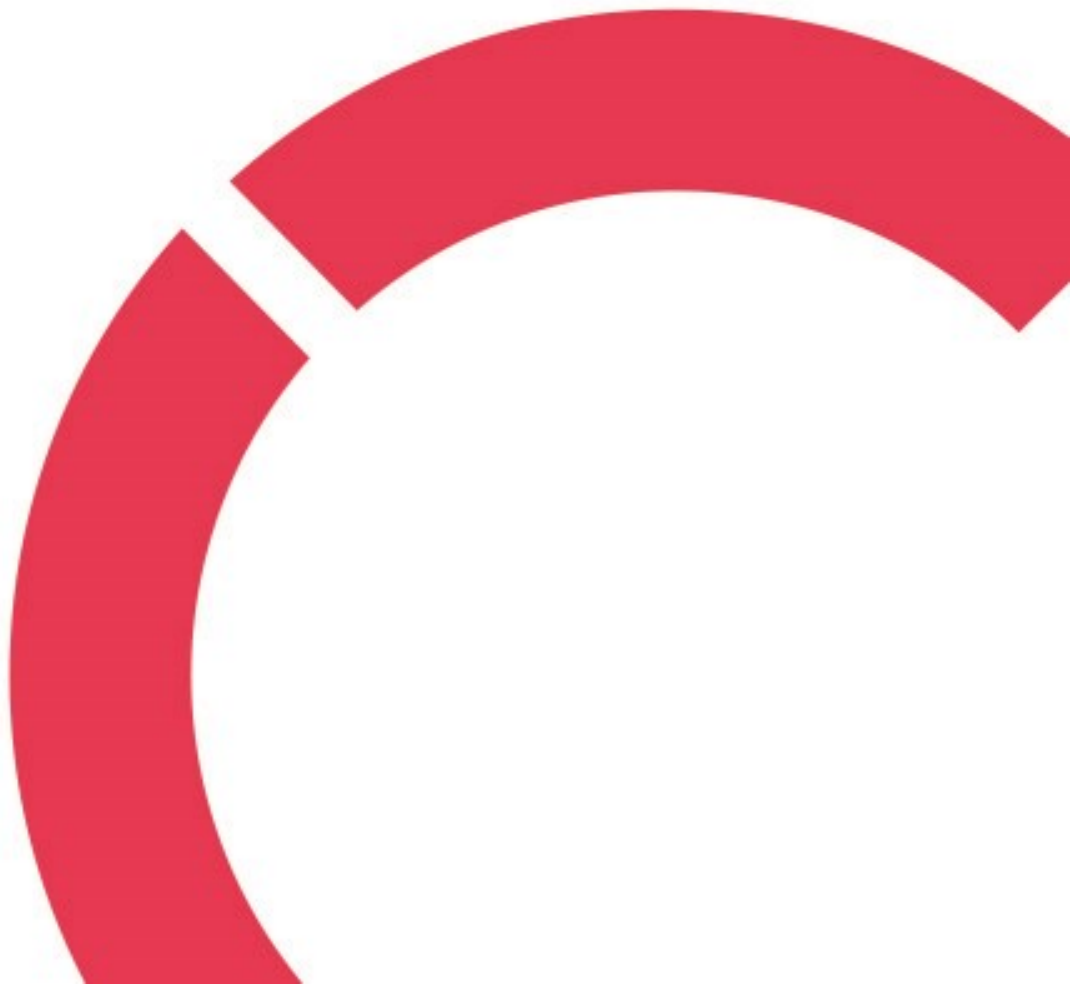


Tom Björklund

HIILINANOPUTKIEN KÄYTTÖ ASFALTIN LISÄAINEENA

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kemiantekniikan koulutus
Huhtikuu 2024**



Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Huhtikuu 2024	Tekijä/tekijät Tom Björklund
Koulutus Kemiantekniikan koulutus	<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK	
Työn nimi HIILINANOPUTKIEN KÄYTTÖ ASFALTIN LISÄAINEENA		
Työn ohjaaja Reija Harlamow	Sivumäärä 30	
Työelämäohjaaja Samuli Räsänen		
<p>Hiilinanoputkien hyödyntäminen asfaltin lisäaineena nousi tutkimuksen keskiöön viime vuosikymmenellä. Tämä innovatiivinen alue on kehittynyt kiihtyvällä tahdilla, ja alustavat tutkimustulokset ovat osoittaneet lupaavia parannuksia asfaltin ominaisuuksissa, kuten lämmönkestävyydessä, viskositeetissa ja kuormankestävyydessä.</p> <p>Tämä opinnäytetyö käsittelee hiilinanoputkien potentiaalia asfaltin lisäaineena. Tutkimusaihe valikoitui yhteistyössä Kokkolassa toimivan Hycamite-yrityksen kanssa, joka tuottaa prosessissaan hiiltä sivutuotteena. Työssä pyritään selvittämään, voisiko tätä hiiltä hyödyntää asfaltin ominaisuuksien parantamisessa. Työssä on analysoinut ja koonnut yhteen kuuden tutkimuksen tulokset. Viidennessä luvussa käsitellään näitä tutkimuksia yksityiskohtaisemmin.</p> <p>Lisäksi työssä tarkastellaan hiilinanoputkien mahdollisia terveysriskejä. On keskeistä huomioida sekä tekniset edut että potentiaaliset terveyshaitat, jotta voidaan tehdä vastuullisia päätöksiä hiilinanoputkien käytöstä asfalttiteknologiassa. Tämä on erityisen tärkeää, sillä hiilinanoputkien laajamittainen käyttöönotto infrastruktuurissa voi olla mahdollista tulevaisuudessa, jos terveysriskit tunnistetaan ja teknologian hyödyt todetaan riittäviksi. Työn tavoitteenani on luoda luotettava tietokanta, joka hyödyttää sekä akateemista että teollista yhteisöä. Tämän tiedon avulla voidaan arvioida hiilinanoputkien potentiaalia asfaltin lisäaineena ja ymmärtää niiden vaikutusta asfaltin ominaisuuksiin eri nanoputkipitoisuuksilla.</p>		

Asiasanat asfaltti, hiilinanoputki
--

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date April 2024	Author Tom Björklund
Degree programme Chemical engineering		
Name of thesis THE UTILIZATION OF CARBON NANOTUBES AS AN ADDITIVE IN ASPHALT		
Centria supervisor Reija Harlamow	Pages 30	
Instructor representing commissioning institution or company. Samuli Räsänen		
<p>The utilization of carbon nanotubes as an additive in asphalt came into the spotlight of research in the last decade. This innovative field has developed at an accelerating pace, and preliminary research results have shown promising improvements in asphalt properties, such as heat resistance, viscosity, and load-bearing capacity.</p> <p>This thesis addresses the potential of carbon nanotubes as an additive in asphalt. The research topic was selected in collaboration with Hycamite, a company based in Kokkola, which produces carbon as a by-product in its process. The thesis work investigates whether this carbon can be used to enhance the properties of asphalt. During the thesis work, six studies were analyzed, and the results were compiled. These studies are discussed in more detail in chapter Five.</p> <p>Additionally, the thesis work examines the potential health risks associated with carbon nanotubes. It is crucial to consider both the technical advantages and potential health hazards to make responsible decisions regarding the use of carbon nanotubes in asphalt technology. This is especially important as the widespread adoption of carbon nanotubes in infrastructure could be feasible in the future if health risks are identified and the benefits of the technology are deemed sufficient. The goal was to create a reliable database that benefits both the academic and industrial community. With this information, the potential of carbon nanotubes as an additive in asphalt can be assessed, and their impact on asphalt properties can be understood at different nanotube concentrations.</p>		
<p>Key words asphalt, carbon nanotube</p>		

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

CNT

Hiilinanoputki

CTMBA

Hiilinanoputkilla muokattu bioasfaltti

HMA

Kuuma sekoitusasfaltti

MWNT

Moniseinäinen hiilinanoputki

RAP

Kierrätetty asfaltti

RAS

Asfalttimassa kierrätetystä asfalttiaineksesta

SEM

Pyyhkäisyelektronimikroskooppi

SWNT

Yksiseinäinen nanoputki

TCD

Termokatalyyttinen hajoaminen

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO	1
2 HIILINANOTUOTTEET JA NIIDEN VALMISTUS.....	3
3 HycAMITE JA SEN HIILITUOTTEET	4
4 ASFALTTI JA SEN TUTKIMISESSA KÄYTETTYJÄ MITTAUSMENETELMIÄ	6
4.1 Penetraatiotesti	6
4.2 Pehmenemispiste	7
4.3 Venyvyysskoe	7
4.4 Viskositeetti.....	7
4.5 Kuormituskoe.....	8
4.6 Urautumisindeksi.....	8
4.7 Taivutussädereometritesti	8
5 HIILINANOPUTKIEN KÄYTTÖ ASFALTIN VALMISTUKSESSA.....	9
5.1 Hiilinanoputkien merkitys moottoriöljypohjaisen kierrätysasfaltin laadussa	9
5.2 Hiilinanoputkilla modifioidun bioasfaltin laboratoriotestaus.....	11
5.3 Hiilinanoputkien vaikutukset kuumasekoiteasfalttiin.....	14
5.4 Hiilinanoputkien vaikutus asfalttipäällysteen urautumiskestävyyteen.....	16
5.5 Hiilinanoputkia sisältävä itsekorjautuva asfalttipäällystemateriaali	19
5.6 Nanohiilellä muokatun asfaltin kosteuserkkyys	22
6 HIILINANOPUTKIEN KÄYTÖN HAASTEET ASFALTIN LISÄAINEENA	25
6.1 Hiilinanoputken mahdolliset terveysvaikutukset.....	26
7 POHDINTA	27
LÄHTEET	29
TAULUKOT	
TAULUKKO 1. Tutkimuksessa käytettyjen hiilinanoputkien mittoja ja ominaisuuksia	9
TAULUKKO 2. Hiilinanoputkien ominaisuudet	10
TAULUKKO 3. Hiilinanoputkien ominaisuudet	12
TAULUKKO 4. Hiilinanoputkien ominaisuudet	14
TAULUKKO 5. Hiilinanoputkien ominaisuudet	17
TAULUKKO 6. Hiilinanoputkien ominaisuudet	19
KUVAT	
KUVA 1. SEM-kuvakollaasi Hycamiten hiilestä.....	5

KUVIO

KUVIO 1. Mittaustuloksia	10
KUVIO 2. Asfaltin reologiset ominaisuudet matalissa lämpötiloissa	13
KUVIO 3. Hiilinanoputken vaikutus urasyvyyteen 10 000 kuormitusyökin jälkeen	18
KUVIO 4. Asfalttiseosten murtumaenergia	21
KUVIO 5. Halkeamiskestävyys indeksi	21
KUVIO 6. Perus- ja muokattujen asfalttiseosten TSR:n tulokset.....	24

1 JOHDANTO

Hiilinanoputkien käyttö asfaltin lisäaineena edustaa innovatiivista tutkimussektoria, joka on viime vuosikymmenen aikana noussut merkittävästi esille kiihtyvän kehitystahtinsa ansiosta. Vaikka kyseessä on varsin tuore tutkimuskohde, alustavat löydökset viittaavat siihen, että hiilinanoputket voivat merkittävästi parantaa asfaltin perusominaisuuksia – kuten lämmönkestävyyttä, viskositeettia ja kuormankestävyyttä. Erityisen huomionarvoista on, että hiilinanoputkilla on osoitettu olevan kyky edistää asfaltin itsekorjaantumista, mikä avaa uusia näköaloja kestävien infrastruktuurien kehittämiseen. (Zhang, Sha, Cao, Wang, Song & Jiao 2023.)

Resurssitietoisessa ajassamme on ensiarvoisen tärkeää pyrkiä löytämään innovatiivisia lähestymistapoja sivutuotteiden hyödyntämiseen. Kokkolassa toimivan Hycamite TCD Technologies Oy:n yhteydenotto tarjosi minulle opinnäytetyön tiimoilta ainutlaatuisen tilaisuuden tutkia hiilen, tässä tapauksessa tuotantoprosessin sivutuotteena syntyvän hiilen, potentiaalia asfaltin ominaisuuksien parantajana. Erityisen kiinnostavaksi nousee kysymys: voisiko hiili ei ainoastaan parantaa asfaltin ominaisuuksia, vaan myös tehostaa sen tuotantoa. Opinnäytetyöni tavoitteena on vastata tähän kysymykseen, samalla avaten uusia mahdollisuuksia hiilen hyödyntämiseen niin Hycamitellä kuin laajemminkin rakennusmateriaaliteollisuudessa.

Analysoin opinnäytetyötäni varten yli kymmentä tutkimusta, joista kuusi tarjosi ainutlaatuisia näkökulmaa aiheeseen – muiden tutkimusten tulokset olivat pääosin yhteneväisiä. Viidennessä luvussa syvennyn näiden tutkimusten tuloksiin. On kriittisen tärkeää punnita sekä teknologian hyötyjä että mahdollisia terveysriskejä, jotta voimme tehdä tasapainoisia ja vastuullisia päätöksiä hiilinanoputkien käytöstä asfaltiteknologiassa. Tämä on erityisen olennaista nyt, kun hiilinanoputkien laajamittainen käyttöönotto näyttäytyy yhä realistisempänä vaihtoehtona, mikäli potentiaaliset terveysriskit saadaan hallintaan ja teknologian hyödyt vakuuttaviksi todistettua.

Opinnäytetyön tarkoituksena on kerätä ja jakaa mahdollisimman laajasti luotettavaa tietoa, joka hyödyttää sekä akateemista että teollista yhteisöä. Työtä apuna käyttäen voimme paremmin ymmärtää hiilinanoputkien potentiaalia asfaltin lisäaineena ja hahmottaa, miten erilaiset nanoputkipitoisuudet vaikuttavat asfaltin ominaisuuksiin. Tavoitteena on tarjota pohja

sekä jatkotutkimuksille että teollisuuden sovellusten kehittämiseksi, tarjoten näin monipuolisen, tieteellisesti perustellun ja ajankohtaisen katsauksen hiilinanoputkien mahdollisuuksiin ja haasteisiin asfaltin lisäaineena.

2 HIILINANOTUOTTEET JA NIIDEN VALMISTUS

Hiilinanoputket, lyhyesti CNT:t, ovat hiiliatomeista muodostuneita erittäin ohuita, kevyitä ja onttoja putkirakenteita. Niiden rakenne muistuttaa sylinteriksi kierrettyä grafiittilevyä, jotka muodostuvat toisiinsa yhdistyneistä kuusikulmioista, jonka muodostavat hiiliatomit. Näiden putkien halkaisija on vain nanometri luokkaa, mikä on huomattavasti pienempi kuin ihmisen hiuksen paksuus. Hiilinanoputkia tuotetaan vaihtelevissa pituuksissa. Näitä nanoputkia luokitellaan rakenteensa perusteella kolmeen tyyppiin: yksiseinäiset (SWNTs), kaksiseinäiset (DWNTs) ja moniseinäiset (MWNTs) nanoputket, mikä viittaa grafeenikerrosten lukumäärään. Kukin rakenne tarjoaa erityisiä ominaisuuksia, jotka tekevät niistä soveltuvia erilaisiin käyttötarkoituksiin. (Johnson 2020.)

Hiilinanoputkien tuotantomenetelmät ovat olennaisia niiden tutkimuksessa ja teollisessa soveltamisessa. Vaikka kynttilänliekki voi muodostaa hiilinanoputkia luonnostaan, tieteelliseen ja kaupalliseen käyttöön on kehitetty tarkempia menetelmiä. Näistä yleisimmät ovat kemiallinen höyrystyskasvatus, kaaripurkaus ja laserhöyrystys. Kemiallisessa höyrystyskasvatuksessa hiilinanoputket kasvatetaan metallinanohiukkasten siemenistä, jotka lämmitetään 700 Celsius-asteeseen ja joihin tuodaan kaasuja nanoputkien muodostumisen käynnistämiseksi. Tämä on suosituin menetelmä kaupallisessa tuotannossa. Kaaripurkausmenetelmä, jossa hiilinanoputket muodostetaan kahta hiilivartta kaaripurkauksella höyrystämällä, oli ensimmäinen hiilinanoputkien syntetisointimenetelmä. Laserhöyrystysprosessissa käytetään pulssittavaa laseria grafiitin höyrystämiseen, hiilinanoputkien muodostamiseen. Nämä menetelmät mahdollistavat hiilinanoputkien tarkan tuotannon ja soveltuvat erilaisiin tutkimus- ja teollisuustarkoituksiin. Hiilinanoputkien puhdistus ja erottelu ovat tärkeitä аспектеja kaikissa näissä tuotantoprosesseissa. (Johnson 2020.)

3 HYCAMITE JA SEN HIILITUOTTEET

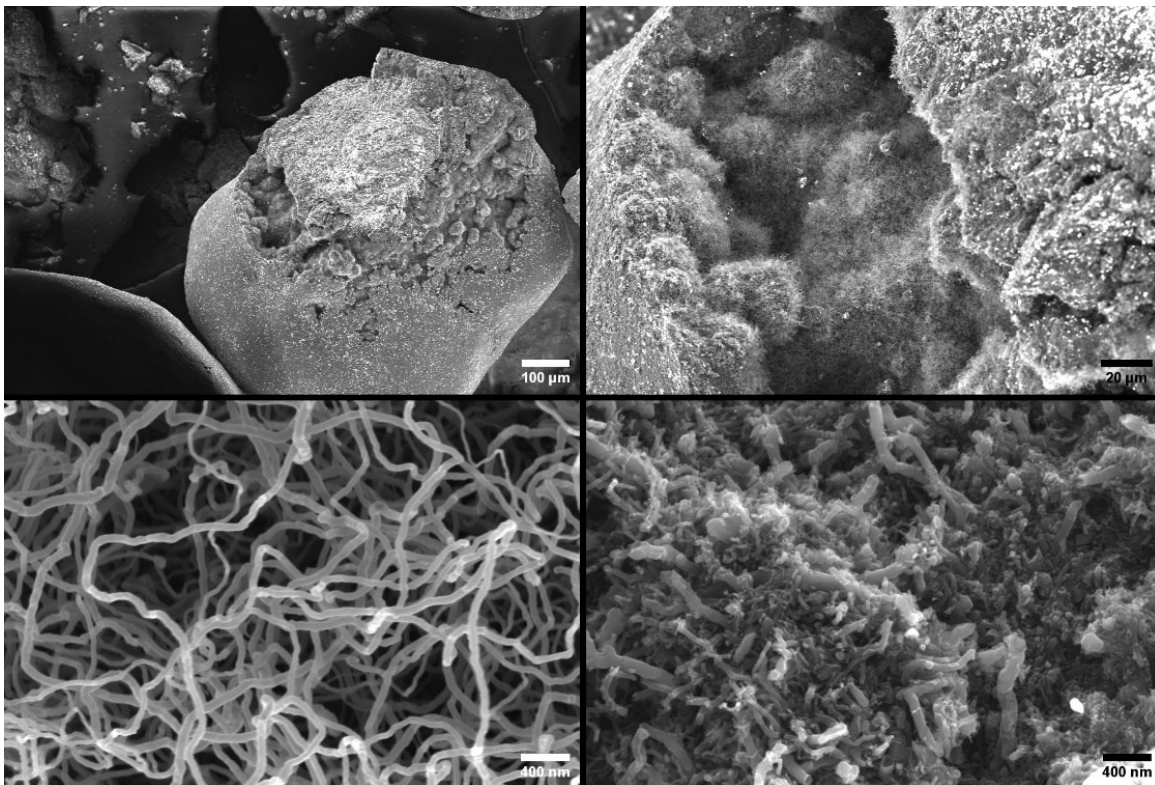
Hiilituotteet valmistetaan hajottamalla metaanimolekyylejä. Metaani (CH₄) on luonnonkaasun ja biokaasun pääkomponentti. Yksi kuutiometri metaania sisältää yli 500 grammaa hiiltä. Hycamiten kehittämä termokatalyyttinen hajoaminen (TCD) perustuu metaanin pyrolyysiin, joka on metaanin lämmittämistä ilman happea. Käytetyt katalysaattorit tekevät Hycamiten prosessista ainutlaatuisen. Termokatalyyttinen hajoamisprosessi (TCD) ei aiheuta päästöjä, ja käytetyt katalysaattorit ovat kestäviä. Kun biokaasua käytetään metaanin lähteenä, ovat hiilituotteet hiilinieluja. (Hycamite 2023.)

Hycamite TCD Technologies, perustettu vuonna 2020, on yksityisomisteinen yritys, jonka pääkonttori sijaitsee Suomessa, Kokkolassa. Yritys, joka on nopeasti kasvanut ja työllistää nykyisin noin viisikymmentä henkilöä, keskittyy vety- ja hiilituotteiden valmistukseen. Hycamiten käyttämä termokatalyyttinen hajoaminen (TCD) metaanista on kehittynyt menetelmä puhtaasta vedyn tuottamiseen. Tässä prosessissa metaani hajotetaan erityisillä katalysaattoreilla ja lämmöllä, tuottaen hiilineutraalia vetyä. Prosessissa käytetty biokaasun metaani tai ilmasta talteen otetun hiilidioksidin avulla valmistettu synteettinen metaani mahdollistavat jopa hiilinegatiivisen vedyn tuotannon. Prosessin sivutuotteena syntyy hiiltä. (Hycamite 2023.)

Hycamiten hiilituotteet ovat sähköä johtavia nanohiilituotteita, kuten hiilinanokuituja, jotka ovat ihanteellisia akkujen valmistuksessa, superkondensaattoreissa, elektroniikassa, polymeerien lisäaineina, komposiittimateriaaleissa ja betonin valmistuksessa. TCD-hiili, joka on sekoitus erilaisia hiilen allotrooppeja – kuten amorfinen hiili, hiilinanoputket (CNT), hiilinanokuidut (CNF) ja grafiittialueet –, valmistetaan termokatalyyttisellä hajoituksella metaanista. Metaanimolekyylien hajottamisessa, prosessissa, jossa metaani (CH₄) – luonnonkaasun ja biokaasun pääkomponentti – pyrolysoituu lämmittämällä ilman happea, syntyy hiilituotteita. Hycamiten prosessissa käytetyt ainutlaatuiset katalyytit tekevät prosessista tehokkaan ja päästöttömän. Lisäksi, kun prosessissa käytetään biokaasua, syntyvät hiilituotteet toimivat hiilinieluinä. Esitellyssä kuvakollaasissa havainnollistetaan tuotantoprosessissamme syntyviä kuiturakenteita. (Hycamite 2023.)

Kuvassa 1 näemme pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM) kuvakollaasin Hycamiten hiilestä. Ensimmäinen kuva, joka sijaitsee kollaasin vasemmassa yläkulmassa, esittelee suuria pallomaisia rakenteita, jotka muodostuvat prosessin aikana. Tämän pallorakenteen pintaa tarkasteltaessa suurennoksen avulla paljastuu, että se koostuu toisiinsa kietoutuneista putkimaisista rakenteista. SEM-kuvat eivät yksilöi, ovatko nämä rakenteet putkia vai kuituja, mutta prosessin erityispiirteiden mukaisesti voidaan vahvistaa niiden olevan kuituja.

Kollaasin alaosassa esitetyt kuvat osoittavat kahden erityyppisen kuiturakenteen olemassaolon näissä palloissa. Yksi rakenne on pitkänomainen ja suhteellisen löyhästi toisiinsa kiinnitynyt kuiturakenne. Toisaalta havaitsemme tiiviin rakenteen, jossa kuitu näyttää olevan varsin lyhyttä, kuvattuna oikeanpuoleisessa alakuvassa. Kuvakollaasin kuvien suurennosaste kasvaa vasemmalta oikealle, ylhäältä alkaen, tarjoten yksityiskohtaisen katsauksen kuiturakenteiden monimuotoisuuteen. (Hycamite 2023.)



Kuva 1. SEM-kuvakollaasi Hycamiten hiilestä (Hycamite 2024)

4 ASFALTTI JA SEN TUTKIMISESSA KÄYTETTYJÄ MITTAUSMENETELMIÄ

Viime vuosina hiilinanoputkien käyttö asfaltin lisäaineena on herättänyt kasvavaa kiinnostusta sekä akateemisissa että teollisissa piireissä. Tämä johtuu hiilinanoputkien ainutlaatuisista mekaanisista ja kemiallisista ominaisuuksista, jotka voivat tarjota merkittäviä etuja asfaltin suorituskyvylle ja kestävyydelle. Tämä kehitys ei ole pelkästään lupaava innovaatio, vaan se edustaa myös uutta suuntausta materiaalitieteessä ja infrastruktuuritekniikassa.

Jotta voisimme ymmärtää tämän kiehtovan tutkimusalueen merkityksen, on ensiarvoisen tärkeää tarkastella perusteellisesti sitä, millaisia tutkimusmenetelmiä ja analyysijä asfaltin parissa yleisesti käytetään. Hiilinanoputkien soveltavuuden tutkimus asfaltin lisäaineena edellyttää usein monimutkaisia kokeellisia menetelmiä ja pitkälle kehitettyä analyttistä osaamista. Tämä johtuu siitä, että hiilinanoputkien lisääminen asfalttiin voi vaikuttaa moniin eri ominaisuuksiin, kuten materiaalin joustavuuteen, lämmönjohtavuuteen ja kestävyYTEEN.

Tässä samalla olisi myös hyvä paneutua itse asfalttiin: mitä se on ja miten sitä tehdään. Asfaltin valmistus alkaa sopivan kallion löytämisellä ja murskaamisella. Kallionäytteiden analysoinnin jälkeen määritetään, soveltuuko kivi asfaltin valmistukseen. Kallion räjäytys ja murskaus tuottavat kalliomursketta, jonka karkeutta kuvaavat lukuarvot, kuten KaM 0–11 tai KaM 0–16. Asfaltin koostumus vaihtelee käyttökohteen mukaan. Asfaltin toinen keskeinen ainesosa on bitumi, joka on öljynjalostuksen sivutuote. Bitumi kuljetetaan lämpimänä asfaltti-asemalle, missä sitä säilytetään lämmitetyissä säiliöissä. Asfaltin valmistusprosessissa kivi-murske lämmitetään ja sekoitetaan bitumin kanssa, jolloin syntyy asfalttimassaa. Tähän massaan voidaan lisätä erilaisia aineita, kuten vanhaa asfalttia tai väriaineita, tuottamaan erikoisominaisuuksia. Koko prosessi vaatii tarkkaa materiaalien käsittelyä ja lämpötilan säätelyä. Valmis asfalttimassa kuljetetaan työmaille, missä se levitetään ja tiivistetään teiden ja pihojen pinnoitteeksi. (Koskinen 2024.)

4.1 Penetraatiotesti

Tämä testausmenetelmä on yksi vanhimmista asfaltin testausmenetelmistä, vaikka se on ajansaatossa päivittynyt soveltumaan paremmin asfaltin nykyvaatimuksille. Penetraatiotesti on menetelmä bitumin pehmeiden ja tunkeutumiskyvyn arvioimiseen. Siinä mitataan, kuinka syvälle erityinen neula uppoaa bitumiin tiettyjen olosuhteiden vallitessa. Neulan ja pidintä

käytetään mittaamiseen vertikaalisesti liikuttaen. Testissä bitumiin painetaan neulaa tietyssä lämpötilassa ja ajassa, ja syvyyttä mitataan millimetreinä 0,1 mm:n tarkkuudella. Neulan kokonaisuuden paino on tarkasti määritelty. Tarvittaessa lisäpainoja voidaan käyttää kokonaispainon lisäämiseksi. Tuloksena saatu penetraatioarvo kertoo bitumin pehmeudesta ja konsistenssista, mikä on tärkeää bitumin käyttötarkoitusten, kuten tiestön rakentamisen ja vedenpitävien kalvojen arvioinnissa. (Pavement interactive 2024f.)

4.2 Pehmenemispiste

Pehmenemispiste-testi on menetelmä bitumin lämpötilaherkkyden määrittämiseen. Se kuvaa lämpötilan, jossa bitumi pehmenee. Testissä käytetään "ring-and-ball" -laitetta, jossa metallirengas ja 3,5 gramman painoinen teräskuula asetetaan bitumille ja altistetaan kuormitukselle ja lämmölle. Testi tehdään 30–157 celsiusasteen lämpötiloissa, käyttäen tislattua vettä tai USP-glyseriiniä liuottimena lämpötilan mukaan. Pehmenemispiste on tärkeä asfaltin valmistuksessa ja eri sovelluksissa, kuten teiden päällystyksessä. Se auttaa ymmärtämään bitumin käyttäytymistä eri lämpötiloissa. (Pavement interactive 2024g.)

4.3 Venyvyyskoe

Venyvyyskoe mittaa bitumin venymiskykyä ennen sen katkeamista. Tässä testissä bitumista valmistettu näyte venytetään määritellyllä nopeudella (5 cm/min) lämpötilassa $25 \pm 0,5$ celsiusasteessa. Menetelmä kertoo bitumin joustavuudesta ja on tärkeä asfaltin ja päällysteiden kestävyydelle. Tulokset auttavat teiden ja lentokenttien rakentamisessa sekä teollisuudessa. Testin standardointi takaa tulosten vertailukelpoisuuden ja bitumin ominaisuuksien luotettavan arvioinnin. (Pavement interactive 2024c.)

4.4 Viskositeetti

Viskositeetti on keskeinen ominaisuus bitumin käytössä eri sovelluksissa. Viskositeettitestillä selvitetään bitumin käyttäytymistä eri olosuhteissa, mikä auttaa arvioimaan sen sopivuutta sekoitus- ja levitysprosesseihin. Testissä bitumia lämmitetään tarkkaan määriteltyyn lämpötilaan, jonka jälkeen mitataan aika, joka kuluu tietyn määrän bitumin virtaamiseen aukon läpi, arvioiden näin bitumin virtausominaisuuksia. Menetelmä on standardoitu, ja testit tehdään yleensä 60 celsiusasteen lämpötiloissa. (Pavement interactive 2024d.)

4.5 Kuormituskoe

Asfaltin kuormituksen tutkimiseen käytetty testi, eli Direct Tension Tester (DTT). Kuormituskokeessa näyte asetetaan DTT-laitteeseen ja altistetaan toistuville veto- ja puristuskuormituksille. Kokeen aikana näyte kuormitetaan tuhansia kertoja, mikä jäljittelee liikenteen aiheuttamia mekaanisia rasituksia. Kuormituksen aste ja syklit säädetään kokeen tarpeiden mukaan. Mahdolliset vauriot tarkkaillaan visuaalisesti tai teknisin apuvälinein, kuten kuvantamisjärjestelmillä tai muodonmuutoksia mittaavilla antureilla. Kokeen jälkeen näytteet analysoidaan, ja tulosten perusteella arvioidaan asfaltin kestävyyttä eri liikenneolosuhteissa. (Pavement interactive 2024b.)

4.6 Urautumisindeksi

Urautumisindeksi on mittari, joka arvioi asfaltin kaltaisten tienpäällystemateriaalien kykyä kestää urautumista. Urautuminen on liikenteen aiheuttama tienpinnan muodonmuutos, joka heikentää ajomukavuutta ja lyhentää tien käyttöikä. Mittaukset tehdään laboratoriossa tai kenttätesteillä, käyttäen laitteita, jotka simuloivat renkaiden kuormaa. Testien jälkeen urautumisindeksi antaa numeerisen arvon materiaalin urautumiskestävyydelle. Pieni indeksiarvo tarkoittaa parempaa kestävyyttä urautumista vastaan. Indeksiautaa vertailemaan eri materiaalien suorituskykyä liikenneolosuhteissa. (Pavement interactive 2024e.)

4.7 Taivutussädereometritesti

Bending Beam Rheometer (BBR) on testilaitte asfaltin taivutusominaisuuksien mittaamiseen. Se testaa asfaltin joustavuutta ja taipumista, jotka ovat tärkeitä tienpäällysteiden laadulle ja kestävyydelle. Testissä ohut asfalttinäyte taivutetaan telineessä eri lämpötiloissa, ja mitataan näytteen taipuma ja palautumiskyky. BBR-testi arvioi asfaltin jäykkyyttä ja viskoelastisuutta eri sääolosuhteissa. Testin tulokset auttavat optimoimaan asfaltin suorituskykyä ja parantamaan tienpäällysteiden kestävyyttä. BBR on standardoitu menetelmä asfaltiteollisuudessa ja sitä käytetään tienpäällysteiden kehityksessä ja materiaalien laadunvalvonnassa. Se on myös tärkeä työkalu asfaltin suorituskyvyn arvioinnissa eri ilmastoissa. (Pavement interactive 2024a.)

5 HIILINANOPUTKIEN KÄYTTÖ ASFALTIN VALMISTUKSESSA

Seuraavassa esittelen useita tieteellisiä tutkimuksia, jotka käsittävät hiilinanoputkien soveltamista asfaltin laadun parantamiseen. Ottaen huomioon, että aiheesta on julkaistu laaja kirjo tutkimuksia, olen valikoinut tarkasteluun joukon tutkimuksia, jotka lähestyvät aihetta erilaisista näkökulmista. Olen valinnut tutkimustuloksia, jossa selvitetään muun muassa kuinka saadaan asfaltille parempi kestävyys niin märissä, kuumissa, kuin kylmissä olosuhteissa, soveltuvuutta uusiomateriaalien kanssa, kestävyyttä raskaalle liikenteelle, ja niin edelleen. Näihin aiheisiin paneudun tarkemmin tulevissa luvuissa. Taulukkoon 1 on kerätty tutkimuksissa käytettyjen hiilinanoputkien mittoja ja ominaisuuksia.

TAULUKKO 1. tutkimuksissa käytettyjen hiilinanoputkien mittoja ja ominaisuuksia

Ulkoisen halkaisija	10–50 nm
Sisähalkaisija	1–12 nm
Pituus	5–30 μm
Puhtausaste	90–97 %
Pinta-ala	60–270 m^2/g
Tiheys	0,06–1,74 g/cm^3

5.1 Hiilinanoputkien merkitys moottoriöljypohjaisen kierrätysasfaltin laadussa

Kiinalais-yhdysvaltalaisessa yhteistyötutkimuksessa käsitellään kierrätetyn asfaltin (RAP) uudelleenkäyttöä ja kuinka hiilinanoputkien lisääminen vaikuttaa asfaltin ominaisuuksiin. Kierrätettyä asfalttia syntyy suuria määriä liikenneinfrastruktuurin ylläpidosta ja sen kierrättäminen on sekä taloudellisesti, että ympäristöllisesti tärkeää. Yksi yleinen tapa parantaa vanhan asfaltin ominaisuuksia on lisätä siihen esimerkiksi käytettyä moottoriöljyä. Käytetty moottoriöljy voi palauttaa vanhan asfaltin kemiallisia ominaisuuksia ja parantaa sen fyysisiä ominaisuuksia. Kuitenkin pelkkä käytetyn moottoriöljyn lisääminen ei tuo kierrätettyä asfalttia täysin alkuperäisen veroiseksi, minkä vuoksi on tutkittu erilaisten nanomateriaalien lisäystä. Tämä tutkimus pyrkii selvittämään, ovatko hiilinanoputket soveltuvia kierrätetyn asfaltin parantamiseen. Erilaisin testein, kuten penetraatio- ja pehmenemispistetestein, pyritään osoittamaan hiilina-

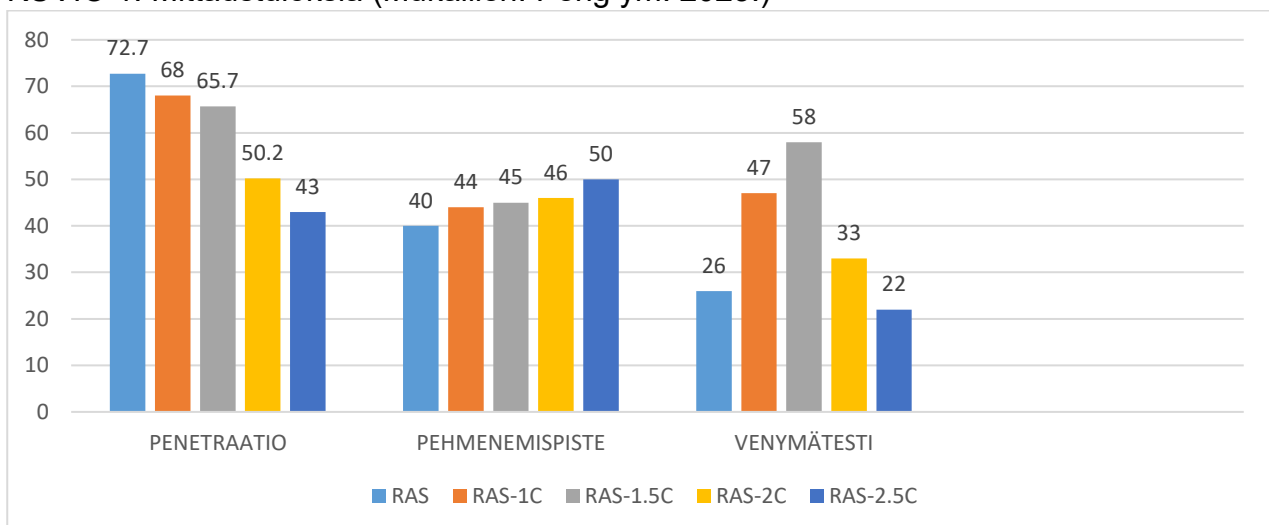
noputkien vaikutus kierrätetyn asfaltin fysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin. Tutkimuksessa käytettiin HX8 5 W-40 kierrätettyä moottoriöljyä, joka suodatettiin, ja josta haihdutettiin vesi pois. Tutkimuksessa käytettyjen hiilinanoputkien ominaisuudet näkyvät taulukossa 2. (Peng, Guan, Liu, Ning, Ruan, Xu, Yang, Ye & You 2023.)

TAULUKKO 2. Hiilinanoputkien ominaisuudet (Mukaillen. Peng ym. 2023.)

Ulkoisen halkaisija	30–50 nm
Sisähalkaisija	5–12 nm
Pituus	<10 µm
Puhtausaste	>95 %
Pinta-ala	>60 m ² /g
Bulkki tiheys	0,14 g/cm ³

Tutkimuksessa valmistettiin asfalttimassa kierrätetystä asfaltista (RAS), johon lisättiin 6 % kierrätettyä öljyä, sekä valmistettiin neljä asfalttimassaa, jotka sisälsivät eri määrän hiilinanoputkia (1.0 %, 1.5 %, 2.0 % ja 2.5 %). RAS ja hiilinanoputket yhdistettiin sekoittamalla 170 asteen lämpötilassa 3000 kierrosta minuutissa pyörivällä sekoittimella 30 minuutin ajan. Valmistetut tuotteet, joissa oli eri määriä hiilinanoputkia, merkittiin lyhenteillä RAS-1C, RAS-1.5C, RAS-2C ja RAS-2.5C. Kuvion 1. mukaan hiilinanoputkien lisääminen paransi asfaltin penetraatiota, pehmenemispistettä, venyvyyttä ja viskositeettia. (Peng ym. 2023.)

KUVIO 1. Mittaustuloksia (Mukaillen. Peng ym. 2023.)



Kokeessa havaittiin, että hiilinanoputkien lisääminen paransi RAS:n ominaisuuksia. Erityisesti RAS-1.5C, jossa hiilinanoputkia oli 1.5 %, osoitti tehokkainta jakautumista ja merkittävintä suorituskyvyn parannusta. Hiilinanoputkien lisääminen paransi RAS:n läpäisevyyttä, lämpötilaherkkyttä, pehmenemispistettä, korkean lämpötilan suorituskykyä ja sitkeyttä. Kuitenkin liian suuri hiilinanoputkien määrä saattoi aiheuttaa niiden aggregoitumista RAS:ssa, mikä saattoi siksi heikentää laatua. Hiilinanoputkien käyttö paransi myös RAS:n varastointistabiili- teettia, sidontavoimaa, lämpövakausta ja UV-säteilyn kestävyttä. RAS-1.5C:n lämpövaka- us oli jopa parempi kuin uudessa asfaltissa. Lisäksi hiilinanoputket edistivät RAS:n ja kiviainek- sen välisen tarttuvuuden parantumista sekä kuivissa että kosteissa olosuhteissa. (Peng et al. 2023.)

5.2 Hiilinanoputkillla modifioidun bioasfaltin laboratoriotestaus

Kiinalaisen CCCC Third Highway Engineering -organisaation tutkijoiden Dayong Zhun ja Linghai Kongin tutkimusartikkelissa käsiteltiin bioasfaltin ja hiilinanoputkien yhdistämisen mahdollisuuksiin tienrakennuksessa. Tutkimuksen tavoitteena on edistää kestävästä tienraken- nusta korvaamalla perinteinen asfalttisideaine bioöljyllä. Erityistä huomiota kiinnitetään bioas- faltin heikkoihin korkean lämpötilan ominaisuuksiin, joita pyritään parantamaan hiilinanoput- kien avulla. (Kong & Zhu 2023.)

Tutkimuksessa valmistettiin hiilinanoputkillla muokattua bioasfalttia käyttäen korkeanopeuk- sista sekoituslaitteistoa. Valmistusprosessi alkoi esilämmittämällä asfalttia ja bioöljyä uunissa 135 asteen lämpötilassa kolmen tunnin ajan. Bioöljyä sekoitettiin tämän jälkeen asfaltin kanssa määrättyssä suhteessa. Sekoitus tapahtui käyttäen 30 minuutin ajan nopeudella 2000 kierrosta minuutissa. Tämän jälkeen prosessiin lisättiin hiilinanoputkia, ja sekoitus jatkui 60 minuuttia nopeudella 4500 kierrosta minuutissa, jotta ainekset sekoittuisivat tasaisesti. Hii- linanoputkien ominaisuudet näkyvät taulukossa 3. Käyttäen tätä metodologia, valmistettiin yh- teensä kuusitoista erilaista hiilinanoputkillla muokattua bioasfalttinäytettä, jotka dokumentoitiin tutkimukseen. (Kong & Zhu 2023.)

TAULUKKO 3. hiilinanoputkien ominaisuudet (mukaiillen Kong & Zhu 2023.)

Halkaisija	10–20 nm
Pituus	5–12 μm
Puhtausaste	99,7 %
Pinta-ala	246 m^2/g

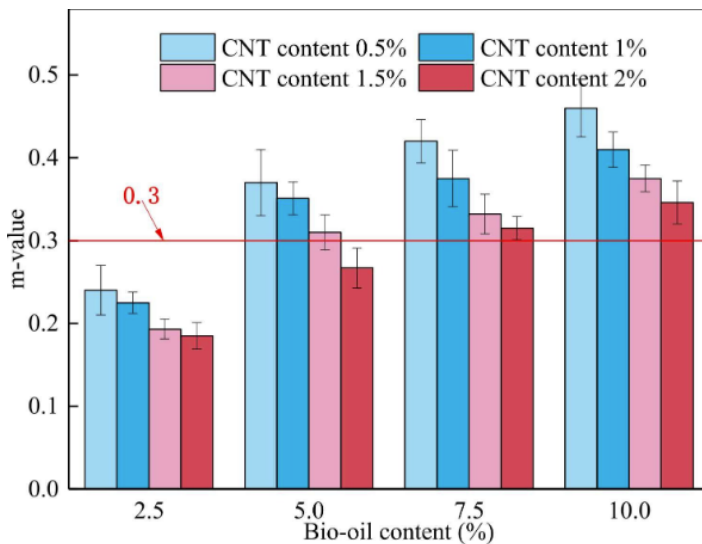
Tutkimuksessa testattiin miten hiilinanoputkilla muokattu bioasfaltti parantaisi suorituskykyä, pehmenemispistettä, vakautta, venyvyyttä ja viskositeettiä. Lisäksi tutkittiin asfaltin käyttäytymistä korkeissa lämpötiloissa, 52–82 celsius asteessa, sekä alhaisissa lämpötiloissa –12 ja –18 celsius asteessa. Tämä auttoi ymmärtämään asfaltin käyttäytymistä lyhytaikaisen ja pitkäaikaisen vanhenemisen jälkeen. (Kong & Zhu 2023.)

Pehmenemispiste kertoo asfaltin käyttäytymisestä eri lämpötiloissa. Tutkimuksessa havaittiin, että 2,5 % bioöljypitoisuudella ja 2 % hiilinanoputkipitoisuudella bioasfaltti oli huomattavasti lämpötilakestävämpää kuin tavallinen asfaltti. Parhaassa sekoitussuhteessa pehmenemispiste nousi 70,3 celsiusasteeseen, mikä on 45,25 % korkeampi kuin tavallisella asfaltilla. Bioöljyn lisääntyessä pehmenemispiste kuitenkin laski, osoittaen sen heikentävän vaikutuksen. Siitä huolimatta hiilinanoputkien käyttö paransi asfaltin jäykkyyttä ja kimmoisuutta, mikä voi auttaa vahvistamaan asfalttia ja parantamaan sen lämpötilan sietokykyä. (Kong & Zhu 2023.)

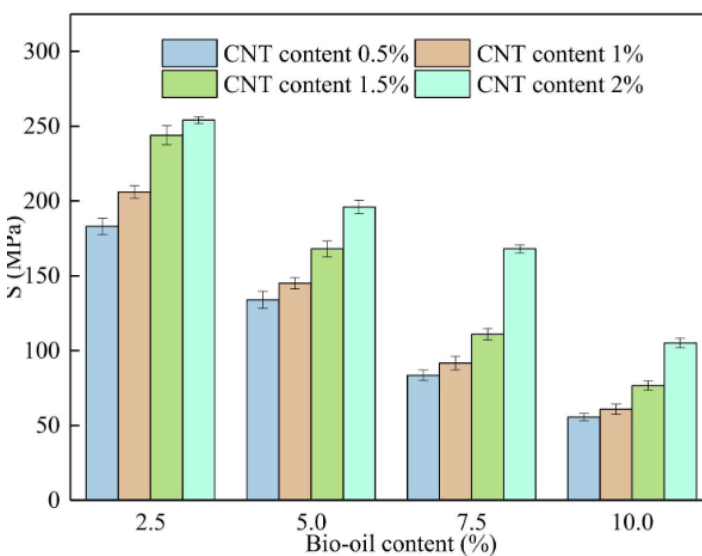
Tutkimuksessa todettiin, että asfaltin venyvyyttä ja käyttäytymistä kylmissä olosuhteissa voi parantaa lisäämällä siihen bioöljyä ja hiilinanoputkia. Perinteisellä asfaltilla venyvyys oli 11,3 cm kymmenen asteen lämpötilassa. Bioöljyn lisääminen vähensi venyvyyttä, kun sitä oli 2,5 %, mutta yli 5 % bioöljyn ja alle 1 % hiilinanoputkien kanssa venyvyys parani huomattavasti. Hiilinanoputket tekevät asfaltista vakaampaa, mutta saattavat vähentää sen venyvyyttä. Bioöljy taas parantaa asfaltin muovailtavuutta kylmissä olosuhteissa, mikä on tärkeää teiden kestävyydelle. Hiilinanoputkien lisääminen asfalttiin tekee siitä kestävämpää ja vähemmän altista muotoutumaan painon alla, parantaen näin urautumisen kestävyyttä. Sen sijaan, jos bioöljyä lisätään yli 2,5 %, sen hyödyt heikkenevät. Hiilinanoputkien käyttö auttaa asfalttia kestävämpään paremmin korkeissa lämpötiloissa, kun taas liikaa bioöljyä lisättäessä asfaltin suorituskyky voi huonontua. (Kong & Zhu 2023.)

Asfaltin reologiset ominaisuudet matalissa lämpötiloissa ovat erityisen tärkeitä sen halkeamisenkestävyyden kannalta. Taivutussauvareologiatestien avulla voidaan arvioida asfaltin kykyä vastustaa halkeilua. Nämä määrittelyt vaativat, että asfaltin m-arvo on yli 0,3 ja jäykkyyden moduulin (S-arvo) on oltava alle 300 MPa alhaisissa lämpötiloissa. Tutkimuksessa suoritettut BBR-testit normaaliasfaltilla tehtiin lämpötiloissa -12 ja -18 celsiusasteessa. Kokeissa havaittiin, että CTMBA (hiilinanoputkia ja bioöljyä sisältävä modifioitu asfaltti) täyttää vaaditut standardit -12 celsiusasteessa, mutta -18 celsiusasteessa esiintyy puutteita m-arvon suhteen, mikä viittaa halkeilunkestävyysongelmiin kyseisessä lämpötilassa. Kuviossa 2 voidaan nähdä miten eri asfalttiseokset reagoivat -18 celsiusasteen lämmössä ja voimme todeta, että seos, joka sisältää maksimissaan 2,5 % öljyä, toimii parhaiten. (Kong & Zhu 2023.)

KUVIO 2. Asfaltin reologiset ominaisuudet matalissa lämpötiloissa (Kong & Zhu 2023.)



(a) m-value (-18°C)



5.3 Hiilinanoputkien vaikutukset kuumasekoiteasfalttiin

Iranissa, Azad Universityssä suoritetussa tutkimuksessa vertailtiin perinteisen kuuman sekoitusasfaltin (HMA) ja hiilinanoputkilla modifioidun HMA:n ominaisuuksia, sekä määrittämään optimaalinen hiilinanoputkien pitoisuus kokeellisten menetelmien avulla. Aluksi verrattiin kahdenlaista sekoitusmenetelmää, tavoitteena löytää paras tapa hiilinanoputkien homogeeniseen sekoittamiseen asfalttisidokseen. Yksinkertaisessa menetelmässä käytettiin voimakasta mikseriä, joka sekoitti nanoputkia asfaltissa tasaisesti 1550 kierrosta minuutissa 40 minuutin ajan 160 celsiusasteen lämpötilassa. Märkämenetelmässä taas hyödynnettiin ultrasonikaatiota kolme kertaa 8 minuutin jaksoissa 25 minuutin tauoilla, ja tämän jälkeen sekoitusta jatkettiin yli 3000 rpm:n nopeudella. Tutkimuksessa käytettiin skannaavaa pyyhkäisy-elektroonimikroskooppia (SEM) asfalttisidoksessa hajautettujen hiilinanoputkien morfologisen rakenteen analysointiin. Hiilinanoputkien ominaisuudet (TAULUKKO 4) (Latifi & Hayati 2018.)

TAULUKKO 4. Hiilinanoputkien ominaisuudet (mukaillen Latifi & Hayati 2018.)

Ulkohalkaisija	10–20 nm
Sisähalkaisija	1–10 nm
Keskipituus	10–30 μm
Pinta-ala	200 m^2/g
Tiheys	1,74 g/cm^3
Puhtausaste	>90 %

Kahdella eri tavalla, märkä- ja yksinkertaissekoitusmenetelmillä, valmistetuissa näytteissä havaittiin eroja. Märkäsekoitusmenetelmässä hiilinanoputket hajautettiin tehokkaasti asfalttisidoksessa käyttäen ultrasonikaatiota, joka saavutti tasaisemman ja homogeenisemmän hiilinanoputkien sekoittumisen. Yksinkertaisessa sekoitusprosessissa, vaikka se oli helpompi ja taloudellisempi, osa hiilinanoputkikasoista säilyi tiheinä, mikä viittaa siihen, että sekoitus ei ollut yhtä tehokasta. (Latifi & Hayati 2018.)

Tutkimuksessa huomattiin, että hyvin hajautetut hiilinanoputket, jotka ovat tunnettuja korkeasta vetolujuudestaan, voivat vahvistaa asfalttiseosta ja auttaa ehkäisemään mikrohal-

keamien muodostumista ja kasvua. Lisäksi havaittiin, että suuremmat hiilinanoputki-pitoisuudet parantavat asfalttisidoksen mekaanista suorituskykyä korkeissa lämpötiloissa, mikä lisää seoksen väsymiskestävyttä. SEM-kuvien analyysi osoittaa, että homogeenisen seoksen valmistuksessa on tärkeää estää hiilinanoputki-kasojen tiivistymistä, joka saavutettiin tehokkaammin märkäsekoitusmenetelmällä. (Latifi & Hayati 2018.)

Sarja vertailevia testejä tehtiin, jotta voitiin arvioida modifioidun ja perinteisen asfaltin ominaisuuksia. Näitä testejä olivat mm. epäsuoran vetojännityksen (ITS) testi, rotaatioviskositeetin (RV) testi, joustavuusmoduluksen testi, sekä epäsuoran vetojännitysväsymyksen (ITF) testi. Tulosten perusteella havaittiin, että märkäsekoitusmenetelmällä valmistetun hiilinanoputkilla modifioidun asfalttisidoksen viskositeetti jäi alle maksimiarvojen. Modifioinnin myötä hiilinanoputkien lisäys johti asfaltin suurempaan jäykkyyteen ja näin ollen parantuneeseen urautumiskestävyteen, erityisesti kun hiilinanoputken pitoisuus oli 0,5–1 %. Lisäksi hiilinanoputki-modifioinnin havaittiin parantavan HMA:n näytteiden väsymiskestävyttä, etenkin alhaisissa lämpötiloissa. (Latifi & Hayati 2018.)

Hiilinanoputkien (CNT) käyttö asfalttisidoksessa näyttää parantavan merkittävästi asfalttiseosten vetolujuutta. Tutkimustulokset osoittavat, että vetolujuus kasvaa CNT-pitoisuuden lisääntyessä, mutta kasvuvauhti hidastuu, kun CNT-pitoisuus ylittää 0,5 %. Erityisesti märkäsekoitusmenetelmällä tuotetut näytteet hyötyvät CNT-lisäyksestä eniten, jossa 1 % CNT-lisäys johti jopa 17 % suurempaan vetolujuuteen puhtaaseen asfalttisidokseen verrattuna. Tämä johtuu CNT:n kyvystä vahvistaa asfalttisidosta ja siten parantaa sen vastustuskykyä vetolujuutta vastaan erityisesti halkeamien muodostumisen kriittisillä hetkillä. Vetolujuuden kasvun voidaan myös päätellä johtuvan sidoksen viskositeetin lisääntymisestä, mikä jäykistää seosta ja vähentää huokoisuutta, parantaen näin asfalttiseoksen halkeilunkestävyyttä. (Latifi & Hayati 2018.)

Tutkimustulokset osoittavat, että hiilinanoputkien (CNT) lisääminen asfalttiseokseen voi parantaa seoksen väsymiskestävyttä. Kun asfalttiseosta modifioitiin lisäämällä 0,5 % tai 1 % CNT:tä, väsymisikä nousi merkittävästi verrattuna perinteisiin asfalttinäytteisiin. Erityisesti 1 % CNT-pitoisuudella modifioitu näyte osoitti yli kaksinkertaista väsymiskestävyttä 5 celsiusasteen lämpötilassa standardinäytteeseen verrattuna. Kuitenkin, kun rasitus kasvoi 150 kPa:sta 300 kPa:an, kaikkien näytteiden väsymisikä laski jopa 2–3-kertaisesti. Tämä korostaa CNT-modifioinnin merkitystä asfaltin mekaanisille ominaisuuksille. Lisäksi lämpötilan nousu

aiheutti kaikissa näytteissä väsymisiän laskua ja rasituksen kasvua, mikä viittaa asfaltin viskoelastisiin ominaisuuksiin ja lämpötilaherkkyyteen. Väsymisiän suhteellinen kasvu oli erilainen eri lämpötiloissa ja CNT-pitoisuuksissa, mikä osoittaa, että optimaalisen CNT-pitoisuuden määrittäminen riippuu myös käytössä olevista olosuhteista. Tämän perusteella tutkimuksessa katsottiin 1 % CNT-pitoisuutta optimaalisimmaksi sekoitussuhteeksi, ottaen huomioon sekä mekaaniset parannukset että kustannustehokkuuden. (Latifi & Hayati 2018.)

5.4 Hiilinanoputkien vaikutus asfalttipäällysteen urautumiskestävyyteen

Irakissa tehdyn tutkimuksen päätavoite oli selvittää, kuinka hyödyllisiä teolliset hiilinanoputket (CNT) ovat kahden paikallisen bitumin modifioinnissa, erityisesti parantamaan niiden urautumiskestävyyttä. Tavoitteen saavuttamiseksi tehtiin kokeita, jotka käsittelivät bitumisideaineita ja niistä valmistettuja seoksia. Testeihin kuului perinteisiä sideaineiden testauksia, sekä ennen, että jälkeen modifioinnin, kuten viskositeetti-, penetraatio- ja pehmennesspistetestit. Tutkimuksen keskeinen osa oli ”kelkka-ajokoe”, joka suoritettiin laattamaisille näytepaloille. (Ismael, Fattah & Jasim 2021.)

Tutkimuksessa tarkasteltiin moniseinämaisten hiilinanoputkien (MWCNT) lisäämistä eri bitumilaatuihin ja sen vaikutusta niiden ominaisuuksiin. Kokeessa käytettyjen hiilinanoputkien mitat ja ominaisuudet näkyvät taulukossa 5. Tämä tieto on relevanttia, koska nanoputkien koko voi vaikuttaa niiden dispersioon bitumissa ja siten lopputuotteen mekaanisiin ominaisuuksiin. Hiilinanoputkien jakautumaa ja morfologiaa tarkasteltiin myös SEM:llä. Nämä analyttiset arvioinnit olivat perusta ymmärtää, miten hiilinanoputkien lisääminen vaikuttaa bitumin ja siitä valmistetun asfalttiseoksen ominaisuuksiin, mikä on keskeistä arvioitaessa hiilinanoputkien käytön soveltuvuutta bitumin vahvistamisessa ja asfalttipäällysteen suorituskyvyn parantamisessa. (Ismael ym. 2021.)

TAULUKKO 5. hiilinanoputkien ominaisuudet (mukaillen Ismael ym. 2021.)

Ulkohalkaisija	10–30 nm
Sisähalkaisija	5–10 nm
Pituus	10–30 μm
Pinta-ala	>200 m^2/g
Tiheys	0,06 g/cm^3
Puhtausaste	90 %

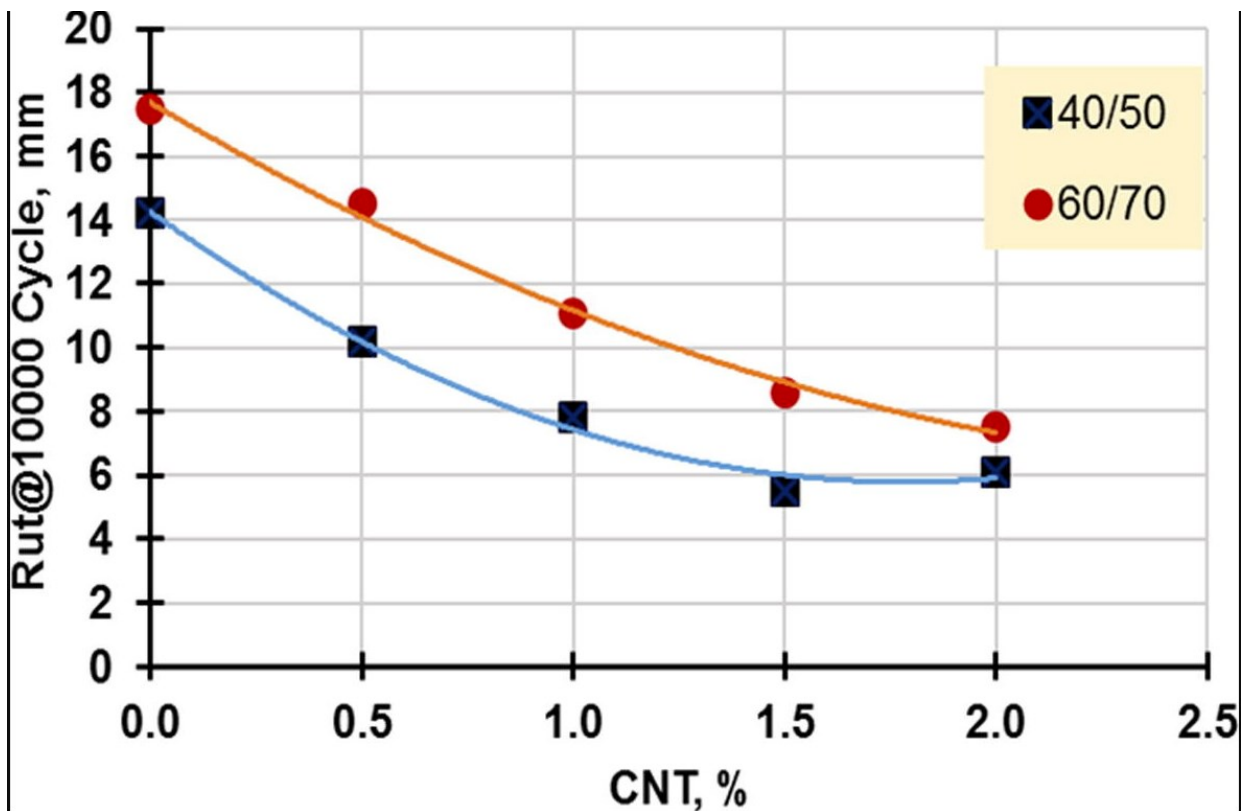
Tutkimuksessa tarkasteltiin kahta yleistä bitumilaatua, joiden tunkeutumisloukat ovat 40/50 ja 60/70. Nämä laadut ovat standardin mukaisia ja soveltuvat erityisesti kuumien alueiden asfalttipäällysteisiin. Ensimmäiseksi tehtiin alustavia testejä puhtaalle bitumille Irakin standardeja noudattaen. Nanomateriaalia lisättiin bitumiin eri määriä, 0,0–2,0 prosenttia bitumin painosta, 0,5 prosentin välein. Sekoitus aloitettiin manuaalisesti ja jatkettiin mekaanisesti korkealla sekoitusnopeudella 163 celsius asteen lämpötilassa 45 minuutin ajan. Tällä tavalla seoksesta saatiin homogeeninen eikä siinä ollut paakkuuntumia. (Ismael ym. 2021.)

Tutkimuksessa testattiin käsittelemätöntä ja hiilinanoputkilla (CNT) muokattua bitumia. Testit käsittivät penetraatiotestin, pehmenemispistetestin ja viskositeettitestin. Lisäksi tutkittiin sideaineiden reologista käyttäytymistä dynaamisella leikkausrheometrilla. Tulokset osoittivat, että CNT:n lisääminen bitumiin vaikutti merkittävästi sen viskositeettiin ja muihin reologisiin ominaisuuksiin. Kun CNT:n määrää bitumissa nostettiin 2,0 prosenttiin, viskositeetti kasvoi huomattavasti: 52,0 prosenttia 40/50-laatuissa ja 48,0 prosenttia 60/70-laatuissa bitumissa. Pehmenemispiste nousi 22,0–25,0 prosenttia ja penetraatioarvo laski 32,0–27,0 prosenttia, mikä kertoo bitumin jäykistymisestä. Nämä havainnot viittaavat siihen, että hiilinanoputkien lisääminen bitumiin lisää sen leikkausvastusta ja parantaa käyttäytymistä tieliikenteen kuorituksessa, mikä on lupaavaa teiden päällysteiden kestävyuden parantamiseksi. (Ismael ym. 2021.)

Tutkimuksessa paneuduttiin myös hiilinanoputkilla (CNT) modifioitujen bitumiseosten urasyvyyden mittaukseen käyttämällä pyöränjäljitystestiä. Testitulokset, jotka esitetään kuviossa 3, osoittavat, että hiilinanoputkien lisääminen vähensi merkittävästi urasyvyyttä. Esimer-

kiksi 40/50 bitumiseoksessa urasyvyys pieneni 61 %, kun CNT-pitoisuus oli 1,5 %. Vastaa- vasti 60/70 bitumiseoksessa urasyvyys laski 17,5 mm:stä 7,5 mm:iin 2,0 % CNT-pitoisuu- della, mikä tarkoittaa 57,0 %:n kasvua urautumiskestävyydessä. Nämä havainnot osoittavat, että hiilinanoputkien käyttö bitumiseoksissa parantaa niiden urautumiskestävyyttä, luoden jäykempiä mutta joustavia bitumiseoksia, jotka kestävät paremmin pyöräkuormien aiheutta- maa rasiitusta. (Ismael ym. 2021.)

KUVIO 3. Hiilinanoputken vaikutus urasyvyyteen 10000 kuormitusyökin jälkeen (Ismael ym. 2021.)



Tutkimustulosten yhteenveto osoittaa hiilinanoputkien (CNT) hyödyllisyyden asfalttiseosten lisäaineena urautumiskestävyyden parantamisessa. Pyöränjäljitystestin mukaan mitattu urasyvyys kuormitusten lopussa osoitti merkittävää vähentymistä, kun CNT-materiaalia käytettiin. Optimaalinen CNT-pitoisuus, joka tuotti parhaan urautumiskestävyyden, näyttää olevan suuresti sidoksissa käytetyn bitumin viskositeettiin. Kovempi 40/50 bitumi tarvitsi vain 1,5 % CNT:tä saavuttaakseen 61,0 %:n parannuksen urautumiskestävyydessä, kun taas pehmeämpi 60/70 bitumi saavutti pienemmän parannuksen, 57,0 %, CNT-pitoisuuden noustessa 2,0 %:iin. (Ismael ym. 2021.)

5.5 Hiilinanoputkia sisältävä itsekorjautuva asfalttipäällystemateriaali

Kiinassa tehdyssä tutkimuksessa tutkittiin hiilinanoputkien (CNT) käyttöä asfaltin modifiointiin, keskittyen erityisesti sen paranemiseen mikroaaltokäsittelyllä. Tutkimuksessa sekoitettiin CNT:itä perusasfaltin kanssa eri pitoisuuksissa (0 %, 0,5 %, 1,0 %, 1,5 % ja 2,0 %), luoden näytteet nimeltään CA-0, CA-0.5, CA-1.0, CA-1.5 ja CA-2.0. Sekoitukseen käytettiin laitetta, jossa asfaltti lämmitettiin ja sekoitettiin hiilinanoputkien kanssa. Sekoitusta jatkettiin eri nopeuksilla ja lämpötiloissa, jotta saatiin valmistettua tasainen asfalttimassa. Tutkimuksen pää tavoitteena oli selvittää, miten CNT-modifiointi vaikuttaa asfaltin ominaisuuksiin, erityisesti sen kykyyn parantua mikroaaltokäsittelyn jälkeen. Hiilinanoputkien tarkemmat ominaisuudet on listattu taulukossa 6. (Zhang, Sha, Cao, Wang, Song & Jiao 2023.)

TAULUKKO 6. hiilinanoputkien ominaisuudet (mukaiillen Zhang ym. 2023.)

Halkaisija	3–15 nm
Pituus	15–30 μm
Puhtausaste	>97 %
Pinta-ala	250–270 m^2/g
Tiheys	0,0609 g/cm^3

Hiilinanoputket ovat erityisen lupaavia lisäaineita asfalttisidosten parantamiseksi, koska ne omaavat erinomaisen lämmönjohtavuuden ja tämän ansiosta tutkimuksessa esitetyt tulokset osoittavat, että CNT:n lisääminen muokattuun asfalttiin parantaa sen lämmönjohtavuutta. Parannus on merkittävin, kun CNT-pitoisuus on 1,5 %. Kuitenkin suurempi CNT-pitoisuus (2.0 %) aiheuttaa lämmönjohtavuuden laskun, mikä johtuu CNT:iden rypästyästä asfalttiin eikä niiden tasaisesta jakautumisesta. (Zhang ym. 2023.)

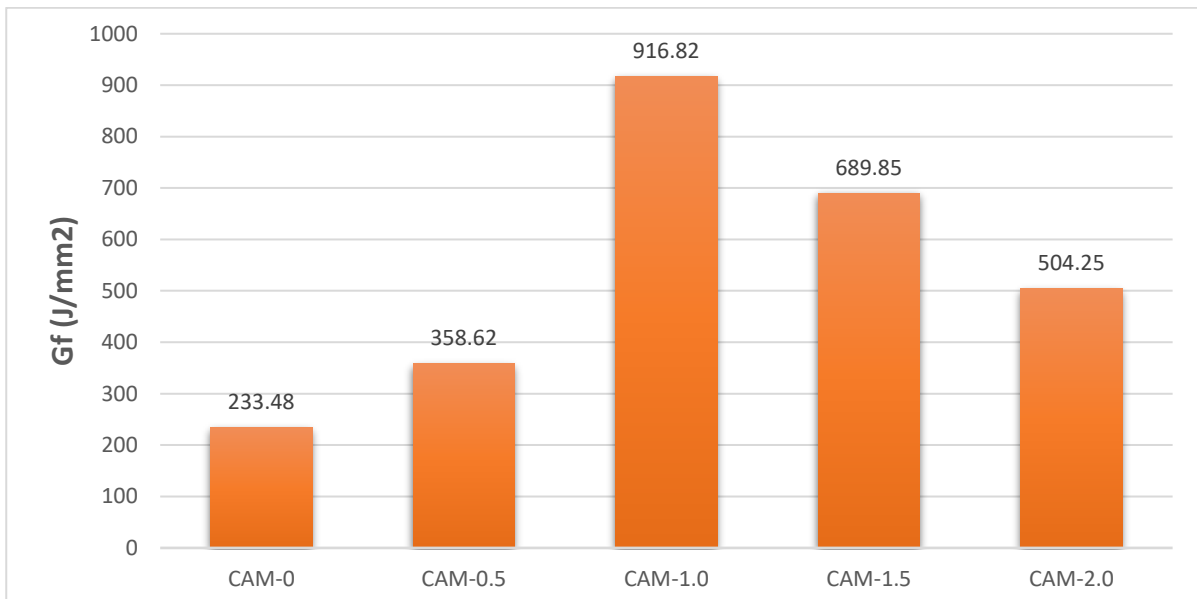
Tutkimuksessa tutkittiin, miten hiilinanoputket (CNT) vaikuttavat asfaltin sideaineiden kimmoisuuteen ja urautumiskestävyyteen. Tutkimuksessa käytettiin kahta keskeistä mittaria: R (3.2) ja Jnr (3.2), jotka ovat tärkeitä asfaltin suorituskyvyn arvioinnissa. Havaittiin, että CNT:n lisääminen sideaineisiin lisää niiden kimmoisuutta, mikä näkyy R (3.2) arvojen kasvuna. Esimer-

kiksi 58 celsiusasteessa CNT:llä parannettujen asfalttien R (3.2) arvot olivat selvästi suurempia kuin tavallisen asfaltin. Tutkimuksessa huomattiin myös, että korkeat lämpötilat tekevät asfaltin sideaineista herkempiä muodonmuutoksille, mikä ilmenee Jnr (3.2) arvojen nousuna. Kuitenkin CNT:llä muokattujen asfalttien Jnr (3.2) arvot olivat pienemmät kuin tavallisessa asfaltissa, mikä tarkoittaa, että ne kestävät paremmin lämpötilan vaihteluita ja kestävät urautumista tehokkaammin. Tutkimus osoittaa, että hiilinanoputkien (CNT) lisääminen asfalttiin voi parantaa sen kestävyttä muodonmuutoksia vastaan. Kuitenkin, jos CNT:n määrä on liian suuri, asfaltti voi muuttua rasisherkäksi, mikä näkyy Jnr-diff-arvojen yli 75 % nousuna. Siksi tutkimuksessa suositellaan, että CNT:n osuus pidetään enintään 1,5 prosentissa. Näin varmistetaan asfaltin paras suorituskyky korkeissa lämpötiloissa ilman, että sen laatu kärsii. (Zhang ym. 2023.)

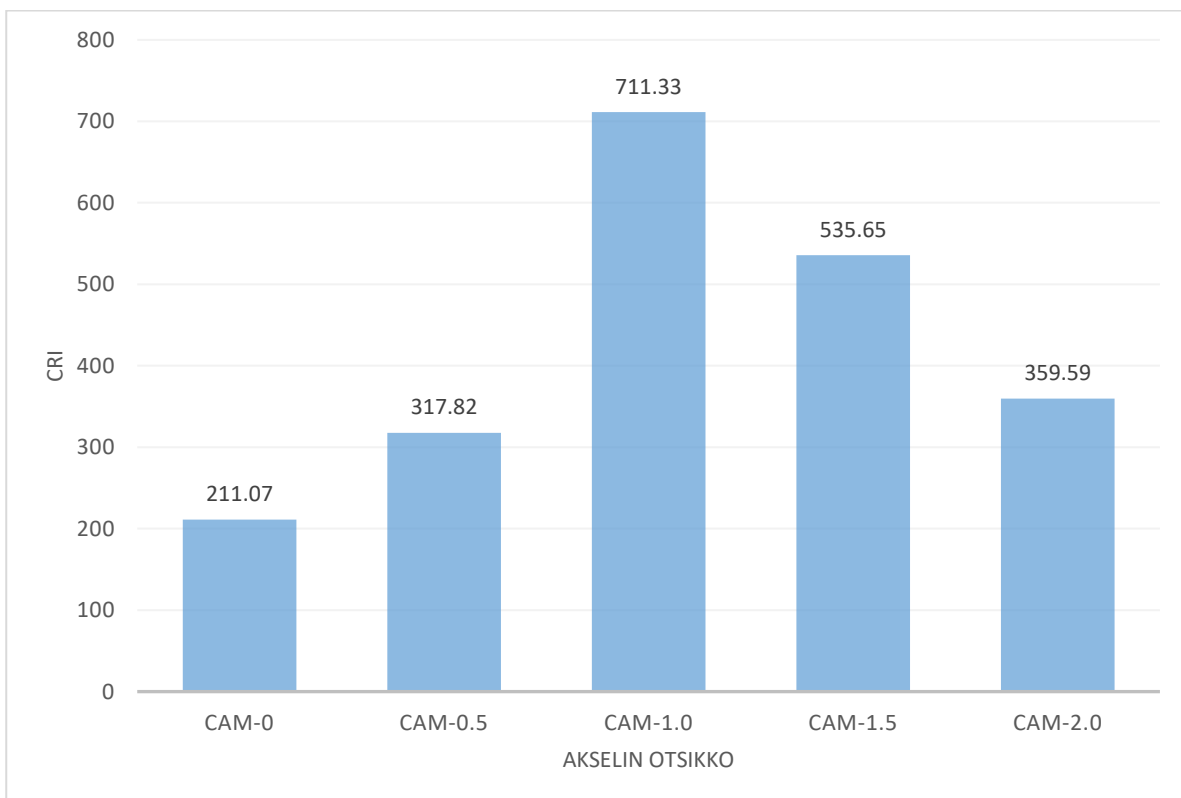
Tutkimuksessa tarkasteltiin asfaltin sideaineiden väsymisenkestävyyttä, joka on oleellista niiden suorituskyvyn arvioinnissa. Todettiin, että hiilinanoputkien (CNT) lisääminen sideaineisiin parantaa niiden elastisuutta ja väsymisenkestävyyttä. Kun CNT-pitoisuus ylitti 1,0 %, väsymisenkestävyydessä havaittiin merkittävää paranemista. Korkeimmalla CNT-pitoisuudella (CA-2.0) saavutettiin parhaat väsymisenkestävyyssominaisuudet, mutta tämä pitoisuus oli liian korkea, jolloin sideaineiden reologiset ominaisuudet eivät täyttäneet vaatimuksia. (Zhang ym. 2023.)

Tutkimuksessa havaittiin, että hiilinanoputkien (CNT) lisääminen paransi asfaltin murtumiskestävyttä. CNT-lisättyjen näytteiden murtumaenergia oli korkeampi, mikä tarkoittaa, että ne kestävät paremmin halkeilua. Näyte, CAM-1.0, osoitti tutkimuksessa huomattavan korkean murtumaenergian, joka oli lähes neljä kertaa suurempi kuin ilman CNT:tä valmistetun CAM-0:n (KUVIO 4). Lisäksi halkeamiskestävyys indeksi (CRI) -analyysi vahvisti, että CNT:tä sisältävät näytteet saavuttivat korkeammat arvot, mikä osoittaa parempaa halkeamisenkestävyyttä (KUVIO 5). (Zhang ym. 2023.)

KUVIO 4. asfalttiseosten murtumaenergia (mukailen Zhang ym. 2023.)



KUVIO 5. halkeamiskestävyys indeksi (mukailen Zhang ym. 2023.)



Tutkimuksessa testattiin hiilinanoputkia sisältävien asfalttiseosten itseparantumiskykyä mikroaaltokäsittelyllä. Kokeissa asfalttinäytteitä lämmitettiin 700 watin Galanz-mikroaaltouunissa (2,45 GHz). Ennen lämmitystä näytteet kuivattiin, jotta kosteus ei vaikuttaisi tuloksiin. Lämmitysaika oli 40 sekuntia, mikä mahdollisti asfalttiseosten parantumisen ylikuumenematta. Lämmityksen aikana seurattiin asfaltin lämpötilaa infrapunakameralla 10 sekunnin välein. Lämmitetyt näytteet pidettiin huoneenlämmössä 12 tuntia, jonka jälkeen suoritettiin testejä arvioidakseen niiden kykyä parantua itsestään. (Zhang ym. 2023.)

Itsekorjaavuutta arvioitiin Healing Index (HI) -mittarilla. CAM-0-näytteellä oli alhaisin HI, alkaen 60,87 %:sta ja laskien viidennen syklin jälkeen 33,69 %:iin. Hiilinanoputkien (CNT) lisääminen paransi näitä ominaisuuksia. Kaikilla CNT:illä muokatuilla seoksilla oli korkeampi HI kuin CAM-0:lla, ja erityisesti CAM-1.0 näytteellä oli tutkimuksen korkeimmat HI-arvot. Halkeamien vertailu ennen ja jälkeen korjausta osoitti, että CNT:t vähensivät halkeamien kokoa tehokkaasti. Tutkimus paljasti kuitenkin, että liian suuri määrä CNT:itä voi heikentää seosten itsekorjaavia ominaisuuksia. Liian korkea CNT-pitoisuus saattaa aiheuttaa epätasaista lämmönjohtavuutta ja ylikuumenemista. Näin ollen 1,0 % CNT-pitoisuus asfalttiseoksessa tarjoaa parhaat itsekorjaavat ominaisuudet. (Zhang ym. 2023.)

5.6 Nanohiilellä muokatun asfaltin kosteusherkkyyys

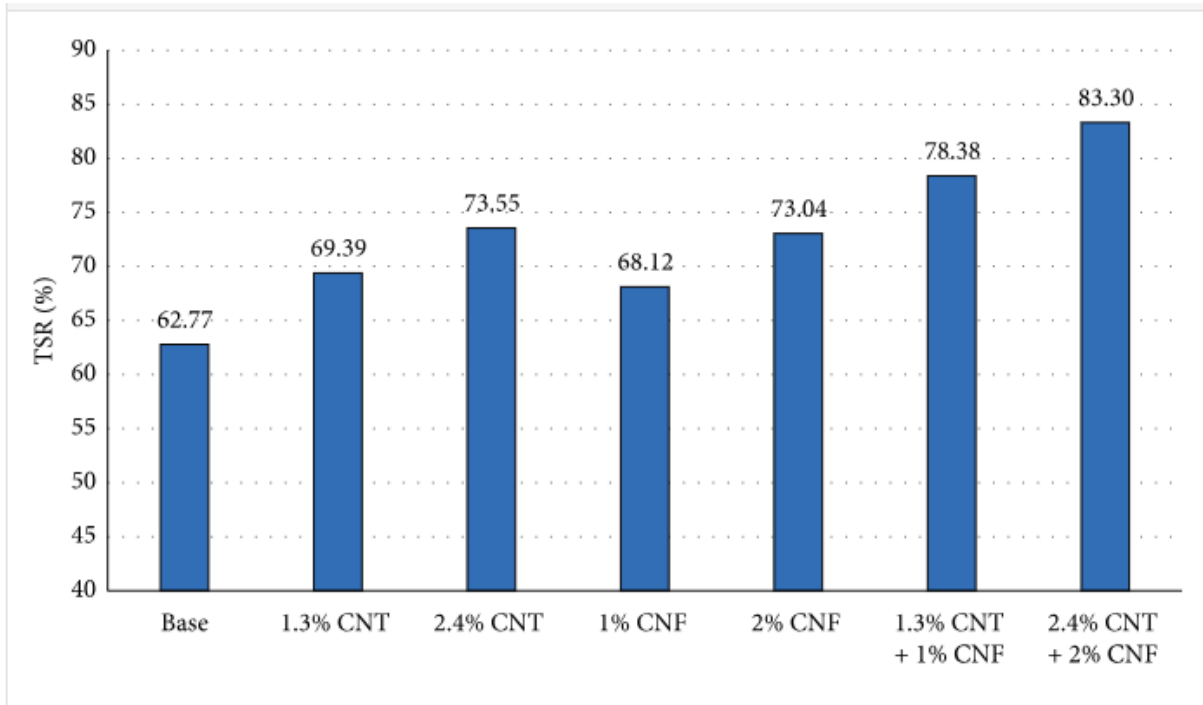
Tässä vuonna 2021, Iranissa tehdyn tutkimuksen aiheena oli asfalttiseosten kosteusherkkyyden vähentäminen. Asfaltin ja kiviaineksen tarttuvuutta ja kiinnittyvyyttä parannettiin käyttämällä hiilinanokuituja (CNF) ja hiilinanoputkia (CNT). Tutkimuksessa hyödynnettiin pintaenergiamenetelmää (SFE) ja epäsuoraa vetolujuustestiä (ITS) arvioimaan asfalttiseosten suorituskykyä kosteudessa. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten CNF:n käyttö asfaltin sideaineen ja CNT:n käyttö kiviaineksen parannusaineena vaikuttaa asfalttiseoksen kosteudenkestävyyteen. Tutkimuksen perusteella nanomateriaalien käyttö paransi asfalttiseosten tarttuvuutta ja kiinnittyvyyttä, mikä vähensi niiden kosteusherkkyyttä. (Nikookar, Bagheri Movahhed, Ayoubinejad, Najafi Moghaddam Gilani & Hosseinian 2021.)

Tutkimustulokset osoittivat, että CNF:n lisääminen vähentää asfaltin sideaineen tunkeutumista (penetraatiota) ja lisää sen pehmenemispistettä. Kun asfalttiin lisättiin 1 % tai 2 % CNF:ää, tunkeutumisaste laski 11,67 % ja 17,72 %. Samoin pehmenemispiste parani 16,84

% ja 29,94 % näillä CNF-määrillä. CNF:n käyttö teki asfaltista jäykempää ja vähensi sen venymistä rasituksen alaisena. Lisäksi tutkittiin CNF:n vaikutusta asfaltin lämpötilaherkkyteen Penetration Index (PI) -mittauksella, jossa korkeammat PI-arvot viittaavat asfaltin parempaan kestävyYTEEN lämpötilan muutoksia vastaan. Tutkimuksessa havaittiin, että CNF:n lisääminen paransi PI-arvoja, mikä tarkoittaa asfaltin sideaineen vähäisempää lämpötilaherkkyttä. Aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet hiilinanoputkien (CNT) parantavan asfaltin sideaineen ominaisuuksia, mutta CNF:n vaikutukset penetraatioindeksiin olivat aiemmin vähemmän tutkittuja. (Nikookar ym. 2021.)

Tutkimuksessa tarkasteltiin muokattujen asfalttiseosten vetolujuuden säilymistä veden vaikutuksen alaisena. Tätä kutsutaan TSR-arvoksi (Tensile Strength Ratio). Se vertaa materiaalin vetolujuutta kuivissa olosuhteissa sen vetolujuuteen, kun se on altistettu vedelle. TSR-testi on tärkeä asfalttiseosten laadun määrittämisessä, koska se auttaa selvittämään, kuinka hyvin asfaltti kestää vesivaurioita ja säilyttää rakenteellisen eheyden veden vaikutuksen alaisena. Tutkimuksessa käytettiin hiilinanoputkia (CNT) ja hiilinanokuituja (CNF) eri pitoisuuksina perusseokseen verrattuna. Tulokset osoittivat, että 1,3 % ja 2,4 % CNT:n sekä 1 % ja 2 % CNF:n lisääminen paransi TSR-arvoja merkittävästi (KUVIO 6). Erityisesti huomattiin, että CNT:n ja CNF:n yhdistelmän käyttö asfalttiseoksissa paransi niiden vedenkestävyyttä ja rakenteellista eheyttä vielä enemmän. Yksittäisten lisäaineiden käyttö ei tuottanut yhtä suurta vaikutusta kuin niiden yhdistelmä. Nanohiilen käyttö sideaineen muokkaamiseen vähentää sen polaarisia ominaisuuksia ja parantaa adheesiota vedessä ja kuivissa olosuhteissa, kun taas kiviainesten muokkaaminen lisää niiden hydrofobisia ominaisuuksia ja parantaa niiden adheesiota sideaineeseen. (Nikookar ym. 2021.)

KUVIO 6. Perus- ja muokattujen asfalttiseosten TSR:n tulokset (Nikookar ym. 2021.)



6 HIILINANOPUTKIEN KÄYTÖN HAASTEET ASFALTIN LISÄAINEENA

Hiilinanoputkien hyödyntäminen asfaltin lisäaineena on tutkimusten perusteella lupaava konsepti, mutta ennen kuin tämä voidaan ottaa kaupalliseen käyttöön Suomessa ja maailmanlaajuisesti, on ratkaistava useita sen mukana tuomia haasteita. Suurin osa näistä tutkimuksista on toteutettu Aasiassa, ja ne keskittyvät pääasiassa hiilinanoputkilla vahvistetun asfaltin kestävyteen ja reaktioihin korkeissa lämpötiloissa, mukaan lukien myös kylmän ja kosteuden kestävyys. Yksi merkittävä yhtäläisyys kaikissa tutkimuksissa on ollut tarve korkeille sekoitusnopeuksille, kun hiilinanoputket integroidaan asfalttimassaan.

Tämän aiheen tiimoilta olen ollut yhteydessä Peab Asphalt Oy:n tutkimus- ja tuotekehitysjohtaja Leo Kaariniemeen. Hän oli aiemmin törmännyt aiheeseen kansainvälisissä alan messuilla. Keskustelin hänen kanssaan opinnäytetyöni aiheesta ja tarjosin hänelle tutkimusaineistoa. Kaariniemi näki hiilinanoputkien käytössä mahdollisuuksia parantaa asfaltin ominaisuuksia, mutta haasteita kuitenkin tulisi olemaan, kuten asfalttimassan sekoittamiseen tarvittavat korkeat sekoitusnopeudet, joita nykyisellä kalustolla ei voida saavuttaa. (Kaariniemi 2023.)

Toinen merkittävä haaste on tuotteen sertifiointin ja sen sisällyttämisen asfalttinormeihin. Prosessi on pitkä, ja samalla tilaajat vaativat, että uuden aineen uudelleenkäyttö on mahdollista ilman haittavaikutuksia ihmisiin tai ympäristöön. Suomessa kierrätetään suuria määriä vanhaa asfalttia, joten tämä on erityisen ajankohtaista. Uusien tuotteiden markkinoille tuomisessa olisi tärkeää yhdistää tuotteen valmistajan, tilaajien edustajien ja urakoitsijoiden osaminen. Suomessa tilaajien edustajat vaativat, että uusia tuotteita ei voida tuoda markkinoille, ellei kaikilla urakoitsijoilla ole mahdollisuutta tarjota kyseistä tuotetta, mikä korostaa yhteistyön tärkeyttä.

Kaariniemi suositteli, että ottaisin yhteyttä Katri Eskolaan, joka työskentelee väyläviraston teiden kunnossapidon asiantuntijana. Eskola ei ollut aiemmin perehtynyt hiilinanoputkien käytöstä asfaltin valmistuksessa, mutta piti sitä kiinnostavana aiheena ja oli halukas tutustumaan opinnäytetyöhöni sen valmistuttuaan. Hän korosti, että matka tutkimuksesta valmiiseen tuotteeseen on pitkä ja että se vaatii merkittäviä investointeja, aikaa ja rahaa. Nykyisessä kehityskontekstissa CO²-päästöjen vähentäminen on keskeinen ohjaava tekijä, ja tässä mielessä

Hycamiten tarjoama hiili voisi sopia hyvin konseptiin, erityisesti sen jopa hiilineutraalin valmistusprosessin ansiosta. (Eskola 2024.)

6.1 Hiilinanoputken mahdolliset terveysvaikutukset

Viimeisten vuosikymmenien ja vuosien aikana sekä teollisuudessa että lääketieteen alalla on kehitetty runsaasti erilaisia nanomateriaaleja. Näistä huomionarvoisia ovat hiilinanoputket (CNT:t), jotka tarjoavat lukuisia kaupallisia mahdollisuuksia ja applikaatioita. Kuitenkin niiden kuitumainen rakenne ja pitkäkestoinen pysyvyys keuhkokudoksissa ovat aiheuttaneet huolta potentiaalisista terveysriskeistä. Nanomateriaalien käytön yleistyessä myös niihin liittyvä tutkimus on lisääntynyt. Sivuutan työssäni yhtä ajatusta herättävää tutkimusta.

Tässä tutkimuksessa paneuduttiin hiilinanoputkien mahdollisiin haitallisiin vaikutuksiin. Huomio kiinnittyi erityisesti CNT:iden kuitumaiseen rakenteeseen, suuriin pituus-leveys-suhteisiin, fysikaaliskemialliseen kestävyys ja niiden oletettuun biokestävyyteen keuhkokudoksissa, jotka muistuttavat vaarallisten asbestikuitujen ominaisuuksia. CNT:iden haitalliset vaikutukset liittyvät neljään tekijään, korkea pinta-ala suhteessa tilavuuteen, kuitumainen, neulamainen muoto, joka muistuttaa asbestia, nanoputkien biokestävä luonne ja kyky adsorboida toksineja ja saasteita pinnalleen. Tutkimuksessa korostettiin, että kahdella ensimmäisellä tekijällä on yhteys kaikkien kuiturakenteiden aiheuttamiin akuutteihin pleuraalisiin tulehduksiin, kun taas kahden viimeisen tekijän merkitys riippuu kuitujen kemiallisesta koostumuksesta. (Gupta, Singh, Gupta, Dusinska & Rahman 2022.)

Tutkimuksessa verrattiin hiilinanoputkien ja asbestikuitujen toksisuutta ja syöpävaarallisuutta. Tutkimustulokset viittaavat mahdollisiin syöpävaarallisiin lopputuloksiin ja auttavat ymmärtämään asbestin ja tiettyjen nanomateriaalien toksisuutta. Asbestille ja CNT:ille altistumisen jälkeiset geenien ilmentymisprofiilit tarjoavat tietoa niiden yhteisistä tai ainutlaatuisista vaikutuspoluista. Tutkimus korostaa samankaltaisuuksia asbestin ja tiettyjen CNT:iden halkaisijoiden ja pituuksien patogeenisissä mekanismeissa, mikä korostaa tarvetta suunnitella tarkkoja protokollia CNT:iden teollisen käytön sääntelemiseksi, välttääksemme asbestikuitujen kanssa aiemmin koetut vaarat. (Gupta ym. 2022.)

7 POHDINTA

Opinnäytetyöprojektini alkoi keväällä 2023, kun otin yhteyttä kokkolalaiseen vetyalan yritykseen Hycamiteen toivoen löytäväni sopivan aiheen opinnäytetyölleni. Yrityksen edustaja ehdotti tutkimaan, kuinka yrityksen prosessissaan sivutuotteena syntyvä hiili soveltuisi asfaltin lisäaineeksi ja millaisia vaikutuksia sillä olisi asfaltin ominaisuuksiin.

Kävin läpi toista kymmentä tutkimusta, joista pyrin valitsemaan niistä mahdollisimman erilaisia, joissa paneuduttiin kyseiseen aiheeseen mahdollisimman monipuolisesti. Valitsin opinnäytetyöhöni kuusi tutkimusta, joiden tuloksia tarkastelin ja vertailin. Tulokset olivat hyvin samansuuntaisia. Yksikään tutkimuksista ei osoittanut, että hiilinanoputket olisivat sopimattomia lisäaineita tai heikentäisivät asfaltin laatua. Tutkitut aspektit sisälsivät muun muassa asfaltin urautumiskestävyyden, viskositeetin ja routimiskestävyyden. Tutkimukset osoittivat, että optimaalinen hiilinanoputkien pitoisuus asfaltissa olisi 1–2 painoprosenttia. Tutkimusten perusteella voidaan tulla siihen tulokseen, että hiilinanoputkien käyttö asfaltin lisäaineena on lupaavaa tulevaisuuden teknologiaa. Kuitenkin hiilinanoputkien potentiaaliset terveysriskit ovat herättäneet tutkijoiden mielenkiinnon viime vuosikymmenellä.

Löytämäni tutkimusaineisto, joka pääasiassa koostuu 2010-luvun julkaisuista, viittaa siihen, että hiilinanoputkien mahdolliset terveysvaikutukset vaativat huolellista tarkastelua. Tutkimuksissa tuodaan usein esille hiilinanoputkien potentiaalisia haitallisia vaikutuksia terveydelle, ja ne puhuvat vahvasti lisätutkimusten tarpeen puolesta. Emme saa myöskään sivuttaa mahdollisia ympäristö haittoja ja vaikutuksia. Vaikka tämä aihealue ei kuulu omaan erikoisosaamiseeni, pidän sen mainitsemista tärkeänä, sillä se liittyy välillisesti opinnäytetyöni kontekstiin. On olennaista ymmärtää, että tämän kaltaiset uudet materiaalit edellyttävät perusteellista riskien arviointia ennen niiden laajamittaista käyttöönottoa.

Tämän projektin myötä olen kokenut valtavia oppimiskokemuksia. Hiilinanokuitujen ja -nanoputkien maailma on avautunut minulle uudella ja syvällisellä tavalla. Olen perehtynyt niiden valmistusmenetelmiin, moninaisiin ominaisuuksiin, sekä niiden tarjoamiin lukemattomiin käyttökohteisiin ja mahdollisuuksiin. Lisäksi olen syventänyt ymmärrystäni asfalttialasta, erityisesti sen tutkimusmenetelmistä. Opinnäytetyöni on opettanut minulle laajaa ja monipuolista tiedonhakua, sekä kehittänyt kykyäni tuottaa laadukasta tekstiä. Tämän prosessin aikana

olen kasvanut aiheeni asiantuntijaksi, mikä herättää minussa syvää ylpeyttä. Jokainen opittu asia on vahvistanut ammatillista osaamistani ja valmistanut minua tuleviin haasteisiin kemian insinöörinä. Kokonaisuutena tämä opinnäytetyö on ollut ainutlaatuinen matka, jossa olen oppinut ei vain itse aiheesta, vaan myös itsestäni tutkijana ja oppijana. Se on antanut minulle vankan pohjan, jonka päälle rakentaa tulevaa uraani.

LÄHTEET

- Eskola, K. 2024. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköpostikeskustelu. 2.1.2024.
- Gupta, S.S., Singh, K.P., Gupta, S., Dusinska, M. & Rahman, Q., 2022. *Do Carbon Nanotubes and Asbestos Fibers Exhibit Common Toxicity Mechanisms?* *Nanomaterials*, 12, 1708. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/nano12101708>. Viitattu 16.11.2023.
- Hycamite. 2023. Decarbonising industry. Saatavissa: <https://www.hycamite.com>. Viitattu 25.10.2023.
- Ismael, M.Q., Fattah, M.Y. & Jasim, A.F. 2021. *Improving the rutting resistance of asphalt pavement modified with the carbon nanotubes additive*. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4). Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.02.038>. Viitattu 7.11.2023.
- Johnson, T. 2020. *All About Carbon Nanotubes*. ThoughtCo. Saatavissa: www.thoughtco.com/what-are-carbon-nanotubes-820395. Viitattu 25.1.2024.
- Kaariniemi, L. 2023. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköpostikeskustelu. 17.11.2023.
- Kong, L. & Zhu, D. 2023. *Laboratory evaluation of carbon nanotubes modified bio-asphalt. Case Studies in Construction Materials*, 18. Saatavissa: <https://doi-org.ezproxy.centria.fi/10.1016/j.cscm.2023.e01944>. Viitattu 27.10.2023.
- Koskinen, T. 2024. *Miten asfaltti tehdään?* Saatavissa: <https://asfalttietieto.fi/miten-asfaltti-teen-daan-katso-tasta-selkea-kuvaus>. Viitattu 25.1.2024.
- Latifi, H. & Hayati, P. 2018. *Evaluating the effects of the wet and simple processes for including carbon Nanotube modifier in hot mix asphalt*. *Construction and Building Materials*, 116. Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.centria.fi/science/article/pii/S0950061817326430#ab010>. Viitattu 6.11.2023.
- Nikookar, M., Bagheri Movahhed, M., Ayoubinejad, J., Najafi Moghaddam Gilani, V. & Hosseinian, S.M., 2021. *Improving the Moisture Sensitivity of Asphalt Mixtures by Simultaneous Modification of Asphalt Binder and Aggregates with Carbon Nanofiber and Carbon Nanotube*. *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021. Saatavissa: <https://doi.org/10.1155/2021/6682856>. Viitattu 16.11.2023.
- Pavement Interactive. 2024a. *Bending Beam Rheometer*. Saatavissa: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/binder-tests/bending-beam-rheometer/>. Viitattu 18.4.2024.
- Pavement Interactive. 2024b. *Direct Tension Tester*. Saatavissa: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/binder-tests/direct-tension-tester/>. Viitattu 18.4.2024.
- Pavement Interactive. 2024c. *Ductility*. Saatavissa: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/binder-tests/ductility/>. Viitattu 18.4.2024.

Pavement Interactive. 2024d. *Kinematic Viscosity*. Saatavissa: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/asphalt-tests/absolute-viscosity/>. Viitattu 18.4.2024.

Pavement Interactive. 2024e. *Laboratory Wheel Tracking Devices*. Saatavissa: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/asphalt-tests/laboratory-wheel-tracking-devices/>. Viitattu 18.4.2024.

Pavement Interactive. 2024f. *Penetration Test*. Saatavissa: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/binder-tests/penetration-test/>. Viitattu 18.4.2024.

Pavement Interactive. 2024g. *Softening Point*. Saatavissa: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/binder-tests/softening-point/>. Viitattu 18.4.2024.

Peng, C., Guan, P., Liu, Y., Ning, Y., Ruan, D., Xu, F., Yang, D., Ye, Z. & You, Z. 2023. *Study on the effect of carbon nanotubes on the properties of wasted engine oil recycled asphalt binder*. *Construction and Building Materials*, 400. Saatavissa: <https://doi-org.ezproxy.centria.fi/10.1016/j.conbuildmat.2023.132800>. Viitattu 27.10.2023.

Zhang, F., Sha, A., Cao, Y., Wang, W., Song, R. & Jiao, W., 2023. *Characterization of Self-healing Properties of Asphalt Pavement Materials Containing Carbon Nanotubes: from the Binder and Mix Level based on Grey Relational Analysis*. *Construction and Building Materials*, 404. Saatavissa: <https://doi-org.ezproxy.centria.fi/10.1016/j.conbuildmat.2023.133323>. Viitattu 14.11.2023.

