





Implementation of Palm Oil Waste Nano Technology to Increase the Durability of Road Pavement Materials: Proposed Research Roadmap

Sri Sunarjono¹ , Ngafwan²

¹Department of Civil Engineering, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Indonesia

²Department of Mechanical Engineering, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Indonesia

 sri.sunarjono@ums.ac.id

 <https://doi.org/10.53017/uje.138>

Received: 22/02/2022

Revised: 25/03/2022

Accepted: 26/03/2022

Abstract

Many road pavements using asphalt mixtures in Indonesia are found to be not durable, especially heavy traffic roads. Even road damage often occurs early before the service life is reached. Many efforts have been made to improve the strength and durability of the mixture, but have not been effectively. For example, the use of fillers can increase the strength and durability of the mixture significantly, but its performance at low temperatures has an impact on the risk of hardening and cracking. The research objective is to propose the idea of implementing nanotechnology for palm oil waste materials to increase the durability of road pavement materials based on the research roadmap developed. The method used is through five approaches, namely: (i) review of research results on the durability of road pavement materials, (ii) review of research results on the implementation of nanotechnology in road pavement materials, (iii) research gaps, (iv) research ideas, and, (v) proposed research roadmap. A research roadmap for the implementation of nanotechnology to improve the durability of road pavement materials has been prepared. The substance of the research roadmap proposes three ideas, namely maximizing the function of nanomaterials as: (i) anti-aging agent, (ii) protecting water infiltration into the body of the asphalt mixture, and (iii) bonding agent between asphalt-aggregate.

Keywords: Nano technology; Palm oil waste; Asphalt mixture durability; Research roadmap

Implementasi Teknologi Nano Limbah Kelapa Sawit Untuk Meningkatkan Keawetan Bahan Perkerasan Jalan: Usulan Peta Jalan Riset

Abstrak

Perkerasan jalan menggunakan campuran aspal di Indonesia banyak ditemukan tidak awet terutama jalan lalu lintas berat. Bahkan kerusakan jalan sering terjadi secara dini sebelum umur rencananya tercapai. Upaya untuk meningkatkan kinerja kekuatan dan keawetan campuran telah banyak dilakukan, namun belum maksimal. Sebagai contoh, penggunaan filler dapat meningkatkan kekuatan dan keawetan campuran secara signifikan, namun kinerjanya pada suhu rendah ternyata berdampak resiko pengerasan dan retak. Tujuan riset adalah mengajukan gagasan implementasi teknologi nano bahan limbah kelapa sawit untuk meningkatkan keawetan bahan perkerasan jalan berbasis peta jalan riset yang dikembangkan. Metode yang digunakan adalah melalui lima pendekatan, yakni: (i) Tinjauan hasil riset tentang keawetan bahan perkerasan jalan, (ii) Tinjauan hasil riset tentang implementasi teknologi nano dalam bahan perkerasan jalan, (iii) Kesenjangan riset, (iv) Gagasan riset, dan, (v) Usulan peta jalan riset. Peta jalan riset implementasi teknologi nano untuk meningkatkan keawetan bahan perkerasan jalan telah disusun. Substansi peta jalan riset mengusulkan tiga

gagasan, yakni memaksimalkan fungsi bahan nano sebagai : (i) agen anti ageing, (ii) pemrotek infiltrasi air kedalam tubuh campuran aspal, dan (iii) agen bonding antara aspal-agregat.

Kata kunci: Teknologi nano; Limbah kelapa sawit; Keawetan campuran aspal; Peta jalan riset

1. Pendahuluan

Infrastruktur jalan sangat berperan dalam pengembangan industri dan merupakan aspek penting dalam pertumbuhan ekonomi suatu negara. Menurut *The Global Competitiveness Report 2016-2017* [1] pembangunan infrastruktur di Indonesia menempati urutan ke-60. Pembangunan infrastruktur perlu ada inovasi dan efisiensi.

Bahan perkerasan jalan menggunakan campuran beraspal di Indonesia banyak ditemukan tidak awet terutama jalan lalu lintas berat. Campuran beraspal dimaksud adalah campuran bahan agregat dengan bahan pengikat aspal, dan terkadang ditambahkan bahan *filler* atau aditif. Kerusakan jalan sering terjadi secara dini sebelum umur rencananya tercapai [2], [3]. Penyebab utama perkerasan jalan tidak awet antara lain adalah faktor drainase [2], [4], faktor beban [4], [5], dan faktor suhu [6], [7]. Faktor drainasi dimaksud adalah konstruksi saluran yang tidak berfungsi dengan baik, atau kapasitas saluran yang tidak memadai, atau bahkan tidak tersedia konstruksi saluran. Faktor beban dimaksudkan adanya realitas beban lebih sehingga kerusakan perkerasan jalan meningkat secara eksponensial. Faktor suhu memberikan kontribusi terjadinya kerusakan retak akibat proses pengerasan (*ageing*) aspal.

Upaya untuk meningkatkan kinerja kekuatan dan keawetan campuran telah banyak dilakukan [8]-[11]. Berbagai upaya yang dilakukan telah menghasilkan perbaikan sifat campuran beraspal, namun ternyata juga masih disertai adanya pengaruh negatif. Sebagai contoh, penggunaan filler dapat meningkatkan kekuatan dan keawetan campuran secara signifikan, namun kinerjanya pada suhu rendah ternyata berdampak resiko pengerasan dan retak [11], [12]. Penggunaan teknologi nano dengan teori mekanika kuantum kemudian direkomendasikan untuk memecahkan problem kerusakan campuran beraspal secara maju [13]-[15].

Permasalahan yang diteliti dirumuskan sebagai berikut: (i) perlu dilakukan tinjauan pustaka untuk mengetahui hasil-hasil riset tentang keawetan campuran beraspal dan implementasi teknologi nano limbah kelapa sawit (ii) perlu diketahui kesenjangan dan gagasan riset (iii) perlu disusun peta jalan riset tentang implementasi teknologi nano dalam material jalan.

Tujuan khusus penelitian adalah untuk Menyusun gagasan riset yang menghasilkan produk campuran beraspal yang memiliki sifat keawetan tinggi, tahan terhadap kerusakan akibat kombinasi beban lebih, air, dan suhu, mampu mendemonstrasikan kinerja durabilitas pada kondisi lingkungan yang ekstrim, dan diperuntukkan kategori jalan lalu lintas berat (*heavy duty traffic*). Hasil penelitian terutama akan membantu para kontraktor bidang jalan untuk melaksanakan pekerjaan berbasis *performance based* tanpa ada kekhawatiran karena bahan campuran beraspal ini diorientasikan memiliki *long-term performance* yang sangat baik.

Studi kelayakan berdasarkan pengamatan awal, produk campuran beraspal yang memiliki keawetan tinggi sangat dibutuhkan di lapangan untuk semua jenis kelas jalan, baik untuk perkerasan jalan baru ataupun untuk kebutuhan pemeliharaan jalan. Produk ini didesain menggunakan bahan nano limbah kelapa sawit sehingga sangat prospektif pada aspek *sustainability and production cost* [16], [17].

2. Literature Review

2.1. Keawetan bahan perkerasan jalan

Pada sistem perkerasan lentur, lapis perkerasan dibangun menggunakan campuran beraspal, yaitu campuran antara agregat (batuan) dan aspal. Agregat sebagai bahan utama dan aspal sebagai bahan pengikat. Campuran beraspal dapat dibuat dengan sistem pencampuran panas (*hot mix asphalt*, HMA) ataupun dengan sistem pencampuran dingin (*cold mix asphalt*, CMA) [18].

Keawetan adalah sifat ketahanan bahan perkerasan jalan dari kerusakan akibat faktor iklim (air dan suhu). Potensi keawetan yang diakibatkan oleh faktor lingkungan dan pemadatan dapat diukur melalui suatu indeks durabilitas. Tingkat durabilitas suatu campuran dapat menggunakan parameter Indeks Kekuatan Sisa (IKS), Indeks Durabilitas Pertama (IDP) dan Indeks Durabilitas Kedua (IDK). Alkawaaz and Qasim [19] telah menggunakan indeks tersebut untuk membandingkan keawetan antar jenis campuran beraspal.

Beberapa metode uji keawetan campuran beraspal dikembangkan dalam rangka mendapatkan hasil yang sesuai ketahanan di lapangan. Metode *durability index* (DI) dikembangkan dengan perendaman air suhu 60°C hingga 14 hari [20]. Evaluasi adhesi antara *crumb rubber* dan aspal digunakan untuk uji keawetan campuran aspal *crumb rubber* [21].

2.2. Teknologi nano dalam pengembangan bahan perkerasan jalan

Teknologi nano memiliki potensi besar untuk menguak tabir problem pengembangan teknologi bahan perkerasan aspal. Analisis bahan hingga skala nano (1-100 nanometer) memungkinkan untuk membedah fenomena keawetan ikatan antara agregat dan aspal. Efek kuantum dan peningkatan rasio luas permukaan terhadap volume partikel nano menyebabkan sifat fisika dan kimia berbeda dengan bahan konvensional [22], [23].

Tiga jenis partikel nano yaitu *nanoclay*, *carbon nano tubes* (CNT), dan *nanosilica* diprediksi memiliki pengaruh signifikan terhadap kiner campuran beraspal. *Nanoclay* adalah partikel lempung yang dapat membentuk komposit dengan monomers atau polymers. Interaksi antara *nanoclay* dan aspal dapat memperbaiki sifat *stiffness* dan viskositas aspal [24]. CNT adalah lembaran grafit setebal satu atom yang digulung menjadi silinder berongga dengan diameter satu nanometer. CNT ditemukan dapat mereduksi tebal film aspal, meningkatkan ketahanan retak dan *rutting*, serta meningkatkan keawetan campuran beraspal [25]-[27]. *Nanosilica* yang ditambahkan kedalam aspal dapat mereduksi nilai viskositas aspal, meningkatkan *anti stripping* dan ketahanan *rutting*, serta tahan suhu rendah [28].

3. Metode

Metode yang digunakan adalah melalui lima pendekatan, yakni: (i) Tinjauan hasil riset tentang keawetan bahan perkerasan jalan, (ii) Tinjauan hasil riset tentang implementasi teknologi nano dalam bahan perkerasan jalan, (iii) Kesenjangan riset, (iv) Gagasan riset, dan, (v) Usulan peta jalan riset.

Kegiatan tinjauan hasil riset dilakukan terhadap hasil-hasil riset terkait yang mutakhir, terutama dari sumber jurnal internasional yang memiliki reputasi. Kesenjangan riset digali berdasarkan berbagai sumber referensi terkait dan dikaji untuk menjadi gagasan riset dan bahan usulan peta jalan riset.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Hasil riset tentang keawetan bahan perkerasan jalan

Perkerasan jalan didesain secara multi layer agar beban dapat didistribusikan secara gradual mulai dari lapis teratas hingga lapis terbawah. Lapis teratas akan menerima tegangan beban terbesar dan lapis terbawah akan menerima tegangan terkecil [19]. Struktur perkerasan lentur terdiri dari lapis permukaan (*wearing* dan *binder course*) dan lapis pondasi (*base* dan *subbase course*) yang berada diatas lapis tanah dasar (*subgrade*). Ketiga lapis ini terutama lapis *wearing course* (lapis aus) yang sangat rentan terhadap pengaruh air dan suhu.

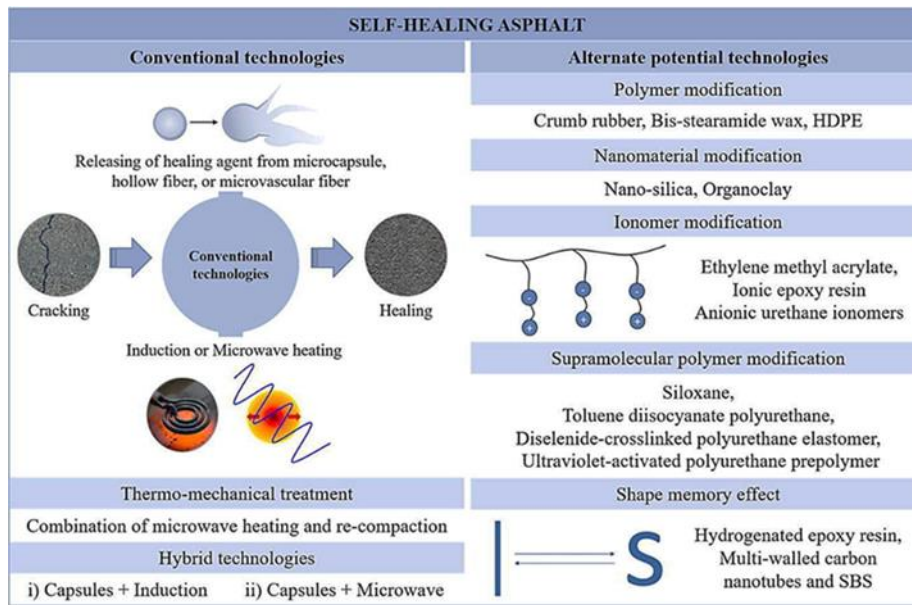
Lapis perkerasan dibangun menggunakan campuran beraspal, yaitu campuran antara agregat (batuan) dan aspal. Agregat sebagai bahan utama dan aspal sebagai bahan pengikat. Keawetan adalah kemampuan campuran beraspal untuk terus menerus melawan pengaruh air dan suhu [6], [8], [10], [29]. Terdapat dua mekanisme dimana air dapat merusak integritas struktural antar muka agregat aspal, (i) air dapat menyebabkan hilangnya kohesi (kekuatan) dan kekakuan aspal, dan (ii) air menyerang ikatan perekat antara aspal dan agregat dalam campuran (*stripping*). Kedua mekanisme kerusakan air ini menghasilkan penurunan kekuatan lapisan perkerasan [2], [3], [29]. Pelepasan aspal dari agregat (atau pengupasan) lebih mungkin terjadi pada campuran yang mudah ditembus oleh air. Konten rongga udara dalam campuran beraspal yang semakin rendah akan mengurangi resiko pengupasan [12], [29].

Dalam TRB 2014 [30] keawetan campuran beraspal dapat diperbaiki melalui beberapa cara dalam prosedur *mix design*, yaitu (i) meningkatkan kadar aspal efektif, (ii) menggunakan lebih banyak agregat fraksi halus, (iii) menggunakan aspal *polymer*, dan (iv) menggunakan aspal pen tinggi dan atau *warm mix* untuk campuran daur ulang. Bennert [31], Bennert dkk [32], dan Mohammad [33] memberi saran untuk meningkatkan keawetan campuran beraspal dengan menggunakan metode *Balanced Mixture Design*, yaitu mempertimbangkan *rutting* dan *cracking resistance* dalam menentukan propertis aspal dan volumetrik. Sunarjono dkk [34], [35] dan Al-Sabaei [36] meneliti penggunaan *filler Portland cement* dan lateks pada campuran beraspal.

4.2. Hasil riset tentang implementasi teknologi nano pada bahan perkerasan jalan

Nanoparticles didefinisikan sebagai partikel ultrafine berukuran diameter antara 1 dan 100 nm. Kegunaan dan aplikasi nanopartikel dalam konstruksi telah diteliti dan didiskusikan [37]. Nanopartikel menjanjikan benefit besar karena meningkatkan sifat fisik dan kimia yang luar biasa. Jenis nanopartikel yang sering digunakan adalah titanium dioksida, nanotube karbon, silika, tembaga, tanah liat, dan *aluminium oksida* [38]. *Nanomaterials* dan nanoteknologi memainkan peran kunci untuk inovasi teknologi termasuk untuk bahan campuran aspal [39]. Problem keberlanjutan dan isu lingkungan pada konstruksi tradisional menjadi perhatian utama [40]. Integrasi bahan nano dalam matriks beton aspal sangat meningkatkan sifat mekanik, durabilitas, dan keberlanjutan konstruksi. Tantangan saat ini dan masa mendatang adalah diperlukannya suatu teknologi yang mampu memproduksi campuran aspal yang dapat mempertahankan kekuatan, durabilitas, dan keberlanjutan dari energi internal yang dimiliki. Untuk menjawab tuntutan ini, bahan *filler* dalam skala nano telah muncul sebagai hotspot yang menarik karena diketahui dapat memberikan pengaruh sangat signifikan terhadap tiga kinerja sekaligus, yaitu kekuatan, durabilitas, dan keberlanjutan [41]-[46]. Para peneliti menawarkan konsep *self healing* (**Gambar 1**) dalam menjawab tuntutan untuk mengatasi problem beban berat disertai

fluktuasi iklim yang ekstrim [42], [47], [48]. Rekayasa teknologi bahan nano diyakini memiliki peluang besar dalam mengambil peran menjawab problem akut kerusakan jalan.



Gambar 1.
Konsep *Self Healing*
Campuran
Aspal [49]

4.3. Kesenjangan riset

Berdasarkan studi literatur diatas maka dapat diketahui bahwa teknologi nano memiliki peluang besar untuk menjawab problem kerusakan campuran aspal, namun belum ditemukan suatu jenis *filler* dan teknologi yang tepat sesuai konsep yang direkomendasikan.

Kebutuhan utama campuran beraspal adalah untuk meningkatkan kinerja *stiffness*, ketahanan *rutting*, ketahanan retak, dan keawetan. Kinerja tersebut dipengaruhi oleh sifat aspal dan agregat, serta bonding (adhesi) antara aspal dan agregat. Berbagai hasil riset telah diketahui bahwa *filler* dalam skala konvensional maupun nano memiliki kemampuan memperbaiki kinerja campuran beraspal. Namun hal mendasar yang perlu diketahui adalah dengan cara bagaimanakah *filler* tersebut dapat meningkatkan kinerja campuran. Bila *gap* pengetahuan ini dapat dipecahkan maka akan sangat mudah untuk menentukan jenis nano *filler* yang efektif untuk meningkatkan kinerja campuran.

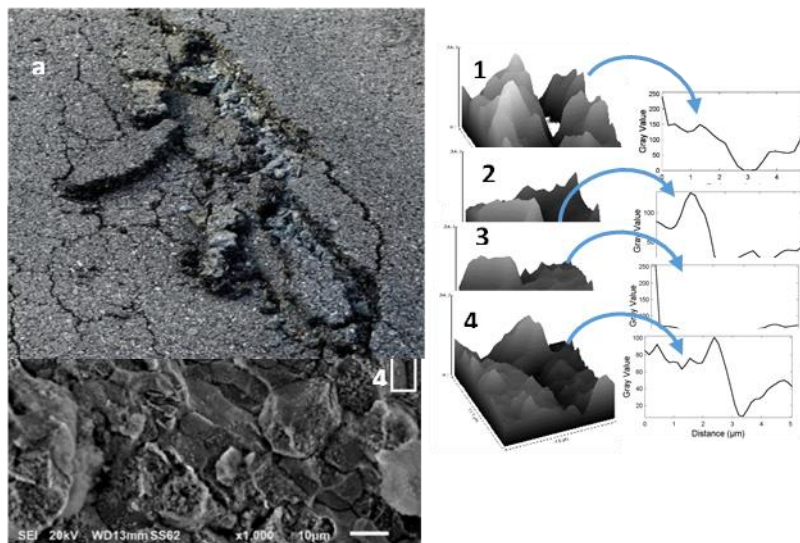
4.4. Gagasan riset

Ada tiga gagasan utama yang diajukan dalam implementasi teknologi nano limbah kelapa sawit untuk meningkatkan keawetan bahan perkerasan jalan. Gagasan pertama adalah bahan nano difungsikan sebagai agen *anti-ageing*. Pada fungsi ini bahan nano bertugas menghambat proses penuaan aspal. Gagasan kedua adalah bahan nano difungsikan untuk memproteksi infiltrasi air kedalam campuran beraspal. Pada fungsi ini bahan nano mampu menangkap air yang akan masuk dan mengubahkannya menjadi klaster air yang sulit menyusup kedalam tubuh campuran beraspal. Gagasan ketiga adalah bahan nano difungsikan untuk meningkatkan *bonding* antara aspal-agregat. Pada fungsi ini bahan nano mampu menyusup kedalam nano *void* dan nano *crack* yang ada/terjadi diantara agregat.

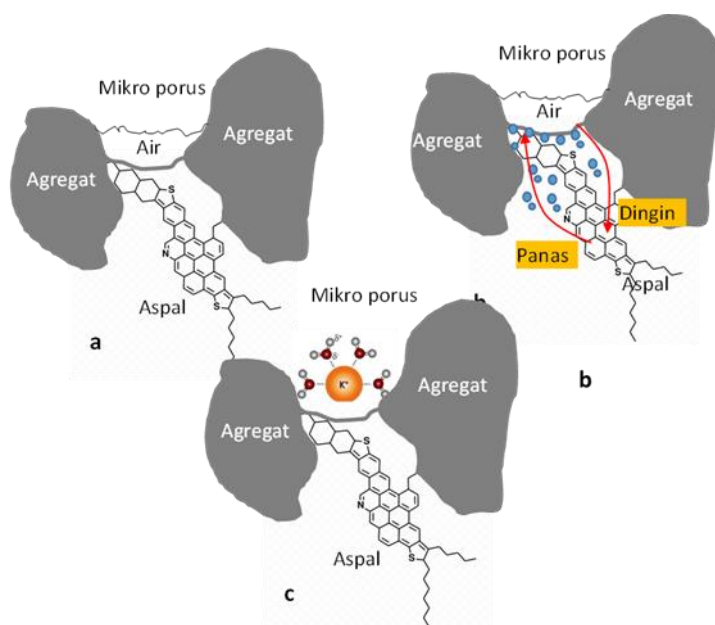
Kajian aspal yang mempunyai sifat *self-healing* menggunakan material nano *filler* berbasis sintesis limbah kelapa sawit yang diambil dari limbah ampas kelapa dan tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Limbah dipirolysis kemudian dilakukan proses menggunakan drum *rotary High Energy Milling* untuk menjadi material skala nano. Mengandalkan peran morfologi dan molekuler gugus fungsi yang terdapat pada permukaan akan memberikan dampak penyimpanan dan pelepas minyak yang terdapat pada aspal pada kondisi fluktuasi lingkungan, sehingga *filler* ini berfungsi sebagai *self-healing* terhadap kandungan minyak aspal.

Pada kondisi curah hujan memberikan dampak terhadap peningkatan sifat *hidrophobic* pada porus diantara *bonding filler* dikarenakan peningkatan jumlah minyak pada porus. Rekayasa teknologi nano menggunakan nano *filler* yang disintesis dari limbah kelapa sawit untuk dijadikan sebagai bahan *nanofiller self-healing* pada aspal pada kondisi terjadinya *nanocrack* pada daerah porus skala mikro yang ditunjukkan pada Gambar 2, model bonding *microcrack* antar agregat aspal ditunjukkan pada sub Gambar 1, Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4. Gambar 3a adalah ilustrasi kerusakan ikatan antara aspal dan agregat akibat tersimpannya air didalam *micro crack* yang terjadi. Nano *filler* dari ampas dan tandan kosong dari kelapa sawit bersifat porus dan mengandung unsur *ester* dan kalium (K) akan difungsikan dapat menyimpan dan mengeluarkan minyak yang dibutuhkan aspal (Gambar 3b).

Sedangkan kandungan kalium nano *filler* akan difungsikan untuk membentuk kluster air atas dasar kekuatan energi hidropilicnya sehingga mampu memproteksi campuran aspal dari infiltrasi air (Gambar 3c).



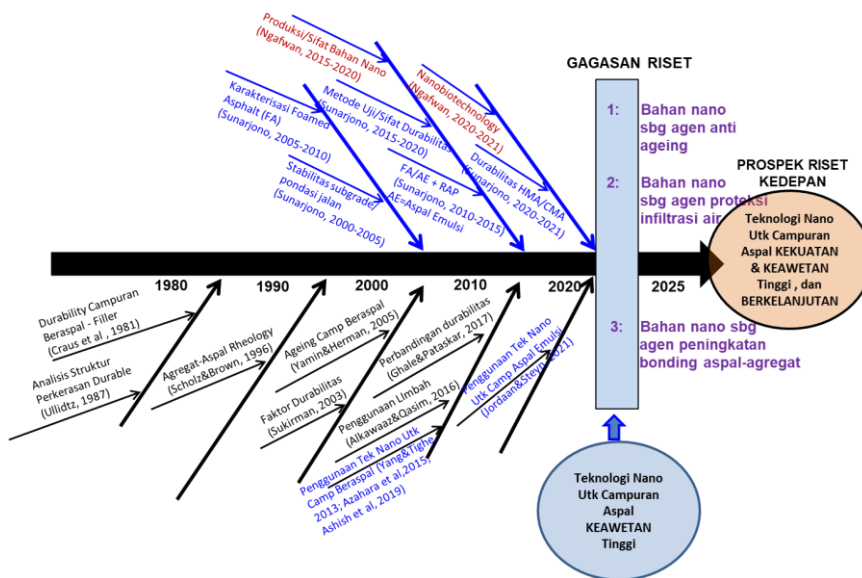
Gambar 2. Photo Makro Campuran Aspal dan SEM Ikatan Aspal dan Agregat



Gambar 3. Ilustrasi bonding antara dua agregat dengan aspal: (a) Sebelum diberi nano filler; (b) sesudah diberi nano filler; (c) kluster air dengan unsur kalium

4.5. Peta Jalan Riset

Roadmap penelitian yang dijelaskan pada **Gambar 4** menunjukkan hasil-hasil riset sebelum tahun 2022 (riset pengusul dan riset peneliti lain), gagasan riset, dan prospek riset yang akan datang.



Gambar 4. Roadmap Riset Implementasi Teknologi Nano untuk Bahan Perkerasan Jalan

5. Kesimpulan

Keawetan campuran beraspal diantaranya dipengaruhi oleh hadirnya air yang merusak integritas struktural ikatan antara aspal dan agregat melalui dua mekanisme yakni: (i) air dapat menyebabkan hilangnya kohesi (kekuatan) dan kekakuan aspal, dan (ii) air menyerang ikatan perekat antara aspal dan agregat dalam campuran (*stripping*). Bahan nano *filler* diketahui dapat memberikan pengaruh sangat signifikan terhadap tiga kinerja campuran beraspal sekaligus, yakni: kekuatan, keawetan, dan keberlanjutan. Namun hal mendasar yang perlu diketahui adalah dengan cara bagaimanakah filler tersebut dapat meningkatkan kinerja campuran.

Peta jalan riset implementasi teknologi nano untuk meningkatkan keawetan bahan perkerasan jalan telah disusun. Peta jalan mencakup hasil-hasil riset sebelum tahun 2022, gagasan riset, dan prospek riset yang akan datang. Substansi peta jalan riset mengusulkan tiga gagasan, yakni memaksimalkan fungsi bahan nano sebagai: (i) agen *anti ageing*, (ii) pemrotek infiltrasi air kedalam tubuh campuran aspal, dan (iii) agen *bonding* antara aspal dan agregat.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Prodi Teknik Sipil Fakultas Teknik dan Lembaga Riset dan Inovasi Universitas Muhammadiyah Surakarta yang telah memberi fasilitas dan layanan kegiatan riset sehingga penulisan paper ini dapat diselesaikan.

Referensi

- [1] Schwab, K. 2016. The Global Competitiveness Report 2016-2017. Insight Report, World Economic Forum.
- [2] Munggarani, N.A. dan Wibowo, A., 2017. Kajian faktor-faktor penyebab kerusakan dini perkerasan jalan lentur dan pengaruhnya terhadap biaya penanganan. Jurnal

- Infrastruktur Vol. 3 No. 01 Juni 2017.
- [3] Sumiati., Hasan, A. 2013. Kerusakan Dini Lapisan Perkerasan Aspal Beton AC-BC. *Jurnal Teknik Sipil* Vol. 9 No. 2, 111-117.
- [4] Hatmoko, J.U.D., Setiadji, B.H., and Wibowo, M.A. 2019. Investigating causal factors of road damage: a case study. *MATEC Web of Conferences* 258, 0 (2019). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925802007>.
- [5] Ojha, K.N. 2018. Overloading and Pavement Service Life—A Case Study on Narayanghat-Mugling Road, Nepal. *Journal of Transportation Technologies* > Vol.8 No.4, October 2018. <https://doi.org/10.4236/jtts.2018.84019>
- [6] Alkaissi, Z.A. 2020. Effect of high temperature and traffic loading on rutting performance of flexible pavement. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 32 (1), January 2020, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.04.005>.
- [7] F. Moreno-Navarro, M. Sol-Sanchez, Trave, G. and Gamez, M.C.R. 2017. “Fatigue cracking in asphalt mixtures: ‘the effects of ageing and temperature,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 19, no. 3, pp. 561–570, 2017.
- [8] Deb, P. and Singh, L. 2022. Mix design, durability and strength enhancement of cold mix asphalt: a state-of-the-art review. *Journal: Innovative Infrastructure Solutions*, Issue 1(2022).
- [9] Sunarjono, S. dan Hidayati, N. 2021. *Rekayasa Teknologi Keawetan Campuran Beraspal Bahan Perkerasan Jalan Untuk Mengatasi Kerusakan Dini Jalan Di Indonesia. Laporan Riset PTUPT Tahun 2021.*
- [10] Sirin, O., Dalim K. Paul, D.K. and Kassem, E. 2018. State of the Art Study on Aging of Asphalt Mixtures and Use of Antioxidant Additives. *Journal: Advances in Civil Engineering*, Volume 2018, Article ID 3428961. <https://doi.org/10.1155/2018/3428961>.
- [11] Remisova, E. 2015. Study of mineral filler effect on asphalt mixtures properties. *Bituminous Mixtures & Pavements VI – Nikolaides (Ed.)*, © 2015 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02866-1. DOI: 10.1201/b18538-9.
- [12] Chen, Y., Xu, S., Tebaldi, G., Romeo, E. 2022. State of the Art: Role of mineral filler in asphalt mixture. *Road Materials and Pavement Design*, vol. 23 (2), 2022: 247-286. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1826351>.
- [13] Yang, J. and Tighe, S. 2013. A review of advances of Nanotechnology in asphalt mixtures. 13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP 2013). *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 96 (2013) 1269 – 1276, doi: 10.1016/j.sbspro. 2013.08.144.
- [14] Azahara, W.N.A.W., Bujanga, M., Jaya, R. P., Hainin, M.R., Aziz, M.M.A., and Ngadi, N. 2015. Application of Nanotechnology in Asphalt Binder: A Conspectus and Overview. *Jurnal Teknologi*, vol. 76, no. 14 (2015) 85–89, eISSN 2180–3722, DOI: 10.11113/jt.v76.5847.
- [15] Jordaan, G.J. and Steyn, W.J. 2021. Nanotechnology Incorporation into Road Pavement Design Based on Scientific Principles of Materials Chemistry and Engineering Physics Using New-Age (Nano) Modified Emulsion (NME) Stabilisation/Enhancement of Granular Materials. *Journal of Applied Sciences*. 2021,11, 8525. <https://doi.org/10.3390/app11188525>.
- [16] Ashish, K., Vishal, P., Rohan, P., Pranav, S., Sohail, S., Shashikant, B. 2019. Application of Nanomaterial in Road Pavement for Sustainable Built Environment. *International Journal of Engineering Science and Computing*, vol. 9 (5): May 2019.
- [17] Victory, W. 2022. A review on the utilization of waste material in asphalt pavements. *Environmental Science and Pollution Research* (2022), <https://doi.org/10.1007/s11356->

- 021-18245-0.
- [18] Ghale, S.R. and Pataskar, S. V., 2017. Comparison of Cold Mix and Hot Mix Asphalt. *International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering*, ISSN (on line) 2456-1290, Special Issue: Advanced Transportation System and Infrastruktur Development in Developing India.
- [19] Alkawaaz, N. G. and Qasim, H. A., 2016. Experimentally Evaluation of Durability Characteristics for Reclaimed Local Asphalt Pavement Mixtures. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR) Vol-2, Issue-10, 2016*, ISSN: 2454-1362.
- [20] Ahmed, N. G., Al-Badran, Y. M., Azeez, D.M. 2017. Laboratory Evaluastion of Moisture Damage and Durability of Hot Mix Asphalt (HMA). *Journal of Engineering and Sustainable Development*, vol.21 no 02, March 2017. ISSN 2520-0917.
- [21] Wang, X., Fan, Z., Wang, H., and Huang, M. 2019. Durability Evaluation Study for Crumb Rubber-Asphalt Pavement. *Appl. Sci.* 2019, 9, 3434, doi:10.3390/app9163434.
- [22] Amiri, P. 2011. Nano Materials in Asphalt and Tar, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(12), 3270-3273.
- [23] Teizer, J., Venugopal M., Teizer W. and Felkl J. 2012. Nanotechnology and Its Impact on Construction: Bridging the Gap between Researchers and Industry Professionals, *Journal of Construction Engineering and Management*, 138.
- [24] Jahromi S., Ghaffarpour, K.A. 2009. Effects of Nanoclay on Rheological Properties of Bitumen Binder. *Construction and Building Materials*, 23, 2894–2904.
- [25] Motlagh A. A., Kiasat A., Mirzaei E. and Birgani F. O. 2012. Bitumen Modification Using Carbon Nanotubes, *World Applied Sciences Journal*, 18 (4), 594-599.
- [26] Amirkhanian, A.N., Xiao, F., & Amirkhanian, S.N. 2011. Evaluation of high temperature rheological characteristics of asphalt binders with carbon nano particles. *Journal of Testing and Evaluation*, 39(4), 1 – 9.
- [27] Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis L., Dalmazzo D. 2012. Rheological Characterization of Bituminous Binders Modified with Carbon Nanotubes, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 546 – 555.
- [28] Yao H., You Z., Li L., Lee C. H., Wingard D., Yap Y. K., Shi X., Goh S. W. 2012 Properties and Chemical Bonding of Asphalt and Asphalt Mixtures Modified with Nanosilica, *Journal of Materials in Civil Engineering*. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000690.
- [29] Jaskula, P. and Judycki, J. 2016. Durability of Asphalt Concrete Subjected to Deteriorating Effects of Water and Frost. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol 30 (1): 2016. DOI:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000645.
- [30] TRB, 2014. Enhancing the Durability of Asphalt Pavement. Transportation Research Board, Transportation Research Circular Number E-C186, September 2014, Washington, D.C.
- [31] Bennert, T., 2011. Implementation of Performance-Based HMA Specialty Mixtures in New Jersey. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol 80.
- [32] Bennert, T., Daniel, J.S., and Mogawer, W., 2014. Strategie for Incorporating Higher RAP Percentages: Review of Northeast States Implementation Trials. Presented at 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [33] Muhammad, L., 2014. Development of a Lousiana’s Balanced Asphalt Mixture Design. Presented at 53rd Lousiana Asphalt Pavement Association Convention, May 30-June 3.
- [34] Sunarjono, S. dan Cendikia, W. F. 2020. Pengaruh Order Pencampuran Terhadap Propertis Dan Durabilitas Campuran Ac-Wc Menggunakan Portland Cement. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2020*, ISSN: 2459-9727.

- [35] Sunarjono, S., Hidayati, N., Pratama, A.I., 2020. Ketahanan Campuran AC-WC Menggunakan Lateks Terhadap Air. *Jurnal Transportasi*, Vol 20, No 2 (2020).
- [36] Al-Sabaei, AM., Mustofa, BA., Sutanto, MH., Sunarjono, S., Bala, N. 2020. Aging and Rheological Properties of Latex and Crumb Rubber Modified Bitumen Using Dynamic Shear Rheometer. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, Vol 52, No 3 (2020), Institute Teknologi Bandung.
- [37] H. Saleem, S. J. Zaidi, and N. A. Alnuaimi, "Recent advancements in the nanomaterial application in concrete and its ecological impact," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 21, 2021, doi: 10.3390/ma14216387.
- [38] Z. V. Pisarenko, L. A. Ivanov, and Q. Wang, "Nanotechnology in construction: State of the art and future trends," *Nanotechnologies Constr.*, vol. 12, no. 4, pp. 223–231, 2020, doi: 10.15828/2075-8545-2020-12-4-223-231.
- [39] Engenharia, E.D. 2021. Iran Gomes da Rocha Segundo ECOLOGICAL PHOTOCATALYTIC.
- [40] A. A. Ali, "Nanotechnology in Civil Engineering Construction," *Int. J. Struct. Civ. Eng. Res.*, vol. 9, no. 1, pp. 87–90, 2020, doi: 10.18178/ijscer.9.1.87-90.
- [41] Q. Bianchi, Application of nano-silica in concrete. 2014.
- [42] A. M. Díez-Pascual, "Effect of graphene oxide on the properties of poly(3-Hydroxybutyrate-co-3-Hydroxyhexanoate)," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 14, 2021, doi: 10.3390/polym13142233.
- [43] M. Han, Y. Tan, A. Meng, X. Xiong, Y. Wang, and H. Lv, "Preparation of chemical-physical hybrid crosslinking double network gel composite incorporated SBS modified asphalt," *Int. J. Pavement Eng.*, pp. 1–15, 2022, doi: 10.1080/10298436.2021.2022674.
- [44] M. Daniyal, A. Azam, and S. Akhtar, "Application of Nanomaterials in Civil Engineering," no. October, pp. 169–189, 2018, doi: 10.1007/978-981-10-6214-8_6.
- [45] Z. Fu et al., "Rheological properties of asphalt binder modified by nano-TiO₂/ZnO and basalt fiber," *Constr. Build. Mater.*, vol. 320, no. January, p. 126323, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126323.
- [46] Q. Zhang, T. Huang, and H. Qi, "Aging Resistance Properties of Nano-silica / SBS Composite Modified Asphalt."
- [47] A. Tabaković and E. Schlangen, "Self-healing technology for asphalt pavements," *Adv. Polym. Sci.*, vol. 273, pp. 285–306, 2016, doi: 10.1007/12_2015_335.
- [48] S. Xu, X. Liu, A. Tabaković, and E. Schlangen, "A novel self-healing system: Towards a sustainable porous asphalt," *J. Clean. Prod.*, vol. 259, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120815.
- [49] Anupam, B.R. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822000897> via%3Dihub.pdf.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)
