

TESIS

**ANALISIS PENUAAN JANGKA PANJANG SECARA
LABORATORIUM CAMPURAN ASPAL PORUS YANG
MENGANDUNG LIMBAH PLASTIK PET TERHADAP
NILAI KUAT TARIK TIDAK LANGSUNG**

**LONG TERM LABORATORY AGING ANALYSIS OF
POROUS ASPHALT CONTAINING PET PLASTIC WASTE
TOWARDS INDIRECT TENSILE STRENGTH**

JOHANNES GEORGE RUMAROPEN

D012 18 1 043



**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

TESIS

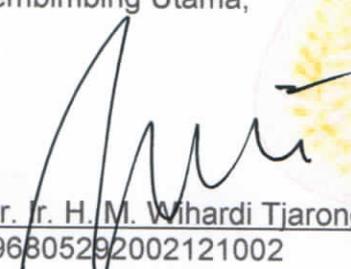
ANALISIS PENUAAN JANGKA PANJANG SECARA LABORATORIUM CAMPURAN ASPAL PORUS YANG MENGANDUNG LIMBAH PLASTIK PET TERHADAP NILAI KUAT TARIK TIDAK LANGSUNG

Disusun dan diajukan oleh

JOHANNES GEORGE RUMAROPEN
D012181043

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi
Program Magister Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada
tanggal 16 Agustus 2021
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Pembimbing Utama,


Prof. Dr. Ir. H. M. Whardi Tjaronge, ST., M.Eng
NIP. 196805292002121002

Pembimbing Pendamping,


Dr. Ir. Abd. Rachman Djamaluddin, MT
NIP. 195910101987031003

Ketua Program Studi S2
Teknik Sipil,


Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT
NIP. 197206192000122001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin,


Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T.
NIP. 196012311986091001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tanga dibawah ini

Nama : Johannes George Rumaropen
Nomor Mahasiswa : D012181043
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S2 (Magister)

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulis berjudul

ANALISIS PENUAAN JANGKA PANJANG SECARA LABORATORIUM CAMPURAN ASPAL PORUS YANG MENGANDUNG LIMBAH PLASTIK PET

Adalah karya tulis saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi tesis ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 16 Agustus 2021

Yang menyatakan



JOHANNES GEORGE RUMAROPEN

KATA PENGANTAR

Puji Tuhan kami panjatkan kehadiran Tuhan yang maha kuasa yang atas izinnya sehingga penelitian dan penulisan ini yakni ***“Analisis Penuaan Jangka Panjang Secara Laboratorium Campuran Aspal Porus yang Mengandung Limbah Plastik PET Terhadap Nilai Kuat Tarik Tidak Langsung”*** dapat terselesaikan. Dalam melaksanakan penelitian ini upaya dan perjuangan keras kami lakukan dalam menyelesaikannya.

Kami menyampaikan penghargaan yang sangat tinggi dan amat mendalam kepada bapak **Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng**, atas bimbingan, arahan dan petunjuknya sehingga penelitian dan penyusunan disertasi ini dapat kami laksanakan dengan baik. Ucapan dan penghargaan yang sama kami sampaikan kepada **Dr. Ir. Abd. Rachman Djamaluddin, MT**. Selaku sekretaris komisi penasehat yang banyak memberikan waktu, arahan dan bimbingannya kepada kami. Kepada bapak kami mengucapkan terima kasih dan penghormatan yang setinggi-tingginya atas bimbingan yang begitu tulus dan ikhlas.

Penghargaan yang setinggi tingginya kepada ; Rektor Universitas Hasanuddin (**Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, MA**), bapak **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc** (Dekan Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin), bapak **Dr. Ir. H. Muh. Arsyad Thaha, MT**. (Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin), Ketua Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin (bapak **Prof. Dr. M. Wihardi Tjaronge, ST.,**

M.Eng), bapak **Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT.** (Ketua Program Studi S2 Teknik Sipil Universitas Hasanuddin) dan bapak/ibu dosen Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah mengarahkan dan membimbing dalam proses perkuliahan. Bapak/ibu staf Pascasarjana Unhas dan staf Prodi S2 Teknik Sipil yang sangat membantu dalam proses administrasi, kami sampaikan banyak terima kasih.

Ucapan terima kasih yang setinggi tingginya atas segala keikhlasan, pikiran dan tenaganya yang tidak ternilai. Hanya dengan doa semoga Allah SWT. Tuhan Yang Maha Kuasa dapat membalasnya.

Makassar, Agustus 2021

Johannes George Rumaropen

ABSTRAK

JOHANNES GEORGE RUMAROPEN. Analisis Penuaan Jangka Panjang Secara Laboratorium Campuran Aspal Porus yang Mengandung Limbah Plastik PET Terhadap Nilai Kuat Tarik Tidak Langsung (dibimbing oleh **H. M. Wihardi Tjaronge dan Abd. Rachman Djamaluddin**).

Campuran aspal porus (*Porous Asphalt*) adalah salah satu jenis campuran aspal yang sedang dikembangkan untuk konstruksi *wearing course* sehingga dapat digunakan di Indonesia. Campuran aspal ini menggunakan gradasi terbuka (*open graded*) yang didominasi oleh agregat kasar. Di sisi lain, peningkatan kebutuhan aspal secara nasional di Indonesia tidak dapat dipenuhi oleh produksi aspal minyak dalam negeri, sehingga setengah dari jumlah tersebut masih harus diimpor. Salah satu alternatif untuk mengurangi impor aspal minyak adalah memanfaatkan sumber daya mineral alam yang terdapat di Pulau Buton yaitu Asbuton. Di Indonesia, menurut *Indonesia Solid Waste Association* (2013), jenis limbah plastik menduduki peringkat kedua sebesar 5,4 juta ton per tahun dan masuk dalam peringkat kedua di dunia sebagai penghasil limbah plastik kelaut setelah Tiongkok. Selain itu, kerusakan konstruksi jalan diakibatkan oleh menurunnya daya dukung jalan karena terjadinya proses penuaan campuran aspal yaitu disebabkan oleh proses pemanasan baik saat pencampuran di AMP, pengangkutan, pemadatan dan masa layanan konstruksi jalan tersebut. Dalam konteks keempat isu tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja campuran aspal porus yang menggunakan Asbuton modifikasi sebagai bahan pengikat dan limbah plastik jenis PET sebagai bahan tambah setelah perlakuan proses penuaan. Penelitian ini berbasis penelitian eksperimental di laboratorium, dimana jenis gradasi campuran aspal porus yang digunakan adalah gradasi REAM (2008). Kadar aspal optimum yang didapatkan adalah sebesar 6,0% berdasarkan pengujian cantabro, binder drain down dan porostas dengan penambahan kadar limbah plastik sebesar 0,0%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0% dan 2,5% dari berat total agregat. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa peningkatan kinerja campuran aspal porus baik dalam keadaan normal maupun keadaan LTOA (proses akselerasi penuaan) akibat penambahan limbah plastik hingga pada kadar 2,0% menunjukkan bahwa limbah plastik jenis PET dapat menyatu sebagai bahan polimer dan bitumen petroleum serta bitumen ekstraksi Asbuton sehingga dapat menambah kekuatan ikatan bahan-bahan pengikat. Namun, pada kandungan 2,5% kekuatan menurun diakibatkan polimer dari jenis PET memperlemah ikatan pengikat dari bitumen aspal minyak dan bitumen dari ekstraksi Asbuton.

Kata kunci : Aspal porus, Asbuton, Limbah plastik, Penuaan, Kinerja

ABSTRACT

JOHANNES GEORGE RUMAROPEN. Long Term Laboratory Aging Analysis of Porous Asphalt Containing PET Plastic Waste Towards Indirect Tensile Strength (supervised by **H. M. Wihardi Tjaronge and Abd. Rachman Djameluddin**).

Porous Asphalt mixture is a type of asphalt mixture that is being developed for wearing course construction so that it can be used in Indonesia. This asphalt mixture uses open graded, which is dominated by coarse aggregate. On the other hand, the increase in national demand for asphalt in Indonesia cannot be met by domestic oil asphalt production, so half of this amount still has to be imported. One alternative to reduce oil asphalt imports is to utilize the natural mineral resources found on Buton Island, namely Asbuton. In Indonesia, according to the Indonesia Solid Waste Association (2013), this type of plastic waste ranks second at 5.4 million tons per year and is ranked second in the world as a producer of marine plastic waste after China. In addition, road construction damage is caused by decreased road bearing capacity due to the aging process of the asphalt mixture, which is caused by heating processes both during mixing in AMP, transportation, compaction and the service life of the road construction. In the context of these four issues, this study aims to analyze the performance of a porous asphalt mixture using modified Asbuton as a binder and PET plastic waste as an added material after the aging process. This research is based on experimental research in the laboratory, where the type of gradation of the porous asphalt mixture used is the REAM (2008) gradation. The optimum asphalt content obtained was 6.0% based on cantabro, drain down binder and porostas testing with the addition of plastic waste content of 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% and 2.5% of the total aggregate weight. The results of this study indicate that the increased performance of the porous asphalt mixture in normal conditions and in the LTOA (accelerated aging process) due to the addition of plastic waste to a level of 2.0% indicates that PET plastic waste can be fused as polymer and petroleum bitumen and extraction bitumen. Asbutone so that it can increase the bond strength of the binder materials. However, at 2.5% the strength decreased due to the polymer from the PET type weakening the binding bond of the petroleum asphalt bitumen and bitumen from the Asbuton extraction.

Keywords : Porous asphalt, Asbuton, Plastic waste, Aging, Performance

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR NOTASI	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	7
C. Tujuan Penelitian	8
D. Batasan Masalah	8
E. Manfaat Penelitian	9
F. Sistematika Penulisan	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
A. Isu Penuaan Pada Campuran Beraspal	12
B. Aspal Porus (<i>Porous Asphalt</i>)	17
C. Bahan Tambah Dalam Campuran Beraspal	21
D. Konsep Campuran Aspal Buton Modifikasi dan Respon Perkerasan Akibat Pembebanan	26

E. Pengujian Campuran Aspal Porus Untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum.....	31
F. Uji Kuat Tarik Tidak Langsung Campuran Aspal Porus.....	34
G. Difraksi Sinar-X.....	41
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
A. Lokasi dan Waktu Penelitian	46
B. Rancangan Uji	49
C. Pengujian Karakteristik Campuran Aspal Porus.	54
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
A. Pengujian Karakteristik Material.....	62
B. Penentuan Gradasi Campuran.....	72
C. Rancangan dan Komposisi Campuran Aspal Porus Berdasarkan Kadar Aspal Perkiraan.	74
D. Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) Campuran Aspal Porus Berdasarkan Metode REAM 2008.....	75
E. Rancangan dan Komposisi Campuran Aspal Porus Dengan Penambahan Limbah Plastik Sebagai Bahan Tambah.	83
F. Kuat Tarik Tidak Langsung Campuran Aspal Porus Transformasi Limbah Plastik Akibat Akselerasi Penuaan Secara laboratorium.....	84

G. Karakteristik Senyawa Kimia Campuran Aspal Porus Transformasi Limbah Plastik Akibat Akselerasi Penuaan Secara Laboratorium Dengan Metode XRD.	101
H. Pengujian Secara Statistik Campuran Aspal Porus Transformasi Limbah Plastik Akibat Akselerasi Penuaan	106
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
A. Kesimpulan.....	108
B. Saran	109
DAFTAR PUSTAKA	110

DAFTAR TABEL

Nomor		Halaman
1.	Jenis-Jenis Plastik yang Termasuk Kategori Termoplastik	23
2.	Penelitian Terdahulu Kuat Tarik Tidak Langsung	35
3.	Metode Pengujian Karakteristik Agregat	51
4.	Metode Pengujian Karakteristik Asbuton Modifikasi	52
5.	Jumlah Benda Uji Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO).....	53
6.	Jumlah Benda Uji (Dalam Kondisi KAO)	53
7.	Gradasi Aspal Porus Malaysia	54
8.	Karakteristik Fisik Agregat Kasar	63
9.	Hasil Pemeriksaan Karakteristik Abu Batu	64
10.	Hasil Pemeriksaan Karakteristik Filler (Abu Batu)	64
11.	Hasil Pemeriksaan Karakteristik Asbuton Modifikasi	65
12.	Karakteristik Kimia Filler Abu Batu (Hasil Uji XRF)	67
13.	Karakteristik Kimia Asbuton Modifikasi (Hasil Uji XRF)	68
14.	Komposisi Material Dalam Berat Untuk 1200 Gram Benda Uji .	75
15.	Hasil Pengujian Karakteristik Campuran Aspal Porus Untuk Seluruh Parameter	76
16.	Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) Campuran Aspal Porus Menggunakan Asbuton Modifikasi.....	83
17.	Komposisi Material Dalam Berat Untuk 1200 Gram Benda Uji Dengan Penambahan Limbah Plastik (Pada KAO 6,0%)	84

18.	Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tarik Tidak Langsung (ITS) Kondisi LTOA.....	92
19.	Modulus Elastisitas 50% Keadaan LTOA	97
20.	Toughness Index Keadaan LTOA	99

DAFTAR GAMBAR

Nomor		Halaman
1.	Penuaan Bitumen Selama Pencampuran, Penyimpanan, Pengangkutan Dan Pemasangan Serta Akhir Masa Layanan ..	12
2.	Permukaan Tipis <i>Polyethylene</i>	24
3.	Kinerja Perkerasan Lentur	27
4.	Sistem Perkerasan Dua Lapis	29
5.	Distribusi Tegangan dan Tekanan.....	29
6.	Penjabaran Tegangan-Tegangan.....	30
7.	Mesin Abrasi <i>Los Angeles</i>	34
8.	Indirect Tensile Strength Campuran yang Dimodifikasi	36
9.	Diagram Pembebanan Uji ITS.....	38
10.	Hubungan Regangan Akibat Beban tarik dan Tegangan Tarik.	39
11.	Ilustrasi Asal Hukum Bragg	42
12.	Perbedaan Perjalanan Gelombang Ketika Merambat Dari A'O'B' Dengan Perjalanan Gelombang Jika Merambat AOB.....	43
13.	Hubungan Antara Garis Jarak, d dan θ	43
14.	Ilustrasi Perbedaan Keteraturan Susunan Atom Untuk Partikel Padatan Kristalin, Polikristalin Dan Amorf	44
15.	Diagram Alir Penelitian	48
16.	Alat Pengujian Abrasi	55
17.	Benda Uji STOA.....	57
18.	Benda Uji LTOA	58

19.	Pengujian <i>Indirect Tensile Strength</i>	59
20.	Difraktogram Polimer Kristalin	61
21.	Permukaan Tipis <i>Polyethylene</i>	66
22.	Hasil Uji XRF Limbah Plastik Jenis PET.....	69
23.	Hubungan Sudut Phase Dengan Intensitas Asbuton Modifikasi	70
24.	Hubungan Sudut Phase Dengan Intensitas Limbah Plastik.....	71
25.	Gradasi Agregat Gabungan Campuran Aspal Porus	73
26.	Hubungan Kandungan Asbuton Modifikasi Terhadap Nilai Cantabro	77
27.	Morfologi Benda Uji Setelah Pengujian Abrasi	77
28.	Hubungan Kandungan Asbuton Modifikasi Terhadap Nilai Binder Drain Down	79
29.	Sampel Pengujian Binder Drain Down	80
30.	Hubungan Kandungan Asbuton Modifikasi Terhadap Nilai Porositas	81
31.	Hubungan Tegangan dan Regangan Bebdada Uji Tanpa Penambahan Limbah Plastik Kondisi LTOA.....	85
32.	Hubungan Tegangan dan Regangan Bebdada Uji Tanpa Penambahan 0,5% Limbah Plastik Kondisi LTOA.....	86
33.	Hubungan Tegangan dan Regangan Bebdada Uji Tanpa Penambahan 1,0% Limbah Plastik Kondisi LTOA.....	87
34.	Hubungan Tegangan dan Regangan Bebdada Uji Tanpa Penambahan 1,5% Limbah Plastik Kondisi LTOA.....	89

35.	Hubungan Tegangan dan Regangan Beban Uji Tanpa Penambahan 2,0% Limbah Plastik Kondisi LTOA.....	90
36.	Hubungan Tegangan dan Regangan Beban Uji Tanpa Penambahan 2,5% Limbah Plastik Kondisi LTOA.....	91
37.	Hubungan Kadar Limbah Plastik Dengan Tegangan Tarik.....	93
38.	Hubungan Kadar Limbah Plastik Dengan Elastisitas 50%.....	98
39.	Hubungan Kadar Limbah Plastik Dengan Toughness Index.....	100
40.	Hubungan Sudut Phase Dengan Intensitas Keadaan LTOA	102
41.	Hasil Perhitungan Uji-T Nilai Tegangan Puncak Kondisi LTOA	107

DAFTAR NOTASI

°C	= Derajat celcius
%	= Persen
cm	= Centimeter
mm	= Milimeter
Pen	= Penetrasi
AC	= Asphalt Concrete
AC WC	= Asphalt Concrete Wearing Course
BGA	= Buton Granular Asphalt
XRF	= X-ray Flourence Spectrofotometer
MQ	= Marshall Quotient
VIM	= Void in Mix
VMA	= Void Mineral in Agregat
ASTM	= American Society for Testing Materials
AASHTO	= American Association of State Highway and Transportation Officials
SNI	= Standar Nasional Indonesia
SEM	= Scanning Electron Microscope
KAO	= Kadar Aspal Optimum
PA	= Kadar Aspal Efektif Perkiraan Terhadap Berat Agregat
AK	= Persentase Agregat Kasar Tertahan Saringan No. 8
AH	= Persentase Agregat Halus Lolos Saringan No. 8 Tertahan No. 200
F	= Persentase Agregat Lolos Saringan No. 200
AR	= Kadar Residu Dalam Campuran (%)
BA	= Berat Jenis Aspal
CS	= Berat Jenis Semu
DA	= Berat Dalam Air (gr)
E	= Berat di Udara (gr)
FS	= Berat SSD (gr)

G	= BJ Bulk–Berat Benda Uji (gr)
H	= Berat BendaUji (gr)
L	= Berat BendaUji Setelah Oven (gr)
KA	= Kadar Air (%)
S	= Stabilitas (kg)
F	= Nilai Flow (mm)
ITS	= Indirect Tensile Strength/Kuat Tarik Tidak Langsung
P	= Beban (N)
Pmax	= Beban Maksimum (N)
H	= Tinggi/Tebal BendaUji (mm)
D	= Diameter Benda Uji (mm)
KTB	= Kuat Tarik Belah (N/mm ²)
ITSscond	= Nilai ITS Terkondisikan Atau Basah
ITSdry	= Nilai ITS Kering
n	= Bilangan Bulat Positif
λ	= Panjang Gelombang Dari X-Ray Tergantung Bahan Yang Digunakan
d	= Jarak Antara Bidang Kisi
θ	= Besar Sudut Dari Arah Radiasi Sinar-X
Xc	= Derajat Kristalinitas

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Penurunan kinerja perkerasan jalan terjadi sebelum perkerasan berakhir masa layannya, sehingga membutuhkan pemeliharaan agar tidak menimbulkan kerusakan jalan yang lebih besar. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Hustim dkk. (2013) menunjukkan bahwa ada beberapa ruas jalan di Kota Makassar mengalami kerusakan sehingga membutuhkan pemeliharaan rutin dan berkala. Salah satu penyebab penurunan kinerja campuran beraspal pada perkerasan lentur adalah adanya penuaan pada aspal.

Penuaan aspal terjadi karena dipengaruhi oleh faktor lingkungan (cuaca dan temperatur). Aspal merupakan material yang termoplastis, yang memiliki kepekaan terhadap perubahan temperatur. Pada saat temperatur berkurang akan menjadi keras atau lebih kental, dan jika temperatur bertambah akan menjadi lunak atau cair. Penelitian yang dilakukan oleh Affandi F. (2010) menunjukkan penambahan bitumen asbuton bisa menjadikan aspal lebih keras, lebih tahan terhadap temperatur tinggi yang ditunjukkan dengan nilai titik lembeknya yang meningkat serta menjadi lebih kuat terhadap perubahan temperatur. Kepekaan terhadap temperatur pada setiap jenis aspal berbeda-beda sehingga waktu penuaan pada setiap jenis aspal berbeda-beda pula.

Hasil penelitian yang dilakukan Wanga *et al.*, (2016) ditemukan adanya perbedaan ketahanan terhadap penuaan dari tiga macam modifikasi aspal menunjukkan perilaku penuaan yang berbeda karena adanya perbedaan jenis aspal.

Untuk dapat dipergunakan atau diaplikasikan di lapangan, maka aspal harus melalui tahapan pemanasan. Salah satu jenis kerusakan campuran beraspal dapat diakibatkan oleh pemanasan, dimana akibat pemanasan tersebut akan menyebabkan penuaan aspal (*asphalt aging*).

Penyebab penuaan campuran beton aspal adalah menguapnya bagian cair dari aspal karena adanya pemanasan sehingga aspal menjadi getas dan kehilangan daya lekatnya. Pengurangan fleksibilitas dan pelekatan aspal ini menyebabkan jalan mudah rusak saat menerima beban lalu lintas berat (Widodo dkk., 2012).

Penuaan aspal yang paling besar terjadi justru pada saat sebelum masa pelayanan, yaitu pada saat proses pencampuran sampai dengan aplikasi di lapangan. Selanjutnya proses penuaan akan berlangsung selama masa layanan dari konstruksi jalan tersebut. Penuaan aspal disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu penguapan fraksi minyak ringan yang terkandung dalam aspal dan oksidasi (penuaan jangka pendek, *short-term ageing*) dan oksidasi yang progresif (penuaan jangka panjang, *long-term ageing*) (Yamin dan Aschuri, 2008).

Penuaan laboratorium merupakan salah satu metode yang dilakukan untuk mendapatkan hasil tes penuaan dalam waktu yang singkat

dibandingkan kondisi lapangan. Kliwer *et al* (1995) telah meneliti hubungan antara kinerja campuran beton aspal dilapangan dan sifat-sifat pelapukan campuran beton aspal yang dilakukan di laboratorium. Prosedur pelapukan campuran beton aspal di laboratorium untuk mewakili pelapukan jangka pendek atau saat pelaksanaan dilakukan dengan cara memanaskan campuran aspal dalam kondisi *loose* di dalam oven selama 4 jam pada temperatur 135°C sebelum dipadatkan.

Suatu lapis permukaan perkerasan jalan memiliki kemampuan sebagai lapis aus dan juga ketika tidak terjadi perubahan bentuk yang tetap dalam masa layan. Salah satu penyebab kerusakan atau tidak mencapainya umur layanan jalan tersebut adalah bertambahnya tingkat kepadatan lalu lintas. Menurut Tayfur *et al.*, 2005 dan Birgisson *et al.*, 2007 pengulangan beban lalu lintas sebagai akibat dari kepadatan lalu lintas menyebabkan terjadinya akumulasi deformasi permanen pada campuran beton aspal sehingga mengalami penurunan kinerja jalan dalam masa layan. Untuk mengatasi masalah tersebut, salah satu caranya adalah dengan memanfaatkan bahan tambah (*additive*) ke dalam campuran.

Plastik merupakan jenis polimer yang tidak dapat terurai sendiri, yang membutuhkan waktu ratusan bahkan ribuan tahun untuk terurai kembali ke bumi. Limbah plastik telah menjadi sesuatu hal yang menakutkan di setiap belahan bumi. Tidak saja di negara-negara berkembang tetapi juga di negara-negara maju seperti Amerika, Inggris, dan Jepang.

Di Indonesia, menurut *Indonesia Solid Waste Association* (2013), jenis limbah plastik menduduki peringkat kedua sebesar 5,4 juta ton per tahun dan masuk dalam peringkat kedua di dunia sebagai penghasil limbah plastik kelaut setelah Tiongkok. Kategori limbah plastik yang terbesar berasal dari kemasan seperti botol minuman dan kantong plastik. Limbah plastik ini termasuk jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*), di mana plastik yang tergolong jenis ini bersifat *thermoplast*, dapat dicetak berulang-ulang (mudah didaur ulang), dan memiliki densitas antara 0.910 - 0.940 gr/cm³. Selain itu, jenis plastik ini bersifat sangat fleksibel, mempunyaidaya proteksi yang baik terhadap uap air, namun kurang baik terhadap gas lainnya seperti oksigen (Billmeyer, 1984).

Selain itu, ilmuwan juga terus dipicu untuk bisa mencari alternatif lain bahan pengganti plastik konvensional ataupun penggunaan limbah plastik dalam dunia konstruksi khususnya konstruksi jalan. Berbagai penelitian baik di dalam maupun luar negeri yang meneliti pemanfaatan limbah plastik dalam campuran aspal telah dilakukan.

Sojobi *et al* (2016) mempelajari pengaruh daur ulang botol plastik (PET) pada beton aspal dan memperoleh bahwa karakteristik *Marshall* meningkat seiring penambahan PET. Rajput & Yadav (2016) melakukan penelitian limbah plastik pada campuran aspal dan diperoleh nilai stabilitas *Marshall* maksimum ketika 12% limbah plastik dimasukkan ke campuran. Fernandes *et al* (2015) menyusun inovasi bitumen dengan bahan limbah plastik dan oli motor yang menunjukkan bahwa limbah

plastik dapat memperbaiki sejumlah karakteristik penting campuran aspal. Angelone *et al* (2015) mengembangkan dengan menggunakan suatu pendekatan ramah lingkungan pada pengaruh limbah plastik campuran aspal yang menunjukkan bahwa penggunaan limbah plastik dapat memperbaiki karakteristik campuran. Mohammed *et al* (2014) melakukan studi penambahan sejumlah jenis polimer pada beton aspal dan dihasilkan bahwa penambahan polimer dalam keadaan optimum meningkatkan viskositas kinematik, stabilitas, *indirect tensile strength*, dan menurunkan nilai penetrasi. Musa & Haron (2014) memanfaatkan limbah plastik jenis LDPE dan hasilnya menunjukkan bahwa terjadi peningkatan karakteristik campuran aspal ketika ditambahkan limbah plastik LDPE khususnya pada stabilitas terjadi peningkatan yang signifikan. Soltani *et al* (2015) juga menggunakan plastik sebagai bahan tambah pada campuran aspal dan memperoleh hasil bahwa salah satu variabel yang mempengaruhi umur kelelahan dari campuran aspal adalah penggunaan plastik.

Di Indonesia, Arianti & Balaka (2015) menyelidiki kadar aspal optimum (KAO) serta karakteristiknya pada campuran aspal beton dengan atau tanpa menggunakan limbah plastik PET. Hasil penelitian ini menunjukkan seiring dengan meningkatnya kadar PET maka akan meningkatkan stabilitas, VMA, VFA, *flow*, dan MQ, serta menurunkan VIM. Israil dkk (2012) meneliti pengaruh penambahan serpihan plastik terhadap karakteristik campuran aspal beton dan diperoleh hasil bahwa terjadi peningkatan pada karakteristik *Marshall* terutama stabilitas dan juga

penelitian dilakukan oleh Amiruddin dkk. (2012) yang memperoleh hasil bahwa dengan penambahan polimer kedalam campuran aspal akan meningkatkan nilai stabilitas yang mengindikasikan bahwa *interlocking* antara gregat semakin baik.

Salah satu jenis perkerasan jalan raya yang sedang dikembangkan sebagai lapis aus (*wearing course*) adalah Aspal Porus (*Porous Asphalt*). Campuran perkerasan aspal ini menggunakan gradasi terbuka (*open graded*) yang didominasi oleh agregat kasar sebanyak 70%-85% dan agregat halus sebanyak 30%-15% (Tjaronge dkk., 2013) untuk mendapatkan pori yang cukup tinggi sehingga diperoleh tingkat permeabilitas campuran yang tinggi, dimana permeabilitas difungsikan untuk *subsurface drain* (Ali dkk., 2013).

Beban kendaraan yang melintas akan menimbulkan tegangan tarik pada bagian bawah hingga pertengahan pada lapis suatu jalan. Campuran aspal akan mengalami pengerasan atau penuaan akibat terpapar cuaca. Penuaan akan mempengaruhi kemampuan campuran aspal memikul beban kendaraan. Kondisi tegangan yang terjadi akibat beban roda pada lapisan perkerasan dapat diuji di laboratorium namun dengan banyak faktor yang disederhanakan. Pada kondisi sesungguhnya atau in-situ, beban diterapkan tiga dimensi. Sejumlah pengujian yang telah disederhanakan untuk dapat menguji sejumlah aspek-aspek tertentu dari perilaku in-situ. Pengujian tersebut dibagi menjadi tiga kelompok. Kelompok pengujian pertama adalah pengujian dasar uji beban berulang

triaksial (*repeated load triaxial test*), uji tekan statik untuk rangkai (*unconfined static uniaxial creep compression test*), uji beban tarik berulang (*repeated load indirect tensile test*), uji dinamik kekakuan dan kelelahan (*dynamic stiffness and fatigue tests*). Kelompok pengujian kedua adalah pengujian simulasi di laboratorium (*simulative*) : Uji Roda-pelacakan (*wheel-tracking test*) dan kelompok pengujian yang ketiga adalah pengujian empiris dengan uji Marshall (*marshall tests*), (*Shell Bitumen Handbook, 2015*).

Berdasarkan berbagai penelitian terdahulu di atas maka dapat disimpulkan bahwa dengan pemanfaatan limbah plastik ke dalam campuran aspal akan menaikkan kinerja campuran khususnya menaikkan stabilitas dan menjadi salah satu solusi dari permasalahan limbah plastik. Dari uraian-uraian diatas, penulis memandang perlu melakukan penelitian lebih lanjut tentang kinerja campuran aspal porus yang menggunakan limbah plastik sebagai bahan tambah, sehingga penulis membuat penelitian ini dengan judul **“Analisis Penuaan Jangka Panjang Secara Laboratorium Campuran Aspal Porus Yang Mengandung Limbah Plastik PET Terhadap Nilai Kuat Tarik Tidak Langsung”**.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian diatas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana nilai kadar aspal optimum campuran aspal porus yang menggunakan Asbuton modifikasi sebagai bahan pengikat ?.

2. Bagaimana hubungan tegangan dan regangan campuran aspal porus yang menggunakan limbah plastik sebagai bahan tambah akibat proses akselerasi penuaan jangka panjang secara laboratorium ?.
3. Bagaimana hubungan nilai kuat tarik tidak langsung dengan kadar limbah plastik pada benda uji campuran aspal porus yang mengalami proses akselerasi penuaan jangka panjang secara laboratorium ?.

C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis nilai kadar aspal optimum campuran aspal porus yang menggunakan Asbuton modifikasi sebagai bahan pengikat.
2. Menganalisis hubungan tegangan dan regangan campuran aspal porus yang menggunakan limbah plastik sebagai bahan tambah akibat proses akselerasi penuaan jangka panjang secara laboratorium.
3. Menganalisis hubungan nilai kuat tarik tidak langsung dengan kadar limbah plastik pada benda uji campuran aspal porus yang mengalami proses akselerasi penuaan jangka panjang secara laboratorium.

D. Batasan Masalah

Permasalahan penuaan dan limbah plastik pada campuran aspal porus sehingga perlu membatasi masalah penelitian ini agar dapat lebih terarah sehingga fokus penelitian ini adalah :

1. Penelitian yang dilakukan adalah berbentuk uji eksperimen di laboratorium.
2. Benda uji yang digunakan adalah benda uji campuran aspal porus dimana bahan pengikat yang digunakan berupa Asbuton modifikasi dengan tipe Retona Blend 55.
3. Benda uji jenis campuran aspal porus yang digunakan, dilakukan pengujian kuat tarik tidak langsung dalam kondisi penuaan jangka panjang (*Long Term Oven Aging, LTOA*) secara laboratorium yang dipanasi pada suhu 85°C selama 4 hari.
4. Pengujian yang dilakukan berupa uji kuat tarik tidak langsung (*Indirect Tensile Strength, ITS*) yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja campuran akibat proses penuaan secara laboratorium.
5. Limbah plastik yang digunakan adalah limbah plastik jenis PET (*Polyethylene Terephthalate*).

E. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah menghasilkan suatu inovasi pada teknologi campuran aspal porus yang memanfaatkan sumber daya alam nasional berupa Asbuton (Aspal Alam Buton), secara berkelanjutan. Selain itu, dapat memprediksi perubahan nilai kuat tarik tidak langsung akibat proses penuaan jangka panjang yang dilakukan di laboratorium yang dapat dikonversi lama penuaan yang dapat terjadi di lapangan .

F. Sistematika Penulisan

Agar lebih terarah tulisan ini, sistematika penulisan tesis yang akan dilakukan sesuai tahapan-tahapan yang dipersyaratkan sehingga produk yang dihasilkan lebih sistematis sehingga susunan tesis ini dapat diurutkan yaitu :

BAB I PENDAHULUAN

Dalam bab ini, memberikan gambaran tentang pentingnya masalah ini diangkat sebagai sebuah penelitian S2. Pokok-Pokok bahasan dalam BAB ini adalah latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, maksud dan tujuan dari penelitian ini, manfaat dari penelitian ini, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini, memberikan gambaran tentang teori aspal Buton, persyaratan Asbuton menurut puslitbang dan potensi-potensi Asbuton yang ada, teori aspal (bitumen), penelitian terdahulu mengenai bitumen hasil ekstraksi maupun hasil semi ekstraksi aspal alam Buton, informasi tentang campuran beraspal panas dan respon perkerasan akibat pembebanan serta informasi mengenai penelitian-penelitian terdahulu yang terkait penuaan dan kuat tarik tidak langsung.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini, dijelaskan metode yang digunakan dalam penelitian ini, pengujian karakteristik yang dilakukan pada agregat

dan aspal Buton modifikasi, bagan alir penelitian, pembuatan benda uji dan rencana jumlah benda uji, pengujian-pengujian yang dilakukan pada hasil campuran aspal panas berupa kuat tarik belah (*indirect tensile strength*) serta waktu penuaan yang diberikan terhadap variasi benda uji. Prosedur penuaan secara laboratorium.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini, disusun hasil-hasil pengujian diantaranya adalah hasil pemeriksaan karakteristik agregat, karakteristik aspal Buton modifikasi, proporsi campuran aspal, validasi penelitian ini adalah pengujian kuat tarik belah (*indirect tensile strength*). Selain itu, akan dijelaskan prediksi penurunan nilai kuat tarik tidak langsung akibat proses penuaan yang terjadi.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Merupakan bab yang menyimpulkan hasil dari analisis penelitian dan memberikan saran-saran dan rekomendasi penelitian.

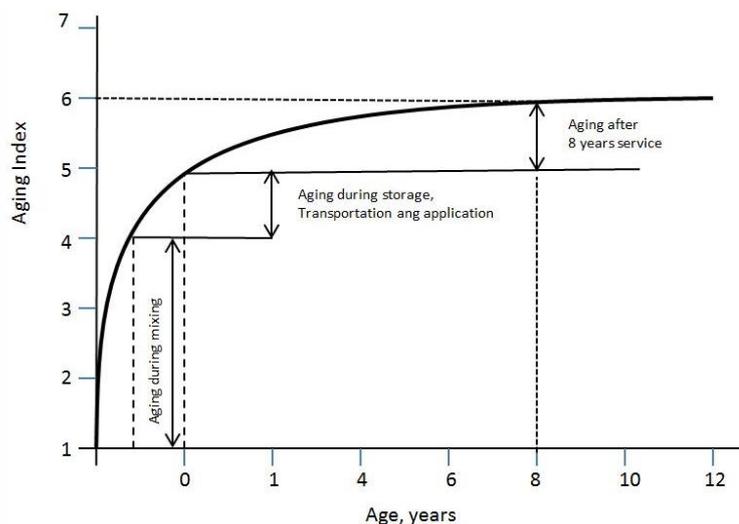
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Isu Penuaan Pada Campuran Beraspal

Kerusakan konstruksi jalan raya antara lain diakibatkan oleh menurunnya daya dukung jalan antara lain karena terjadinya proses penuaan campuran beton aspal. Penuaan diakibatkan oleh proses pemanasan baik saat pencampuran di *Asphalt Mixing Plant (AMP)*, pengangkutan, pemadatan dan selama masa layanan konstruksi jalan tersebut.

Pada campuran beraspal, penuaan dinyatakan dengan fenomena pengerasan (*hardening*). Dua pengertian lain yang sering digunakan, yaitu; umur pengerasan (*age hardening*) dan pelapukan (*embrittlement*) (Elvik & Greibe, 2005).



Gambar 1. Penuaan bitumen selama pencampuran, penyimpanan, pengangkutan dan pemasangan serta akhir masa layanan (*The Shell Bitumen Handbook, 2015*)

Gambar 1 memperlihatkan penuaan bitumen selama pencampuran, penyimpanan, pengangkutan dan pemasangan serta akhir masa layanan. Penyebab penuaan campuran beton aspal adalah karena menguapnya bagian cair dari aspal karena adanya pemanasan sehingga aspal menjadi getas dan kehilangan daya rekatnya. Pengaruh fleksibilitas dan pelekatan aspal ini menyebabkan jalan mudah rusak saat menerima beban lalu lintas berat. (Widodo dkk., 2012).

Penuaan aspal disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu penguapan fraksi minyak ringan yang terkandung dalam aspal dan oksidasi (penuaan jangka pendek, *short-term aging*), dan oksidasi progresif (penuaan jangka panjang, *long-term aging*). Penuaan ini menyebabkan terjadinya pengerasan pada aspal dan selanjutnya akan meningkatkan kekakuan campuran beraspal sehingga akan mempengaruhi kinerja campuran tersebut (Yamin dan Aschuri, 2008).

Penuaan aspal merupakan perubahan tingkat kekerasan (*hardening*) dan kerapuhan aspal (*brittleness*) akibat penanganan, proses produksi campuran beraspal dan masa pelayanan campuran beraspal tersebut di lapangan. Penuaan ini menyebabkan terjadinya pengerasan pada aspal dan selanjutnya akan meningkatkan kekakuan campuran beraspal. Kesemuanya ini berkaitan erat dengan kecepatan terjadinya retak ataupun pelepasan butir pada perkerasan beraspal.

Pelapukan yang terbesar terjadi pada saat pemanasan aspal dan pencampuran aspal dengan agregat. Pada saat pemanasan terjadi

oksidasi/penguapan fraksi ringan sehingga terjadi pengerasan aspal, sedangkan pada saat pelayanan di perkerasan jalan pelapukan aspal sangat tergantung besarnya rongga sebagai hasil dari pelaksanaan pemadatan (Suroso, 2009).

Dalam perancangan beton aspal, pengaruh penuaan aspal ini belum diperhitungkan. Dalam spesifikasi beton aspal yang dikeluarkan oleh Bina Marga (2010) disyaratkan bahwa stabilitas beton aspal yang direndam selama 4 hari, stabilitas sisanya tidak boleh kurang dari 90%. Persyaratan ini adalah untuk menguji ketahanan beton aspal terhadap kerusakan akibat terendam air. Akan tetapi yang menjadi masalah adalah bahwa cuaca yang merusak beton aspal tidak hanya air saja. Pemanasan berlebihan juga menyebabkan kerusakan campuran beton aspal, karena aspal yang digunakan sebagai bahan pengikat mengalami penuaan. (Widodo dkk., 2012).

Umumnya penuaan campuran aspal diklasifikasikan ke dalam dua kategori, yaitu penuaan jangka pendek dan jangka panjang. Penuaan jangka pendek dikaitkan dengan hilangnya komponen volatil dan oksidasi dari aspal selama produksi campuran aspal. Penuaan jangka panjang adalah oksidasi progresif materi tempat di lapangan selama masa pelayanan perkerasan (Bell *et al.*, 1994). Proses pemanasan benda uji pada temperatur 135°C selama 4 jam untuk mensimulasikan penuaan jangka pendek disebut *Short Term Oven Aging* (STOA). Sedangkan pemanasan benda uji pada temperatur 85°C selama 5 hari,

mensimulasikan penuaan jangka panjang (*Long Term Oven Aging – LTOA*).

Kliewer *et al* 1995 telah meneliti hubungan antara kinerja pelapukan campuran beton aspal di lapangan dan sifat-sifat pelapukan campuran beton aspal yang dilakukan di laboratorium. Prosedur pelapukan campuran beton aspal di laboratorium untuk mewakili pelapukan jangka pendek atau saat pencampuran dilakukan dengan cara memanaskan campuran lepas beton aspal di dalam oven selama 4 jam pada temperatur 135°C sebelum dipadatkan. Sedangkan untuk mensimulasikan pelapukan jangka panjang di laboratorium dilakukan dengan memanaskan benda uji beton aspal padat pada temperature 85°C. Jangka waktu pemanasan selama 2 hari mewakili pelapukan lapisan perkerasan beton aspal selama 5 tahun. Pemanasan selama 5 hari mensimulasikan pelapukan lapisan perkerasan beton aspal selama 10 tahun (Widodo dkk., 2012).

Pengaruh eksternal aspal dipengaruhi oleh adanya oksigen, radiasi ultraviolet dan perubahan suhu. Pengaruh eksternal ini menyebabkan aspal mengeras, sehingga terjadi perubahan rheologi seperti penurunan penetrasi, peningkatan titik leleh, dan peningkatan viskositas. Faktor yang memiliki pengaruh yang signifikan pada age hardening aspal, kategori umum disebut oleh sebagian peneliti (Khalid, 2002). Faktor-faktor ini adalah :

1. Oksidasi : Oksidasi adalah reaksi oksigen dengan aspal, tingkat oksidasi sangat tergantung pada suhu, waktu dan ketebalan film aspal.

2. Penguapan : Penguapan adalah penguapan konstituen cahaya dari aspal dan terutama fungsi temperatur.
3. Polimerisasi : Polimerisasi adalah kombinasi dari molekul yang sama untuk membentuk yang lebih besar, yang menyebabkan pengerasan progresif.
4. Thixotropy : Thixotropy adalah pengerasan progresif karena pembentukan struktur dalam aspal selama periode waktu.
5. Sineresis : sineresis merupakan reaksi eksudasi di mana cairan berminyak tipis memancarkan ke permukaan film aspal. Dengan hilangnya konstituen berminyak, aspal menjadi lebih sulit.
6. Pemisahan : Pemisahan adalah penghapusan konstituen berminyak, resin atau asphaltenes dari aspal yang disebabkan oleh penyerapan selektif beberapa agregat berpori.

Penuaan mengubah sifat reologi, mekanik, dan kimia dari pengikat dan campuran aspal. Perubahan properti dari campuran binder dan aspal dapat diukur melalui indikator penuaan. Ada berbagai macam tes yang dapat digunakan untuk menilai efek penuaan pada campuran aspal dan pada pengikat dari campuran dengan mengukur properti sebelum dan setelah penuaan. Indikator penuaan biasa digunakan dalam praktek parameter empiris yang menggambarkan perubahan sifat pengikat, sifat mendasar yang dapat menunjukkan perubahan perilaku viskoelastis pengikat dan campuran atau ukuran dari perubahan komposisi kimia

pengikat yang menunjukkan perubahan dalam struktur koloid setelah penuaan (Khalid, 2002).

B. Aspal Porus (*Porous Asphalt*)

Aspal porus telah dikembangkan di negara-negara maju seperti ; Spanyol, Swiss, Belgia, Belanda, Inggris dan beberapa Negara Bagian di USA, Jepang dan Singapura. Aspal porus pada awalnya dikenal sebagai *Open Graded Friction Courses (OGFC)* yang digunakan sejak tahun 1950 di USA yang bertujuan untuk mendapatkan lapis permukaan yang lebih kesat. Perkerasan *OGFC* ini memiliki rongga dalam campuran yang lebih besar, sehingga dapat memindahkan air dari perkerasan melalui lapisan aspal (Hardiman, 2008).

Banyak negara telah menggunakan jenis campuran ini, seperti di Inggris, Belanda, Kanada, Spanyol, Belgia, Perancis dan Italia. Di Asia penggunaan campuran ini masih dikategorikan baru, seperti Jepang, dan Korea Selatan yang menggunakan campuran ini tahun 1990. Aspal porus telah digunakan sebagai lapisan permukaan jalan pada daerah pedestrian seperti tempat-tempat pejalan kaki (*pedestrian walkways*) di taman-taman, trotoar dan untuk kendaraan ringan (*light vehicle*). Di Jepang, Belanda dan sejumlah negara lainnya telah menggunakan aspal berongga sebagai jalan utama (Miradi, *et. al.*, 2009) dan (Katsuji, *et.al.*,2009).

Aspal porus adalah campuran beraspal yang didesain mempunyai porositas lebih tinggi dibandingkan jenis perkerasan yang lain. Sifat porus diperoleh karena campuran aspal porus menggunakan proporsi agregat

halus lebih sedikit dibanding campuran perkerasan jenis yang lain. Kandungan rongga pori dalam jumlah yang besar diharapkan menghasilkan kondisi permukaan agak kasar, sehingga akan mempunyai tingkat kekesatan yang tinggi. Selain itu pori yang tinggi diharapkan dapat berfungsi sebagai saluran drainase di dalam campuran.

Menurut Setyawan dkk (2008), campuran aspal porus merupakan generasi baru dalam perkerasan lentur, yang membolehkan air meresap ke dalam lapisan atas (*wearing course*) secara vertical dan horisontal. Lapisan ini menggunakan gradasi terbuka (*open graded*) yang dihamparkan di atas lapisan aspal yang kedap air. Lapisan aspal porus ini secara efektif dapat memberikan tingkat keselamatan yang lebih terutama diwaktu hujan agar tidak terjadi *aquaplaning*, sehingga menghasilkan kekesatan permukaan yang lebih kasar dan dapat mengurangi kebisingan (*noise reduction*).

Aspal porus atau aspal berpori adalah campuran beraspal menggunakan gradasi terbuka dan terletak diatas lapisan kedap air dan didesain setelah dipadatkan mempunyai pori sekitar 20%.

1. Penggunaan Aspal Porus

a. Keuntungan Penggunaan Aspal Porus

Pada umumnya, aspal porus digunakan untuk :

1. Mengurangi efek *aquaplaning* apabila permukaan aspal basah.
2. Mengurangi efek percikan dan semprot (*splash and spray*) ketika kendaraan melewati permukaan aspal.

3. Mengurangi efek silau.
 4. Meningkatkan kekesatan permukaan di jalan.
 5. Mengurangi kebisingan.
- b. Kerugian dalam penggunaan aspal porus (Ali dkk., 2010)
1. Berhubung tingginya kadar rongga di dalam aspal porus menyebabkan stabilitas aspal porus rendah sehingga perlu mempertimbangkan penggunaannya lebih cermat pada lalu lintas tinggi.
 2. Dengan besarnya rongga yang ada dalam perkerasan menyebabkan resiko terhadap bahaya *pumping* oleh lalu lintas sehingga perlu mendapat perhatian pada proses perencanaan.
 3. Peluang terjadinya pelapukan pada perkerasan sangat tinggi oleh karena oksigen dapat memasuki rongga aspal porus, sehingga terjadi proses oksidasi pada aspal yang menyebabkan aspal menjadi lapuk.
 4. Kemungkinan bahaya *desintegrasi* perkerasan akan terjadi akibat kurangnya *interlocking* karena penggunaan agregat kasar dalam jumlah yang besar dan dibatasainya agregat halus yang memiliki fungsi memperkuat *interlocking*, untuk mempertahankan rongga yang besar dalam perkerasan.

2. Karakteristik Material Aspal Porus

a. Agregat Kasar

Agregat kasar yang digunakan untuk aspal porus harus memenuhi kualitas fisik dan mekanis yaitu :

1. Kehilangan berat setelah dilakukan pengetesan mesin *Los Angeles* <40 %, berdasarkan ASTM C-131 atau SNI 03-2417-1991.
2. Kehilangan berat rata-rata setelah dilakukan pengujian *magnesium sulfate soundness* < 18%, sesuai AASHTO T-104 atau SNI 03-3407-1994.
3. Indeks kepipihan bila diuji <25 %, berdasarkan MS-30 atau RSNI T-01-2005.
4. Absorpsi air < 3% berdasarkan pengujian SNI 03-1969-1990.

b. Agregat Halus

Agregat halus terdiri dari bahan *non-plastis* dan harus bebas dari lumpur, tanah liat, bahan organik. Agregat halus yang digunakan untuk aspal porous harus memenuhi kualitas fisik dan mekanis yaitu :

1. Fraksi agregat setara pasir yang lolos saringan no. 4 (4,75 mm) > 45 %, berdasarkan ASTM D 2419.
2. Angularitas agregat halus > 45 %, bila diuji berdasarkan ASTM C1252.
3. Kehilangan berat rata-rata pada pengujian *magnesium sulfate soundness* (lima putaran) < 20 %, berdasarkan AASHTO T 104 atau berdasarkan pada aturan SNI 03-3407-1994.
4. Absorpsi air < 3 %, berdasarkan pengujian SNI 03-1970-1990.

Seluruh spesifikasi perkerasan mensyaratkan bahwa partikel agregat harus berada dalam rentang ukuran tertentu dan ukuran partikel harus dalam proporsi tertentu.

C. Bahan Tambah Dalam Campuran Beraspal

Menurut Abtahi *et al* (2011) dan Ahmadinia *et al* (2011) plastik dibagi atas dua jenis berdasarkan sifat fisiknya, yaitu :

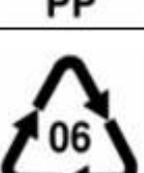
(a) *Thermoplast*, merupakan jenis plastik yang bisa didaur-ulang atau dicetak lagi dengan proses pemanasan ulang. Polimer termoplastik memiliki sifat-sifat khusus yaitu jika dipanaskan akan melunak, jika didinginkan akan mengeras, mudah untuk diregangkan, fleksibel, titik leleh rendah, dapat dibentuk ulang atau di daur ulang, dan mudah larut dalam pelarut yang sesuai dengan kecocokan jenis plastik ini. Contoh plastik yang termasuk dalam jenis termoplastik adalah :

- (1) **Polyethylene (PE)**, yang terdiri dari PET (*Polyethylene Terephthalate*) dengan berat jenis yaitu sebesar 1,34-1,39; HDPE (*High Density Polyethylene*) dengan berat jenis yaitu sebesar 0,96-0,97; dan LDPE (*Low Density Polyethylene*).
- (2) **Polyivinilklorida (PVC)** dengan berat jenis 1,37–1,39.
- (3) **Polipropena (PP)**.
- (4) **Polistirena (PS)** dengan berat jenis 1,04-1,09.
- (5) **Polycarbonate (Other)** dengan berat jenis 1,2.

(b) *Thermosetting*, merupakan jenis plastik yang tidak bisa didaur-ulang atau dicetak lagi. Pemanasan ulang akan menyebabkan kerusakan molekul-molekul yang ada pada jenis plastik ini. Sifat polimer termosetting yaitu keras dan kaku (tidak fleksibel) sehingga jika dipanaskan jenis plastik ini akan mengeras, tidak dapat dibentuk ulang

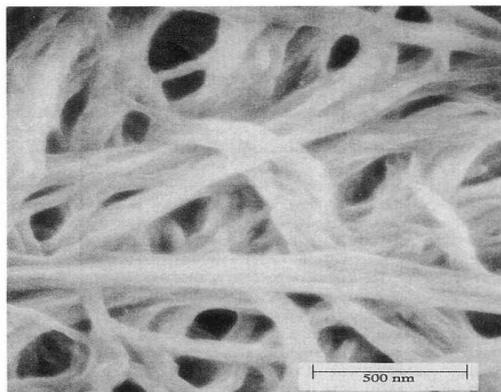
atau sukar didaur ulang, tidak dapat larut dalam pelarut apapun, jika dipanaskan akan meleleh, tahan terhadap asam basa, dan mempunyai ikatan silang antar rantai molekul yang ada pada jenis plasti ini. Contoh plastik dengan jenis *thermosetting* adalah terdiri dari asbak, *fitting* lampu listrik, *steker* listrik, peralatan fotografi, dan radio. Oleh karena itu, jenis plastik ini harus diberikan perlakuan yang khusus pada saat ingin di daur ulang dan dimanfaatkan kembali. Jenis plastik yang seharusnya digunakan dalam penelitian-penelitian yang memanfaatkan limbah plastik sebagai bahan tambah dalam campuran beraspal adalah limbah plastik yang dapat digunakan kembali dan dapat di daur ulang yang ditandai dengan ketika dipanaskan akan mencair dan tidak mengeras. Selain itu, tidak merusak lingkungan ketika diaplikasikan pada level lapangan. Polimer atau plastik jenis ini banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari sehingga dapat dengan mudah digunakan sebagai bahan tambah dalam campuran beraspal. Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, disebutkan bahwa plastik dapat memperbaiki dan bahkan meningkatkan kinerja dari campuran beraspal. Oleh karena itu, selain dari sisi perbaikan kinerja pada campuran beraspal, penggunaan plastik juga dapat digunakan sebagai material yang berbasis ramah lingkungan. Tabel 1 memperlihatkan jenis-jenis plastik yang termasuk kategori termoplastik.

Tabel 1. Jenis-jenis plastik yang termasuk kategori termoplastik

Simbol Daur Ulang	Jenis Plastik	Sifat-sifat	Aplikasi kemasan
	Polietilen Tereftalat (PET, PETE)	Bening, kuat, tangguh non permeabel (gas dan uap air)	Soft drink, botol air-salad keju kacang
	High Density Polietilen	Kaku, kuat, tangguh, tahan lembab,	Susu, jus buah, kantong belanja
	Polivinil Klorida (PVC)	Tangguh, kuat, mudah dicampur	Botol jus, pipa air bungkus plastik
	Low Density Polietilen (LDPE)	Mudah diproses, kuat tangguh, fleksibel, mudah disegel, tahan lembab	Kantong makanan beku, botol remas (kecap, saus, madu), bungkus plastik
	Polipropilen (PP)	Kuat, tangguh, tahan panas, minyak bahan kimia, tahan lembab	Peralatan dapur, peralatan microwave, wadah yoghurt, piring dan mangkuk sekali pakai
	Polistiren (PS)	Mudah dibentuk dan diproses	Karton telur, styrofoam, mangkuk sekali pakai
	Plastik lain (Polikarbonat atau ABS)	Tergantung dari jenis polimernya	Botol minuman, botol susu bayi, barang-barang elektronik

a. Sifat botol plastik

Botol plastik yang akan digunakan pada penelitian ini adalah jenis *Low Density Polyethylene* (LDPE) yang merupakan salah satu dari jenis *polyethylene*, yaitu polimer yang terdiri dari rantai panjang monomer etilena (IUPAC : etena). Struktur molekul etena C_2H_4 adalah ($---CH_2---CH_2---$)_n dua grup CH_2 bersatu dengan ikatan ganda. Polietilena dibentuk melalui proses polimerisasi dari etena. Polietilena umumnya bisa dilarutkan pada temperatur yang tinggi dalam hidrokarbon aromatik (Wikipedia, 2016 b). Gambar 2 memperlihatkan permukaan tipis *polyethylene*.



Gambar 2. Permukaan tipis *polyethylene* (Israil, 2012)

Plastik jenis LDPE merupakan plastik tipe cokelat yang dibuat dari minyak bumi. Sifat mekanis jenis plastik LDPE adalah kuat, agak tembus cahaya, mempunyai sifat fleksibilitas yang tinggi, dan permukaan agak berlemak. Pada suhu $60^{\circ}C$ sangat resisten terhadap senyawa kimia. Selain itu, plastik jenis ini mudah diproses, mudah larut dalam campuran, daya proteksi terhadap uap air tergolong baik, serta memiliki berat jenis

0,91–0,94 gr/cm³. LDPE termasuk jenis polietilen dengan kerapatan rendah yang diproduksi melalui polimerisasi radikal bebas pada suhu tinggi (200⁰C) dan tekanan yang tinggi, serta mempunyai titik leleh 115⁰ C (Sunarya, 2011). Adapun yang termasuk plastik jenis LDPE, yaitu botol plastik, mainan, bahan cetakan, ember, drum, pipa saluran, isolasi kawat dan kabel, kantong plastik, dll.

b. Plastik dan campuran aspal

Menurut Bale (2011), ada dua teknik (metode) pencampuran plastik ke dalam campuran aspal, yaitu :

- a. Cara basah, (*wet process*), yaitu suatu cara pencampuran dimana plastik dimasukkan ke dalam aspal panas dan diaduk dengan kecepatan tinggi sampai homogen. Cara ini membutuhkan tambahan dana cukup besar antara lain bahan bakar, *mixer* kecepatan tinggi sehingga aspal modifikasi yang dihasilkan harganya cukup besar bedanya dibandingkan dengan aspal konvensional.
- b. Cara kering (*dry process*), yaitu suatu cara dimana plastik dimasukkan ke dalam agregat yang dipanaskan pada temperatur campuran, kemudian aspal panas ditambahkan. Cara ini bisa lebih mudah dibandingkan cara basah, hanya dengan memasukkan plastik ke dalam agregat panas, tanpa membutuhkan peralatan lain untuk mencampur (*mixer*). Namun, untuk cara ini harus diperhatikan kehomogenan dan keseragaman kadar plastik yang dimasukkan atau dicampurkan.

Dalam penelitian ini menggunakan cara kering untuk menambahkan plastik ke dalam campuran beton aspal. Dari segi ekonomi, cara kering lebih murah karena waktu pencampuran lebih cepat, tidak membutuhkan peralatan lain untuk mencampur, lebih mudah ditangani dari pada cara basah (Bale, 2009), dapat meningkatkan sifat pengikatan agregat pada campuran, mengurangi degradasi di jalan, serta mengurangi penggunaan kadar aspal pada campuran (Mir, 2015).

Adapun persentase plastik yang ditambahkan dalam campuran tidak boleh melebihi 17% (Moghaddam *et al.*, 2012) karena akan membuat karakteristiknya jauh dari disyaratkan. Selain itu, menurut Moghaddam, dkk. (2013) kepadatan dan kekakuan campuran akan meningkat jika hanya ditambahkan sedikit persentase plastik (0,2 - 1% dari berat agregat). Semakin besar kepadatan suatu campuran, maka akan semakin banyak jumlah siklus pembebanan yang dapat ditahan oleh beton aspal (Aforla *et al.*, 2015). Oleh karena itu, diharapkan plastik yang digunakan dalam campuran beraspal mampu meningkatkan kinerja campuran beraspal.

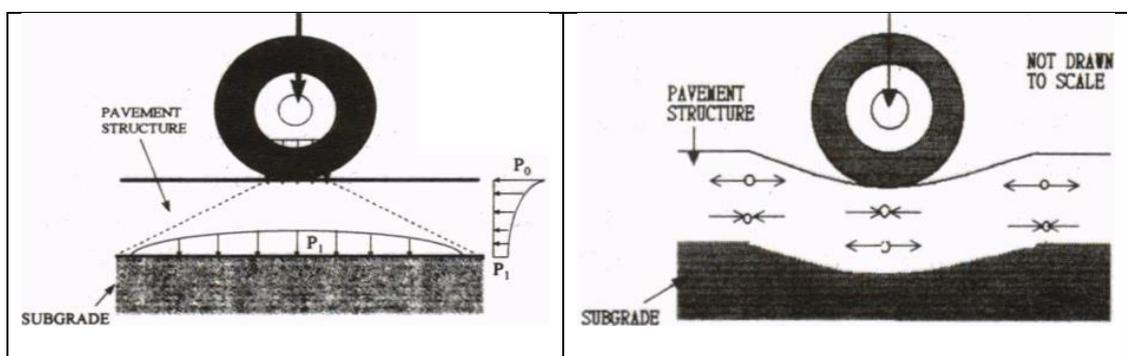
D. Konsep Campuran Aspal Buton Modifikasi dan Respon

Perkerasan Akibat Pembebanan

Spesifikasi Khusus Bina Marga, Indonesia (2010) tentang campuran beraspal panas, dijelaskan bahwa yang dimaksud dengan campuran

beraspal panas dengan aspal yang dimodifikasi adalah campuran agregat dan aspal dari jenis Asbuton, yang dicampur, dihampar dan dipadatkan. Pekerjaan ini mencakup pembuatan lapisan campuran aspal modifikasi untuk lapis permukaan antara dan lapis permukaan (lapis aus), yang dihampar dan dipadatkan di atas lapis pondasi atau permukaan jalan yang telah disiapkan sesuai dengan spesifikasi dan memenuhi garis, ketinggian, dan potongan memanjang serta potongan melintang yang ditunjukkan dalam Gambar Rencana.

Chen *et al* dalam *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol.4, No.1, October, 2001, memberikan gambaran kinerja pembebanan pada *flexibel pavement* seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Kinerja perkerasan lentur

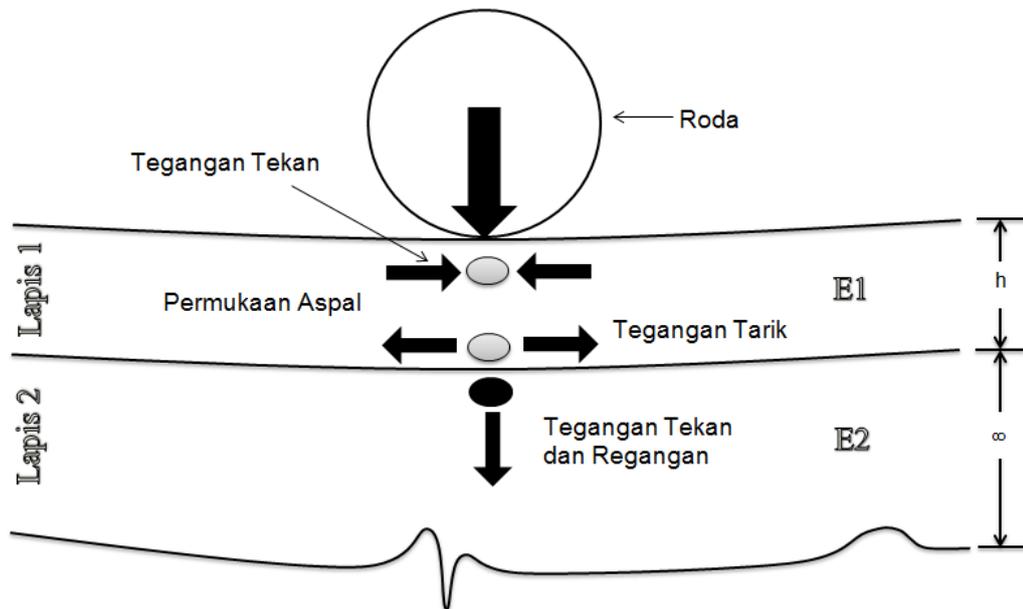
Analisis didasarkan pada pendekatan desain mekanistik (Croney *et al*, 1998 dan Huang HY, 1993), dan elastis sistem perkerasan dua lapisan linear seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Semua lapisan yang terletak di bawah permukaan aspal (*top-layer*) yang secara teoritis ditandai

dengan satu nilai komposit modulus elastisitas (E_2). Akibatnya, kriteria desain perkerasan jalan dapat dibahas yaitu :

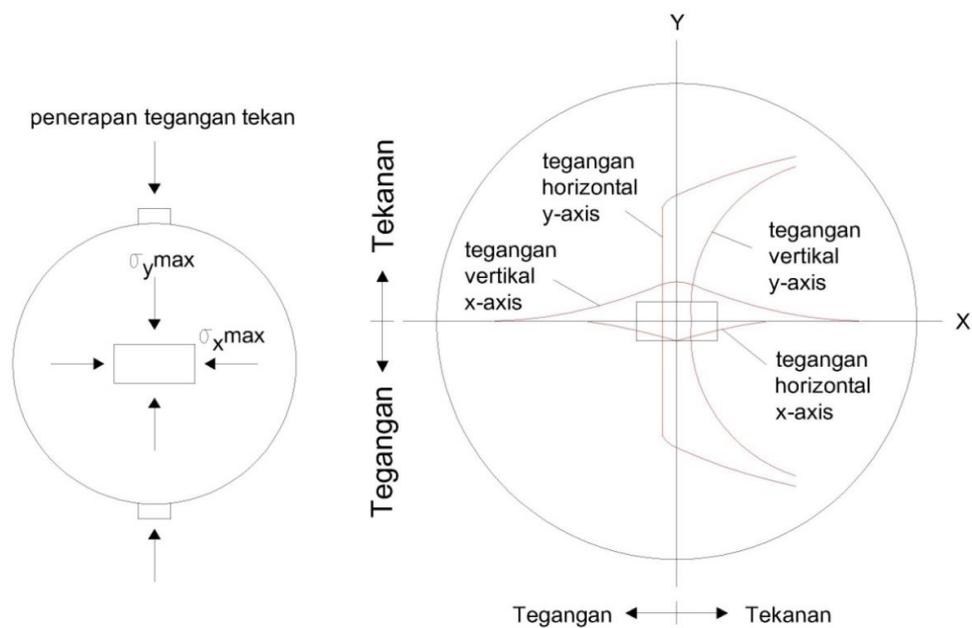
- a. Distribusi tegangan-regangan tiga dimensi lebih tinggi dari lapisan aspal-permukaan.
- b. Tegangan tarik horizontal dan regangan yang terjadi di zona bawah ($[h-1]$ mm) dari lapisan aspal permukaan yang merupakan parameter kerusakan pada perkerasan akibat kelelahan dan mengakibatkan terjadinya retak.

Gambar 4 memperlihatkan sistem perkerasan jalan dengan sistem dua lapis dengan distribusi tegangan dan regangan pada perkerasan jalan yang ditinjau. Untuk sistem perkerasan *multi-layer*, penyederhanaan pada lapisan atas dan karakterisasi dari lapisan-lapisan dalam menahan beban yang ada pada perkerasan jalan. Pada Gambar 4 menunjukkan adanya penyederhanaan model dengan asumsi kondisi lalu lintas sebagai pembebanan statis dan karakterisasi pada kondisi linier-elastis isotropik dari bahan itu sendiri. Dalam Gambar 4, Q adalah beban ban dengan satuan kN, p adalah tekanan ban dalam kPa, h adalah ketebalan lapisan aspal permukaan dalam mm dan E_1 serta E_2 adalah modulus elastisitas dalam MPa. Gambar 5 memperlihatkan distribusi tegangan dan tekanan yang dapat terjadi pada lapis perkerasan jalan. Berdasarkan Gambar 5 yang memperlihatkan distribusi tegangan dan tekanan yang dapat terjadi pada perkerasan jalan, terlihat bahwa penerapan tegangan tekan yang

terjadi berupa tegangan tekan arah horizontal maksimum ($\sigma_y = \max$) dan tegangan tekan arah vertikal maksimum ($\sigma_x = \max$).

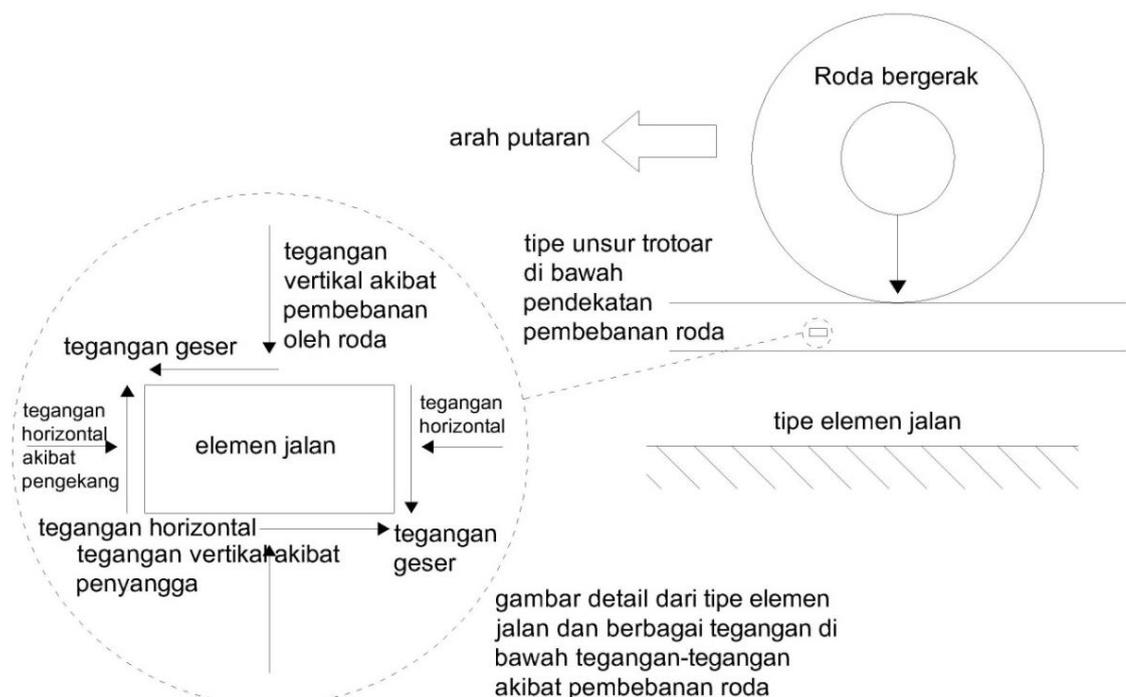


Gambar 4. Sistem perkerasan dua lapis (Walubita, 2000)



Gambar 5. Distribusi tegangan dan tekanan (*The Shell Bitumen Handbook, 2015*)

Selain itu, tegangan dan tekanan saling melawan sehingga besarnya tekanan sama dengan besarnya tegangan yang terjadi baik tegangan horizontal (y-axis) dan tegangan vertikal (x-axis). Distribusi tegangan dan tekanan yang terjadi pada perkerasan jalan ini dapat disebabkan oleh beban lalu lintas maupun beban roda kendaraan yang berulang. Gambar 6 memperlihatkan penjabaran tegangan-tegangan yang terjadi pada perkerasan jalan.



Gambar 6. Penjabaran tegangan-tegangan (*The Shell Bitumen Handbook, 2015*)

Berdasarkan Gambar 6 yang memperlihatkan penjabaran tegangan-tegangan yang terjadi pada perkerasan jalan, terlihat bahwa tegangan-tegangan yang terjadi pada perkerasan jalan adalah tegangan geser arah horizontal dan tegangan geser arah vertikal. Tegangan geser pada

perkerasan jalan ini terjadi pada daerah bawah perkerasan jalan yang disebabkan oleh pembebanan roda kendaraan. Pembebanan roda kendaraan yang terjadi bisa disebabkan karena pembebanan secara berulang dan terus-menerus.

E. Pengujian Campuran Aspal Porus Untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

1. Porositas

Porositas (*Voids In Mix* - VIM) merupakan volume pori yang terdapat dalam campuran aspal porus yang telah dipadatkan sebanyak 50 kali atau banyaknya rongga udara yang berada dalam campuran aspal pada aspal porus yang telah dipadatkan sesuai aturan standar yang digunakan. Nilai porositas atau nilai VIM dinyatakan dalam bilangan satu angka dibelakang koma atau dalam persen (%) terhadap campuran dan dihitung dengan rumus yaitu diperlihatkan pada persamaan 1, 2 dan persamaan 3 dengan berbagai variabel yang ada :

$$P = \left[\frac{D}{SG} \right] \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

$$D = \frac{4.Ma}{\pi d^2 h} \dots\dots\dots(2)$$

Dimana ;

D = densitas (gr/cm³),

Ma = berat sampel diudara (gr),

d = diameter sampel (cm),

h = tinggi sampel (cm).

$$SG = \frac{100}{\frac{\%Wag}{SGag} + \frac{\%Wa}{SGa} + \frac{\%Wf}{SGf}} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana :

SG = *specific gravity* campuran

%Wag= persen berat agregat (%)

%Wa = persen berat aspal (%)

%Wf = persen berat *filler* (%)

SGag = *Specific Gravity* agregat (gr/cm³)

SGa = *Specific Gravity* aspal (gr/cm³)

SGf = *Specific Gravity* *filler* (gr/cm³)

2. *Binder Drain Down*

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui jumlah *drain-down* yang terjadi pada campuran beraspal yang belum dipadatkan, yaitu selama produksi, pengangkutan, dan pemadatan campuran aspal. Aturan yang digunakan untuk pengujian binder drain down adalah AASHTO T 305. Besarnya *drain-down* yang terjadi pada campuran beraspal dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 4.

$$\text{Drainage} = \frac{A-B}{C} \times 100 \dots\dots\dots(4)$$

Dimana :

A = Berat wadah setelah pengujian (gram)

B = Berat awal wadah sebelum digunakan (gram)

C = Berat total sample (gram)

3. Abrasi (*Cantabro Test*)

Affandi (2008) menggunakan pengujian ini untuk mengetahui daya ikat dari bitumen *Buton Granular Asphalt* (BGA). Pada pengujian cantabro tidak menggunakan bola baja dan dilakukan pengamatan setelah 500 putaran. Campuran aspal yang digunakan merupakan campuran aspal yang menggunakan aspal minyak dibandingkan dengan campuran aspal yang menggunakan Asbuton butir (Affandi, 2008).

Keawetan dari campuran beraspal dapat diketahui dengan menggunakan tes cantabro atau pengujian ketahanan terhadap pelepasan butir. Pelaksanaan pengujian abrasi dengan mesin Los Angeles, dimana sampel briket yang telah ada dimasukkan kedalam mesin Los Angeles tanpa menggunakan bola baja dan diputar sebanyak 300 putaran dengan kecepatan putaran sebesar 30-33 rpm (Tx DOT Designation : TEX-245-F, 2005). Kehilangan berat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 5.

$$L = \frac{M_o - M_i}{M_o} \times 100\% \dots \dots \dots (5)$$

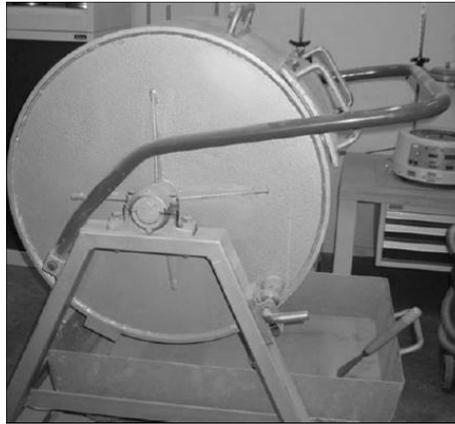
Dimana : M_o = Berat sebelum diabrasi (*gram*)

M_i = Berat setelah diabrasi (*gram*), dan

L = Persentase kehilangan berat (%)

Daya ikat bitumen Asbuton tidak sebaik dengan aspal minyak penetrasi 60/70. Campuran aspal yang menggunakan 100% bitumen asbuton sebagai bahan ikat tidak dapat berfungsi secara maksimal

sehingga campuran aspal tidak dapat dipadatkan dan terurai (Affandi, 2008).



Gambar 7. Mesin abrasi *Los Angeles*

F. Uji Kuat Tarik Tidak Langsung Campuran Aspal Porus

Kuat tarik tidak langsung (ITS) dimaksudkan untuk menentukan karakteristik kuat tarik dari aspal beton yang dapat dijadikan sebagai indikator dalam melakukan kajian terhadap retak (*cracking*) yang terjadi pada lapis perkerasan (Tayfur *et al.*, 2007). Perkembangan jumlah beban lalu lintas yang akan diterima oleh jalan mengakibatkan masa layanan dari lapisan perkerasan akan berkurang. Beban tekan dan beban tarik adalah dua pembebanan yang dialami oleh suatu lapisan perkerasan jalan. ASTM telah mengeluarkan pedoman dalam melakukan pengujian ITS (*Indirect Tensile Strength*) dengan kode ASTM D6931-12. Pengujian ini kuat tidak langsung lakukan karena tidak memungkinkan campuran campuran aspal untuk dilakukan pengujian kuat tarik langsung. Kuat tarik tidak langsung dimaksudkan untuk melihat seberapa besar tegangan tarik yang dapat

terjadi pada permukaan jalan dan menyebabkan deformasi pada permukaan jalan tersebut.

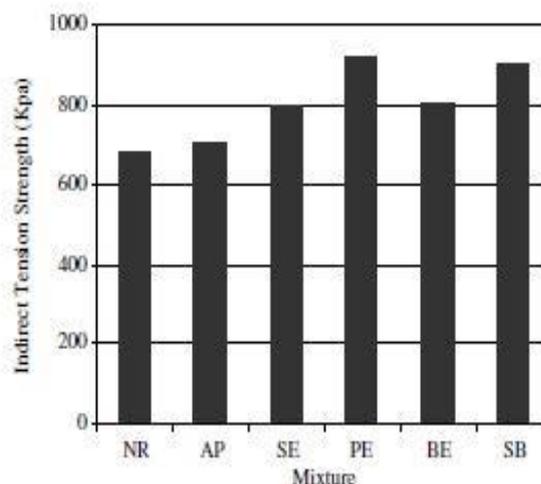
Tabel 2. Penelitian terdahulu kuat tarik tidak langsung

Peneliti	Hasil penelitian	Jenis campuran aspal
Birgisson <i>et al</i> (2008)	Tegangan, regangan	Superpave
Tayfur <i>et al</i> (2007)	Tegangan, regangan	Aspal dimodifikasi
Mahyuddin <i>et al</i> (2017)	Tegangan, regangan dan indeks ITS	AC dengan BGA
Abu <i>et al</i> (1997)	Tegangan, regangan, tensile modulus	AC
Du, 2013	Tegangan	Aspal emulsi
Katman <i>et al</i> (2012)	Tegangan	Aspal yang dikeringkan (RAP)
Ahmedzade & Yilmaz, 2008	Tegangan	Aspal modifier polyester resin
Yan <i>et al</i> (2009)	Tegangan	Aspal Emulsi

Telah banyak peneliti ahli konstruksi perkerasan jalan khususnya perkerasan lentur dalam melakukan berbagai penelitian dan melaporkan kinerja campuran beraspal sehubungan dengan kuat tarik tidak langsung. Banyaknya ahli konstruksi jalan yang telah melakukan penelitian dengan topik kuat tarik campuran aspal karena masalah ini sehubungan masalah utama kerusakan perkerasan yakni retak yang terjadi pada perkerasan aspal yang diakibatkan oleh deformasi permanen, seperti yang

ditunjukkan pada Tabel 2. Ada tiga tekanan besar mekanis yang dapat menyebabkan terjadi retak yaitu retak pada suhu rendah, kelelahan (*fatigue*) dan *rutting*. Campuran aspal yang memiliki kekuatan tarik tinggi akan berkorelasi ketahanan terhadap retak meningkat.

Tayfur *et al* (2005) mengatakan campuran aspal yang mampu mentolelir regangan yang lebih tinggi sebelum kegagalan cenderung lebih tahan terhadap retak daripada campuran aspal yang tidak dapat mentoleransi regangan tinggi. Uji kuat tarik tidak langsung merupakan pengujian yang digunakan dalam menentukan efek bahan aditif dalam campuran aspal yang dimodifikasi. Gambar 8 menunjukkan kuat tarik belah campuran aspal dimodifikasi.



Gambar 8. *Inderect tensile strength* campuran yang dimodifikasi (Tayfur *et al.*, 2005).

Penelitian Xuan *et al* (2012) menunjukkan nilai kuat tarik tidak langsung merupakan index yang sangat penting dalam design perkerasan struktur, kuat tarik tidak langsung merupakan parameter terpisah dengan

parameter yang lain dan sangat penting diperhitungkan pada campuran aspal.

Birgisson *et al* (2008) mengatakan perilaku retak (*cracking*) pada campuran aspal dapat dijelaskan dengan uji kuat tarik tidak langsung campuran aspal yang dibandingkan dengan metode prediksi dengan menggunakan *digital image correlation* (DIC). Kuat tarik tidak langsung dapat dilakukan pada benda uji dalam bentuk lingkaran penuh dan setengah lingkaran.

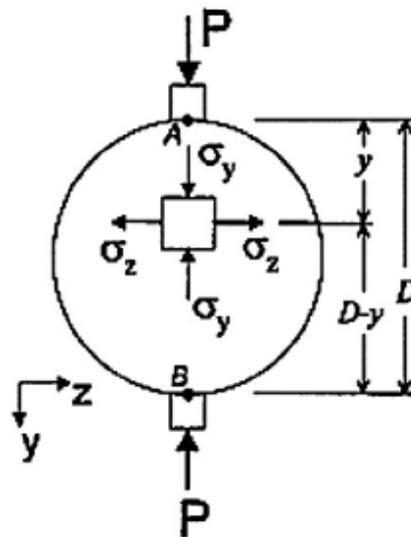
Abu *et al* (1997) mengatakan benda uji akan ditekan sampai pada beban maksimum, beban tekan didistribusikan dengan menggunakan beban strip yang diletakkan pada permukaan lingkaran benda uji, beban tekan dilaksanakan sampai pada tingkat benda uji mengalami kegagalan.

Sedangkan Ahmedzade & Yilmaz (2008) mengatakan nilai kuat tarik tidak langsung merupakan fungsi dari beban, diameter dan ketebalan benda uji, untuk benda uji berbentuk lingkaran penuh seperti Gambar 9. Nilai ITS benda uji lingkaran penuh diperlihatkan dalam persamaan 6.

Du, 2013 mengatakan kuat tarik aspal semen mastik sangat sensitif terhadap kadar air dan memiliki hubungan dengan stabilitas pada pelaksanaan di lapangan, sehingga kadar air optimum aspal emulsi dapat diprediksi dengan nilai ITS.

Nilai ITS dapat digunakan untuk mengevaluasi kualitas relatif campuran aspal dalam hubungannya dengan pengujian desain campuran laboratorium dan untuk memperkirakan potensi terjadinya *rutting* atau retak yang dapat terjadi di lapangan selama masa layan maupun masa

pemeliharaan dari perkerasan. Hasil ini dapat juga digunakan untuk menentukan potensi untuk bidang perkerasan kerusakan akibat kelembaban ketika hasil yang diperoleh pada kedua sampel berkondisi dan dikondisikan atau sampel tanpa perendaman maupun sampel yang telah dilakukan perendaman dengan air.



Gambar 9. Diagram pembebanan uji ITS

Nilai kuat tarik tidak langsung pada benda uji berbentuk selinder merupakan fungsi dari beban (P_{max}), tebal benda uji dan diameter yang dituliskan dalam bentuk :

$$ITS = \frac{2 P}{\pi D H} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana :

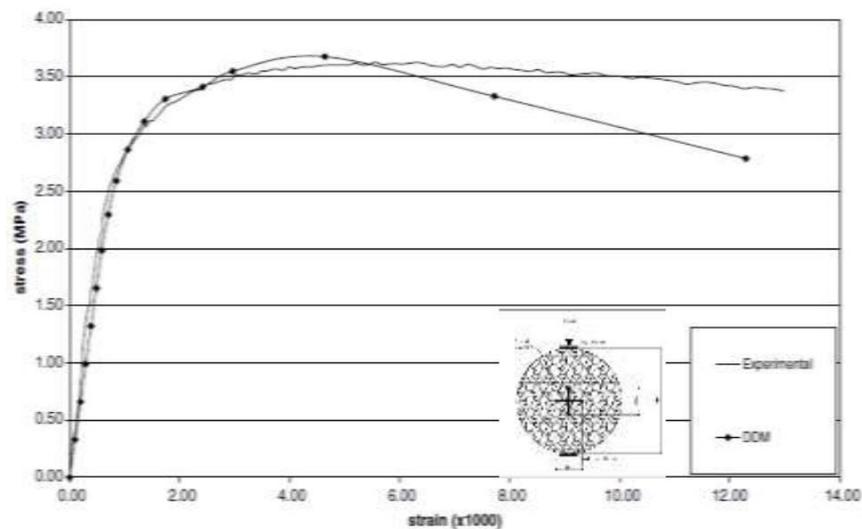
ITS = kuat tarik langsung dipusat benda uji (kN)

P_{max} = beban maksimum (kN)

t = ketebalan benda uji (mm)

d = diameter benda uji (mm)

Gambar 10 menunjukkan hubungan tegangan – regangan pada campuran aspal superpave. Terlihat bahwa tegangan maksimum sebesar 3,60 MPa pada regangan 0,006. Kurva regangan – tegangan membentuk garis lurus sampai pada tegangan 2,5 MPa dengan regangan 0,001 MPa.



Gambar 10. Hubungan regangan akibat beban tarik dan tegangan Tarik (Birgisson *et al.*, 2008)

Penelitian Wong *et al* (2004) mengatakan bahwa rasio kuat tarik tidak langsung (ITSR) dapat digunakan untuk mengetahui kerentanan kelembaban campuran aspal (Katman *et al.*, 2012). Kerusakan perkerasan fleksibel pada daerah tropis seperti di Indonesia yang disebabkan karena keretakan perkerasan yang terjadi akibat rendaman air. Campuran aspal sangat penting untuk diketahui sensitifitasnya terhadap air. Air memberikan efek atau pengaruh terhadap deformasi campuran aspal.

Semakin tinggi nilai ITS_R maka campuran aspal semakin tahan terhadap air begitupun sebaliknya campuran aspal dengan ITS_R rendah menunjukkan semakin rentang terhadap air. Kerentanan kelembaban Campuran aspal (*moisture susceptibility of asphalt mixtures*) dievaluasi dengan AASHTO T283. ITS_R lebih besar dari 0,7 lebih tahan terhadap retak (Ahmedzade *et al.*, 2007). Nilai ITS_R berada pada kisaran antara 0 – 1. Ratio kuat tarik tidak langsung dapat ditulis dalam bentuk persamaan 7.

Dimana :

$$\begin{aligned} \text{ITS}_{\text{cond}} &= \text{Nilai ITS terkondisikan atau basah (MPa)} \\ \text{ITS}_{\text{dry}} &= \text{Nilai ITS kering (MPa)} \end{aligned} \quad (7)$$

Menurut Birgisson *et al* (2008) nilai ITS campuran aspal superpave sekitar 3.60 MPa. Pada campuran aspal menggunakan *aditif poliolefin* (PE) nilai *indirect tensile strength* dapat mencapai ± 920 Kpa, aspal normal (NR) sebesar 683 kPa (Tayfur *et al.*, 2005). Peneliti yang lain mendapatkan nilai kuat tarik tidak langsung pada campuran aspal AC-10 sebesar 758 kPa dan AC-5 sebesar 489,41 kPa (Ahmadzade *et al.*, (2007).

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh (Ahmedzade & Yilmaz, 2008) dikemukakan pengaruh rendaman terhadap campuran aspal AC-10 dan didapatkan nilai ITS_{cond} sebesar 721,07 kPa dengan nilai ITS_R sebesar 0,951 sedang campuran aspal AC-5 didapatkan ITS_{cond} sebesar 452,87 kPa dengan nilai ITS_R sebesar 0,925 dan AC-10 + 0,75% PR didapat ITS_{cond} sebesar 806,84 kPa dengan ITS_R 0,955.

Gul & Guler (2014) mengatakan bahwa karakteristik deformasi permanen dari campuran aspal dapat dipelajari dengan menggunakan benda uji silinder dipadatkan yang dapat dibuat baik dari superpave atau perangkat pemadat Marshall, terlepas dari metode campuran aspal desain dan jenis agregat. Sedangkan Shu *et al* (2008) mengatakan untuk mengevaluasi karakteristik retak pada campuran aspal digunakan metode Marshall dalam mendesain campuran aspal.

G. Difraksi Sinar-X

Sinar x ditemukan pada tahun 1895 oleh fisikawan Jerman bernama Roentgen dan dinamakan 'x' disebabkan pada masa itu belum di ketahui penamaan yang cocok untuk sinar ini. Sinar-x ditemui pada panjang gelombang 10 nm sampai 100 pikometer, kondisi monokromatik untuk ($\lambda = 1 \text{ \AA}$) dapat dimanfaatkan sebagai sumber difraksi material sehingga diperoleh sifat dan jenis zat sesuai dengan pola difraksi yang diperoleh dari interaksi bahan dengan sinar x. Ada dua fakta geometrical yang perlu diingat dalam proses difraksi yakni :

- a) Peristiwa penyinaran, normal ke bidang pemantul dan sinar yang terdifraksi selalu koplanar.
- b) Sudut antara sinar yang didifraksi dan sinar yang ditransmisikan selalu beda 2θ . Ini dikenal sebagai difraksi sudut, dan sudut yang dimaksud itu bukanlah θ , yang diperoleh dari eksperimental (Ribeiro, 2004).

Hukum Bragg menyatakan bahwa peristiwa difraksi hanya dapat terjadi jika memenuhi persamaan 8.

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \dots \dots \dots (8)$$

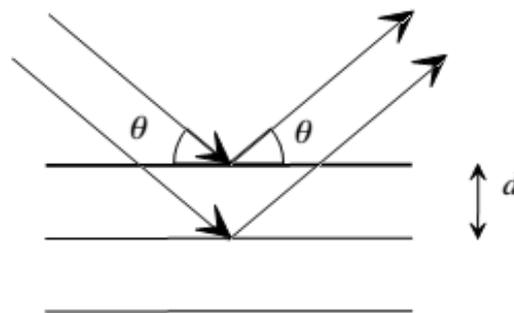
Keterangan :

n : Bilangan bulat positif

λ : Panjang gelombang dari X-Ray tergantung bahan yang digunakan
 d adalah jarak antara bidang kisi

θ : Besar sudut dari arah radiasi sinar x

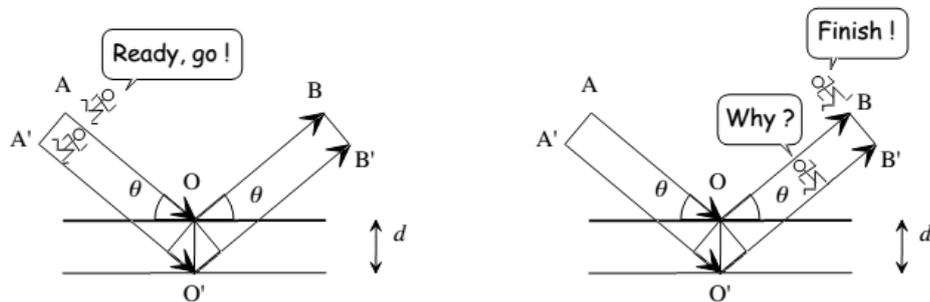
Ilustrasi dari kejadian difraksi bisa dilihat dan di pahami dari Gambar 11, Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 11. Ilustrasi asal Hukum Bragg (Mote *et al.*, 2012)

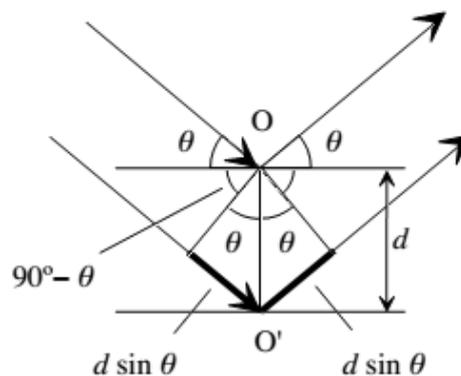
Perlu diperhatikan perbedaan garis jarak pada ilustrasi diatas yang dimana poin penting dari hukum Bragg adalah dapat di jelaskan dengan interferensi konstruktif. Ilustrasi perbedaan garis jarak akan memudahkan kita untuk memahami hukum Bragg.

Panjang satu segment (digaris tebal) harus senilai dengan $d \sin \theta$, karena bagian ini berlainan sisi dengan simpangan sudut. Lebih tepatnya sisi bagian kiri dan kanan pada perbedaan panjang gelombang dijumlahkan sehingga setara dengan d .



Gambar 12. Perbedaan perjalanan gelombang ketika merambat dari A'O'B' dengan perjalanan gelombang jika merambat AOB (Mote *et al.*, 2012)

Akan digambarkan kembali perbedaan garis jarak dengan menebalkan bagian tersebut.

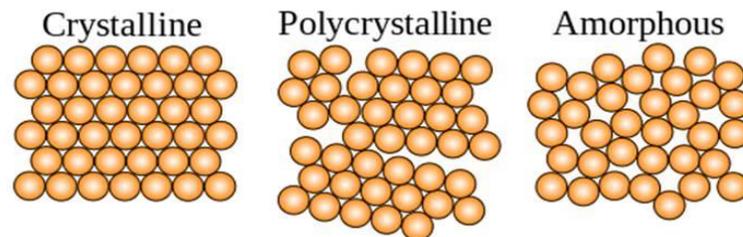


Gambar 13. Hubungan antara garis jarak, d dan θ (Mote *et al.*, 2012)

Struktur Kristal

Pengetahuan mengenai kristal ideal ditentukan oleh susunan satuan satuan struktur yang identik (hampir sama) secara berulang – ulang dengan jumlah yang tak hingga (sulit dihitung) dalam ruang. Kumpulan yang berupa atom atau molekul dan sel ini terpisah sejauh 1 \AA atau 2 \AA . Semua struktur kristal dapat digambarkan dengan istilah basis dan *lattice* (kisi), sebaliknya zat padat yang tidak memiliki keteraturan satuan struktur

identik dalam ruang disebut amorf. Gambar 14 memperlihatkan ilustrasi perbedaan keteraturan susunan atom untuk partikel padatan kristalin, polikristalin dan amorf.



Gambar 14. Ilustrasi perbedaan keteraturan susunan atom untuk partikel padatan kristalin, polikristalin dan amorf (Zak *et al.*, 2013)

Mengenal Kristal menurut "*Elementary X-Ray diffraction*" tahun 1956, secara skala nano adalah langkah wajib yang harus dilakukan para peneliti bidang material, agar nantinya tidak mengalami hambatan dalam melakukan interpretasi data serta untuk penyajian hasil pengolahan data. Struktur kristal dalam istilah mineralogi dan kristalografi merupakan susunan-susunan atom yang khas dan bersistem secara periodik berdimensi tiga. Struktur kristal yang ideal disusun secara rapi oleh unit sel dengan jumlah tertentu. Unit sel dipisahkan oleh kisi dengan jarak tertentu, ini berarti unit sel (spatial atom) akan semakin kecil jika kisi memiliki ukuran yang kecil pula. Zat padat memiliki 2 kategori dasar jika dipandang dari sisi susunan atomnya, yakni kristal dan amorf. Amorf merupakan struktur yang tidak memiliki arah yang konsisten (tidak menentu) sehingga panjang dan sudut ikatannya tidak teratur.

Penyimpangan struktural adalah hal dasar yang menyebabkan suatu material memiliki kondisi bersifat amorf (*amorphous*). Adapun material yang memiliki susunan atom yang baik akan tetapi strukur yang terbentuk lebih dari satu, sehingga memiliki orientasi yang lebih dari satu kondisi material yang seperti ini disebut polikristal. Contoh unsur berstruktur kristal yakni S, Fe, Li, Zn, Cl dll, contoh unsur komposit (senyawa) berstruktur polikristal antara lain NaCl (garam), SiO₂ (quartz), pirit (FeS), gula (C₂H₁₂O₆) dan lain-lain, contoh padatan amorf antara lain karbon amorf adsorben dan silika gel adsorben.