

PENGARUH KONSENTRASI DAN RASIO BERAT GRAPHENE NANOSHEETS (GNSs) TERHADAP KARAKTERISTIK HOT ROLLED SHEET (HRS)

Ahmad Syaiful Bahri¹⁾, Amun Amri²⁾, Muhammad Shalahuddin³⁾

¹⁾Mahasiswa Teknik Kimia, ²⁾Dosen Teknik Kimia, ³⁾Dosen Teknik Sipil

Laboratorium Dasar Proses dan Operasi Pabrik

Program Studi Sarjana Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau

Kampus Bina Widya Jl. HR. Soebrantas KM. 12,5 Simpang Baru, Panam

Pekanbaru, 28293

ahmdsyaifulbahri@gmail.com

ABSTRACT

Hot rolled sheet (HRS) characteristics can be improved by adding additives in the asphalt. This study aims to analyze and determine the effects of concentration and weight ratio of graphene nanosheets (GNSs) additive on the characteristics of HRS. The research was carried out in several stages, starting from the preparation of graphite powder from 2B pencils, preparation of 60/70 penetration asphalt and aggregates, making GNSs solution using the turbulence assisted shear exfoliation (TASE) method and continued with the manufacture of HRS with variations in GNSs concentrations of 10 mg/ml, 20 mg/ml and GNSs weight ratios of 0%, 5%, 10%, 15%. The results showed that the concentration and weight ratio of GNSs could affect the stability value, flow and marshall quotient (MQ) of the HRS. The best results were obtained at a concentration of 20 mg/ml and a weight ratio of 15% GNSs, with a stability value of 1541.19 kg, flow of 4.13 mm and MQ of 391.74 kg/mm.

Keywords : Asphalt, Graphene nanosheets (GNSs), Hot rolled sheet (HRS)

A. PENDAHULUAN

Perkerasan jalan merupakan infrastruktur terpenting yang mendukung kelancaran lalu lintas, sehingga pengguna jalan dapat merasa nyaman dan aman selama berkendara. Perkerasan jalan yang umum digunakan ialah *hot rolled sheet* (HRS) yang dipercaya dapat menghasilkan kelenturan dan keawetan yang cukup baik. HRS menjadi tahan retak, akan tetapi terjadi kerusakan berupa deformasi plastis yang disebabkan karena semakin tingginya beban kendaraan yang dipikul oleh jalan (Amiruddin dkk, 2012). Selain akibat repetisi beban kendaraan, suhu permukaan jalan yang tinggi serta efek rembesan air antara aspal dan batuan juga menjadi penyebab rusaknya perkerasan jalan (Edison, 2010). Secara umum, 43,43%

jalan di Indonesia berada dalam kondisi baik, 21,12% dalam kondisi sedang, 14,98% dalam kondisi rusak ringan dan 20,47% lagi dalam kondisi rusak berat (Badan Pusat Statistik, 2020).

Untuk mempertahankan ataupun meningkatkan karakteristik perkerasan jalan dapat dilakukan dengan mencampurkan bahan aditif ke dalam aspal. Bahan aditif seperti polimer dan alotrop karbon telah ditambahkan ke dalam aspal untuk memperbaiki kinerja dari perkerasan jalan. Alotrop karbon merupakan material yang berpotensi untuk digunakan dalam bidang rekayasa dan konstruksi (Bondavalli, 2018). Bahan alotrop karbon yang mulai dikembangkan untuk bahan aditif aspal ialah *graphene*.

Graphene merupakan lembaran atom karbon dalam bentuk heksagonal dalam skala nanometer yang dapat diperoleh dari sumber yang mengandung grafit (Shamsaei dkk, 2018). Penggunaan utama *graphene* dalam bidang konstruksi adalah sebagai bahan penguat untuk meningkatkan sifat mekanik yang memungkinkan untuk memperbaiki kekuatan material konstruksi (Young dkk, 2012). Menurut Aravind dkk (2018), penambahan *graphene* ke dalam aspal dapat meningkatkan kekuatan (stabilitas) dari campuran beraspal sebesar 14,71%. Selain itu, *graphene* mudah terdispersi ke dalam aspal sehingga mempermudah proses pencampuran dan harga *graphene* juga sebanding dengan beberapa bahan aditif polimer yang umum digunakan seperti *styrene butadiene styrene* (SBS) (Le dkk, 2016). Oleh karena itu, *graphene* dapat dijadikan sebagai alternatif bahan aditif pada perkerasan jalan.

B. TINJAUAN PUSTAKA

B.1 Hot Rolled Sheet (HRS)

HRS atau yang dikenal dengan nama lapis tipis aspal beton (lataston) merupakan suatu lapisan beraspal pada konstruksi jalan raya yang terdiri dari agregat bergradasi senjang, bahan pengisi (*filler*) dan aspal dengan perbandingan tertentu, yang dicampur dan dipadatkan dalam keadaan panas (Sukirman, 1999). HRS merupakan perkembangan dari *hot rolled asphalt* (HRA) yang berasal dari Inggris dan telah disesuaikan dengan kondisi alam yang ada di Indonesia. Lataston terdiri dari dua macam campuran, yaitu Lataston Lapis Pondasi (HRS-Base) dan Lataston Lapis Aus (HRS-WC) yang ukuran maksimum masing-masing agregat adalah 19 mm (Susanto dkk, 2014)

Sifat yang terpenting dari campuran HRS adalah keawetan dan fleksibilitas, namun HRS juga harus memiliki stabilitas yang memadai saat menerima beban lalu lintas yang langsung bekerja pada lapisan ini sehingga campuran HRS tidak akan mudah mengalami kerusakan (Howardy dkk, 2008).

B.2 Bahan Campuran HRS

B.2.1 Agregat

Agregat merupakan sekumpulan partikel batuan dengan ukuran tertentu yang diperoleh langsung dari hasil alam ataupun berupa batu pecah yang sengaja dibuat untuk tujuan tertentu. Pada pembuatan campuran beraspal, agregat menyumbang sekitar 90-95% dari berat komposisi campuran beraspal atau sekitar 75-85% dari volume campuran beraspal. Hal ini menandakan bahwa agregat memiliki peranan penting terhadap faktor kekuatan utama campuran beraspal. Agregat terdiri dari agregat kasar yang tertahan saringan 8 *mesh* dan agregat halus yang melewati saringan 8 *mesh* (Lekhaz dkk, 2016).

B.2.2 Filler

Filler merupakan partikel halus yang melewati saringan No. 200 (0,075 mm) dan berperan sebagai pengisi rongga antara agregat kasar dan agregat halus, sehingga rongga udara semakin mengecil dan densitasnya meningkat (Subono, 2011). Bahan *filler* yang sering dipergunakan dalam pembuatan campuran beraspal ialah debu batu, kapur padam, semen *portland* dan bahan non plastis lainnya. Kandungan *filler* yang ada pada campuran beraspal tidak boleh kurang dari 1% dari total agregat yang digunakan, selain itu *filler* juga harus bersih, kering dan bebas dari gumpalan (Subaganata, 2012).

B.2.3 Aspal

Aspal dapat diartikan sebagai bahan pengikat (*cementitious*) berwarna hitam atau coklat tua dan bersifat *thermoplastis*. Aspal akan mudah mengeras atau mengental pada suhu rendah dan melunak atau mencair pada suhu tinggi (Bahri & Irawan, 2010). Aspal merupakan senyawa hidrokarbon yang mengandung sedikit sulfur, oksigen, nitrogen dan unsur kimia lainnya. Kandungan unsur kimia tersebut sebagian besar dipengaruhi oleh jenis aspal dan proses pembuatannya (Read & Whiteoak, 2003).

B.3 Aspal Modifikasi Alotrop Karbon

Aspal modifikasi merupakan aspal yang diperoleh dari proses pencampuran atau penambahan aditif ke dalam aspal. Beberapa tahun belakangan ini, para peneliti banyak menggunakan bahan alotrop karbon seperti *graphene* sebagai bahan tambah pada aspal.

Graphene merupakan susunan atom karbon monolayer dua dimensi yang membentuk struktur kristal heksagonal menyerupai sarang lebah. *Graphene* ditemukan pertama kali pada tahun 2004 oleh Andre Geim dan Konstantin Novoselov (Bondavalli, 2018).

Brcic (2016) melakukan penelitian mengenai pengaruh penambahan *graphene* pada aspal. Hasilnya menunjukkan bahwa meningkatnya kadar *graphene* pada aspal dapat meningkatkan kekuatan aspal. Selain itu, peningkatan pemulihan elastis aspal juga diamati sebagai konsekuensi dari penambahan *graphene* meskipun kenaikannya masih rendah dibandingkan dengan penambahan polimer. Studi ini juga menunjukkan bahwa proses fabrikasi mempengaruhi perilaku mekanik akhir dari aspal modifikasi *graphene*.

C. METODE PENELITIAN

C.1 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Aspal penetrasi 60/70 (Cosmic, Indonesia).
2. Batu pecah berasal dari Sungai Kampar yang diolah oleh PT. Alas Watu Emas menjadi material sirtu (*stone crusher*).
3. Pasir yang digunakan ialah pasir alam yang diperoleh dari Sungai Taratak Buluh, Kabupaten Kampar.
4. *Aquadest* (PT. Brataco, Indonesia)
5. Serpihan grafit berukuran 200 mesh yang berasal dari pensil 2B (Faber Castell, Indonesia).
6. Surfaktan (Sunlight) (Unilever, Indonesia).

C.2 Variabel Penelitian

Variabel penelitian ini meliputi variabel tetap dan variabel berubah. Variabel tetap pada penelitian ini adalah aspal jenis penetrasi 60/70, proses pencampuran aspal dengan GNSs dilakukan pada rentang suhu 156-159°C dengan lama pengadukan 10 menit (Hafeez dkk, 2019) dan kadar aspal yang akan digunakan pada pembuatan campuran HRS sebesar 6 wt%. Sedangkan untuk variabel berubah terdiri dari variasi konsentrasi GNSs sebesar 10 mg/ml dan 20 mg/ml serta variasi rasio berat GNSs sebesar 5 wt%, 10wt% dan 15 wt%.

C.3 Prosedur Penelitian

C.3.1 Persiapan Bahan Baku

Bahan baku utama yang digunakan ialah serbuk grafit, aspal penetrasi 60/70 dan agregat. Serbuk grafit dari pensil 2B dihaluskan dan disaring menggunakan saringan 200 mesh. Saringan 200 mesh ialah saringan yang memiliki 200 lubang pada bidang jaring seluas 1 inch. Agregat yang berupa batu pecah dan pasir halus dicuci terlebih dahulu agar kadar lumpur dan kotoran yang melekat pada agregat dapat berkurang. Setelah bersih, agregat dioven selama 24 jam dan kemudian agregat dianalisa saringan untuk menentukan gradasi yang akan digunakan pada pembuatan campuran *hot rolled sheet* (HRS). Aspal penetrasi 60/70 dipindahkan dari kemasan ke dalam kaleng yang telah dibersihkan. Berat aspal ditimbang sesuai dengan perbandingan yang telah ditentukan.

C.3.2 Pembuatan Larutan GNSs

GNSs dibuat menggunakan metode *turbulence assisted shear exfoliation* (TASE) yang dilaporkan Varrla dkk (2014). Untuk pembuatan larutan GNSs 20 mg/ml, grafit yang digunakan sebanyak 10 gram dan surfaktan 1,25 gram yang kemudian dilarutkan dalam 500 ml *aquadest*. Grafit harus terdispersi dengan baik di dalam *aquadest*, sehingga diperlukan adanya surfaktan yang berguna sebagai dispersan

supaya grafit tidak mudah mengendap. Campuran dimasukkan ke dalam blender yang dioperasikan pada kecepatan maksimal dengan lama pengoperasian yaitu 60 menit. Untuk menjaga kondisi proses, blender dioperasikan 1 menit *on* dan 1 menit *off*. GNSs akan terlepas dari kulit grafit karena adanya gaya geser antar lembaran GNSs akibat turbulensi di dalam blender. Setelah pengelupasan kulit grafit selesai, GNSs yang dihasilkan kemudian dipisahkan dari busa menggunakan spatula. Sedangkan untuk larutan GNSs 10 mg/ml dapat dibuat melalui pengenceran konsentrasi 20 mg/ml.

C.3.3 Pembuatan Campuran HRS

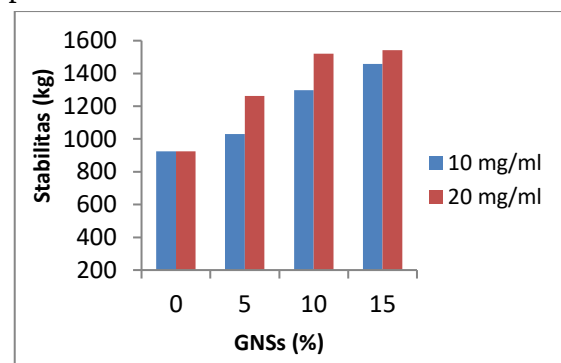
Pencampuran GNSs ke dalam aspal mengikuti prosedur yang dilaporkan Hafeez dkk (2019), dimana suhu pencampuran 158°C dengan lama pengadukan 10 menit. Namun, dikarenakan alat pencampuran aspal dengan GNSs yang digunakan pada penelitian ini masih konvensional maka suhu pencampuran dilakukan pada rentang suhu 156-159°C. Jika suhu pencampuran dilakukan pada suhu dibawah 156°C maka akan menyebabkan GNSs tidak terdispersi dengan sempurna di dalam aspal, sedangkan jika dilakukan pada suhu diatas 159°C maka akan mencapai titik nyala aspal yang dapat menimbulkan percikan api. Aspal yang sudah ditimbang sesuai dengan berat yang telah ditentukan selanjutnya dipanaskan menggunakan kompor. Pada saat suhu aspal mencapai rentang suhu yang sudah ditentukan, GNSs dituangkan ke dalam aspal sedikit demi sedikit sambil diaduk selama 10 menit. Aspal modifikasi GNSs yang dihasilkan kemudian dicampur dengan agregat yang telah dianalisa saringan, setelah itu campuran beraspal dimasukkan ke dalam cetakan (*mold*) dan dilakukan pemadatan sebanyak 2 × 75 tumbukan dengan menggunakan alat *marshall automatic compactor*. Campuran beraspal yang telah padat didinginkan sekitar 2 – 3 jam sampai diperkirakan tidak akan terjadi perubahan bentuk. Campuran beraspal dikeluarkan

dari *mold* menggunakan alat *extruder* dan diletakkan ditempat yang rata serta di diamkan selama 24 jam pada suhu ruangan untuk selanjutnya dilakukan uji marshall.

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

D.1 Pengaruh *Graphene Nanosheets* (GNSs) terhadap Sifat Stabilitas Campuran *Hot Rolled Sheet* (HRS)

Stabilitas merupakan kemampuan campuran beraspal dalam menahan beban lalu lintas tanpa terjadinya perubahan bentuk tetap seperti gelombang, alur dan *bleeding* (Purnamasari & Suryaman, 2010). Nilai stabilitas campuran HRS yang dihasilkan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Grafik Pengaruh GNSs terhadap Nilai Stabilitas

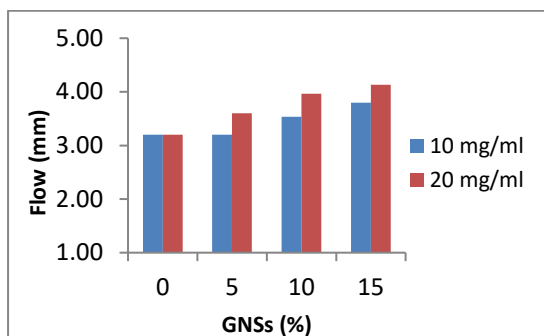
Gambar 1 menunjukkan bahwa penambahan GNSs ke dalam aspal dapat membuat nilai stabilitas menjadi lebih tinggi. Nilai stabilitas tertinggi dihasilkan pada konsentrasi 20 mg/ml dengan rasio berat GNSs 15% yaitu sebesar 1541,19 kg, sedangkan nilai stabilitas terendah pada konsentrasi 10 mg/ml dengan rasio berat GNSs 5% sebesar 1030,40 kg. Nilai stabilitas yang tidak dicampur dengan GNSs sebesar 923,95 kg. Berdasarkan spesifikasi umum Bina Marga, stabilitas standar untuk campuran HRS yaitu minimal 800 kg. Hal tersebut menunjukkan bahwa stabilitas yang dihasilkan sudah memenuhi standar.

Partikel *graphene* membantu fungsi aspal sebagai pengikat agregat yang dapat meningkatkan daya lekat antar agregat dan aspal, sehingga agregat tidak mudah mengalami pergeseran ketika diberi

tekanan (Hafeez dkk, 2019). Selain itu, partikel *graphene* yang terdispersi dengan baik dapat berada di aspal dalam bentuk yang stabil, yang membentuk struktur lapisan pada aspal. Lapisan *graphene* ini dapat secara efektif meningkatkan ketahanan retak pada campuran beraspal karena tekanan yang diberikan akan menyebar melalui partikel *graphene*. Hal tersebut akan membuat campuran beraspal lebih kuat dalam menahan beban yang diterimanya (Ranjbar dkk, 2015).

D.2 Pengaruh *Graphene Nanosheets* (GNSs) terhadap Sifat *Flow* Campuran *Hot Rolled Sheet* (HRS)

Nilai *flow* mengacu pada besarnya perubahan bentuk plastis pada campuran beraspal akibat beban yang mencapai batas keruntuhan dan dinyatakan dalam satuan panjang (Purnamasari & Suryaman, 2010). Nilai *flow* campuran HRS yang dihasilkan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



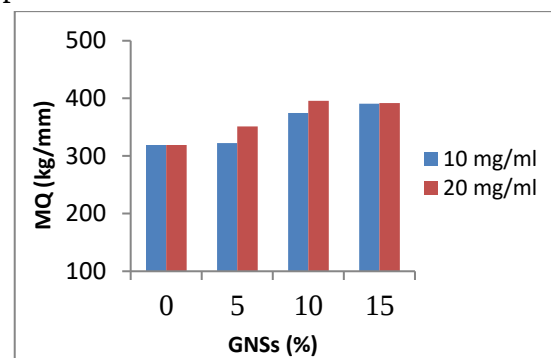
Gambar 2 Grafik Pengaruh GNSs terhadap Nilai *Flow*

Gambar 2 memperlihatkan kenaikan *flow* berbanding lurus dengan jumlah GNSs yang ditambahkan ke dalam aspal. Nilai *flow* tertinggi diperoleh pada konsentrasi 20 mg/ml dengan rasio berat GNSs 15% yaitu sebesar 4,13 mm, sedangkan nilai *flow* terendah pada konsentrasi 10 mg/ml dengan rasio berat GNSs 5% sebesar 3,20 mm. Nilai *flow* yang tidak dicampur dengan GNSs sebesar 3,20 mm. Berdasarkan spesifikasi umum Bina Marga, standar minimal *flow* untuk campuran HRS ialah 3 mm. Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai *flow* yang dihasilkan sudah memenuhi standar.

Menurut Shamsaei dkk (2018) *graphene* mampu memberikan bahan yang dicampurinya kekuatan setara baja dan juga mampu mempertahankan atau bahkan menambah sifat elastisitas dari bahan campurannya, sehingga ketika GNSs ditambahkan ke dalam aspal maka akan menghasilkan nilai stabilitas dan *flow* yang tinggi.

D.3 Pengaruh *Graphene Nanosheets* (GNSs) terhadap Sifat *Marshall Quotient* (MQ) Campuran *Hot Rolled Sheet* (HRS)

Marshall Quotient (MQ) merupakan rasio perbandingan antara nilai stabilitas dengan nilai *flow*. Nilai MQ ini digunakan untuk mengetahui sejauh mana tingkat kekakuan dan fleksibilitas dari campuran beraspal (Edison, 2010). Nilai MQ yang diperoleh pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Grafik Pengaruh GNSs terhadap Nilai *Marshall Quotient* (MQ)

Gambar 3 menunjukkan nilai MQ yang semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kadar GNSs pada campuran beraspal. Nilai MQ tertinggi mencapai 395,55 kg/mm pada konsentrasi 20 mg/ml dengan rasio berat GNSs 10%, namun terjadi penurunan pada konsentrasi 20 mg/ml dengan rasio berat GNSs 15% sebesar 391,74 kg/mm. Penurunan nilai MQ ini disebabkan karena nilai *flow* yang dihasilkan tidak diimbangi dengan nilai stabilitas yang cukup. Secara keseluruhan, nilai MQ yang dihasilkan pada penelitian ini masih memenuhi standar minimum MQ untuk campuran HRS, yaitu 250 kg/mm sesuai spesifikasi Bina Marga. Campuran

beraspal yang menggunakan aspal dengan penambahan GNSs akan memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi permanen karena stabilitasnya yang tinggi serta MQ yang lebih tinggi dibandingkan dengan campuran beraspal yang menggunakan aspal konvensional.

E. KESIMPULAN DAN SARAN

E.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Penambahan *graphene nanosheets* (GNSs) ke dalam aspal dapat meningkatkan kualitas dari campuran *hot rolled sheet* (HRS), dimana hasil terbaik diperoleh pada konsentrasi 20 mg/ml dan rasio berat GNSs 15%.
 - a. Penambahan konsentrasi 20 mg/ml dan rasio berat GNSs 15% dapat meningkatkan nilai stabilitas marshall dari 923,95 kg menjadi 1541,19 kg dengan persentase peningkatan sebesar 66,80%.
 - b. Penambahan konsentrasi 20 mg/ml dan rasio berat GNSs 15% dapat meningkatkan nilai *flow* dari 3,20 mm menjadi 4,13 mm dengan persentase peningkatan sebesar 29,16%.
 - c. Penambahan konsentrasi 20 mg/ml dan rasio berat GNSs 15% dapat meningkatkan nilai *marshall quotient* (MQ) dari 318,88 kg/mm menjadi 391,74 kg/mm dengan persentase peningkatan sebesar 22,84%.
2. *Graphene nanosheets* (GNSs) dapat diaplikasikan sebagai bahan aditif pada *hot rolled sheet* (HRS) yang menyebabkan HRS memiliki sifat stabilitas dan fleksibilitas yang baik sehingga dapat memperpanjang masa pakai dari campuran HRS.

E.2 Saran

Untuk penyempurnaan dan pengembangan penelitian selanjutnya, maka peneliti menyarankan beberapa hal:

1. Penambahan GNSs ke dalam aspal sebaiknya tidak melebihi 15% dikarenakan akan menghasilkan nilai MQ yang rendah.
2. Perlu dilakukan pengujian durabilitas dari campuran HRS yang berguna untuk mengetahui kinerja campuran HRS ketika terendam air dalam jangka waktu yang lama.

DAFTAR PUSTAKA

- Amiruddin, A. A., Sasmita, S. A. A., Ali, N., & Renta, I., 2012, Kajian Eksperimental Campuran HRS-WC dengan Aspal Minyak dan Penambahan Aditif Lateks sebagai Bahan Pengikat, *Konferensi Nasional Teknik Sipil 6 (KoNTekS 6)*, 133–140.
- Aravind, S., Isac, A. J., & Aparajith, S., 2018, Construction of Porous Asphalt Pavement Using Graphene, *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research (IJRTER)*, 4(4), 482–486.
- Badan Pusat Statistik, 2020, *Statistik Transportasi Darat 2019*, Jakarta: BPS RI.
- Bahri, S., & Irawan, D. A. S., 2010, Pengaruh Limbah Serbuk Besi sebagai Pengganti Sejumlah Agregat Halus terhadap Campuran Aspal, *Jurnal Teknik Sipil Inersia*, 2(2), 25–32.
- Bina Marga, 2010, *Spesifikasi Umum Jalan dan Jembatan*, Jakarta: Direktorat Jendral Bina Marga.
- Bondavalli, P., 2018, Carbon and Its New Allotropes: Fullerene, Carbon Nanotubes, and Graphene, Dalam P. Bondavalli (Ed.), *Graphene and Related Nanomaterials*, 1–40, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-48101-4.00001-1>.
- Brcic, H., 2016, Investigation of the Rheological Properties of Asphalt Binder Containing Graphene Nanoplatelets, *Thesis*, Norwegian University of Science and Technology, Norway.

- Edison, B., 2010, Karakteristik Campuran Aspal Panas (Asphalt Concrete-Binder Course) Menggunakan Aspal Polimer, *Jurnal APTEK*, 2, 60–71, <https://doi.org/10.30606/aptk.v2i1.14>.
- Hafeez, M., Ahmad, N., Kamal, M. A., Rafi, J., Ul-haq, M. F., Jamal, J., & Nasir, M. A., 2019, Experimental Investigation into the Structural and Functional Performance of Graphene Nano-Platelet (GNP)-Doped Asphalt, *Applied Sciences*, 9(4), 1–19, <https://doi.org/10.3390/app9040686>.
- Howardy, H., Suparma, L. B., & Satyarno, I., 2008, Perancangan Laboratorium Campuran HRS-WC dengan Penggunaan Buton Granular Asphalt (BGA) sebagai Bahan Additive, *Forum Teknik Sipil*, XVIII, 921–933.
- Le, J., Marasteanu, M., & Turos, M., 2016, *Graphene Nanoplatelet (GNP) Reinforced Asphalt Mixtures: A Novel Multifunctional Pavement Material*, IDEA Program Final Report NCHRP 173.
- Lek haz, D., Reddy, S. S., Mohan, M. K., & Naidu, M. V., 2016, A Study on Bituminous Concrete Mix with Cement, GGBS, Brick Dust as a Filler, *International Journal of Engineering Science and Computing*, 6(10), 2771–2775.
- Purnamasari, P. E., & Suryaman, F., 2010, Pengaruh Penggunaan Limbah Botol Plastik Sebagai Bahan Tambah Terhadap Karakteristik Lapis Aspal Beton (LASTON), *Konferensi Nasional Teknik Sipil 4 (KoNTekS 4)*, 397–404.
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Mehrali, M., Alengaram, U. J., & Jumaat M. Z., 2015, Graphene Nanoplatelet-Fly Ash Based Geopolymer Composites, *Cement and Concrete Research*, 76, 222–231.
- Read, Dr. J., & Whiteoak, Mr. D., 2003, *The Shell Bitumen Handbook*, London: Thomas Telford.
- Shamsaei, E., de Souza, F. B., Yao, X., Benhelal, E., Akbari, A., & Duan, W., 2018, Graphene-Based Nanosheets for Stronger and More Durable Concrete: A Review, *Construction and Building Materials*, 183, 642–660.
- Subaganata, B., 2012, Pengaruh Penambahan Serbuk Ban Bekas Terhadap Kinerja Campuran Aspal Panas Jenis Hot Rolled Sheet (HRS), *Jurnal Penelitian Dosen Fakultas Teknik*, 2, 7–34.
- Subono, V. P., 2011, Karakteristik Marshall Campuran Asphalt Concrete (AC) dengan Bahan Pengisi (Filler) Abu Vulkanik Gunung Merapi, *Skripsi*, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Sukirman, S., 1999, *Perkerasan Lentur Jalan Raya*, Bandung: Nova.
- Susanto, H. A., Indriyanti, E. W., & Edison, B., 2014, Permeability Campuran Hot Rolled Sheet Wearing Course (HRS-WC) dengan Filler Abu Sekam Padi untuk Jalan Perkotaan, *Jurnal APTEK*, 6, 17–32.
- Varrla, E., Paton, K. R., Backes, C., Harvey, A., Smith, R. J., McCauley, J., & Coleman, J. N., 2014, Turbulence-Assisted Shear Exfoliation of Graphene Using Household Detergent and a Kitchen Blender, *Nanoscale*, 6(20), 1–22.
- Young, R. J., Kinloch, I. A., Gong, L., & Novoselov, K. S., 2012, The Mechanics of Graphene Nanocomposites: A Review, *Composites Science and Technology*, 72(12), 1459–1476.