n tutkimuksen tulokset olivat vertailubitumin osalta kumibitumia parempia ja kulumat pienempiä. Göteborgin ja Malmön alueella kulumisen tutkimustulokset ovat olleet päinvastaisia. Kuitenkin täytyy huomioida, että kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin valmistusprosessi on kehittynyt, sekoitusmenetelmät ja laitteet ovat kehittyneet sekä kokemusperäinen tietämys on lisääntynyt huomattavasti Ruotsissa kymmenen vuoden aikana, jolla luonnollisesti on merkitystä RMB asfaltin ominaisuuksiin.

Ruotsalaisten tekemät koetiet ja niistä saatu kokemus sekä tietämys tulisi ehdottomasti hyödyntää siinä vaiheessa, kun Suomessa koetietä ollaan toteuttamassa. Lajittumien väheneminen RMB asfaltissa suhteessa normaaliasfalttiin on asfaltin iän osalta tärkeä tekijä. Toinen merkittävä huomio on halkeamien määrän aleneminen RMB asfalttiteissä. Nordgrenin (2016) mukaan yksi onnistumiseen liittyviä tekijöitä on vanhan asfaltin päälle asennettavassa RMB asfaltissa vanhan pinnoitteen lämpötila. Ruotsalaisessa ohjeistuksessa vanha asfaltti tulee lämmittää 30–50 celsiusasteiseksi ennen uudelleen pinnoittamista, mikäli käytetään RMB asfalttia. Lisäksi ilman lämpötilan tulisi olla yli 10 °C. Nämä tekijät asettavat ehdottomasti haasteita ja kustannuksia RMB asfaltin käyttämiselle, mutta samalla varmistavat lopputuotteen laadun onnistumisen.

6.3 Muita kohteita

Italiassa ja Tanskassa on tehty kylmäpäällysteiden osalta koeteitä, joista on kerätty mittaustietoja massan tiivistymisen, halkeamien keston ja säilymisen osalta (Dondi *et al.,*2014). Tutkimuksen tulokset osoittavat, että kierrätysrengasmodifioitu kumibitumi tiivistyi 1-2 % tiiviimmäksi verrattuna normaaliin bitumiin. Näissä kokeissa Cryogeenitekniikalla valmistettu kumijauhe oli kuumennettu bitumin kanssa 170 °C lämpötilaan ja sekoitettu noin 60 minuuttia eli ns. normaalien kierrätysrengasmodifioitujen kumibitumiohjeistuksen mukaisesti.

Tiivistymisen lisäksi RMB asfaltti säilyi paremmin ja halkeamien määrä oli alempi verrattuna tavalliseen asfalttimassaan. Tämän selittää ainakin osin RMB asfaltin parempi tiivistyminen eli alhaisempi tyhjätila (Dondi *et al.,* 2014). Tutkimuksessa oli verrattu myös Ambient – ja Cryogeenitekniikalla valmistettuja kumijauheita. Kylmäpäällystysmassoilla kumijauheen merkitys ei korostu samalla tavalla kuin kuumapäällysteillä, joka ilmeni myös tämän tutkimuksen tuloksista.

Puolassa on tehty runsaasti tutkimusta kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin ja RMB asfaltin osalta viimeisen 10 vuoden aikaan. Yksi keskeisiä tutkimuksen kohteita on ollut melun mittaaminen eri asfalttilaaduilla. Swieczko-Zurek (2016) on selvittänyt RMB asfaltin melun muutosta käytettäessä kierrätysrengasmodifioitua kumibitumia, jonka runkoaines vastaa kivimastiksi asfaltin (SMA) runkoainetta. 50 km/h tuntinopeudella tehdyissä mittauksissa ei pystytty havaitsemaan poikkeamaa eri sideaineiden välillä, mutta 80 km/h nopeudella kierrätysrengasmodifioitu kumibitumi oli 0,2-1,2 dB alhaisempi riippuen käytetyistä renkaista. Tämän perusteella voidaan todeta, että melun alentaminen pelkästään sideaineen vaikutuksesta on varsin vähäinen (Svieczko-Zurek *et al.,* 2016).

7 LCA

Kierrätysrengasmodifioitukumibitumin kannattavuus RMB asfaltissa on todennäköisesti helpoin perustella Life Cycle Analyysin (Life Cycle Analysis, LCA) kautta. Sideaineen kustannukset kasvavat, kun siihen lisätään lisäaineita, sekoitetaan bitumimassa uudestaan, tarkkaillaan erilaisia ominaisuuksia ja rakennetaan koeteitä. Tähän kirjallisuusselvityksen on kerätty niitä keskeisiä tekijöitä, jotka vaikuttavat kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin valmistukseen ja sitä kautta hyötyjä, joita RMB asfaltin avulla pystytään saavuttamaan.

Tässä osiossa ei tulla tarkastelemaan LCA:ta monimutkaisten mallien kautta vaan yksinkertaisten tekijöiden, kuten päällysteen kestoiän ja kunnossapitokustannusten osalta. Kirjallisuuslähteissä RMB asfaltti on esimerkiksi Bartolozzin (2015) mukaan 10 % kalliimpaa kuin normaali sideaineella tehty asfaltti, mutta pystyy saavuttamaan elinkaaren aikana 30–40 % säästöt. Nämä skenaariot perustuvat oletuksiin, kuten sideaineen hinnan käyttäytymiseen tulevaisuudessa, tuotantoprosessien kehitykseen ja ylläpidon kustannuksiin.

Sousa (2006) on tarkastellut Yhdysvalloissa normaalin kuuma-asfaltin ja RMB asfaltin elinkaarikustannuksia 15 vuoden tarkkailujaksolla, jossa on vertailtu ylläpitoon liittyviä kustannuksia (kuva 11).



Kuva 11. RMB asfaltin ja normaalin kuuma-asfaltin ylläpitokustannusten vertailukaavio.

Sousan tutkimukset osoittavat, että ylläpitokustannukset alkavat poiketa merkittävästi vasta viiden ylläpitovuoden jälkeen, jolloin RMB asfaltti on huomattavasti edullisempi ylläpitokustannuksiltaan. Nordgrenin (2016) mukaan tilanne on Ruotsissa ollut samanlainen ja todellisia etuja RMB asfaltista saadaan vasta 5-10 vuoden kuluttua päällystämisestä, koska halkeamat, murtumat ja lajittumat ovat vähäisempiä normaaliasfalttiin verrattuna. Tämä vaikuttaa suoraan ylläpitokustannuksiin.

Nordgrenin (2016) mukaan nykyiset urakkamuodot eivät houkuttele urakoitsijoita etsimään innovatiivisia vaihtoehtoja ylläpitokustannusten alenemiseksi, koska heillä ei ole suoraan yleensä ylläpitovelvoitetta asfaltoinnin jälkeen ja takuu aika on vain kaksi vuotta, jolloin merkittäviä muutoksia asfaltin pintaan ei ole vielä ehtinyt muodostua. Mikäli kunnossapito tai osittainen kunnossapito kuuluisi päällystysurakoitsijalle esimerkiksi 20 vuotta päällystämisen jälkeen, olisi todennäköistä, että urakoitsijat haluaisivat kehittää päällysteitä entistä kestävämmiksi, että heidän kunnossapitovelvoitteen aikana korjauskustannukset eivät muodostuisi merkittäväksi kustannuseräksi.

Urakointimuotojen kehittämisen kautta Suomessa voitaisiin saavuttaa pitkällä aikavälillä merkittäviä kustannushyötyjä, kun osittainen kunnossapito olisi osana päällystysurakkaa. Esimerkkinä tästä voisi olla jonkin uuden ajoradan kunnossapitovelvoite, jolloin tienrakentaja vastaisi myös kunnossapidosta 20–40 vuotta tien käyttöönoton jälkeen.

8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Kirjallisuusselvityksen tavoitteena oli selvittää mitä ja miten muualla maailmassa on toteutettu kumijauheesta kierrätysrengasmodifioitua kumibitumia ja RMB asfalttia. Lisäksi työssä oli tavoitteena kartoittaa hyötyjä ja haasteita, joita kumijauheen käyttäminen osana asfaltin sideainetta aiheuttaa.

Tämän kirjallisuusselvityksen tuloksena ovat selvinneet eri kumijauheiden valmistustekniikan vaikutukset käytettävyyteen RMB asfaltissa, kumijauheiden vaikutukset bitumiin ja mitä tekijöitä RMB asfaltin valmistuksessa tulee huomioida. RMB asfalttia ei ole hyödynnetty koskaan Suomessa ja tästä syystä meillä ei ole siihen liittyviä kokemuksia. Sen sijaan Ruotsissa massoja on tehty vuosittain sama määrä kuin päällystettäisiin nelostie Oulusta Jyväskylään vuosittain eli noin 350 kilometriä.

Maailmalla, erityisesti Yhdysvalloissa, RMB asfalttia on tehty jo lähes 40 vuoden ajan ja massan hyötyjä on tarkasteltu laajasti. Tällä hetkellä kumijauheiden ja RMB asfaltin eri osa-alueilla julkaistaan viikoittain yhdestä viiteen tieteellistä artikkelia, joka ilmenee myös tämän selvityksen aineiston tuoreudessa. Yhdysvalloissa tehtyjä tutkimuksia RMB asfaltille ei voida suoraan rinnastaa Suomeen esimerkiksi lämpötilaolosuhteista johtuen.

Kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin valmistaminen on tietoa ja kokeita vaativa prosessi, jossa lämpötilan seuranta on avainasemassa laadukkaan ja käyttökelpoisen bitumin aikaan saamiseksi. Viskositeetin vaihtelut vaikuttavat bitumin sekoitettavuuteen ja sitä kautta suoraan lopputuotteen laatuun.

RMB asfaltilla on tieteellisten julkaisujen pohjalta osoitettu olevan kiistattomia etuja normaaliasfalttiin verrattuna kitkan, kylmäkestävyyden, elastisuuden ja halkeamien muodostumisen suhteen. RMB asfaltti on kuitenkin valmistuskustannuksiltaan normaaliasfalttia kalliimpaa ja saavutettavien hyötynäkökulmien avulla tulisi pystyä tapauskohtaisesti määrittelemään mikä RMB asfaltin ”break even” suhteessa normaaliasfalttiin.

Mikäli tai kun Suomessa päädytään kokeilemaan ja käyttämään RMB asfalttia kannattaa opetella Ruotsissa tehdyt ”virheet” ennen tuotannon aloittamista. Ruotsalaiset ilmasto-olosuhteet ja ajoneuvojen renkaat ovat varsin samanlaiset kuin meillä Suomessakin. Tällä perusteella ruotsalainen ohjeistus voitaisiin ainakin suurimmaksi osaksi ottaa käyttöön tai soveltaa Suomessa sellaisenaan.

Kuumapäällysteiden lisäksi tulisi Suomessa tarkastella kylmäpäällysteitä, kuten PAB päällysteitä tai vanhaa öljysoraa, ja niiden uudelleen käsittelemistä kierrätysrengasmodifioidulla kumibitumilla. Tällä osa-alueella kunnossapitovelka on suuri ja jo viime vuosina vanhoja pinnoitteita on jyrsitty pois, koska niiden kunnostamiseen ei ole käytettävissä riittävästi resursseja. Kierrätysrengasmodifioidun kumibitumin edut voisivat korostua tämän tyyppisellä tiestöllä ja jatkaa merkittävästi vanhojen päällysteiden käyttöikää uudelleenkäsittelyn jälkeen.

Taloudellisten hyötyjen saavuttaminen ns. pikavoittoina ei ole kovinkaan todennäköistä mikäli verrataan RMB asfalttia normaaliasfalttiin. RMB asfaltin kalliimpi valmistuskustannus on mahdollista saavuttaa kunnossapitohyötynä vasta vuosien jälkeen sen valmistamisesta. Tästä syystä asfalttiurakoitsijat tulisi saattaa mukaan kehittämistyöhön siten, että pitkän tähtäimen taloudelliset edut voitaisiin analysoida jatkossa kunnossapitohyötynä. Tämän hetkinen urakointimalli ei juuri velvoita ja vaadi asfalttiurakoitsijoita kehittämään massojen käyttöikää, koska siitä saatava hyöty muodostuu heille negatiiviseksi. Kunnossapitovelvoitteen lisääminen pitkäksi aikaa osaksi asfalttiurakkaa voisi antaa kipinän asfalttiurakoitsijoille osallistua asfalttimassojen kestävään kehittämiseen, joka olisi pitkällä tähtäimellä merkittävä hyöty koko yhteiskunnalle.

Yhteenvetona voidaan todeta, että RMB asfaltti soveltuisi käytettäväksi Suomessa osalle tiestöä nopeallakin aikavälillä. Sen sijaan suuriliikenteisillä teillä käytössä olevan remix-

kunnossapitomenetelmän osalta vaadittaisiin testaamista suomalaisella kalustolla ja siihen varmaankin jouduttaisiin tekemään modifikaatioita erityisesti lämpötilan hallintaan liittyen. RMB asfaltti pystyisi tuomaan pitkällä aikavälillä säästöjä päällysteiden kunnossapitokustannuksien kautta, mutta kustannushyötyjen saavuttaminen nykymuotoisella urakointimallilla voi olla haastavaa. Joka tapauksessa koetieosuuksien kautta pystyttäisiin toiminnallisten laatuvaatimusten kautta selvittämään myös valmistukseen liittyvät kustannusvaikutukset huomioiden bitumin edullisen maailman markkinahinnan tällä hetkellä.

Oulussa 25.4.2016

Hannu Aurinko, TkT

Lähteet

Abdelrahman, M.A. & Carpenter, S.H. 1999. The mechanism of the interaction of asphalt cement with crumb rubber modifier (CRM), Transport Res Rec 1999;1661: pp. 106–130.

Attia, M. & Abdelrahman, M. 2009. Enhancing the performance of crumb rubber-modified binders through varying the interaction conditions, International Journal of Pavement Engineering, 10(6), pp. 423–434.

AsAc. 2007. The use of Modified Bituminous Binders in Road Construction, Technical Guideline of the South African Asphalt Acadamey TG1, SouthAfrica.

ASTM D 6114/D 6114M. 2009. American Society for Testing and Materials; Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder.

Austroads. 2006. Specification framework for polymer modified binders and multigrade bitumens, Austroads Technical Report APT41/06, Australia.

Bartolozzi, I., Mavridou, S., Rizzi, F. & Frey, M. 2015. Life cycle thinking in sustainable supply chains: The case of rubberized asphalt pavement, Environmental Engineering and Management Journal Volume 14, Issue 5, pp. 1203-1215.

Bertollo, S.M.2004. Mechanical properties of asphalt mixtures using recycled tyre rubber produced in Brazil – a laboratory evaluation, Washington: s.n. In: 83rd TRB Annual Meeting; 2004.

CalTrans. 2006., Asphalt Rubber Usage Guide, State of California Department of Transportation, Materials Engineering and Testing Services, USA.

Carlsson, H. 2015. Profilmätning på sträckor med gummimodifierat bitumen på E4 Uppsala och E6 Mölndal, Uppföljning efter tre års trafik, VTI notat 5-2015, pp. 56.

Celauro, B., Celauro, C., Lo Presti, D. & Bevilacqua, A. 2012. Definition of a laboratory optimization protocol for road bitumen improved with recycled tire rubber, Construction and Building Materials, 37 (2012), pp. 562-572.

Committee of Land Transport Officials. 1998. Standard specifications for road and bridge works for state road authorities, Johannesburg, Gauteng: South African Institution of Civil Engineering.

Dondi, G., Tataranni, P., Pettinari, M., Sangiorgi, C., Simone, A. & Vignali, V. 2014. Crumb Rubber in cold recycled bituminous mixes: Comparison between Traditional Crumb Rubber and Cryogenic Crumb Rubber, Construction and Building Materials 68 (2014), pp. 370–375.

Doyle, T.A., McNally, C., Gibney. A. & Tabakovic, A. 2013. Developing maturity methods for the assessment of cold-mix bituminous materials, Construction and Building Materials 38 (2013), pp.524–529.

Epps, J.A. 1994.Uses of recycled rubber tyres in highways. Washington, DC: Synthesis of Highway Practice No.198, TRB National Research Council. NCHRP Report.

ETRMA ELTs. End-of-Life Tyres. 2011. <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/brochure-elt-2011-final.pdf>; January 2011.

Euroopan Unionin direktiivi 1999/3i EY. Direktiivi kaatopaikoista.

Euroopan Unionin direktiivi 2000/53 EY. Direktiivi romuautoista.

Euroopan Unionin direktiivi 2000/76 EY. Direktiivi jätteen poltosta.

Ghaly, N.F. 2008. Effect of sulfur on the storage stability of tire rubber modified asphalt, World J Chem 2008;3(2), pp. 42–50.

Ghavibazoo, A. & Abdelrahman, M. 2013. Composition analysis of crumb rubber during interaction with asphalt and effect on properties of binder, International Journal of Pavement Engineering, 14(5), pp.517–530.

Heitzman, M. 1992. Design and construction of asphalt paving materials with Crumb Rubber Modifier, Transportation Research Record 1339.

Huang, B., Mohammad, L.N., Graves, P.S. & Abadie, C. 2002. Louisiana experience with crumb rubber-modified hot-mix asphalt pavement, Transportation Research Record Issue 1789, 2002, pp. 1-13.

Kamil, E.K. & Krishna P.B. 2010. Laboratory Evaluation of Rubber & Polymer Modified Bituminous Mixtures Constructed in Stockholm. E18 Highway between the Järva Krog & Bergshamra Interchanges, Final report Feb 2010. Arizona State University.

Lo Presti, D. 2013. Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. Nottingham Transportation Engineering Centre, University of Nottingham, Nottingham, UK., pp. 19.

Lo Presti, D., Memon, N., Airey, G. & Grenfell, J. 2009. Comparison between bitumen modified with crumb tire rubber and stirene butadiene styrene. MAIREPAV 6 Proc., Turin, Italy, pp. 54–63.

Memon, N. 2011. Characterisation of conventional and chemically dispersed crumb rubber modified bitumen and mixtures. University of Nottingham, Nottingham, UK: s.n. PhD thesis.

Mturi, G. A. J., O'Connell, J., & Anochie-Boateng, J. K. 2013. Limitations of current South African test methods for bituminous binders. Construction and Building Materials, 45, pp. 314–323.

Navarro, F.J., Partal, P., Martinez-Boza, F.J. & Gallegos, F. 2004. Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tyre rubber-modified bitumens, Fuel 14–15 October 2004;83.

Nordgren, T. 2016. Haastattelu Torsten Nordgrenin kanssa Ruotsin liikennevirastossa, Göteborissa, 11.4.2016.

Nordgren, T. 2015. Handledning för asfaltmassa/beläggning med gummi modifierat bitumen, Version 3.0 2014-11-25, pp. 15.

Oliver, J.W.H. 1981. Modification of paving asphalts by digestion with scrap rubber. [ed.] Transportation Research Board, Transportation Research Record 821.

Perez-Lepe, A., Martinez-Boza, F.J. & Gallegos, F. 2007. High temperature stability of different plymer-modified bitumens: a rheological evaluation C. J, Applied Polymer Scientific.

Pettinari, M., Dondi, G., Sangiori, C.& Hededal, O. 2014. The effect of Cryogenic Crumb Rubber in cold recycled mixes for road pavements, Construction and Building Materials 63 (2014), pp. 249–256.

Potgieter, C.J. 2004. Bitumen Rubber Asphalt in South Africa Conventional Techniques. Vienna: s.n. In: 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress; 2004.

Ng Puga, K.L.N & Williams, R.C. 2016. Low temperature performance of laboratory produced asphalt rubber (AR) mixes containing polyoctenamer, Construction and Building Materials 112 (2016), pp. 1046–1053.

Rahman, M.M. 2004. Characterisation of dry process crumb rubber modified asphalt mixtures. Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. s.l.: University of Nottingham, School of Civil Engineering.

Santagata, F.A., Antunes, I., Canestrari, F. & Pasquini, E. 2008. Asphalt Rubber: Primeiros Resultados em Itália. Estoril: s.n. Estrada 2008, V Congresso Rodoviário Português.

Sousa, J.B. 2006. The Successful World Wide Use of Asphalt Rubber, XVI Convegno NazionaleS.I.I.V, 2006.

Sousa, J.B. 2005. Experiences with use of reclaimed rubber in asphalt within Europe. Birmingham: s.n. Rubber in Roads.

Subhy, A., Lo Presti, D. & Airey, G. 2015. Rubberised bitumen manufacturing assisted by rheological measurements. Nottingham Transportation Engineering Centre, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK, pp. 22.

Swieczko-Zurek, B., Jaskula, P., Ejsmont, J.A., Kedzierska, A. & Czajkowski, P. 2016. Rolling resistance and tyre/road noise on rubberised asphalt pavement in Poland, Road Materials and Pavement Design.

Technical Guideline 1. 2007. The use of modified bituminous binders in road construction (2nd ed.).Pretoria, Gauteng: Asphalt Academy.

Xiao, F., Putman, B. J., & Amirkhanian, S. N. 2006. Laboratory investigation of dimensional changes of crumb rubber reacting with asphalt binder. In J. B. Sousa (Ed.), Proceedings of Asphalt Rubber 2006 Conference, Palm Springs, CA. pp. 693–715.

Liite 1. Ruotsin ohjeistus asfalttimassan valmistukseen jossa käytetään kierrätys-rengasmodifioitua kumibitumia.

Liite 2. ERTMAn raportti 2016-04-04 Crumb Rubber from ELTs_vF.