UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Subtitusi Bio-Oil Limbah Cangkang Pala Kadar 15% pada Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) terhadap Rutting dan Moisture Damage
Mochamad Sifa Mahendra, Ir. Latif Budi Suparma, M.Sc., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN ii
HALAMAN PENGESAHAN iii
HALAMAN PERNYATAAN iv
HALAMAN PERSEMBAHAN v
KATA PENGANTAR vi
DAFTAR ISI vii
DAFTAR GAMBAR xi
DAFTAR TABEL xii
INTISARI xiii
ABSTRACT xiv
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan Penelitian 2
1.4 Batasan Masalah 2
1.5 Manfaat Penelitian 3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA 4
2.1 Cangkang Buah Pala 4
2.2 Bio Aspal 5
2.2.1 Klasifikasi bio aspal 6
2.2.2 Proses produksi bio aspal 7
2.2.3 Kelebihan dan kekurangan bio aspal 8
2.3 Substitusi Aspal dengan Bahan Alternatif 9
2.3.1 Jenis-jenis bahan substitusi aspal 9
2.3.2 *Bio-binder* sebagai bahan substitusi ramah lingkungan 10
2.4 Penyebab Kerusakan Perkerasan Aspal 10
2.4.1 Faktor beban lalu lintas 10
2.4.2 Faktor lingkungan dan iklim 11
2.4.3 Faktor material dan kualitas campuran 12
2.5 Kinerja campuran beton aspal dengan bio oil 13
2.5.1 Pengaruh bio oil terhadap sifat fisik aspal 13
2.5.2 Pengaruh bio oil terhadap karakteristik marshall 15
2.5.3 Pengaruh bio oil terhadap deformasi permanen 16

Pengaruh Subtitusi Bio-Oil Limbah Cangkang Pala Kadar 15% pada Campuran Asphalt Concrete-Wearing
Course (AC-WC) terhadap Rutting dan Moisture Damage
Mochamad Sifa Mahendra, Ir. Latif Budi Suparma, M.Sc., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

2.6 Keasliaan Penelitian 17
BAB 3 LANDASAN TEORI 19
3.1 Perkerasaan Lentur 19
3.2 Jenis Campuran Beraspal 19
3.2.1 Stone Matrix Asphalt (SMA) 19
3.2.2 Lapis Tipis Aspal Beton (*Hot Rolled Sheet*, HRS) 20
3.2.3 Lapis Aspal Beton (*Asphalt Concrete, AC*) 20
3.2.4 Karakteristik Campuran Aspal Perkerasan 20
3.3 Material Penyusun Campuran Aspal Beton 22
3.3.1 Aspal 22
3.3.2 Agregat 23
3.4 *Bio-oil* 25
3.5 Pengujian Campuran Aspal Beton 26
3.5.1 Pengujian Marshall 26
3.5.2 Penentuan kadar aspal optimum (KAO) 30
3.5.3 Rasio debu terhadap aspal 31
3.5.4 Pengujian ketahanan kekesatan (*skid resistance*) 31
3.5.5 Pengujian ketahanan alur (*rutting*) 32
3.5.6 Pengujian *indirect tensile strength* (ITS) 34
3.5.7 Pengujian stabilitas Marshall sisa 35
BAB 4 METODE PENELITIAN 36
4.1 Lokasi Penelitian 36
4.2 Prosedur Penelitian 36
4.2.1 Studi literatur 38
4.2.2 Persiapan material 38
4.2.3 Uji karakteristik bahan 38
4.2.4 Peracangan campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* 42
4.2.5 Penentuan kadar *nutmeg shell bio-oil* (NSBO) 43
4.2.6 Penetuan jumlah benda uji 44
4.2.7 Pembuatan benda uji 45
4.2.8 Pelaksanaan penelitian 46
4.3 Data Penelitian 48
4.3.1 Data primer 48
4.3.2 Data sekunder 48
4.4 Alat dan Bahan Penelitian 49

UNIVERSITAS GADJAH MADA
Pengaruh Subtitusi Bio-Oil Limbah Cangkang Pala Kadar 15% pada Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) terhadap Rutting dan Moisture Damage
Mochamad Sifa Mahendra, Ir. Latif Budi Suparma, M.Sc., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

4.4.1 Alat penelitian 49
4.4.2 Bahan penelitian 53
4.5 Metode Analisis 54
4.5.1 Analisis parameter Marshall 54
4.5.2 Analisis kadar aspal optimum 55
4.5.3 Analisis rasio debu terhadap aspal 55
4.5.4 Analisis ketahanan *rutting* 55
4.5.5 Analisis *skid resistance* 56
4.5.6 Analisis stabilitas Marshall sisa 56
4.5.7 Analisis kuat tarik tidak langsung (ITS) 56
BAB 5 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 58
5.1 Hasil Pengujian Bahan Penyusun Campuran 58
5.1.1 Hasil pengujian karakteristik aspal penetrasi 60/70 58
5.1.2 *Nutmeg shell bio-oil* (NSBO) kadar 15% 58
5.1.3 Perbandingan karakteristik NSBO 0% dan NSBO 15% 58
5.1.4 Hasil pengujian agregat alam 59
5.2 Hasil dan Analisis Pengujian Marshall untuk Penetuan KAO 60
5.2.1 Hasil pengujian Marshall untuk penentuan KAO 60
5.2.2 Analisis data pengujian Marshall untuk penentuan KAO 61
5.2.3 Kadar Aspal Optimum (KAO) campuran 68
5.2.4 Hasil pengujian rasio debu terhadap aspal 70
5.3 Hasil dan Analisis Pengujian *Skid Resistance* 71
5.3.1 Hasil pengujian *skid resistance* 71
5.3.2 Analisis data pengujian *skid resistance* 71
5.4 Hasil dan Analisis Pengujian Ketahanan Deformasi Permanen (*Wheel Tracking*) ... 72
5.4.1 Hasil pengujian ketahanan deformasi permanen (*wheel tracking)* 73
5.4.2 Analisis data pengujian ketahanan defotmasi (*wheel tracking*) 74
5.5 Hasil dan Analisis Pengujian Ketahanan *Moisture Damage* 75
5.5.1 Analisis volumetrik sampel *coiring* 75
5.5.2 Hasil pengujian stabilitas Marshall sisa 76
5.5.3 Hasil pengujian kuat tarik tidak langsung (ITS) 78
5.5.4 Hubungan TSR dan RMS 80
5.6 Perbandingan Hasil Pengujian NSBO 0% dan NSBO 15% 81
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN 83
6.1 Kesimpulan 83

Pengaruh Subtitusi Bio-Oil Limbah Cangkang Pala Kadar 15% pada Campuran Asphalt Concrete-Wearing
Course (AC-WC) terhadap Rutting dan Moisture Damage
Mochamad Sifa Mahendra, Ir. Latif Budi Suparma, M.Sc., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

6.2 Saran 84
DAFTAR PUSTAKA 85
LAMPIRAN 88
Lampiran 1 Karakteristik bahan 88
Lampiran 2 Perancangan gradasi 91
Lampiran 3 Uji GMM 92
Lampiran 4 Karakteristik Marshall 93
Lampiran 5 Rasio partikel lolos ayakan 94
Lampiran 6 Massa slab 95
Lampiran 7 *Wheel Tracking* 96
Lampiran 8 Hasil ITS dan RMS 97

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Subtitusi Bio-Oil Limbah Cangkang Pala Kadar 15% pada Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) terhadap Rutting dan Moisture Damage
Mochamad Sifa Mahendra, Ir. Latif Budi Suparma, M.Sc., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Morfologi tanaman pala (Ashokkumar, 2022). 4
Gambar 2.2 Hubungan antara *bio-oil*, *bio-binder*, dan *bio* aspal (Zhang, 2022). 5
Gambar 2.3 Proses pirolisis *biomass* (Zhang, 2022). 7
Gambar 2.4 Nilai penetrasi minyak goreng bekas (Azahar, 2016). 14
Gambar 2.5 Nilai titik lembek minyak goreng bekas (Azahar, 2016). 14
Gambar 2.6 Stabilitas Marshall minyak goreng bekas (Azahar, 2017). 15
Gambar 2.7 Kelelehan minyak goreng bekas (Azahar, 2017). 16
Gambar 2.8 Kedalaman deformasi *bio-oil* kayu (Yang, 2014). 17
Gambar 3.1 Struktur perkerasan lentur (Bina Marga, 2024). 19
Gambar 3.2 Grafik hubungan antara nilai deformasi dan waktu (Ismoyo, 2014). 34
Gambar 4.1 Bagan alir pelaksanaan. 36
Gambar 5.1 Perbandingan kadar aspal dan variasi NSBO terhadap *density*. 62
Gambar 5.2 Perbandingan kadar aspal dan variasi NSBO terhadap VMA. 63
Gambar 5.3 Perbandingan kadar aspal dan variasi NSBO terhadap VITM. 64
Gambar 5.4 Perbandingan kadar aspal dan variasi NSBO terhadap VFWA. 65
Gambar 5.5 Perbandingan kadar aspal dan variasi NSBO terhadap stabilitas. 66
Gambar 5.6 Perbandingan kadar aspal dan variasi NSBO terhadap flow. 68
Gambar 5.7 Perbandingan KAO NSBO 0% dan 15%. 70
Gambar 5.8 Pengujian rasio debu terhadap aspal. 70
Gambar 5.9 Hasil pengujian *skid resistance* NSBO 0% dan 15%. 72
Gambar 5.10 Hasil pengujian ketahanan deformasi permanen NSBO 0% dan 15%. 73
Gambar 5.11 Nilai *flow* Marshall sisa NSBO 0% dan 15%. 76
Gambar 5.12 Nilai stabilitas Marshall sisa NSBO 0% dan 15%. 77
Gambar 5.13 Nilai RMS Marshall sisa NSBO 0% dan 15%. 77
Gambar 5.14 Nilai ITS NSBO 0% dan 15%. 79
Gambar 5.15 Nilai ITS NSBO 0% dan 15%. 79
Gambar 5.16 Hubungan TRS dan RMS NSBO 0% dan 15% 81

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Pengaruh Subtitusi Bio-Oil Limbah Cangkang Pala Kadar 15% pada Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) terhadap Rutting dan Moisture Damage
Mochamad Sifa Mahendra, Ir. Latif Budi Suparma, M.Sc., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Keaslian penelitian. 18
Tabel 3.1 Ketentuan sifat-sifat campuran laston (Bina Marga, 2025). 21
Tabel 3.2 Komposisi kimiawi penyususn aspal (Read dan Whiteoak, 2003). 22
Tabel 3.3 Sayrat aspal penetrasi 60/70 (Bina Marga, 2025). 23
Tabel 3.4 Syarat agregat kasar (Bina Marga, 2025). 24
Tabel 3.5 Syarat agregat halus (Bina Marga, 2025). 24
Tabel 3.6 Gradasi agregat gabungan (Bina Marga, 2025) 25
Tabel 3.7 Nilai koreksi BPN (SNI 4427:2008, 2008). 32
Tabel 3.8 Syarat minimum nilai *skid resistance* (Road Research Laboratory, 1969). 32
Tabel 4.1 Gradasi agregat AC-WC (Bina Marga, 2025). 42
Tabel 4.2 Gradasi agregat campuran AC-WC (Bina Marga, 2025). 43
Tabel 4.3 Rincian kebutuhan benda uji. 44
Tabel 4.4 Alat-alat penelitian dan fungsinya 49
Tabel 4.5 Bahan-bahan penelitian dan fungsinya. 54
Tabel 5.1 Hasil pengujian sifat fisik aspal penetrasi 60/70. 58
Tabel 5.2 Hasil pengujian sifat fisik aspal campuran NSBO 15%. 59
Tabel 5.3 Hasil pengujian karakteristik agregat kasar. 59
Tabel 5.4 Hasil pengujian karakteristik agregat halus. 60
Tabel 5.5 Hasil pengujian Marshall variasi kadar NSBO 0%. 60
Tabel 5.6 Hasil pengujian Marshall variasi kadar NSBO 15%. 61
Tabel 5.7 Hasil penentuan KAO NSBO 0%. 69
Tabel 5.8 Hasil penentuan KAO NSBO 15%. 69
Tabel 5.9 Pengujian rasio debu terhadap aspal. 70
Tabel 5.10 Hasil pengujian *skid resistance* NSBO 0% dan 15% 71
Tabel 5.11 Hasil pengujian ketahanan deformasi permanen NSBO 0% dan 15%. 73
Tabel 5.12 Karakteristik sampel coring uji ITS danMarshall 75
Tabel 5.13 Pengujian stabilitas Marshall sisa NSBO 0% dan 15%. 76
Tabel 5.14 Hasil pengujian kuat tarik tidak langsung NSBO 0% dan 15%. 79
Tabel 5.15 Perbandingan Hasil Pengujian NSBO 0% dan 15% 82