



DISERTASI - RC186601

**POTENSI PENGGUNAAN AGREGAT BUATAN  
BERBAHAN LIMBAH BATU BARA DALAM  
CAMPURAN ASPAL BETON UNTUK MENGURANGI  
*RUBBER DEPOSIT* PADA PERMUKAAN *RUNWAY***

I DEWA MADE ALIT KARYAWAN  
NRP.03111660010003

DOSEN PEMBIMBING

Ir. Ervina Ahyudanari, M.E., Ph.D

Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.

Iswandaru Widyatmoko, S.T., M.Sc, Ph.D, C.Eng. FCIHT, FIAT

PROGRAM DOKTOR

BIDANG KEAHLIAN MANAJEMEN DAN REKAYASA TRANSPORTASI

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2020



Disertasi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar

**Doktor (Dr.)**

di

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

oleh :

**I Dewa Made Alit Karyawan**

NRP. 03111660010003

Tanggal Ujian : 3 Pebruari 2020

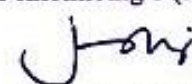
Periode Wisuda : Maret 2020

Disetujui oleh:


1. **Ir. Ervina Ahyudanari, M.E., Ph.D.**  
NIP. 19690224 199512 2 001

  
.....  
Pembimbing 1 (Promotor)


2. **Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.**  
NIP. 19740112 200501 2 001

  
.....  
Pembimbing 2 (Co-Promotor 1)


3. **Iswandaru Widyatmoko, S.T., M.Sc., Ph.D.,  
C. Eng. FCIHT, FIAT.**

  
.....  
Pembimbing 3 (Co-Promotor 2)

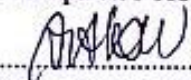
4. **Prof. Dr. Ir. Triwulan, D.E.A.**  
NIP. 19530408 197603 1 002

  
.....  
Penguji Internal (Departemen  
Teknik Sipil FTSP ITS)

5. **Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc.**  
NIP. 19710915 199412 1 001

  
.....  
Penguji Internal ITS (Dep. Teknik  
Sistem Perkapalan FTK ITS)

6. **Prof. Ir. I Nyoman Arya Thanaya, M.E., Ph.D.**  
NIP. 19601108 198803 1 002

  
.....  
Penguji Eksternal (Jurusan Teknik  
Sipil Fakultas Teknik Unud)

  
Kepala Departemen Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan  
**Dr. techn. Umboro Lasminto, S.T., M.Sc.**  
NIP : 19721202 199802 1 001



# **POTENSI PENGGUNAAN AGREGAT BUATAN BERBAHAN LIMBAH BATU BARA DALAM CAMPURAN ASPAL BETON UNTUK MENGURANGI *RUBBER DEPOSIT* PADA PERMUKAAN *RUNWAY***

Nama Mahasiswa : I Dewa Made Alit Karyawan  
NRP : 03111660010003  
Promotor : Ir. Ervina Ahyudanari, M.E., Ph.D  
Co-Promotor 1 : Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.  
Co-Promotor 2 : Iswandaru Widyatmoko, S.T., M.Sc, Ph.D,  
C.Eng FCIHT, FIAT

## **ABSTRAK**

*Fly ash* adalah limbah dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang berbahan bakar batubara. Setiap tahun dihasilkan sekitar 1.037.176 ton limbah *fly ash*. Limbah ini tergolong berbahaya, sehingga akumulasinya mempunyai potensi merusak lingkungan. Pemanfaatan *fly ash* sebagai beton dapat mengurangi sifat bahan berbahaya yang terkandung di dalamnya. Beton hasil proses solidifikasi *fly ash* melalui proses geopolimerisasi dikenal dengan nama beton geopolimer. Keberhasilan pengelolaan *fly ash* ini, kemudian dikembangkan menjadi agregat buatan. Sifat agregat buatan dari *fly ash* ini memungkinkan untuk digunakan dalam campuran aspal beton. Penggunaan agregat buatan yang dicampur dengan agregat natural ini dapat mengurangi gerusan karet ban pesawat. Di sisi lain, pembersihan penumpukan karet tersebut akan berakibat pada kerusakan permukaan aspal beton. Tujuan penelitian adalah mengetahui potensi penggunaan agregat buatan berbahan limbah batubara melalui rekayasa campuran aspal beton untuk mengurangi *rubber deposit* permukaan *runway*.

Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dengan membuat dan melakukan karakterisasi agregat buatan, observasi pada penerapan gradasi rapat (FAA) dan gradasi terbuka (BBA) termasuk analisis komposisi campuran antara agregat buatan dengan agregat natural dan observasi karakteristik permukaan aspal beton. Pengujian yang dilakukan meliputi uji *Marshall* dan *wheel track* (uji karakteristik mekanik campuran), serta *sand patch* (pengukuran tekstur permukaan) dan *British pendulum* (pengukuran *skid resistance*).

Berdasarkan hasil uji *Marshall*, stabilitas BBA lebih besar dari pada FAA. Penambahan 25% agregat buatan, meningkatkan stabilitas 6% untuk FAA, namun terjadi penurunan 3% untuk BBA. Penggunaan 25% agregat buatan dalam campuran aspal beton pada BBA berpotensi menurunkan 2,1% penumpukan *rubber deposit* dibandingkan dengan FAA tanpa agregat buatan. Penggunaan agregat buatan dari *fly ash* ini, berpotensi mengurangi 23 kg *fly ash*/m<sup>2</sup> lapisan permukaan atau sekitar 1.876 ton untuk *runway* sebuah bandara.

Kata kunci: agregat buatan, aspal beton, *rubber deposit*, *skid resistance*, *tekstur permukaan*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **POTENTIAL USE ARTIFICIAL AGGREGATE WITH COAL WASTE IN ASPHALT CONCRETE MIXED TO REDUCE RUBBER DEPOSIT ON RUNWAY SURFACE**

Student Name : I Dewa Made Alit Karyawan  
Student ID : 03111660010003  
Promotor : Ir. Ervina Ahyudanari, M.E., Ph.D  
Co-Promotor 1 : Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.  
Co-Promotor 2 : Iswandaru Widyatmoko, S.T., M.Sc, Ph.D,  
C.Eng FCIHT, FIAT

## **ABSTRACT**

Fly ash is a waste of steam power plant (PLTU). Every year, PLTU produces 1,037,176 tons of fly ash. Fly ash is classified as hazardous waste, thus the accumulation has the potential to pollute the environment. The use of fly ash as concrete can reduce the nature of hazardous materials contained. Concrete produced from fly ash solidification through the geopolymerization process is known as geopolymer concrete. The success of fly ash processing is then developed into an artificial aggregate. The nature of artificial aggregate from fly ash allows it to be used in concrete asphalt mixtures. Artificial aggregate mixed with natural aggregate as a mixture of concrete asphalt can reduce the scouring of rubber tires in aircraft. On the other hand, cleaning the rubber deposit will result in damage to the surface of concrete asphalt. The research aims to determine the potential use of artificial aggregate made from coal waste through a mixture of concrete asphalt engineering to reduce rubber deposits on the runway surface.

The research was carried out on a laboratory scale by making and characterizing artificial aggregates, observations on the application of dense grading (FAA), and open grading (BBA), including analysis of mixture composition between artificial aggregates with natural aggregates and observations on the characteristics of the concrete asphalt surface. Tests carried out included the Marshall test and wheel track (a test of mixed mechanical characteristics), Sand Patch (the measurement of surface texture), and British pendulum (the measurement of skid resistance).

Based on the Marshall test results, BBA stability was greater than FAA stability. The addition of 25% artificial aggregates increased 6% stability of the FAA, but there was a 3% decrease in BBA. The use of 25% artificial aggregate in asphalt concrete mix on BBA had the potential to reduce 2.1% rubber deposits compared to the FAA without artificial aggregates. The use of artificial aggregates made from fly ash had the potential to reduce 23 kg of fly ash/m<sup>2</sup> of the surface layer or approximately 1,876 tons for an airport runway.

Keywords: artificial aggregate, asphalt concrete, rubber deposit, skid resistance, surface texture

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## KATA PENGANTAR

Puji syukur, *angayubagia* penulis haturkan kehadiran *Ida Sang Hyang Widhi Wasa*, atas berkat-Nya, maka disertasi dengan berbagai kekurangan dan keterbatasan ini dapat diselesaikan. Penelitian disertasi dengan topik “Potensi Penggunaan Agregat Buatan Berbahan Limbah Batu Bara dalam Campuran Aspal Beton untuk Mengurangi *Rubber Deposit* pada Permukaan *Runway*”, mencoba mengurangi permasalahan terkait limbah batubara berupa *fly ash* dan penumpukan karet roda pesawat pada *runway*. Langkah yang ditempuh adalah dengan memanfaatkan *fly ash* sebagai agregat buatan untuk bahan campuran aspal beton lapis permukaan *runway*. Penggunaan agregat buatan berbahan *fly ash* yang dicampur dengan agregat natural sebagai campuran aspal beton untuk mengurangi ketebalan *rubber deposit* pada permukaan *runway*, merupakan hal yang baru dalam riset ini.

Disertasi ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh derajat Doktor pada Program Studi Pascasarjana, Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, disamping persyaratan lain yang tak terpisahkan yakni publikasi artikel pada jurnal internasional terindeks (*Scopus*) dan seminar internasional bereputasi. Mengingat bahwa, penyusunan naskah disertasi ini telah melibatkan berbagai pihak, maka dengan penuh rasa hormat penuliskan menghaturkan penghargaan dan terima kasih yang setinggi-tingginya kepada:

1. Ibu **Ervina Ahyudanari, M.E., Ph.D.**, Promotor, Pembimbing yang selalu dapat memberikan waktu ditengah kesibukan yang padat, dengan sambutan, motivasi, arahan dan bimbingan yang penuh kesejukan dalam berbagai kesempatan, membangkitkan semangat dan inspirasi dalam kegalauan, keraguan, ketidakpastian dan kegelapan, hingga perlahan menemukan titik terang, penulis menghaturkan penghormatan yang setinggi-tingginya
2. Ibu **Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, S.T., M.T.**, Co-Promotor, Pembimbing yang memberikan pelayanan dengan waktu yang tidak terbatas, menularkan semangat dengan memberikan petunjuk-petunjuk yang inspiratif, dengan sabar selalu menyisipkan pesan motivasi yang mampu menyibak kegelapan dan menepis kegalauan, keraguan dan ketidakpastian, sehingga perlahan titik terang itu tampak, penulis menghaturkan penghormatan yang setinggi-tingginya
3. Bapak **Iswandaru Widyatmoko, S.T., M.Sc, Ph.D., C.Eng. FCIHT, FIAT**, Co-Promotor, Pembimbing dengan komitmen tinggi dalam kesibukan yang super padat, mendukung dalam kelancaran penelitian, selalu memberikan masukan, arahan dan solusi permasalahan yang ditemui. Menuntun dan memberikan cahaya dalam setiap langkah menyusuri kegelapan, hingga sampai pada tujuan, penulis menghaturkan penghormatan yang setinggi-tingginya
4. Ibu **Prof. Dr. Ir. Triwulan, D.E.A.**, Penguji Internal ITS dari Departemen Teknik Sipil, Guru Besar senior yang telah memberikan berbagai petunjuk, saran, koreksi yang sangat teliti untuk perbaikan format maupun isi tulisan ini, penulis menghaturkan penghormatan yang setinggi-tingginya

5. Bapak **Prof. Dr. Ketut Buda Artana, S.T., M.Sc.**, Penguji Internal ITS, Guru Besar berprestasi dari Departemen Teknik Sistem Perkapalan. Selalu memberikan semangat, motivasi, masukan dan koreksi dalam perbaikan tulisan ini, penulis menghaturkan penghormatan yang setinggi-tingginya
6. Bapak **Prof. Ir. I Nyoman Arya Thanaya, M.E., Ph.D.**, Penguji Eksternal dari Universitas Udayana Denpasar (Guru Besar pada Jurusan Teknik Sipil UNUD), dengan siraman ilmu yang pernah penulis dapatkan saat studi S1, terima kasih yang sebesar-besarnya atas kesabarannya memberikan berbagai petunjuk, saran, koreksi dan nasehat di berbagai pertemuan yang direncanakan maupun yang tidak disengaja, telah membangkitkan semangat penulis, penulis menghaturkan penghormatan yang setinggi-tingginya
7. Bapak **Prof. Ir. Indra Surya B. Mochtar, M.Sc, Ph.D.**, Ibu **Ir. Hera Widyastuti, M.T., Ph.D.**, Bapak **Dr. Catur Arif Prastyanto, S.T., M.Eng.**, atas semua saran dan masukan pada Ujian Kelayakan Proposal dan Ujian Kelayakan Disertasi, sehingga naskah disertasi ini menjadi lebih bernilai dalam keterbatasannya.
8. Bapak **Ir. I Putu Artama Wiguna, M.T., Ph.D** dan segenap pengelola Program Pascasarjana Teknik Sipil ITS atas berbagai pelayanan dalam menempuh Program Doktor di Jurusan Teknik Sipil ITS

Selanjutnya penulis juga menghaturkan terima kasih kepada:

1. Rektor Universitas Mataram atas rekomendasi Tugas Belajar dan Beasiswa BUDI-DN dari Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP).
2. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) atas seluruh biaya selama studi S3 di ITS, melalui Beasiswa Unggulan Dosen Indonesia Dalam Negeri (BUDI-DN).
3. Dekan Fakultas Teknik, Ketua Jurusan Teknik Sipil, segenap Dosen Jurusan Teknik Sipil Universitas Mataram, atas motivasi dan dukungannya.
4. Kepala dan segenap teknisi Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR di Bandung, atas bantuannya dalam melakukan pengujian campuran aspal beton dalam penelitian ini.
5. Kepala dan Teknisi Laboratorium di Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) yang telah banyak membantu dalam proses pengambilan data penelitian.

Terima kasih yang setulus-tulusnya penulis haturkan kepada:

1. Keluarga **DAMANDALU**-Mataram yang *Ajik* banggakan, cintai dan sayangi: **Ni Ketut Eli Kristina Dewi, S.Ag.** (istri), dan anak-anakku : 1) **Desak Gede Meita Purnama Dewi, S.H, S.Pd**; 2) **dr. Desak Made Dinda Kartika Utari**; 3) **Desak Nyoman Febrina Ambara Puspita**; 4) **I Dewa Gede Dirgayusa Wicaksana**; 5) **I Dewa Made Krisnayana Wicaksana**), atas segala dukungan, motivasi dan kesabarannya.

2. Keluarga besar di Bali khususnya **KAM-family** dan keluarga besar di Surabaya atas semua dukungan dan motivasinya.
3. Spesial *best friend* SMASTA 85 Jatim domisili Surabaya, pelipur lara dan “tukang kompor” penyemangat untuk segera menuntaskan studi di ITS.
4. Rekan seperjuangan di Program S2 dan S3 Pascasarjana ITS, sahabat, handai taulan dan berbagai pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari sepenuhnya, dengan berbagai keterbatasan, tulisan dalam disertasi ini masih jauh dari sempurna, namun demikian, betapapun kecil nilainya semoga memberikan sumbangan yang berharga bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Surabaya, Pebruari 2020  
Penulis,

**I Dewa Made Alit Karyawan**  
NRP. 03111660010003

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	I
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	8
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian.....	11
1.4 Batasan Penelitian.....	12
1.5 Hipotesa .....	12
1.6 Kontribusi dan Orisinalitas Penelitian.....	13
1.7 Luaran Penelitian .....	17
1.8 Organisasi Penulisan .....	18
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	21
2.1 Skope Kajian Pustaka dan Dasar Teori dalam Penelitian ini.....	21
2.2 Perkerasan Bandara .....	21
2.2.1 Kebutuhan Perkerasan pada Sisi Udara Bandara .....	21
2.2.2 Lapisan Perkerasan .....	22
2.2.3 Jenis Perkerasan untuk Bandara.....	24
2.3 Karakteristik Permukaan Perkerasan Bandara.....	26
2.3.1 Tekstur Permukaan.....	26
2.3.2 <i>Skid Resistance</i> .....	29
2.3.3 Hubungan <i>Rubber Deposit</i> terhadap <i>Skid Resistance</i> dan Tekstur .....	32
2.3.4 Deformasi Permukaan .....	38

2.4	Campuran Perkerasan Aspal untuk Bandara.....	39
2.4.1	Persyaratan Agregat sebagai Bahan Campuran Aspal.....	39
2.4.2	Agregat Natural.....	40
2.4.3	Agregat Buatan .....	42
2.4.4	Gradasi Agregat.....	44
2.4.5	Campuran Aspal .....	48
2.4.5.1	Aspal Sebagai Bahan Pengikat Campuran.....	49
2.4.5.2	Perencanaan Campuran Aspal.....	50
2.4.5.3	Pengujian-pengujian Campuran Aspal Beton dengan Metode <i>Marshall</i> .....	54
2.5	Geopolimer.....	59
2.5.1	Mekanisme Pengikatan Geopolimer (Geopolimerisasi) .....	62
2.5.2	Geopolimer <i>Fly Ash</i> .....	63
2.5.3	Agregat Buatan Geopolimer Berbahan Dasar <i>Fly Ash</i> .....	65
BAB 3 METODE PENELITIAN.....		71
3.1	Kerangka Konseptual Penelitian.....	71
3.2	Langkah Penyelesaian Masalah dan Pencapaian Tujuan Penelitian...	75
3.3	Rancangan Eksperimen.....	75
3.3.1.	Properties Agregat Buatan dan Agregat Natural.....	78
3.3.2.	Properties campuran aspal ( <i>Marshall</i> ).....	81
3.3.3.	Kebutuhan Agregat untuk Sampel <i>Slab</i> .....	83
3.4	Detail Tahapan Penelitian.....	85
3.4.1	Fase Agregat.....	85
3.4.1.1	Proses Pembuatan Agregat Buatan .....	86
3.4.1.2	Pengujian Agregat Buatan. ....	91
3.4.1.3	Pembahasan Hasil Analisis Pengujian Agregat.....	93
3.4.2	Fase Gradasi Agregat.....	93
3.4.2.1	Penyusunan Gradasi Agregat .....	93
3.4.2.2	Analisis Gradasi Agregat.....	98
3.4.2.3	Pembahasan untuk Menentukan Proporsi Agregat Buatan .....	99

3.4.3 Fase Campuran Aspal Beton.....	99
3.4.3.1 Pengujian Properties Campuran Aspal Beton .....	99
3.4.3.2 Analisis Properties Campuran Aspal Beton .....	110
3.4.3.3 Pembahasan tentang Properties dan Karakteristik Permukaan Campuran Aspal Menggunakan Agregat Buatan.....	112
3.4.4 Hubungan Tekstur dan <i>Skid Resistance</i> terhadap <i>Rubber Deposit</i> .....	113
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>115</b>
4.1 Pengantar : Pelaksanaan Penelitian, Analisis Hasil dan Pembahasan.	115
4.2 Properties Agregat.....	117
4.2.1 Agregat Natural.....	117
4.2.2 Agregat Buatan.....	117
4.2.2.1 <i>Fly Ash</i> .....	118
4.2.2.2 Alkali Aktivator.....	119
4.2.2.3 Komposisi Campuran .....	120
4.2.2.4 Proses Pembuatan dan Pengujian.....	121
4.2.2.5 Hasil Pembuatan dan Pengujian Agregat .....	123
4.2.2.6 Mikrostruktur Agregat Buatan.....	131
4.2.3 Properties Agregat Buatan sebagai Bahan Campuran Aspal....	134
4.3 Gradasi dan Proporsi Penggunaan Agregat untuk Campuran Aspal Beton.....	138
4.3.1 Data Material Campuran Aspal Beton.....	138
4.3.2 Penentuan Proporsi Agregat Buatan dan Natural dalam Campuran .....	142
4.3.3 Gradasi untuk Campuran Aspal Beton .....	148
4.3.4 Gradasi dan Proporsi Agregat Buatan dan Agregat Natural yang Digunakan .....	148
4.4 Properties Campuran Aspal Beton dengan Agregat Buatan.....	149

4.4.1	Karakteristik Campuran Aspal Beton Metode <i>Marshall</i> .....	150
4.4.1.1	Pembuatan dan Pengujian Sampel .....	150
4.4.1.2	Karakteristik Campuran Aspal Beton dengan Agregat Kasar Buatan.....	150
4.4.2	Karakteristik Campuran Aspal Beton dengan Uji <i>Wheel Track</i>	160
4.4.2.1	Pembuatan dan Pengujian Sampel .....	160
4.4.2.2	Analisis Data dan Interpretasi Hasil Pengujian <i>Wheel Track</i> .....	162
4.4.3	Properties Aspal Beton dengan Agregat Buatan dan Variasi Gradasi .....	165
4.5	Karakteristik Permukaan Perkerasan Aspal Beton dengan Agregat Buatan.....	166
4.5.1	Pengukuran Data Tekstur dan <i>Skid Resistance</i> Permukaan.....	167
4.5.2	Hasil Pengukuran Tekstur dan <i>Skid Resistance</i> .....	170
4.5.3	Analisis Hubungan Tekstur dengan <i>Skid resistance</i> Permukaan Aspal Beton Menggunakan Agregat Buatan.....	172
4.6	Kemampuan Variasi Campuran Aspal Beton Menekan <i>Rubber Deposit</i> .....	175
4.6.1	Kecenderungan Hubungan <i>Skid resistance</i> dan Tekstur terhadap <i>Rubber deposit</i> .....	175
4.6.2	Verifikasi Pengujian Skala Laboratorium dengan Skala Lapangan.....	179
4.6.2.1	Analisis Akumulasi Ketebalan <i>Rubber Deposit</i> .....	179
4.6.2.2	Verifikasi Hubungan Terhadap Kondisi Real di Lapangan.....	187
4.6.3	Analisis Variasi Campuran terhadap Jumlah <i>Rubber Deposit</i> .....	191
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....		197
5.1	Kesimpulan.....	197
5.2	Saran.....	198
DAFTAR PUSTAKA.....		199
LAMPIRAN		
BIOGRAFI PENULIS		



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Lokasi dan Besaran Daya Listrik yang dihasilkan .....	1
Gambar 1.2	Endapan Karet dan Proses Pembersihan .....	5
Gambar 1.3	Tekstur dan Karakteristik Permukaan .....	7
Gambar 1.4	Gap Analisis .....	9
Gambar 1.5	Hasil Penelitian yang Relevan dan Posisi Penelitian yang Diusulkan .....	16
Gambar 2.1	Bagian-bagian Sisi Udara Bandara .....	22
Gambar 2.2	Tipe Struktur Perkerasan .....	23
Gambar 2.3	Tipikal Struktur Perkerasan Lentur dan Kaku .....	25
Gambar 2.4	Makrotekstur, Mikrotekstur dan Kedalaman Tekstur Rata- rata (MTD) .....	27
Gambar 2.5	Jenis Tekstur Permukaan Perkerasan .....	27
Gambar 2.6	Prosedur Pengujian <i>Sand Patch Method</i> .....	29
Gambar 2.7	Hubungan Tekstur dengan <i>Skid Resistance</i> .....	33
Gambar 2.8	Hubungan Terbentuknya Endapan Karet dengan Waktu .....	34
Gambar 2.9	Hubungan <i>Skid resistance</i> dengan Waktu .....	35
Gambar 2.10	Grafik Gradasi Terbuka, Rapat, Senjang dan Seragam.....	47
Gambar 2.11	Penentuan Kadar Aspal Rencana .....	52
Gambar 2.12	Diagram Alir Pengujian <i>Marshall</i> .....	55
Gambar 2.13	Skema Volume Beton aspal .....	58
Gambar 2.14	Ilustrasi Berat Jenis <i>Bulk</i> , Efektif, Apparent dan VIM, serta Kadar Aspal Efektif .....	58
Gambar 2.15	Sistem Ikatan Geopolimer berdasarkan Unit Siloxo Si-Al-O .....	60
Gambar 2.16	Reaksi Geopolimerisasi dari Geopolimer .....	63
Gambar 2.17	Mekanisme Reaksi Geopolimer berbasis <i>Fly Ash</i> .....	64
Gambar 3.1	Kerangka Konseptual .....	71
Gambar 3.2	Fase Eksperimen dan Pengambilan Keputusan .....	74
Gambar 3.3	Rancangan Eksperimen .....	77

Gambar 3.4	Pan Granulator untuk Membuat Agregat .....	78
Gambar 3.5	Bahan untuk Membuat Agregat .....	78
Gambar 3.6	Prosedur Pembuatan Agregat dan Pengujian Properties Agregat .....	87
Gambar 3.7	Rancangan Komposisi Gradasi .....	94
Gambar 3.8	Peralatan untuk Penyusunan Gradasi Agregat .....	94
Gambar 3.9	Prosedur Pembuatan Gradasi Agregat Gabungan .....	96
Gambar 3.10	Gradasi Agregat Natural, Buatan dan Gabungan, Proporsi 75%:25% .....	98
Gambar 3.11	Urutan Pelaksanaan Eksperimen Pengujian Properties Campuran Aspal Metode <i>Marshall</i> .....	100
Gambar 3.12	Macam-macam Pengujian Aspal .....	101
Gambar 3.13	Perangkat Peralatan Uji <i>Marshall</i> .....	102
Gambar 3.14	Proses Pelaksanaan Eksperimen Properties Campuran Aspal .....	105
Gambar 3.15	Peralatan Uji Properties Campuran Aspal dengan Sampel <i>Slab</i> .....	106
Gambar 3.16	Pengukuran Tekstur dengan <i>Sand Patch Method</i> .....	108
Gambar 4.1	Sistematika Analisis dan Pembahasan untuk Mencapai Tujuan Penelitian .....	116
Gambar 4.2	Kondisi Asli dan Visualisasi Mikrostruktur <i>Fly ash</i> Suralaya .....	119
Gambar 4.3	Sodium Silikat dan Larutan Sodium Hidroksida 8 M dari Flaks yang Dilarutkan dengan Aquades .....	120
Gambar 4.4	Granulator untuk Pembuatan Agregat .....	122
Gambar 4.5	Agregat Buatan Berdasarkan Variasi Kemiringan Granulator .....	124
Gambar 4.6	Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Berdasarkan Beda Kemiringan Granulator .....	125
Gambar 4.7	Hasil Pengujian Ketahanan dan Keausan Berdasarkan Beda Kemiringan Granulator .....	126

Gambar 4.8	Hasil Pengujian Kelekatan Agregat terhadap Aspal Berdasarkan Beda Kemiringan Granulator .....	127
Gambar 4.9	Agregat Buatan dengan Rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ .....	127
Gambar 4.10	Hasil Uji Penyerapan Air/ <i>Absorption</i> Agregat Buatan dan Spesifikasinya .....	129
Gambar 4.11	Hasil Uji Keausan/ <i>Hardness</i> Agregat Buatan dan Spesifikasinya .....	130
Gambar 4.12	Hasil Uji Ketahanan/ <i>Durability</i> Agregat Buatan dan Spesifikasinya .....	130
Gambar. 4.13	Hasil Uji Kekuatan/ <i>Strength</i> Agregat Buatan dan Spesifikasinya .....	131
Gambar 4.14	Hasil SEM Agregat Buatan Geopolimer dengan Rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$ .....	132
Gambar 4.15	Hasil SEM Agregat Buatan Geopolimer dengan Rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2,0$ .....	133
Gambar 4.16	Hasil SEM Agregat Buatan Geopolimer dengan Rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$ .....	133
Gambar 4.17	Hasil SEM Agregat Buatan Geopolimer dengan Rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 3,0$ .....	134
Gambar 4.18	Properties Agregat Geopolimer <i>Fly Ash</i> dengan Variasi Kemiringan .....	135
Gambar 4.19	Hasil Uji Properti Agregat Buatan Geopolimer <i>Fly Ash</i> dengan Variasi $\text{Na}_2\text{SiO}_3/ \text{NaOH}$ .....	136
Gambar 4.20	Nilai Stabilitas Variasi Campuran Hasil Uji <i>Marshall</i> .....	143
Gambar 4.21	Nilai <i>Flow</i> Variasi Campuran Hasil Uji <i>Marshall</i> .....	144
Gambar 4.22	Nilai <i>Marshall Quotien</i> Variasi Campuran Hasil Uji <i>Marshall</i> .....	145
Gambar 4.23	Nilai VMA Variasi Campuran Hasil Uji <i>Marshall</i> .....	146
Gambar 4.24	Nilai VIM Variasi Campuran Hasil Uji <i>Marshall</i> .....	146
Gambar 4.25	Nilai VFB Variasi Campuran Hasil Uji <i>Marshall</i> .....	147
Gambar 4.26	Kurva Gradasi Campuran Aspal Beton yang Digunakan .....	148

Gambar 4.27	Hubungan Properties Mekanik Dengan Kadar Aspal dengan Uji <i>Marshall</i> .....	152
Gambar 4.28	Hubungan Properties Mekanik dengan Kadar Aspal dengan Uji <i>Marshall</i> .....	153
Gambar 4.29	Kadar Aspal Optimum Berdasarkan Batas-Batas Sepesifikasi .....	154
Gambar 4.30	Nilai Stabilitas Gradasi Rapat dan Terbuka dengan dan Tanpa Agregat Buatan .....	155
Gambar 4.31	Nilai <i>Flow</i> Gradasi Rapat dan Terbuka dengan dan Tanpa Agregat Buatan .....	156
Gambar 4.32	Nilai MQ Gradasi Rapat dan Terbuka dengan dan Tanpa Agregat Buatan .....	157
Gambar 4.33	Nilai VIM Gradasi Rapat dan Terbuka dengan dan Tanpa Agregat Buatan .....	158
Gambar 4.34	Nilai VMA Gradasi Rapat dan Terbuka dengan dan Tanpa Agregat Buatan .....	159
Gambar 4.35	Nilai VFB Gradasi Rapat dan Terbuka dengan dan Tanpa Agregat Buatan .....	160
Gambar 4.36	Pembuatan dan Pengujian Sampel Campuran Aspal Beton ....	161
Gambar 4.37	<i>Displacement</i> dan Stabilitas Dinamis Gradasi FAA 25%AB:75%AN .....	162
Gambar 4.38	<i>Displacement</i> dan Stabilitas Dinamis Gradasi BBA 25%AB:75%AN .....	163
Gambar 4.39	<i>Displacement</i> dan Stabilitas Dinamis Gradasi FAA 0%AB:100%AN .....	163
Gambar 4.40	<i>Displacement</i> dan Stabilitas Dinamis Gradasi BBA 0%AB:100%AN .....	163
Gambar 4.41	Perbandingan Nilai <i>Displacement</i> , Stabilitas Dinamis dan Kecepatan Penurunan untuk Seluruh Variasi .....	164
Gambar 4.42.	Sampel <i>Slab</i> untuk Pengujian Tekstur dan <i>Skid resistance</i> .....	167
Gambar 4.43	Pengujian Tekstur dengan Metode <i>Sand Patch Post Tracking</i> .....	168

Gambar 4.44	Pengujian Tekstur dengan Metode <i>Sand Patch Pre Tracking</i> .....	169
Gambar 4.45	Persiapan Alat dan Sampel Uji <i>British Pendulum Tester</i> .....	169
Gambar 4.46	Pengujian <i>Skid resistance</i> dengan <i>British Pendulum Tester</i> ..	170
Gambar 4.47	<i>Skid resistance</i> Awal dan Akhir (BPN) Setiap Variasi Campuran .....	171
Gambar 4.48	<i>Skid resistance</i> Awal dan Akhir (GN) Setiap Variasi Campuran .....	171
Gambar 4.49	MTD Awal dan Akhir (mm) untuk Setiap Variasi Campuran .....	172
Gambar 4.50	<i>Skid resistance</i> (GN) dan Tekstur pada Luar Lintasan .....	173
Gambar 4.51	<i>Skid resistance</i> (GN) dan Tekstur pada Alur Lintasan .....	173
Gambar 4.52	Hubungan <i>Skid resistance</i> dan <i>Rubber deposit</i> , Hasil Analisis Berdasarkan Data Penelitian (Joubert dkk., 2004) ...	176
Gambar 4.53	Hubungan Tekstur dan <i>Rubber deposit</i> , Hasil Analisis Berdasarkan Data Penelitian (Joubert dkk., 2004) dan (Yager dkk., 1990) .....	178
Gambar 4.54	Panjang Pendaratan .....	182
Gambar 4.55	Area <i>overlapping</i> lintasan roda .....	186
Gambar 4.56	Hasil Pengukuran <i>Skid resistance</i> dengan MU Meter 6 m Sebelah Kiri <i>Center line</i> dari R10–R28 Bandara Internasional Juanda.....	188
Gambar 4.57	Hasil Pengukuran <i>Skid resistance</i> dengan MU Meter 3 m Sebelah Kiri <i>Center line</i> dari R10–R28 Bandara Internasional Juanda.....	189
Gambar 4.58	Deviasi <i>Skid resistance</i> dan Tekstur Pra-Pasca <i>Tracking</i> .....	193

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Daftar PLTU yang Menggunakan Bahan Bakar Batubara .....	2
Tabel 1.2	Penelitian Berkaitan dengan Tekstur, <i>Skid Resistance</i> dan <i>Rubber Deposit</i> .....	14
Tabel 2.1	Perbedaan Perkerasan Jalan Raya dan Lapangan Terbang .....	25
Tabel 2.2	Hubungan Antara Nilai <i>Skid Resistance</i> Permukaan (SFC) dengan Resiko Kecelakaan .....	30
Tabel 2.3	Nilai <i>Skid Resistance</i> untuk Masing-masing Bentuk Agregat ....	31
Tabel 2.4	Ringkasan Hasil Penelitian <i>Rubber Deposit</i> .....	36
Tabel 2.5	Jadwal Pembersihan Endapan Karet ( <i>Rubber Removal</i> ) .....	37
Tabel 2.6	Persyaratan Properties Agregat untuk Bahan Campuran Aspal ..	40
Tabel 2.7	Variasi Sumber Bahan, Pengikat dan Metode Pembuatan Agregat .....	45
Tabel 2.8	Susunan Gradasi Agregat dari Berbagai Lembaga dan Organisasi .....	47
Tabel 2.9	Persyaratan Aspal Keras Pen 60 .....	50
Tabel 2.10	Kriteria Perencanaan untuk Pengujian <i>Marshall</i> .....	53
Tabel 2.11	Metode Karakterisasi terhadap Sifat-Sifat Fisis Mekanis Geopolimer .....	61
Tabel 2.12	Sifat Agregat Buatan dan Agregat Natural .....	66
Tabel 3.1	Rancangan Pelaksanaan Penelitian .....	73
Tabel 3.2	Langkah Penyelesaian Masalah dan Pencapaian Tujuan Penelitian.....	75
Tabel 3.3	Jumlah Kebutuhan Agregat Buatan dan Natural untuk Sampel ..	79
Tabel 3.4	Gradasi agregat yang digunakan dalam penelitian .....	80
Tabel 3.5	Kebutuhan agregat untuk sampel uji <i>Marshall</i> dengan gradasi rapat .....	82
Tabel 3.6	Kebutuhan agregat untuk sampel uji <i>Marshall</i> dengan gradasi terbuka .....	82

Tabel 3.7	Kebutuhan agregat untuk sampel <i>slab wheel track</i> dengan gradasi rapat .....	84
Tabel 3.8	Kebutuhan agregat untuk sampel <i>slab wheel track</i> dengan gradasi terbuka .....	84
Tabel 3.9	Pengujian properties agregat dan standar yang digunakan .....	90
Tabel 3.10	Jumlah Agregat yang Dibutuhkan untuk Tiap Ukuran Saringan .....	97
Tabel 3.11	Kebutuhan Agregat Natural dan Agregat Buatan Tiap Sampel ..	97
Tabel 3.12	Tabel Uji Kekesatan Permukaan dengan Alat <i>British Pendulum Tester</i> .....	111
Tabel 4.1	Ringkasan Hasil Analisis Data Pengujian Agregat Natural .....	117
Tabel 4.2	Komposisi Kimia <i>Fly ash</i> .....	119
Tabel 4.3	Jumlah Kebutuhan Bahan untuk Sekali Granulasi .....	121
Tabel 4.4	Properties Agregat Buatan berdasarkan Kemiringan Pan Granulator.....	124
Tabel 4.5	Properti Agregat Buatan berdasarkan Rasio Alkali Aktivator .....	128
Tabel 4.6	Ringkasan Hasil Analisis Data Pengujian Aspal .....	140
Tabel 4.7	Hasil Pengujian Properties Aspal Beton untuk Semua Variasi Campuran .....	142
Tabel 4.8	Hasil Analisis Pengujian Sampel untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum Campuran Aspal 25% AB : 75% AN Gradasi FAA.....	151
Tabel 4.9	Karakteristik Fisik dan Mekanis Campuran Aspal Beton .....	166
Tabel 4.10	Karakteristik Permukaan Perkerasan Aspal Beton .....	170
Tabel 4.11	Hubungan <i>Skid resistance</i> , Tekstur dan <i>Rubber deposit</i> .....	177
Tabel 4.12	Jumlah dan Jenis Pesawat Tahun 2016 di Bandara Juanda .....	180
Tabel 4.13	Luas Segitiga <i>Rubber deposit</i> Tiap Pesawat Berdasarkan Jenisnya .....	181
Tabel 4.14	Pembuatan Panjang Segmen 1 (S1) .....	182
Tabel 4.15	Grup Pesawat Menurut ICAO .....	183
Tabel 4.16	Panjang Pendaratan Tiap Pesawat Berdasarkan Jenisnya .....	183



Tabel 4.17	Tebal <i>Rubber deposit</i> pada <i>Touchdown</i> Tiap Pesawat Berdasarkan Jenisnya .....	184
Tabel 4.18	Prosentase Pergerakan Pesawat pada Ujung <i>Runway</i> .....	184
Tabel 4.19	Distribusi Pergerakan Pesawat untuk Masing-Masing Ujung <i>Runway</i> .....	185
Tabel 4.20	<i>Rubber deposit</i> Akibat Pergerakan Pesawat Masing-Masing Ujung <i>Runway</i> .....	185
Tabel 4.21	Tebal <i>rubber deposit</i> pada segmen <i>overlapping</i> masing-masing ujung <i>runway</i> .....	186
Tabel 4.22	Prediksi Tebal <i>Rubber deposit</i> Saat Pembersihan .....	187
Tabel 4.23	Data pengukuran <i>Skid Friction</i> permukaan <i>runway</i> .....	188
Tabel 4.24	<i>Rubber deposit</i> Berdasarkan <i>Skid resistance</i> dan Operasional Bandara untuk Gradasi FAA .....	189
Tabel 4.25	<i>Rubber deposit</i> Berdasarkan Tekstur dan Operasional Bandara untuk Gradasi FAA .....	190
Tabel 4.26	Nilai <i>Rubber deposit</i> untuk Seluruh Variasi Campuran Aspal Beton Berdasarkan <i>Skid resistance</i> .....	191
Tabel 4.27	Nilai <i>Rubber deposit</i> untuk Seluruh Variasi Campuran Aspal Beton Berdasarkan Tekstur .....	192
Tabel 4.28	<i>Skid resistance</i> dan % Penurunan Pra dan Pasca <i>Tracking</i> .....	194

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

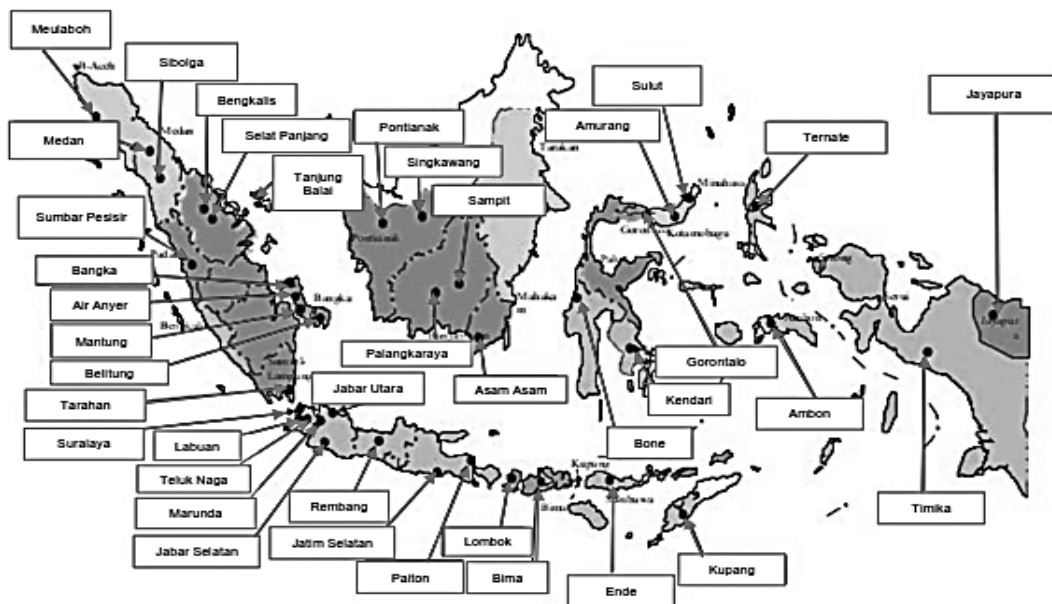
# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Menurut data tahun 2018, rata-rata produksi *fly ash* dan *bottom ash* di Indonesia setiap tahunnya yang dihasilkan dari PLN sebanyak 5.234.400 ton (Sicca, 2018). Dari jumlah tersebut 1.046.880 ton (20%) adalah *fly ash* dan sisanya adalah *bottom ash*<sup>1</sup>.

Berdasarkan data dari PT. PLN (Persero), jumlah pembangkit listrik yang menggunakan batubara di Indonesia sebanyak 39 unit. Gambar 1.1. menunjukkan sebaran lokasi pembangkit listrik tenaga uap dengan bahan bakar batubara.



Gambar 1.1. Sebaran Lokasi PLTU di Indonesia<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> (<https://tirto.id/semen-indonesia-akan-manfaatkan-limbah-batu-bara-pltu-cGdR>).

<sup>2</sup> (<https://images.app.goo.gl/wRjwNGoSJJuoFXV59>).

Menurut Megasari, dkk. (2008), untuk menghasilkan 50 Mega Watt (MW), pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) membutuhkan batubara sebanyak 210,1 ton/hari. Proses ini menghasilkan 17.3 ton *fly ash*. Artinya setiap 1 MW dihasilkan 17,3 ton/ 50 MW = 0,35 ton/ hari atau  $0,35 \times 365 = 126,3$  ton/ tahun. Dengan patokan ini, maka jumlah produksi *fly ash* pada masing-masing PLTU dapat dihitung. Sebagai contoh untuk lokasi PLTU Meulaboh yang menghasilkan 2x100 MW, maka *fly ash* yang dihasilkan adalah  $200 \times 126,3 = 25.260$  ton/tahun. Hasil untuk PLTU yang lain dapat dilihat pada Tabel 1.1. Total *fly ash* yang dihasilkan dari seluruh PLTU di Indonesia adalah 1.037.176 ton/ tahun.

Tabel 1.1. Daftar PLTU yang Menggunakan Bahan Bakar Batubara<sup>3</sup>

No	Nama PLTU	Daya (MW)	<i>Fly ash</i> (t/tahun)	No	Nama PLTU	Daya (MW)	<i>Fly ash</i> (t/tahun)
1	Meulaboh	200	25260	21	Kendari	20	2526
2	Medan	200	25260	22	Bone	100	12630
3	Sumbar Pesisir	200	25260	23	Ternate	14	1768
4	Bangka	50	6315	24	Ambon	14	1768
5	Air Anyer	20	2526	25	Jayapura	20	2526
6	Mantung	20	2526	26	Timika	14	1768
7	Belitung	30	3789	27	Lombok	50	6315
8	Tarahan	200	25260	28	Bima	14	1768
9	Sibolga	200	25260	29	Ende	14	1768
10	Bengkalis	14	1768	30	Kupang	30	3789
11	Selat Panjang	10	1263	31	Suralaya	1320	166716
12	Tanjung Balai Karimun	14	1768	32	Labuan	300	37890
13	Pontianak	50	6315	33	Teluk Naga	600	75780
14	Singawang	50	6315	34	Marunda	600	75780
15	Sampit	14	1768	35	Jabar Selatan	300	37890
16	Palangkaraya	130	16419	36	Jabar Utara	600	75780
17	Asam Asam	130	16419	37	Rembang	600	75780
18	Sulut	50	6315	38	Jatim Selatan	600	75780
19	Amurang	50	6315	39	Paiton	1320	166716
20	Gorontalo	50	6315		Total		1.037.176

Berlimpahnya *fly ash* hasil pembakaran batu bara tersebut, jika tidak dimanfaatkan akan menjadi permasalahan lingkungan. Hal ini tentu karena

<sup>3</sup> (<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2F>)

dampak yang diakibatkan, mengingat keberadaannya merupakan limbah dalam kategori bahan berbahaya dan beracun, seperti disebutkan pada Penjelasan atas PP101 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, Pasal 54, ayat (1), huruf a yaitu contoh pemakaian *fly ash* untuk bahan semen. Para peneliti telah banyak mencoba menggunakan *fly ash* sebagai material konstruksi. Misalnya penggunaan *fly ash* sebagai pengikat dalam pembuatan beton geopolimer.

Di sisi lain pembangunan infrastruktur sangat berkaitan dengan lingkungan, terutama dalam pengadaan material. Pada pekerjaan perkerasan dengan aspal beton misalnya, dibutuhkan material alam, yaitu agregat antara 90% sampai 95% dari total berat campurannya (Tarigan, 2019). Pengadaan agregat, dilakukan melalui eksplorasi di alam. Dimana keberadaannya tidak dapat diperbaharui, sehingga semakin lama akan semakin berkurang. Sementara itu pada lokasi-lokasi pembangunan yang tidak mempunyai deposit agregat, harus dikirim dari tempat lain, sehingga memerlukan biaya yang mahal.

*Fly ash* adalah salah satu limbah yang banyak dicoba digunakan sebagai agregat buatan selain *bottom ash*, lumpur logam berat, lumpur industri, lumpur kertas, lumpur saluran kotoran, terak baja, tempurung kelapa, tutup botol, residu penambangan dan lempung laut. Sebagai pengikat (*binder*) umumnya digunakan semen, lempung, kapur, atau bentonite. Dengan proses produksinya melalui *sintering*, *autoclaving* atau *cold bonded* (Priyadharshini dkk., 2012).

Fly ash dapat digunakan secara mandiri sebagai bahan pengikat tanpa menggunakan semen sama sekali. Semenjak diperkenalkannya geopolimer untuk pertama kalinya oleh *Davidovits* pada tahun 1978, penggunaan geopolimer terutama yang berbasis *fly ash* sebagai bahan agregat banyak dilakukan. Penggunaan *fly ash* sebagai agregat sekaligus memberikan beberapa keuntungan. Diantaranya: mengurangi limbah bahan berbahaya dan beracun, dapat menggantikan peran agregat natural yang persediaannya makin menipis. Potensi keberhasilan *fly ash* untuk mendapatkan agregat dengan kualitas seperti agregat natural cukup besar, merujuk beberapa penelitian yang sudah dilakukan.

Penelitian pembuatan agregat dengan *fly ash* telah banyak dilakukan. Singh (2016) menggunakan metode *sintered pellets*, menghasilkan agregat dengan

kerapatan (*bulk density*) 1050 kg/ m<sup>3</sup>, penyerapan air 18%, nilai abrasi <40%, ketahanan agregat <12% dan berat jenis agregat 1,7. Metode granulasi dan pemanasan, dilakukan oleh Sudrajat (2016), mendapatkan berat jenis sebesar 2,092 pada suhu 80<sup>0</sup>. Memenuhi persyaratan dalam hal keausan (abrasi) dan kekekalan. Tetapi lemah terhadap penyerapan air dan kelekatan terhadap aspal. Agregat yang dibuat dengan *Metode Pelletization* process menghasilkan berat jenis 2,12 bentuk bulat, dan *bulk density* 942,68 kg/m<sup>3</sup> (Gomathi dan Sivakumar, 2012). Dengan metode *sintered fly ash aggregate* (Rafiza, dkk, 2013) menghasilkan *water absorption* 15%-16%, berat jenis 1,66.

Dalam penggunaannya untuk perkerasan aspal beton, disamping kuantitas, kualitas agregat harus memenuhi persyaratan dari aspek struktural dan keselamatan. Khusus dalam penggunaan untuk infrastruktur bandara, terutama pada landas pacu (*runway*), sangat dituntut perkerasan yang memenuhi persyaratan dari aspek keselamatan. Dalam perencanaan campuran aspal untuk aspek fungsi perkerasan dalam keselamatan, ditekankan pada tekstur permukaan dan kekesatan (*skid resistance*), serta hal-hal yang mempengaruhinya terutama akumulasi endapan karet (*rubber deposit*). *Skid resistance* adalah ukuran resistensi dari permukaan perkerasan untuk menahan geser berdasarkan gesekan antara roda dan permukaan perkerasan. Ini merupakan hubungan antara gaya vertikal dan gaya horisontal sebagai pergeseran ban sepanjang permukaan perkerasan.

Aktivitas pergerakan pesawat pada *runway* memberikan dampak pada permukaan perkerasan akibat beban pesawat, serta karet roda yang ditinggalkan. Setiap kenaikan ketebalan endapan karet sebesar 0,1 mm, mengakibatkan penurunan nilai *skid resistance* sekitar 0,05. Namun sebaliknya, peningkatan makrotekstur menyebabkan peningkatan gesekan (*friction*) permukaan perkerasan, yang menyebabkan peningkatan jumlah deposit karet (Chen, dkk, 2014).

Timbulnya karet pada permukaan *runway* ini adalah akibat dari tergerusnya roda karet pesawat oleh permukaan perkerasan. Ketebalan endapan karet roda tersebut akan bertambah seiring dengan jumlah dan konfigurasi roda pesawat yang beroperasi. Hal ini terjadi, karena setiap aktivitas pendaratan satu pesawat meninggalkan rata-rata 700 gram karet berupa lapisan tipis pada

landasan pacu dan menghasilkan peningkatan ketebalan deposit karet sekitar 0,05  $\mu\text{m}$  (Wilding, dkk, 2008).

Jejak karet terjadi karena gesekan antara roda pesawat dengan permukaan *runway*. Panas yang dihasilkan selama interaksi menyebabkan reaksi kimia yaitu reaksi polimerisasi. Reaksi polimerisasi ini mengubah deposit karet menjadi keras dan melekat pada permukaan perkerasan. Penumpukan karet ini akan mengisi mikrotekstur dan makrotekstur perkerasan (Wilding, dkk, 2008).



Gambar 1.2. Endapan Karet dan Proses Pembersihan<sup>4</sup>

Gambar 1.2. menunjukkan endapan karet yang terjadi pada *runway*. Akumulasi endapan karet, secara bertahap menyebabkan ukuran tekstur berkurang. Kedalaman tekstur dan kepadatan permukaan perkerasan yang selalu berkurang dari waktu ke waktu, menyebabkan penurunan *skid resistance*. Kehilangan *skid resistance* adalah salah satu kegagalan perkerasan yang paling serius. Hal ini menimbulkan kerugian yang signifikan, karena dapat menimbulkan resiko keselamatan bagi pesawat saat lepas landas atau mendarat (Asi 2007) (Woods dan Jr, 2002).

*Federal Aviation Administration* dalam Wilding, dkk, (2008) menegaskan, bahwa permukaan *runway*, harus mempunyai *skid resistance* yang cukup, sehingga dapat dilakukan gerakan lepas landas dan pendaratan, terhadap semua jenis pesawat, dengan aman. Karena itu, pembersihan endapan karet di landasan

<sup>4</sup> (<https://aviation.stackexchange.com>; [https://en.wikipedia.org/wiki/Airfield\\_rubber\\_removal](https://en.wikipedia.org/wiki/Airfield_rubber_removal))

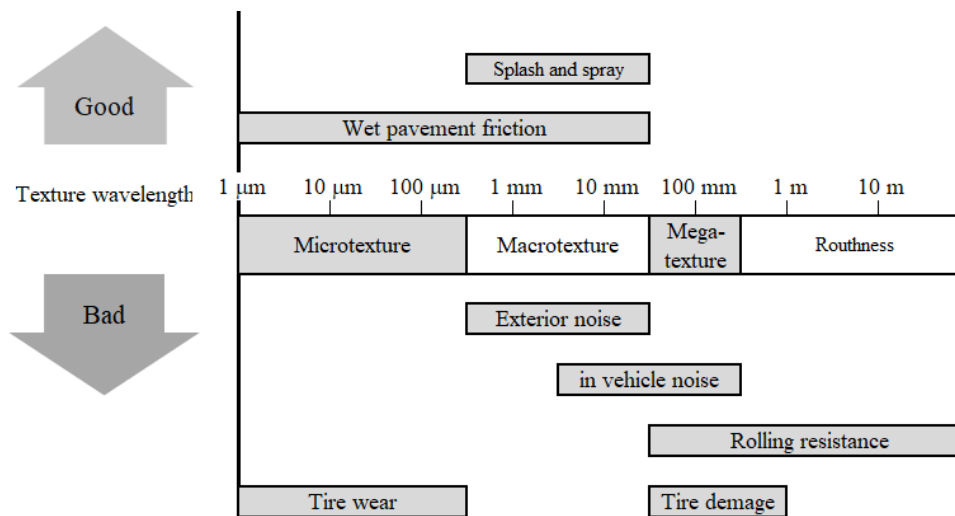
harus dilakukan sehingga *skid resistance* menjadi lebih baik, sehingga terpenuhi standar minimal *skid resistance* yang disyaratkan. Dalam SKEP/77/VI/2005 (2005), angka *skid resistance* untuk operasional permukaan perkerasan *runway* diukur dengan alat MU-meter atau *Grip Tester*. *Skid resistance* direkomendasikan > 0,6 jika diukur dengan alat MU-meter atau 0,74 untuk konstruksi baru dan 0,53 untuk pemeliharaan, jika menggunakan alat *Grip Tester*.

*Rubber deposit* dapat dibersihkan dengan beberapa cara, namun pembersihan secara terus-menerus dapat menimbulkan dampak buruk terhadap perkerasan. Dampak tersebut antara lain: 1) mengurangi *skid resistance* karena terjadi penghalusan tekstur dan permukaan agregat; 2) memperlemah ikatan (*bonding*) antar agregat pada lapisan permukaan akibat berkurangnya kandungan aspal dalam perkerasan, baik akibat larutan kimia maupun fisik, seperti gosokan atau semburan; 3) terhapusnya cat marka; 4) gangguan lingkungan akibat limbah yang dihasilkan; dan 5) Melemahnya ikatan antar agregat mengakibatkan agregat terlepas dari ikatannya. Terlepasnya agregat merupakan serpihan kecil (*Foreign Object Debris/ FOD*), berbahaya karena dapat tersedot dan merusak bagian dalam mesin pesawat.

Joubert, dkk (2004), melakukan penelitian di *Johannesburg International Airport* untuk mengetahui kinerja campuran aspal akibat pengaruh terbentuknya lapisan karet pada permukaan landas pacu (*runway*). Ukuran kinerja yang dipakai meliputi ketahanan ikatan antar material lapis permukaan, tekstur permukaan dan *skid resistance*. Ditemukan bahwa tekstur permukaan perkerasan adalah fungsi utama dari *skid resistance*. Ketika tekstur permukaan perkerasan bersentuhan dengan roda, dihasilkan gaya gesekan.

Praticò dan Vaiana (2015), menyatakan bahwa *skid resistance* dapat ditentukan berdasarkan hasil pengukuran tekstur permukaan, dengan menggunakan parameter kedalaman profil rata-rata (*Mean Profile Depth/ MPD*) dan kedalaman tekstur rata-rata (*Mean Texture Depth/ MTD*) perkerasan aspal. Karakteristik permukaan berdasarkan ukuran tekstur permukaan ditunjukkan dalam Gambar 1.3. (Mataei, dkk., 2016).





Gambar 1.3. Tekstur dan Karakteristik Permukaan (Mataei, dkk., 2016)

Selain tekstur yang terbentuk di atas permukaan *runway*, pada kondisi tertentu juga dibuatkan tekstur, dalam hal ini adalah *transverse grooving*. Namun, hal ini menyebabkan peningkatan *rubber deposit*. Menyikapi hal tersebut, beberapa landas pacu bandara di Inggris mulai menggunakan campuran beton aspal tanpa *transverse grooving* yang disebut *Béton Bitumineux pour Chaussées Aéronautiques* (BBA) sejak tahun 2011. BBA pada awalnya dikembangkan di Negara Perancis. BBA sebagai temuan baru telah terbukti mampu meningkatkan daya tahan serta keuntungan dari segi biaya, berkaitan dengan rentang periode waktu pembersihan karet. Ketertarikan terhadap BBA dari berbagai pihak terkait, karena bahan permukaan ini menawarkan kinerja tinggi, pekerjaan konstruksi yang cepat dan kemudahan perawatan. Melihat hasil implementasinya, maka penggunaan BBA untuk *ungroove* digunakan sebagai pilihan terkini untuk permukaan *runway* di Inggris (Widyatmoko, dkk, 2015). Sistem tanpa *transverse grooving* serta permukaan dengan beton aspal (AC, *Asphalt Concrete*) adalah sistem permukaan yang banyak diterapkan di Indonesia.

Berdasarkan uraian di atas perlu dilakukan studi untuk mendapatkan campuran aspal beton menggunakan agregat buatan untuk mengganti sebagian agregat natural untuk mendapatkan kinerja dalam aspek struktural dan keselamatan yang lebih baik. Penggunaan agregat buatan geopolimer *fly ash*

dalam campuran aspal beton diharapkan dapat membentuk makrotekstur yang lebih besar sehingga dapat menyimpan lebih banyak gerusan karet roda dan meningkatkan *skid resistance*. Hal ini menguntungkan dari aspek keselamatan dan percepatan timbulan tumpukan karet permukaan *runway*. Disisi lain peningkatan properties mekanik agregat dapat meningkatkan kinerja strukturalnya. Hasil tersebut dapat membantu mengurangi penggunaan agregat natural dan menggunakan sebanyak-banyaknya limbah *fly ash*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Selain harus mempunyai fungsi dari sisi kapasitas struktur, *runway* harus mampu memenuhi fungsi keamanan (*safety*) dalam hal ini *skid resistance* dan tekstur. Fokus utama dalam perencanaan campuran aspal beton di laboratorium hanya mengejar terpenuhinya aspek kapasitas strukturnya. Sedangkan aspek fungsi keamanannya dilakukan di lapangan setelah campuran dihampar sebagai lapisan permukaan. Karena itu, perencanaan permukaan perkerasan untuk mencapai kondisi ideal, perlu dilakukan pengujian *skid resistance* dan tekstur pada skala laboratorium.

Di sisi lain, perlu penelitian untuk mendapatkan lapisan permukaan yang mempunyai masa layanan lebih lama dari aspek keselamatan, dalam hal ini perkerasan yang dapat mempertahankan nilai *skid resistance*. Misalnya menggunakan agregat buatan yang mampu menekan jumlah endapan karet, sehingga interval waktu pembersihan karet menjadi lebih panjang. Saat ini, campuran aspal beton sepenuhnya menggunakan material alam dengan tujuan memenuhi karakteristik mekanik (bagian dari aspek struktural).

Gap analisis untuk mendapatkan rumusan utama masalah, ditunjukkan Gambar 1.4. Berdasarkan gap analisis tersebut, maka rumusan utama permasalahan dalam penelitian ini adalah : Bagaimana membuat perkerasan aspal beton untuk *runway* yang memenuhi aspek keamanan dan struktural menggunakan campuran agregat natural dan agregat buatan berbahan limbah batu bara yang dapat mengurangi *rubber deposit*?

KONDISI SAAT INI	KONDISI IDEAL
1) Pekerjaan perkerasan dengan campuran aspal beton, umumnya sepenuhnya menggunakan agregat natural (alam). Penelitian dengan menggunakan agregat buatan berbahan limbah (misalnya <i>fly ash</i> ) pada daerah-daerah deposit agregat masih jarang dilakukan.	1) Perlu dilakukan penelitian perencanaan aspal beton dengan menggunakan kombinasi agregat natural dengan agregat buatan berbahan limbah pada daerah-daerah dengan kuota agregat natural yang kurang, serta mempunyai potensi penghasil limbah olahan batu bara (misalnya <i>fly ash</i> ) yang tinggi.
2) Perencanaan campuran aspal beton untuk perkerasan bandara lebih berorientasi pada kapasitas struktural dibandingkan dengan aspek keamanan ( <i>safety</i> ), yaitu <i>skid resistance</i> dan tekstur. Tekstur dan <i>skid resistance</i> biasanya baru diukur setelah pekerjaan konstruksi selesai dilaksanakan di lapangan.	2) Perencanaan yang baik harus mengakomodir aspek keamanan ( <i>safety</i> ) dan aspek struktural (propertis mekanik). Aspek keamanan ( <i>safety</i> ), yaitu <i>skid resistance</i> dan tekstur, harus sudah diperhitungan mulai saat perencanaan campuran aspal beton di laboratorium, sehingga aman untuk gerakan pendaratan dan lepas landas.
3) Perencanaan campuran aspal beton menggunakan gradasi menerus (mengacu pada peraturan yang berlaku/ FAA), belum menghasilkan kinerja maksimal dalam aspek keamanan ( <i>safety</i> ) dibandingkan dengan gradasi terbuka (yang telah berhasil diterapkan di Perancis dan Inggris/ BBA).	3) Dilakukan penelitian perencanaan dengan gradasi terbuka mengacu pada BBA untuk menghasilkan kinerja yang lebih baik dari aspek keamanan (menjaga <i>skid resistance</i> ), akibat tertutupnya tekstur oleh tumpukan karet di permukaan landas pacu.

Gambar 1.4. Gap Analysis

Rumusan masalah utama tersebut di atas, perlu dijabarkan lagi menjadi permasalahan yang lebih detail sebagai berikut:

- 1) Bagaimana metode pembuatan agregat yang menghasilkan properties optimum sebagai bahan beton aspal?

Properties agregat sedapat mungkin harus memenuhi kriteria sebagai bahan campuran aspal beton. Banyak hal yang berpengaruh terhadap properties agregat buatan berbasis geopolimer *fly ash*. Misalnya, metode pembuatan menyangkut : proporsi *fly ash* terhadap larutan alkali aktivator, rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan  $\text{NaOH}$ , dan kemiringan pan granulator. Perlu didapatkan metode yang menghasilkan properties agregat buatan optimum.

- 2) Bagaimana proporsi agregat buatan dan agregat natural yang digunakan dalam menyusun gradasi agregat sebagai bahan campuran aspal beton lapis permukaan *runway*?

Selain kadar aspal, agregat penyusun gradasi sangat mempengaruhi properties campuran aspal. Karena itu proporsi agregat penyusun gradasi harus direncanakan dengan tepat, sehingga mendapatkan campuran aspal beton yang memenuhi persyaratan.

- 3) Bagaimana properties campuran aspal beton yang dihasilkan dengan penambahan agregat buatan dan variasi gradasi?

Pengujian properties campuran yang dibuat dengan variasi gradasi proporsi agregat buatan dan agregat natural perlu dilakukan untuk mengetahui apakah memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai bahan lapis permukaan *runway*. Uji yang dilakukan adalah uji *Marshall* dan *wheel track*. Uji *Marshall* untuk mendapatkan properties mekanis (stabilitas, *flow* dan *Marshall quotient*). Sedangkan uji *wheel track* untuk mendapatkan stabilitas dinamis dan *displacement*.

- 4) Bagaimana kecendrungan hubungan (*trend*) *skid resistance* dan tekstur permukaan hasil pengukuran terhadap variasi campuran aspal di laboratorium dibandingkan hasil pengukuran di lapangan dari penelitian sebelumnya?

Percobaan pembuatan campuran aspal beton menggunakan 2 alternatif gradasi dan proporsi agregat buatan dalam skala laboratorium. Maka perlu dicarikan pembandingan dalam skala lapangan, berdasarkan hasil pengukuran lapangan pada penelitian sebelumnya. Dicari hubungan antara *skid resistance* dengan tekstur. Hubungan tersebut selanjutnya digunakan untuk melihat apakah hubungan *skid resistance* dengan tekstur hasil uji laboratorium, sesuai dengan uji lapangan.

- 5) Bagaimana pengaruh variasi gradasi dan penggunaan agregat buatan terhadap ketebalan tumpukan karet berdasarkan nilai *skid resistance* dan nilai tekstur?

Terbentuknya karet pada *runway* erat kaitannya dengan *skid resistance* dan tekstur. Gradasi dan agregat yang digunakan dalam campuran aspal beton berpengaruh terhadap tekstur dan *skid resistance*. Sehingga berdasarkan *skid resistance* dan tekstur dapat ditentukan pengaruh variasi gradasi dan proporsi penggunaan agregat buatan terhadap *rubber deposit*.

### 1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan utama penelitian adalah menemukan aspal beton untuk perkerasan *runway* yang memenuhi aspek keamanan dan struktural menggunakan campuran agregat natural dan agregat buatan berbahan limbah batu bara yang dapat mengurangi *rubber deposit*.

Tujuan utama penelitian di atas merupakan pengerucutan dari tujuan-tujuan di bawah ini:

- 1) Mendapatkan metode pembuatan agregat yang menghasilkan properties optimum sebagai bahan campuran beton aspal.
- 2) Mendapatkan proporsi agregat buatan dan agregat natural yang digunakan dalam menyusun gradasi agregat sebagai bahan campuran aspal beton lapis permukaan *runway*
- 3) Mendapatkan properties campuran aspal beton yang dihasilkan dengan agregat buatan dan variasi gradasi yaitu gradasi terbuka (*open graded*) dan gradasi rapat (*dense graded*).
- 4) Menganalisis kecenderungan hubungan (*trend*) *skid resistance* dan tekstur permukaan hasil pengukuran terhadap variasi campuran aspal di laboratorium dibandingkan hasil pengukuran di lapangan.
- 5) Menganalisis pengaruh variasi gradasi dan penggunaan agregat buatan terhadap ketebalan tumpukan karet berdasarkan nilai *skid resistance* dan nilai tekstur.

Hasil dari penelitian ini dapat digunakan karena memberikan beberapa manfaat antara lain:

- 1) Memberikan kontribusi dalam pemanfaatan limbah industri dan pengurangan penggunaan agregat alam. Kombinasi penggunaan agregat natural dan buatan sebagai campuran aspal beton merupakan solusi untuk mengurangi penggunaan agregat natural yang depositnya semakin menipis.
- 2) Implementasi temuan yang dihasilkan dalam menentukan komposisi campuran aspal beton menggunakan agregat buatan ini akan bermanfaat dalam mengatasi cepatnya penurunan *skid resistance* akibat akumulasi

deposit karet pada landas pacu, sehingga rentang waktu pembersihan karet dapat diperpanjang.

- 3) Keberhasilan penelitian merupakan sumbangan ilmu pengetahuan bagi dunia perancangan perkerasan bandara terutama teknologi bahan perkerasan. Dengan harapan dapat berkembang terus pada masa-masa mendatang.

#### **1.4 Batasan Penelitian**

Dalam rangka mengkondisikan suatu penelitian pada hal-hal yang dapat dilakukan sesuai dengan keberadaan material, peralatan dan pelaksana penelitian, maka perlu diberikan batasan-batasan. Batasan dalam penelitian ini adalah:

- 1) *Fly ash* yang digunakan untuk bahan agregat buatan adalah hasil pembakaran batu bara PLTU Suralaya unit 1 dan 4.
- 2) Agregat buatan yang digunakan hanya agregat kasar saja.
- 3) Seluruh pekerjaan dilakukan di laboratorium, termasuk seluruh pengujian seperti properties campuran, *skid resistance*, tekstur dan lain-lain. Sehingga hasilnya adalah untuk skala laboratorium, bukan lapangan.
- 4) Benda uji untuk pengujian *skid resistance* dan tekstur, adalah pelat campuran aspal beton yang dicetak dengan pencetak untuk uji *wheel track*.
- 5) Alat uji *skid resistance* adalah *British Pendulum Tester*, sedangkan pengukuran tekstur permukaan menggunakan metode *Sand Patch*.
- 6) Pengujian *skid resistance*, dilakukan sesuai standar, di atas permukaan sampel, tidak mempertimbangkan temperatur gesekan dan kecepatan pesawat.
- 7) *Rubber deposit* didapatkan dari hasil perhitungan secara teoritis, karena tidak dilakukan pengujian/pengukuran.

#### **1.5 Hipotesa**

Hipotesa yang dapat ditarik dari uraian di atas adalah: penggunaan agregat buatan dalam campuran aspal beton dapat merubah *mean texture depth* (MTD) sehingga dapat mengurangi penumpukan *rubber deposit*.

## 1.6. Kontribusi dan Orisinalitas Penelitian

Beberapa penelitian yang berkaitan dengan tekstur, *skid resistance* dan *rubber deposit* dapat dilihat pada Tabel 1.2. Penelitian tersebut menyatakan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap *skid resistance*, seperti kualitas agregat, jenis agregat, gradasi campuran, desain campuran, ukuran tekstur, tingkat lalu lintas dan kecepatan. Berdasarkan faktor ukuran tekstur, dijelaskan bahwa akibat endapan karet akan mengurangi ukuran tekstur sesuai dengan penambahan endapannya. Pengaruh lainnya yaitu kualitas agregat, jenis serta gradasinya terhadap *skid resistance* menjadikan suatu gagasan untuk dilakukan penelitian. Penelitian yang dilakukan untuk mewujudkan ide tersebut adalah menggunakan agregat buatan dalam campuran aspal beton untuk perkerasan permukaan *runway* sehingga dapat mengurangi efek *rubber deposit*, tetapi mampu memberikan *skid resistance* yang dibutuhkan.

Gambar 1.5., menunjukkan dukungan beberapa penelitian sebelumnya terhadap munculnya ide dan posisi usulan penelitian ini. Adapun ide tersebut adalah menganalisis potensi penggunaan agregat buatan berbahan limbah batu bara dalam campuran aspal beton untuk mengurangi *rubber deposit* pada permukaan *runway*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam perencanaan perkerasan *runway* yang berkinerja baik dari aspek struktural (karakteristik mekanik) dan aspek keselamatan (*skid resistance* dan tekstur). Dalam aspek keselamatan, dengan didapatkannya peningkatan nilai *skid resistance* sehingga masa layanannya menjadi lebih panjang. Dengan demikian maka, terdapat efisiensi dalam hal pemeliharaan landasan pacu, dalam hal pembersihan *rubber deposit*.

Penggunaan agregat buatan berbahan *fly ash* sebagai bahan campuran aspal beton memberikan manfaat bagi lingkungan. Karena dengan pemanfaatan limbah agregat buatan ini, secara tidak langsung dapat mengurangi limbah *fly ash*.

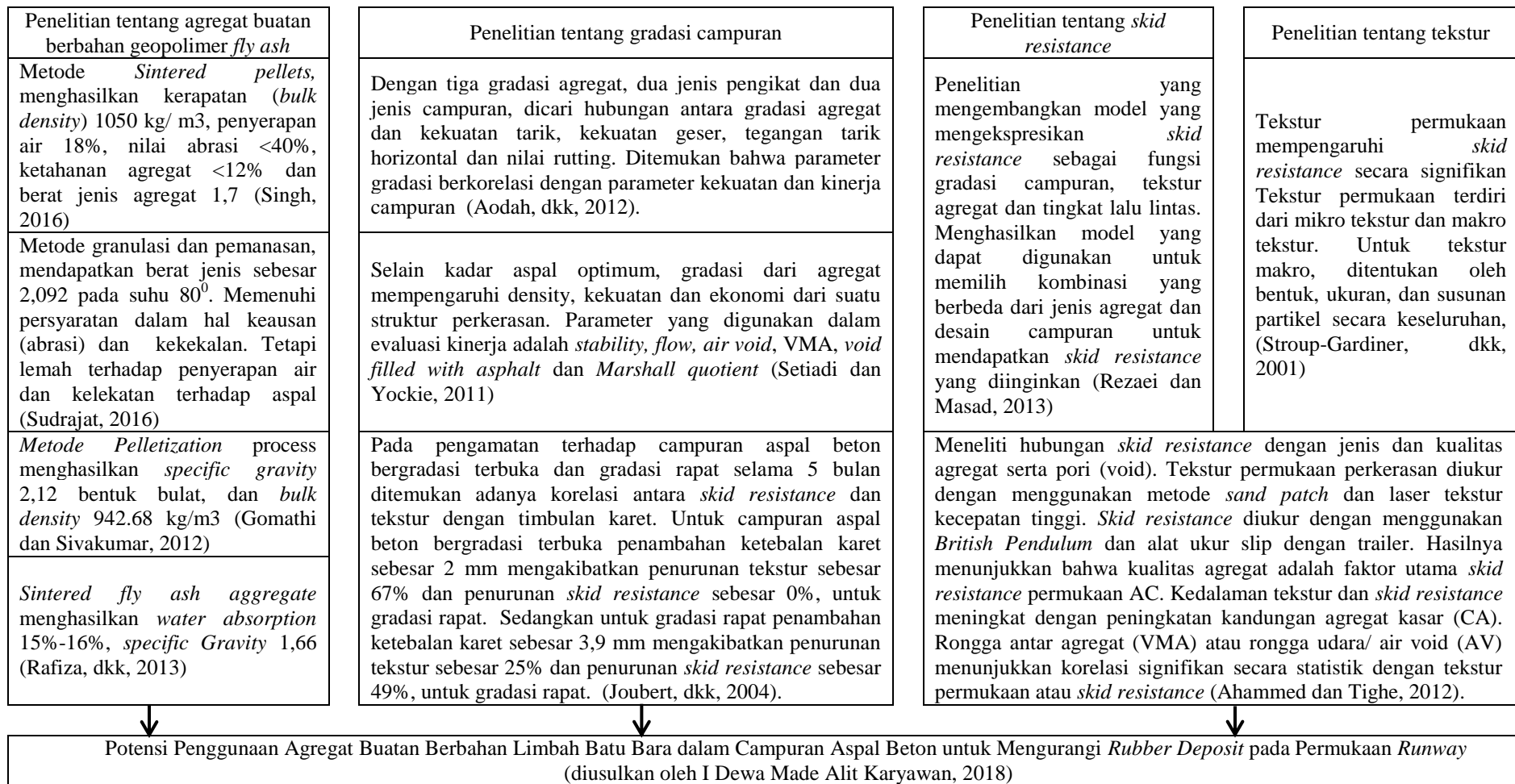
Tabel 1.2 Penelitian Berkaitan dengan Tekstur, *Skid Resistance* dan *Rubber Deposit*

No	Judul dan nama peneliti	Obyek/ topik penelitian	Metode	Hasil	Rekomendasi/ Kesimpulan
1	<i>Prediction of Skid resistance as a Function of Speed From Pavement Texture Measurements</i> (Leu dan Henry, 1978)	Pengembangan model untuk menghubungkan karakterisasi perilaku kecepatan, <i>skid resistance</i> perkerasan dan ukuran tekstur perkerasan. <i>Skid resistance</i> diukur berdasarkan <i>American Society for Testing and Materials</i> (ASTM) E 279-77,	Membentuk model dengan mengambil data atas dua konstanta yaitu: 1) pengukuran <i>skid resistance</i> pada kecepatan rendah; dan 2) pengukuran untuk mendapatkan penurunan <i>skid resistance</i> saat kecepatan kendaraan meningkat.	Konstanta dapat diprediksi dengan pengukuran mikrotekstur dan macrotexture perkerasan. Fitur penting dari model ini adalah menjelaskan perbedaan efek dari dua tipe tekstur. Ini juga dapat digunakan untuk menentukan hubungan kecepatan dengan <i>skid resistance</i> dari pengukuran kecepatan tunggal dan pengukuran makrotekstur.	Suatu model yang dapat digunakan untuk menggambarkan variasi <i>skid resistance</i> berdasarkan kecepatan kendaraan.
2	<i>Experimental Based Model for Predicting The Skid Resistance of Asphalt Pavements</i> (Rezaei dan Masad, 2013)	Meneliti karakteristik permukaan campuran aspal.	Dilakukan dengan pengukuran dan analisis gesekan, tekstur dan <i>skid resistance</i> di laboratorium dan lapangan.	Penelitian ini mengembangkan model yang mengekspresikan <i>skid resistance</i> sebagai fungsi gradasi campuran, tekstur agregat dan tingkat lalu lintas, yang menghasilkan model yang dikembangkan untuk dapat memberikan perkiraan <i>skid resistance</i> di lapangan.	Sehingga dapat digunakan untuk memilih kombinasi yang berbeda dari jenis agregat dan desain campuran sehingga tingkat <i>skid resistance</i> yang diinginkan tercapai.
3	<i>Airfield and Highway Pavements 2008 Pavement Surface Mixture, Texture, and Skid Resistance: A Factorial Analysis</i> (Ahmed dan Tighe, 2008)	Mengevaluasi efek dari berbagai tekstur permukaan pada sifat gesekan beton semen Portland.	Tekstur permukaan perkerasan diukur dengan menggunakan metode <i>sand patch</i> dan <i>Automated Road Analyzer</i> (ARAN) sedangkan <i>skid resistance</i> diukur dengan menggunakan <i>British Pendulum</i> dan uji lapangan dengan <i>skid trailer</i> .	Nilai tekstur permukaan perkerasan hasil dari pengukuran metode <i>sand patch</i> dan <i>Automated Road Analyzer</i> (ARAN) Nilai <i>skid resistance</i> hasil pengukuran dengan <i>British Pendulum</i> dan <i>skid trailer</i> .	Gesekan permukaan maksimum pada permukaan beton bertekstur, dihasilkan oleh makroteksture optimum dari <i>Mean Texture Depth</i> (MTD) sekitar 1,8 mm.



Tabel 1.2 Penelitian Berkaitan dengan Tekstur, *Skid Resistance* dan *Rubber Deposit* (lanjutan)

No	Judul dan nama peneliti	Obyek/ topik penelitian	Metode	Hasil	Rekomendasi/ Kesimpulan
4	<i>Asphalt Pavements Surface Texture and Skid Resistance Exploring The Reality</i> (Ahammed dan Tighe, 2012)	Meneliti hubungan <i>skid resistance</i> dengan jenis dan kualitas agregat serta pori (void).	Melakukan pengukuran tekstur permukaan perkerasan aspal beton (AC), menggunakan metode <i>sand patch</i> dan laser tekstur kecepatan tinggi. Sedangkan <i>skid resistance</i> diukur dengan menggunakan <i>British Pendulum</i> dan alat ukur slip dengan trailer.	Tekstur permukaan hasil pengukuran metode <i>sand patch</i> dan laser tekstur kecepatan tinggi. <i>Skid resistance</i> diukur dengan <i>British Pendulum</i> dan alat ukur trailer. Hasilnya menunjukkan bahwa kualitas agregat adalah faktor utama <i>skid resistance</i> permukaan AC. Kedalaman tekstur dan <i>skid resistance</i> meningkat dengan peningkatan kandungan agregat kasar (CA).	Terdapat korelasi signifikan secara statistik antara rongga antar agregat (VMA) atau rongga udara/ air void (AV) dengan tekstur permukaan dan <i>skid resistance</i> .
5	<i>Experimental Investigation on Skid Resistance of Asphalt Pavement Under Various Slippery Conditions.</i> (Dan, dkk, 2017)	Meneliti <i>skid resistance</i> perkerasan dalam berbagai kondisi yaitu: kering, basah, terlapisi es dan bersalju, dengan british pendulum.	<i>Pavement Friction Coefisien</i> (PFC) dikelompokkan menjadi tujuh tingkat, yang menggambarkan hubungan antara tingkat gesekan, <i>skid resistance</i> , kisaran PFC dan kondisi perkerasan.	Model untuk mendapatkan koefisien gesekan perkerasan/ <i>Pavement Friction Coefisien</i> (PFC), pada kondisi berbeda yang ditetapkan dengan evaluasi empiris.	<i>Skid resistance</i> perkerasan dalam berbagai kondisi yaitu: kering, basah, terlapisi es dan bersalju, yang didapatkan dengan model
6	Potensi Penggunaan Agregat Buatan Berbahan Limbah Batu Bara dalam Campuran Aspal Beton untuk Mengurangi <i>Rubber Deposit</i> pada Permukaan <i>Runway</i> (Karyawan, I Dewa Made Alit)	Properties agregat buatan, properties campuran aspal beton, properties permukaan lapisan aspal beton, prediksi timbulan <i>rubber deposit</i>	Uji laboratorium terhadap properties agregat, campuran aspal dan permukaan aspal beton. Uji permukaan meliputi uji <i>skid resistance</i> dengan alat BPT, dan uji tekstur dengan metode <i>sand patch</i> . Prediksi timbulan karet dengan cara perhitungan teoritis.	Properties terbaik agregat, properties terbaik campuran aspal beton, properties terbaik permukaan dengan tekstur dan <i>skid resistance</i> sesuai persyaratan dan <i>rubber deposit</i> rendah.	Campuran aspal beton menggunakan agregat kasar buatan dari limbah batu bara untuk mengurangi <i>rubber deposit</i> pada permukaan <i>runway</i>



Gambar 1.5. Hasil Penelitian yang Relevan dan Posisi Penelitian yang *Diusulkan*

Gambar 1.4. menunjukkan gap riset dan Gambar 1.5, menunjukkan posisi penelitian ini. Kedua gambar tersebut menunjukkan adanya perbedaan dengan penelitian sebelumnya dan kondisi ideal yang ingin dicapai. Sehingga orisinalitas dari penelitian ini adalah:

- 1) Campuran aspal beton menggunakan kombinasi agregat natural dengan agregat buatan. Agregat buatan digunakan untuk mengganti ukuran tertentu dari agregat natural hingga didapatkan campuran aspal beton dengan kinerja baik.
- 2) Pengujian *skid resistance* dan tekstur di laboratorium terhadap sampel dari campuran yang dipadatkan dengan pemadat uji *wheel track*.
- 3) Mendapatkan metode pembuatan campuran untuk mendapatkan permukaan yang mempunyai tekstur dan *skid resistance*, sehingga mampu menekan *rubber deposit*.

## 1.7 Luaran Penelitian

Penelitian ini merupakan suatu rangkaian eksperimen laboratorium untuk mengaplikasikan agregat buatan dalam campuran aspal beton. Perencanaan campuran aspal beton dibuat supaya dapat digunakan untuk permukaan *runway*. Agregat buatan dibuat dari geopolimer berbahan dasar *fly ash* dan alkali aktivator, dengan beberapa proporsi. Gradasi agregat dibuat dalam beberapa variasi proporsi campuran agregat buatan dan agregat natural. Untuk mengetahui kinerja struktural campuran aspal beton, dicari nilai stabilitas, *flow*, MQ dan *stabilitas dinamis*. Kinerja keselamatan diketahui dengan mengukur nilai *skid resistance* dan tekstur, setelah kinerja struktural campuran aspal beton diketahui.

Luaran utama yang merupakan *novelty* dari penelitian ini adalah aspal beton yang menggunakan campuran agregat buatan dan agregat natural untuk mengurangi efek *rubber deposit* pada *runway*.

Beberapa luaran yang didapatkan untuk mendapatkan luaran utama (*novelty*) tersebut adalah:

- 1) Metode dan komposisi campuran agregat buatan
- 2) Gradasi campuran agregat buatan dan natural
- 3) Kinerja struktural campuran baru

- 4) Nilai *skid resistance* dari campuran baru
- 5) Nilai tekstur yang dapat mengurangi efek penumpukan *rubber deposit*

Kelima luaran tersebut, masing-masing memberikan suatu kontribusi tambahan dari penelitian sebelumnya.

## 1.8 Organisasi Penulisan

Penelitian disertasi yang berjudul Potensi Penggunaan Agregat Buatan Berbahan Limbah Batubara dalam Campuran Aspal Beton untuk Mengurangi *Rubber Deposit* pada Permukaan *Runway*, ditulis dalam 5 Bab, dengan uraian sebagai berikut:

- Bab 1 Pendahuluan, memuat tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, batasan penelitian, hipotesa, kontribusi dan orisinalitas, dan luaran penelitian.
- Bab 2 Kajian Pustaka dan Dasar Teori, menguraikan tentang persyaratan yang digunakan dan teori yang berkaitan dan menunjang pelaksanaan penelitian. Teori tersebut antara lain : geopolimer *fly ash*, properties agregat, gradasi agregat, properties campuran aspal beton, dan karakteristik permukaan perkerasan meliputi *skid resistance* dan tekstur.
- Bab 3 Metode Penelitian, menguraikan tentang metodologi dalam membuat rancangan eksperimen mulai dari pembuatan agregat, proporsi dan gradasi campuran aspal beton dengan agregat buatan, pembuatan sampel dan pengujian untuk mengetahui propertiesnya. Analisis dan diskusi yang dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian.
- Bab 4 Hasil dan Pembahasan, memaparkan hasil pengambilan data, analisis data dan pembahasan hasil analisis. Pembahasan dilakukan untuk mendapatkan tujuan penelitian yaitu: metode pembuatan agregat yang menghasilkan agregat dengan properties yang memenuhi persyaratan, proporsi penggunaan agregat buatan, properties campuran aspal, *rubber deposit* yang ditimbulkan pada permukaan campuran dengan penambahan agregat dan variasi gradasi.

- Bab 5 Kesimpulan dan Saran, di sini disajikan kesimpulan hasil penelitian dan saran yang diperlukan untuk perbaikan dan atau pengembangan untuk penelitian selanjutnya.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 2**

### **KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Lingkup Kajian Pustaka dan Dasar Teori dalam Penelitian ini**

Sebagaimana diuraikan sebelumnya bahwa penelitian ini akan mengkaji keseimbangan antara *Skid resistance* dan pengurangan tekstur akibat endapan karet roda pesawat dengan pendekatan modifikasi campuran aspal. Modifikasi yang dilakukan meliputi penggantian sebagian agregat alam dengan agregat buatan, dalam 2 gradasi yaitu *open graded* dan *dense graded*. Tujuan kajian adalah menemukan perkerasan aspal beton dengan campuran agregat buatan yang mempunyai properties struktural untuk perkerasan *runway* dan dapat mengurangi *rubber deposit*. Karena itu, Kajian Pustaka dan Dasar Teori, akan terfokus pada hal-hal: properties agregat buatan dari geopolimer *fly ash*, penyusunan gradasi agregat dan proporsi campuran agregat, properties campuran aspal beton dan karakteristik lapis permukaan dengan campuran aspal beton dari sisi keselamatan yaitu *Skid resistance* dan tekstur serta prediksi *rubber deposit*.

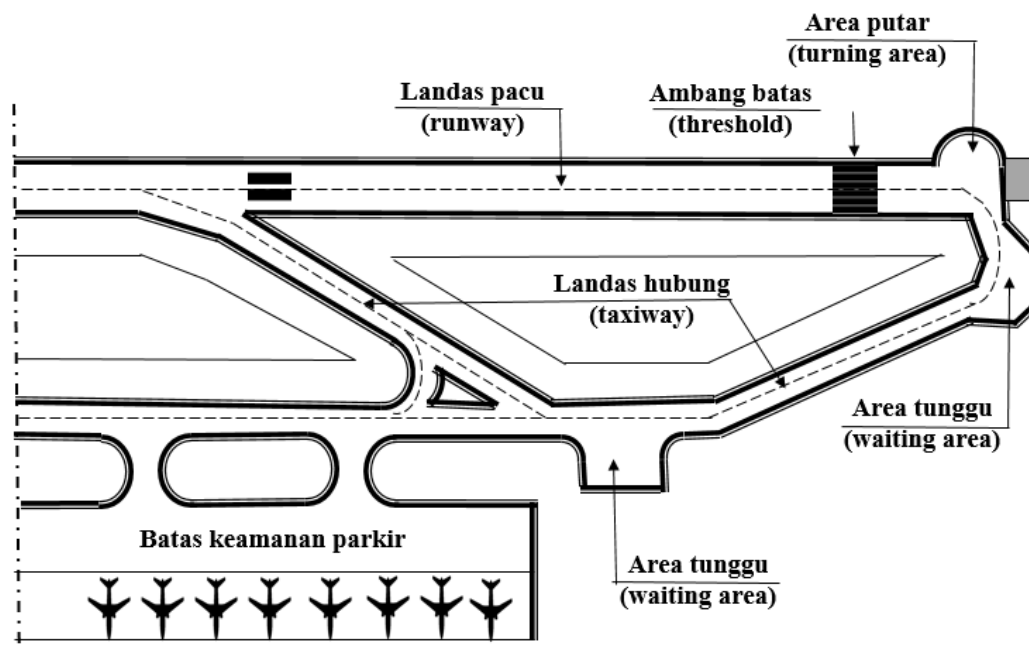
#### **2.2 Perkerasan Bandara**

##### **2.2.1 Kebutuhan Perkerasan pada Sisi Udara Bandara**

Bandar Udara adalah kawasan di daratan dan/ atau perairan dengan batas-batas tertentu yang digunakan sebagai tempat pesawat udara mendarat dan lepas landas, naik turun penumpang, bongkar muat barang, dan tempat perpindahan intra dan antarmoda transportasi, yang dilengkapi dengan fasilitas keselamatan dan keamanan penerbangan, serta fasilitas pokok dan fasilitas penunjang lainnya (Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 2009 tentang Penerbangan, 2009). Secara umum terdiri atas dua bagian utama yaitu bagian sisi darat (*land side*) dan bagian sisi udara (*air side*). Bagian-bagian sisi udara yang berkaitan dengan operasional pergerakan pesawat meliputi (Direktorat Jenderal

Perhubungan Udara, 2011): 1) landas pacu (*runway*); 2) *runwaystrip*, *Runway end Safety Area* (RESA), *stopway*, *clearway*; 3) landas hubung (*taxiway*); 4) landas parkir (*apron*); dan 5) marka dan rambu. Bagian-bagian tersebut merupakan wilayah operasional pesawat yang membutuhkan perhatian, utamanya adalah perkerasannya. Perencanaan perkerasan pada bagian-bagian tersebut harus menekankan pada aspek keselamatannya disamping aspek kekuatan konstruksi.

Sebelum menguraikan tentang perkerasan bandara, perlu diketahui terlebih dahulu bagian-bagian sisi udara dari bandara, seperti pada Gambar 2.1.

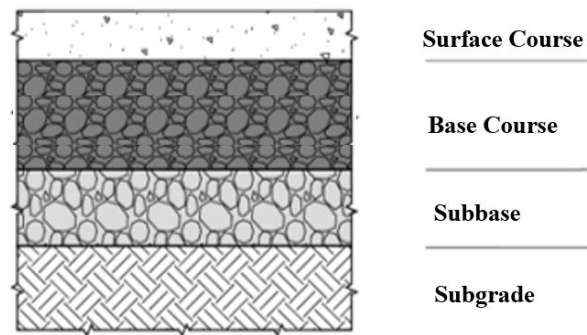


Gambar 2.1 Bagian-bagian Sisi Udara Bandara  
(Diadaptasi dari Deffieux, dkk, 2009)

### 2.2.2 Lapisan Perkerasan

Perkerasan adalah struktur yang terdiri dari beberapa lapisan dengan kekerasan dan daya dukung yang berlainan. Dinyatakan juga bahwa ada 2 macam perkerasan yaitu perkerasan lentur (*flexible pavement*) dan perkerasan kaku (*rigid pavement*).





Gambar 2.2 Tipe Struktur Perkerasan (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2016)

Struktur perkerasan (*Pavement Structure*), terdiri dari: *surface course*, *base course*, *subbase*, dan *subgrade* (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2016). Masing-masing lapisan bisa satu lapis atau lebih. Semuanya digelar di atas tanah asli (*subgrade*), seperti terlihat pada Gambar 2.2.

Penjelasan tentang struktur perkerasan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Lapisan Permukaan (*surface course*), meliputi pelat beton semen Portland/*Portland cement concrete (PCC)* atau campuran aspal panas/*Hot Mix Asphalt (HMA)*.
2. Lapis Pondasi (*Base*), adalah lapisan dasar yang terdiri dari campuran material, yang distabilisasi ataupun tidak. Material yang digunakan terdiri dari agregat dengan atau tanpa bahan pengikat. Bahan pengikatnya dapat berupa aspal, semen dan lainnya.
3. Lapisan pondasi bawah (*Subbase*), merupakan lapisan yang terdiri dari bahan berupa butiran atau tanah, baik distabilisasi dengan bahan pengikat ataupun tidak.
4. Tanah dasar (*subgrade*) adalah lapisan tanah alami atau modifikasi. Modifikasi dapat dilakukan dengan bahan-bahan *geosynthetics*. *Geosynthetics* adalah berbagai produk sintetis atau buatan yang diperlukan untuk mengatasi lokasi yang mempunyai permasalahan geoteknik. Istilah ini mencakup empat produk utama: *geotextiles*, *geonets/ geogrids*, *geomembranes* dan *geocomposites*. Dengan sifat bahan sintetis dalam produk ini cocok digunakan di tempat-

tempat di mana diperlukan ketahanan yang tinggi. Dalam aplikasinya dapat digunakan sebagai pemisahan antara lapisan agregat *subbase* dan tanah dasar (*subgrade*).

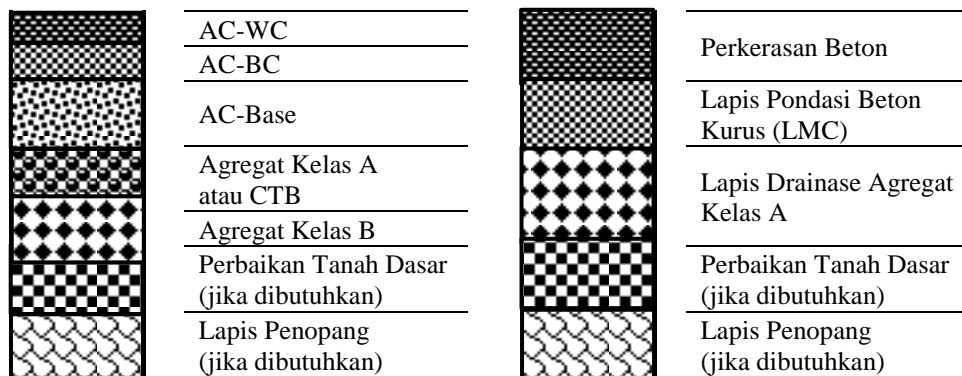
### 2.2.3 Jenis Perkerasan untuk Bandara

Berdasarkan *Advisory Circular 150/5380-6C* yang dikeluarkan oleh *Federal Aviation Administration* (2014), perkerasan bandara harus dipastikan memiliki kualitas sehingga mampu mendukung beban kritis yang dikenakan terhadapnya, baik menahan aksi abrasif lalu lintas, cuaca buruk, tahan terhadap gesekan (*skid-resistance*), dan pengaruh kerusakan lainnya. Adapun jenis perkerasan yang digunakan pada bandara antara lain (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2016):

- 1) Perkerasan lentur (*flexible pavements*) adalah struktural perkerasan dengan masing-masing lapisan didukung oleh lapisan di bawahnya dan pada akhirnya didukung oleh tanah dasar. Digunakan sebagai lapisan permukaan adalah campuran aspal panas/ *Hot Mix Asphalt* (HMA). HMA didukung oleh lapisan pondasi (*base course*) dan lapis pondasi bawah (*subbase*). Keseluruhan struktur perkerasan lentur pada akhirnya didukung oleh tanah dasar (*sub grade*) (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2016).
- 2) Perkerasan kaku (*rigid pavements*) adalah struktur perkerasan dengan beban utama diberikan kepada pelat beton sebagai lapisan permukaan. Pelat beton yang digunakan adalah beton *Portland cement concrete* (PCC).

Jenis struktur perkerasan yang diterapkan dalam desain struktur perkerasan baru terdiri atas: 1) Struktur perkerasan pada permukaan tanah asli; 2) Struktur perkerasan pada timbunan; 3) Struktur perkerasan pada galian (Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, 2011). Tipikal struktur perkerasan dapat dilihat pada Gambar 2.3.

Beberapa parameter menyebabkan terdapat perbedaan dalam perencanaan perkerasan untuk lapangan terbang (bandara) dan perkerasan jalan raya. Perbedaan perkerasan untuk lapangan terbang dan jalan raya ditunjukkan oleh Tabel 2.1 (Deffieux, *dkk.*, 2009).



Gambar 2.3 Tipikal Struktur Perkerasan Lentur dan Kaku (Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, 2011)

Tabel 2.1 Perbedaan Perkerasan Jalan Raya dan Lapangan Terbang

Perkerasan Jalan ( <i>Road pavements</i> )	Perkerasan Bandara ( <i>Airport pavements</i> )
<i>Aplikasi Beban (Loads applied)</i>	
Pembebanan dengan penyebaran yang sangat rendah, karena lalu lintas cenderung pada jalur yang sama, sehingga menyebabkan rutting	Pada <i>runway</i> , beban tersebar hanya pada sepertiga bagian perkerasan dan konfigurasi landing gear bervariasi dari satu pesawat terbang ke pesawat lainnya. Tidak demikian halnya pada <i>taxiway</i>
Jumlah pergerakan tinggi, hingga 50.000/hari. Beban yang relatif ringan, berat total 42 t. Beban sumbu maksimum 4.2 t. Kelelahan karena frekuensi gerakan yang tinggi.	Jumlah pergerakan sangat kecil, dari sangat sedikit hingga > 100/ hari. Beban yang berbeda, berat total sampai >550 t. Beban sumbu 45 t untuk <i>twin-wheel</i> dan 115 t untuk <i>bogy</i> . Kelelahan terutama karena gerakan yang terjadi dengan tekanan yang besar
Tekanan ban < 0,8 MPa (8 bar)	Tekanan ban mencapai 1,7 MPa (17 bar) untuk pesawat terbang tertentu
Kecepatan rendah < 90 km / jam	Kecepatan sangat bervariasi: <ul style="list-style-type: none"> <li>• kecepatan sangat rendah</li> <li>• kecepatan sangat tinggi &gt; 300 km/jam (saat lepas landas dan mendarat )</li> </ul>
<i>Fitur khusus</i>	
Tekanan ban sehingga terjadi kontak yang baik dengan perkerasan untuk mendapatkan kinerja pengereman yang memuaskan bagi kendaraan yang menggunakannya.	Kondisi geometrik dan lingkungan, berpengaruh terhadap konstruksi perkerasan, karena berada pada kondisi terbuka. Mendapat pengaruh langsung dari hujan atau panas matahari, dll.
Kemiringan permukaan terkait dengan kenyamanan penumpang	Kemiringan permukaan terkait dengan keselamatan pesawat terbang saat meluncur dengan kecepatan tinggi

Sumber: Deffieux , dkk., 2009

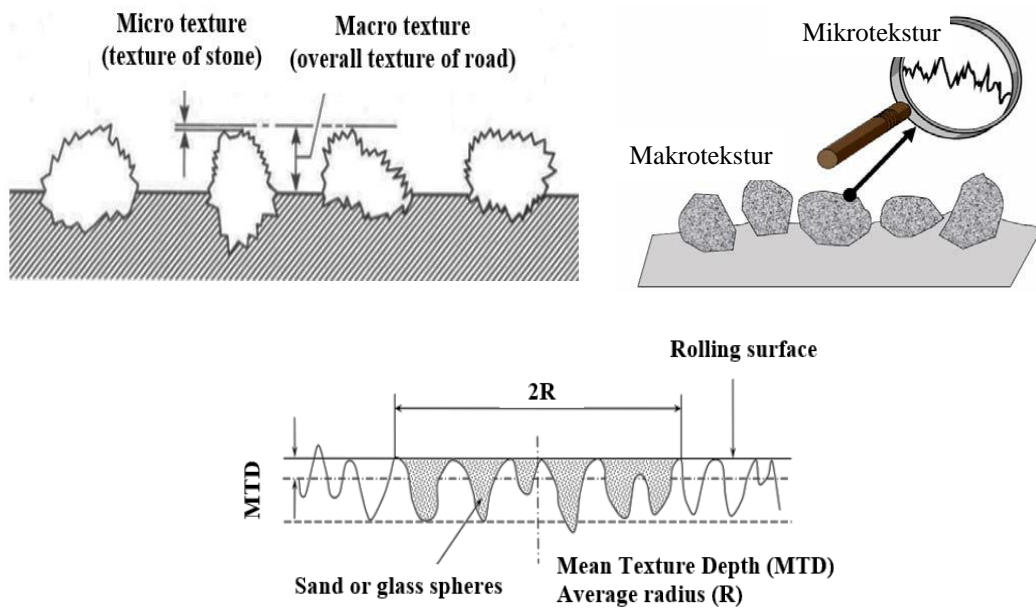
## 2.3 Karakteristik Permukaan Perkerasan Bandara

### 2.3.1 Tekstur Permukaan

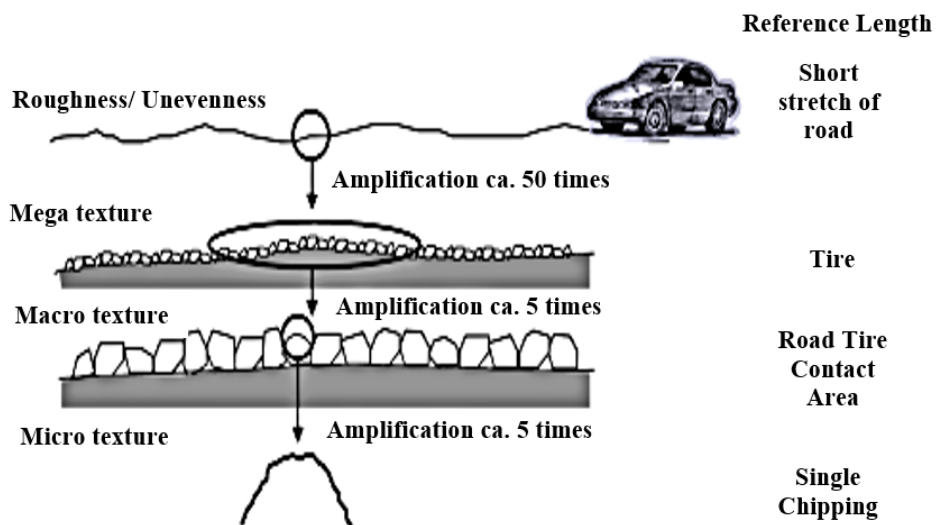
Karakteristik permukaan perkerasan, geometrik, kecepatan, dan variabel kendaraan seperti tekanan ban dan roda berpengaruh dalam mengendara. Tekstur seperti mikrotekstur dan makrotekstur merupakan karakteristik permukaan yang menentukan keamanan dan kenyamanan pengguna jalan. Perubahan dalam mikrotekstur yaitu tekstur permukaan partikel agregat dan partikel berukuran pasir kecil penyusun perkerasan aspal dan tekstur makro, yang ditentukan oleh bentuk, ukuran, dan susunan partikel secara keseluruhan, mempengaruhi *Skid resistance* secara signifikan (Stroup-Gardiner, dkk, 2001).

Makrotekstur dapat diketahui dengan pengukuran berbasis laser dan tipe volumetrik. Pengukuran berbasis laser dapat dilakukan dengan alat MU Meter. Alat ini memanfaatkan sinar laser untuk mendeteksi kedalaman profil permukaan. Sehingga dalam pengukuran ini dihasilkan *Mean Profile Depth* (MPD). Nilai ini nantinya yang akan menentukan besar atau tidaknya kandungan *rubber deposit* dan menunjukkan bagian dari *runway* yang memiliki konsentrasi *rubber deposit* yang tinggi. Nilai MPD dapat dihitung dengan membagi *runway* ke dalam beberapa segmen.

Sedangkan pengukuran tipe volumetrik dilakukan dengan metode *sand patch*. Yaitu, menentukan kedalaman tekstur berdasarkan banyaknya pasir yang masuk kedalam lubang. Berdasarkan konsep volume dibagi dengan luasan sebaran lingkaran pasir, maka kedalaman tekstur dapat diketahui. Sehingga dalam pengukuran ini dihasilkan *Mean Texture Depth* (MTD). Meskipun kedua cara tersebut bermaksud sama, yaitu untuk menentukan makrotekstur, namun hasilnya tidak dapat dibandingkan (Freitas dan Pereira, 2015; Miller, 2012). Pada Gambar 2.4 ditunjukkan ilustrasi mikro dan makro tekstur, serta hasil pengukuran makro tekstur.



Gambar 2.4 Makrotekstur, Mikrotekstur dan Kedalaman Tekstur Rata-rata (MTD) (Freitas dan Pereira, 2015; Miller, 2012; Bennett, 2007)



Gambar 2.5 Jenis Tekstur Permukaan Perkerasan (Pandia, dkk, 2016)

Dalam hal keselamatan, tekstur permukaan perkerasan jalan, mempengaruhi kemampuan roda bergesekan dengan permukaan jalan dalam kondisi basah. Tekstur perkerasan jalan juga berpengaruh terhadap emisi kebisingan yang

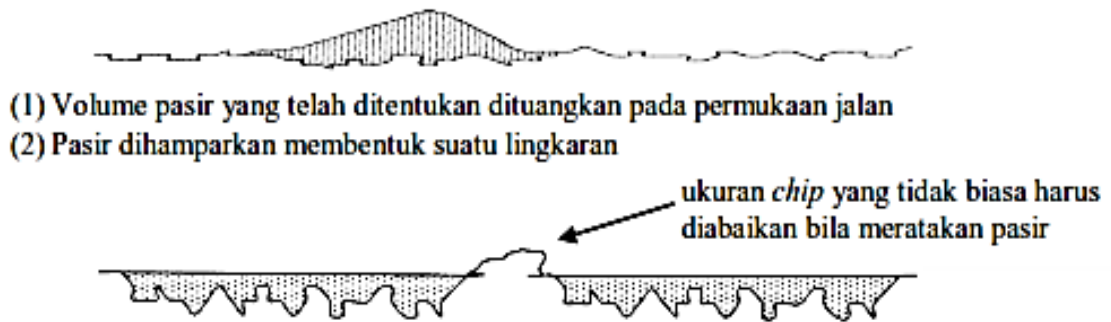
disebabkan oleh lalu lintas. Jenis jenis tekstur permukaan jalan : a) Mikrotekstur, yaitu tekstur yang memungkinkan adhesi antara ban karet dan permukaan jalan, sangat penting untuk menghindari kendaraan selip. ( $<0,5\text{mm}$ ); b) Makrotekstur, yaitu tekstur yang dapat menyalurkan sebagian besar air dari bagian bawah roda kendaraan. Tekstur ini berkisar antara 0,5 mm sampai 0,5 cm; c) Megatekstur, yaitu tekstur yang berkisar antara 0,5 cm sampai 0,5 m. Kondisi tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.5.

Megatekstur tidak memungkinkan roda kendaraan melakukan kontak ideal dengan permukaan jalan. Hal ini menyebabkan roda kendaraan “terpental” dari bagian megatekstur tersebut, yang berarti adhesi sesaat hilang antara bagian permukaan roda dengan permukaan jalan. Dalam penelitian tentang tekstur perkerasan, Praticò dan Vaiana (2015) mempertimbangkan untuk menggunakan berbagai gradasi. Gradasi tersebut adalah: gradasi rapat/ *Dense Graded Friction Courses* (DGFC), *Split Mastic Asphalts* (SMA), gesekan gradasi terbuka/ *Open Graded Friction Courses* (OGFC), campuran berpori *Porous European Mixes* (PEM).

Ada berbagai metode yang dapat digunakan dalam mengukur kedalaman tekstur, yang paling sederhana adalah Metode Lingkaran Pasir (*Sand Patch Method*). Metode ini merupakan teknik pengukuran kedalaman tekstur permukaan secara volumetrik menggunakan pasir dengan ketentuan tertentu. Nilai hasil pengukuran kedalaman tekstur dinyatakan dalam rata-rata kedalaman tekstur atau *Mean Texture Depth* (MTD). Gambar 2.6 menunjukkan prosedur pengujian *Sand Patch Method* (Pandia, dkk, 2016).

Alat dan material yang digunakan dalam pengujian *Sand Patch Method* adalah:

1. Sebuah penggaris atau pita ukur, panjang minimum 400 mm.
2. Sebuah sikat halus atau kuas.
3. Sebuah perata berbentuk bulat dengan permukaan karet.
4. Sebuah pengukur/ penakar pasir yang akan digunakan untuk pengujian yang mempunyai volume sebelah dalam  $45 \pm 0,5$  ml.
5. Sejumlah pasir kering dan bersih dengan butiran yang bulat, ukuran butir  $< 600\mu\text{m}$  dan  $> 300\mu\text{m}$ .



Gambar 2.6 Prosedur Pengujian *Sand Patch Method* (Pandia, dkk, 2016)

### 2.3.2 *Skid resistance*

*Skid resistance* sangat penting bagi pesawat terbang untuk memperlambat kemudian berhenti atau berbalik. Jika *Skid resistance* tidak mencukupi, roda akan meluncur di atas landasan. Hal ini mengakibatkan kontrol pilot terhadap pesawat secara drastis berkurang. Visser (1974) dalam Joubert, dkk, (2004), menyatakan bahwa gesekan antara ban pesawat dan permukaan *runway* terdiri dari 2 komponen, yaitu adhesi dan kondisi permukaan. Gaya gesek akibat adhesi dihasilkan dari interaksi molekuler karet dan agregat yang besarnya ditentukan oleh sifat kedua bahan yang bersentuhan. Tentang kondisi permukaan, Kolbe (1998) dalam Joubert, dkk, (2004) menyatakan bahwa permukaan perkerasan yang kering umumnya tidak menimbulkan masalah dalam hal *Skid resistance*. Namun jika basah, *Skid resistance* dapat berubah drastis menjadi rendah (Joubert, dkk, 2004). Sesuai dengan AC 150 / 5320-12, perkerasan bandara harus mempunyai permukaan yang tahan selip selama semua kondisi cuaca (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2016). *Skid resistance* menurut Standar ICAO untuk *Grip Number* (GN) dengan kecepatan pengujian 95 km / jam (Joubert, dkk, 2004): a) bagus (*good*): 0,70; b) pada tingkat perlu pemeliharaan (*maintenance intervention level*): 0,37; c) tingkat minimum yang diijinkan (*minimum allowable level*): 0,24.

Kecelakaan karena defisiensi *Skid resistance* perkerasan menjadi perhatian utama industri penerbangan dan jalan raya. *Skid resistance* menjadi kritis pada

saat perkerasan basah atau terdapat kontaminan, seperti tumpahan bahan pelumas (Fuentes , dkk, 2010). *Skid resistance* permukaan diukur dengan cara mengukur friksi antara roda dan permukaan perkerasan dalam kondisi basah (membasahi permukaan). Pengukuran juga menggunakan alat MU Meter yang digunakan dalam pengukuran tekstur di atas. Pengujian dilakukan dengan cepat dan terus menerus yang hasilnya berupa grafik serta menunjukkan besaran nilai untuk *Side Friction Coefficient* (SFC). Dari alat ini akan didapatkan nilai koefisien untuk mengetahui kondisi *skid resistance* pada *runway*. Secara umum nilai MPD dan koefisien hasil pengukuran dengan MU Meter adalah sama. Penentuan kondisi *skid resistance* permukaan yang didapatkan dari hasil nilai SFC pada mesin MU meter atau hasil nilai perhitungan MPD dan resiko yang mungkin dapat terjadi dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Hubungan Antara Nilai SFC dengan Resiko Kecelakaan

Nilai SFC	Resiko yang terjadi
>0,6	Kemungkinan kecelakaan sangat kecil, permukaan perkerasan dapat dikatakan kasar
0,55 – 0,60	Kemungkinan kecelakaan akan mulai terjadi, permukaan perkerasan masih dalam kondisi kasar
0,40 – 0,55	Kecelakaan terjadi dan resiko fatal, terjadi dalam bentuk slip

Sumber: Direktorat Jenderal Perhubungan Udara (2015)

Hal-hal yang mempengaruhi rendahnya nilai *Skid resistance* pada permukaan aspal beton, berkaitan dengan salah satu atau lebih dari alasan berikut: (1) penggunaan kadar aspal yang lebih tinggi dari yang direkomendasikan pada desain campuran, (2) desain campuran, (3) penggunaan gradasi agregat, dan (4) kualitas agregat (Asi, 2007). Neubert (2006) dalam Wilding, dkk, (2008), berpendapat bahwa faktor-faktor yang menyebabkan hilangnya *skid resistance* dapat dikelompokkan menjadi dua kategori: 1) Keausan mekanis dan gosokan akibat roda saat menggelinding atau saat pengereman di landasan; 2) Akumulasi kontaminan.



Secara umum, saat merancang *skid resistance* pada campuran aspal beton, perancang mengandalkan dua ukuran, yaitu nilai kehalusan agregat (*polished stone value*), dan tipe gradasi campuran. Dalam desain campuran aspal panas (*hot mix asphalt/ HMA*), aspek fungsional seperti gesekan ban dengan perkerasan (*skid resistance*) tidak selalu dipertimbangkan dibandingkan parameter volumetrik dan parameter struktural. Faktor yang paling penting dalam *skid resistance* adalah tekstur campuran aspal beton. Karakteristik tekstur permukaan dipengaruhi oleh distribusi ukuran partikel HMA. Namun variasi kecil bentuk partikel agregat, tidak memberikan variasi besar terhadap tekstur HMA (Araujo, dkk, 2015).

Sementara itu, Shah dan Abdullah (2010) mendapatkan bahwa bentuk agregat ternyata juga berpengaruh terhadap nilai *skid resistance*. Nilai rata-rata hasil pengujian pada Tabel 2.3, menunjukkan bahwa *skid resistance* tertinggi didapatkan pada agregat bersudut (*angular*), sedangkan yang terendah adalah yang pipih (*flaky*) (Shah dan Abdullah, 2010).

Tabel 2.3 *Skid Resistance* Permukaan Aspal Beton berdasarkan Bentuk Agregat

No. Sampel	Pengujian ke-	Bersudut ( <i>angular</i> )		Lonjong ( <i>elongated</i> )		Pipih ( <i>flaky</i> )	
		Kering ( <i>dry</i> )	Basah ( <i>wet</i> )	Kering ( <i>dry</i> )	Basah ( <i>wet</i> )	Kering ( <i>dry</i> )	Basah ( <i>wet</i> )
1	1	53	42	52	39	49	36
	2	53	42	51	37	47	37
	3	54	41	58	36	46	35
2	1	54	39	51	39	50	35
	2	55	40	51	40	48	41
	3	53	38	53	39	47	37
3	1	55	38	50	35	51	39
	2	54	37	55	37	48	37
	3	56	39	54	39	46	38
Rata-rata ( <i>average</i> )		54	40	53	38	48	37

Sumber: Shah dan Abdullah (2010)

*Skid resistance* diukur dengan metode *British Pendulum Tester* (BPT) seperti yang ditentukan dalam ASTM E303. Prinsip kerja BPT adalah pengukuran gesekan karet di ujung pendulum dengan permukaan perkerasan. Pada saat

pengukuran, pendulum dilepaskan dari ketinggian tetap di atas permukaan perkerasan yang sudah dipadatkan. Karet yang terpasang pada ujung pendulum bergerak melintasi permukaan perkerasan, gaya gesekan akan mengurangi energi kinetik pendulum. Pembacaan yang ditunjukkan oleh pointer dicatat sebagai nilai *skid resistance*.

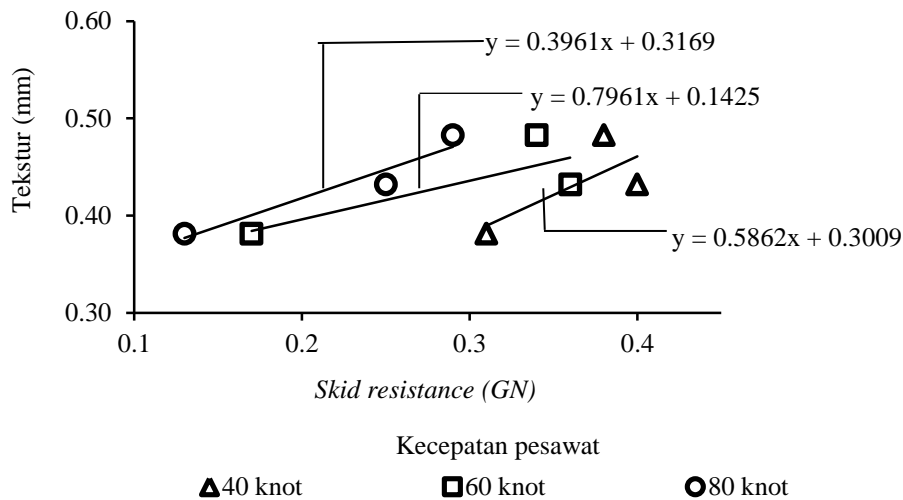
*Skid resistance* juga dapat diprediksi berdasarkan tekstur permukaan. Seperti yang dilakukan oleh Seno and Ahyudanari (2015) untuk mendapatkan nilai *skid resistance* Bandara Juanda. Pendekatan ini didasarkan pada pengaruh makrotekstur dan mikrotekstur terhadap *skid resistance*. Pengukuran tekstur dilakukan dengan menggunakan *sand patch test* (ASTM E 965). Berdasarkan hasil pengukuran akan didapatkan nilai kedalaman tekstur. Dari kedalaman tekstur ini prediksi terhadap permukaan dapat dilakukan. Yaitu, apabila kedalaman < 1,5 mm permukaan dinyatakan licin dan bila kedalaman > 1,5 mm permukaan cukup kasar (Seno dan Ahyudanari, 2015).

### **2.3.3 Hubungan *Rubber Deposit* terhadap *Skid resistance* dan Tekstur**

Joubert, dkk (2004) menyatakan bahwa terdapat pengaruh tekstur terhadap *rubber deposit*. Panagouli dan Kokkalis (1998) memperkuat pernyataan tersebut, dimana tekstur permukaan perkerasan berpengaruh dalam meningkatkan *skid resistance*. Tekstur tidak dapat diabaikan karena dibutuhkan untuk dapat memberikan *skid resistance* yang cukup (Sullivan, 2005). Pandia, dkk (2016), dalam penelitian yang lebih spesifik tentang adanya korelasi antara tekstur dengan *skid resistance* menyatakan: (1) terdapat korelasi positif antara kedalaman tekstur dan *skid resistance*; (2) kenaikan nilai *skid resistance* berbanding lurus dengan kenaikan nilai kedalaman tekstur permukaan perkerasan; dan (3) penggunaan metode yang berbeda dalam pengukuran tekstur dan *skid resistance* tidak menyebabkan perbedaan hasil yang signifikan (Pandia, dkk., 2016).

Sejak kemunculan pesawat *turbojet* dengan bobot dan kecepatan pendaratan yang lebih tinggi, kinerja pengereman pada permukaan landasan pacu, menjadi pertimbangan keamanan yang signifikan. Sejumlah program penelitian diarahkan pada dua area utama yaitu: 1) desain permukaan perkerasan baru untuk memaksimalkan *skid resistance* dengan bahan dan teknik konstruksi yang tepat;

dan 2) teknik evaluasi dan perawatan yang efektif untuk mendeteksi penurunan *skid resistance* dan mengembalikannya ke tingkat yang dapat diterima (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration AC No: 150/5320-12D).



Gambar 2.7. Hubungan Tekstur dengan *Skid Resistance* (Yager dkk., 1990)

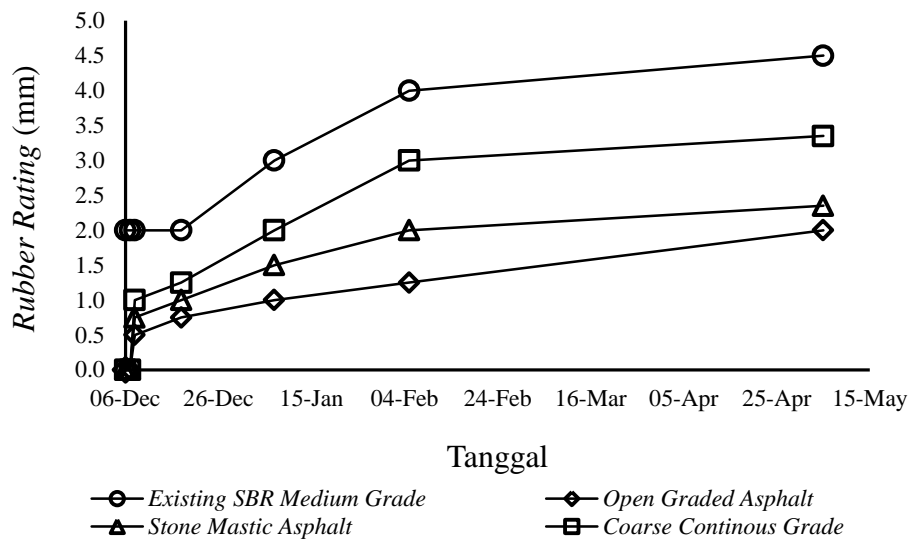
Analisis hubungan tekstur dengan *skid resistance* berdasarkan hasil pengujian di lapangan yang dilakukan oleh Yager dkk. (1990), ditunjukkan pada Gambar 2.7. Gambar tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kedalaman tekstur (MTD), mengakibatkan meningkatnya *skid resistance*. Hal ini dapat dijelaskan bahwa, kekesatan (*friction coefficient*) permukaan ditentukan oleh kedalaman tekstur selain pengaruh air, kecepatan kendaraan, temperature, jenis dan permukaan karet roda. Semakin kesat permukaan maka nilai *skid resistance* akan semakin meningkat.

Hubungan antara tekstur (y) dan *Skid resistance* (x) pada Gambar 2.7 terbentuk dalam 3 persamaan berdasarkan kecepatannya adalah sebagai berikut:

$$y = 0,3961x + 0,3169; \text{ untuk kecepatan } 80 \text{ knot} = 148,2 \text{ Km/jam} \quad (2.1)$$

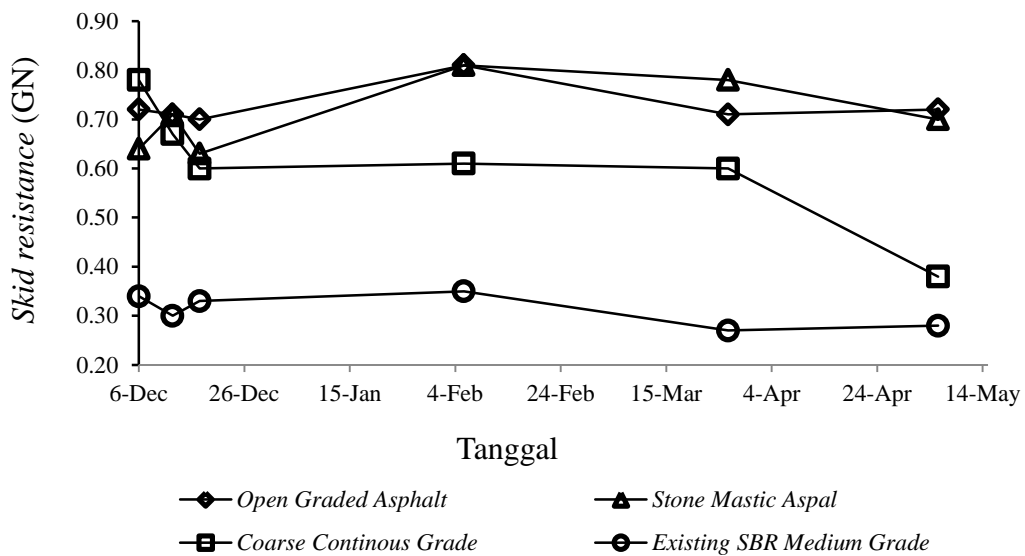
$$y = 0,7961x + 0,1425; \text{ untuk kecepatan } 60 \text{ knot} = 111,1 \text{ Km/jam} \quad (2.2)$$

$$y = 0,5862x + 0,3009; \text{ untuk kecepatan } 40 \text{ knot} = 74,1 \text{ Km/jam} \quad (2.3)$$



Gambar 2.8. Hubungan Terbentuknya Endapan Karet dengan Waktu (Joubert, dkk, 2004)

Gambar 2.8. adalah hubungan terbentuknya endapan karet dengan waktu pengamatan (Joubert, dkk, 2004). Penelitian tentang *rubber deposit*, kaitannya dengan tekstur dan *skid resistance*, untuk campuran aspal beton ini dilakukan di *touchdown zone* landasan pacu *Johannesburg International Airport*. Studi menunjukkan bahwa campuran *split mastic asphalt* (SMA) memberikan kinerja terbaik dalam hal *Skid resistance* dan pengurangan *rubber deposit* dibandingkan dengan campuran bergradasi menerus dan campuran bergradasi terbuka (Joubert, dkk, 2004). Gambar 2.8 menunjukkan hubungan antara waktu dengan tingkat pengendapan karet (*rubber deposit*) untuk berbagai jenis campuran aspal. Sedangkan Gambar 2.9 adalah hubungan antara waktu pengamatan dengan *skid resistance*.



Gambar 2.9. Hubungan *Skid Resistance* dengan Waktu (Joubert, dkk, 2004)

Gambar 2.8. dan 2.9 serta Tabel 2.4 menunjukkan hasil pengamatan selama 5 bulan penggunaan perkerasan, menunjukkan bahwa *rubber deposit* tertinggi berturut-turut yaitu: 1) gradasi menerus, kondisi awal 0 mm, setelah 5 bulan 3,9 mm); 2) gradasi terbuka kondisi awal 0 mm setelah 5 bulan 2 mm; dan 3) *Stone Mastic Asphalt* kondisi awal 0 mm setelah 5 bulan 0,24 mm. Nilai teksturnya berturut-turut: 1) gradasi menerus, berkurang 0,1 mm, dari kondisi awal 0,43 mm, setelah 5 bulan menjadi 0,3 mm; 2) gradasi terbuka berkurang 0,43 mm, dari kondisi awal 1,33 mm, setelah 5 bulan menjadi 0,9 mm; dan 3) *Stone Mastic Asphalt* berkurang 1,77 mm, dari kondisi awal 2,66 mm, setelah 5 bulan menjadi 0,89 mm. Ini menunjukkan bahwa penurunan tekstur pada perkerasan dengan gradasi menerus paling rendah. Hal ini menunjukkan perkerasan aspal dengan gradasi menerus lebih tahan terhadap gerusan dari pada 2 campuran lainnya. Sehingga timbunan karet tertinggi terjadi pada perkerasan dengan gradasi menerus sebesar 3,9 mm (Joubert, dkk, 2004). Hubungan antara tekstur dengan *rubber deposit* selengkapnya dapat dilihat dalam Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Ringkasan Hasil Penelitian *Rubber Deposit*

Aktivitas Pengamatan	<i>Existing SBR medium grade</i>	<i>Coarse continuous grade</i>	<i>Stone Mastik Asphalt</i>	<i>Open grade asphalt</i>
<i>Rubber build-up rating Initial/ 5 months</i>	2/4,5	0/3,9	0/2,4	0/2
<i>Skid resistance (GN) Initial/ 5 months</i>	0,34/0,28	0,79/0,38	0,64/0,71	0,73/0,73
<i>Pendulum test Initial/ 5 months</i>	81/63	61/62	58/74	68/66
<i>Surface texture Initial/ 5 months</i>	0,86/0,62	0,40/0,30	1,33/0,90	2,66/0,89
<i>Operations (incidents)</i>	Dua	Nol	Nol	Nol
<i>Surface integrity</i>	Sangat baik	Sangat baik	Baik	<i>Scattered aggregate loss</i>

Sumber: Joubert, dkk, 2004

Karena volume lalu lintas penerbangan yang tinggi, maka menyebabkan gesekan antara ban pesawat dengan permukaan perkerasan menjadi banyak pula. Bekas gesekan material ban berupa karet lambat laun akan mengendap di bagian permukaan perkerasan yang menyebabkan permukaan licin terutama pada saat basah. Permukaan licin berpotensi mengakibatkan penambahan jarak pengereman dan resiko tergelincirnya pesawat. Pesawat terbang saat lepas landas maupun mendarat meninggalkan bekas / sisa karet ban di landas pacu (*runway*), sementara pada saat berjalan akan meninggalkan bekas ban di daerah landas hubung (*taxiway*) maupun landas parkir (*apron*). Hal ini terjadi akibat gesekan ban pesawat dengan permukaan perkerasan. *Rubber deposit* mempunyai efek *hydroplaning* berupa efek yang sama dengan genangan air dan memungkinkan roda pesawat mengapung dan mengakibatkan rem pesawat tidak bisa bekerja secara efektif. Sebesar apapun kekuatan rem pesawat, tidak mampu untuk mengurangi kecepatan pesawat karena permukaan yang licin sehingga pesawat kehilangan kontrol dan keluar dari jalurnya. Endapan karet yang tertinggal di permukaan perkerasan dapat diperparah bila terjadi tumpahan atau ceceran minyak yang mengenainya. Akumulasi dari endapan karet yang menempel di

permukaan perkerasan dapat disebabkan antara lain karena berat dari pesawat yang mendarat, banyaknya roda pendaratan, iklim serta panjang dan variasi landas pacu.

*Skid resistance* pada perkerasan kaku adalah kemampuan dari permukaan perkerasan untuk memberikan kekesatan yang baik (*good friction*) pada semua kondisi cuaca terutama saat cuaca hujan (basah), dengan bentuk meliputi: 1) permukaan yang licin karena material tergerus oleh lalu lintas pesawat (*polished aggregate*); 2) permukaan yang licin karena karet ban pesawat (*contaminants*). Tetapi, *skid resistance* pada perkerasan lentur adalah penurunan kemampuan dari permukaan perkerasan untuk memberikan kekesatan yang baik (*good friction*) pada semua kondisi cuaca terutama saat cuaca hujan (basah), dengan bentuk meliputi: 1) permukaan yang licin karena material tergerus oleh lalu lintas pesawat (*polished aggregate*); 2) permukaan yang licin karena karet ban pesawat (*contaminants*); 3) permukaan licin karena kebanyakan penggunaan aspal (*bleeding*); 4) permukaan aspal yang melunak akibat tumpahan minyak (*fuel spillage*) (Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, 2015).

Untuk itu, mengacu pada FAA AC No 150/5320-12C *Measurement, Construction, and Maintenance of Skid-Resistant Airport Pavement Surfaces* (Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, 2015), maka Kementerian Perhubungan merekomendasikan jadwal pembersihan endapan karet (*rubber removal*) tersebut sebagaimana tersaji dalam Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Jadwal Pembersihan Endapan Karet (*Rubber Removal*)

Frekuensi pendaratan per hari	Pembersihan rutin
≤ 15	Setiap 2 tahun
16-30	Setiap 1 tahun
31-90	6 bulan sekali
91-150	4 bulan sekali
151-210	3 bulan sekali
≥210	2 bulan sekali

Sumber: Direktorat Jenderal Perhubungan Udara (2015)

Beberapa cara digunakan untuk membersihkan *rubber deposit*: 1) Teknik pengompresan angin panas, dapat digunakan pada landasan pacu dengan beton semen (*Rigid Pavement*) dan landasan pacu dengan beton aspal (*Flexible Pavement*); 2) Teknik menggunakan gas temperatur tinggi, digunakan untuk membakar habis *rubber deposit* yang ditinggalkan oleh ban pesawat; 3) Bahan kimia, digunakan untuk menghilangkan *rubber deposit* yang terdapat di landasan beton dan aspal. Bahan kimia ini sebagian mempunyai bahan dasar *cresylic acid* (suatu derivatif cairan pengawet kayu). Pada landasan beton digunakan campuran *benzene* dengan *synthetic detergent* untuk memisahkan air dari *removal rubber*. Sedangkan pada landasan aspal digunakan bahan kimia yang bersifat alkali; 4) menggosok menggunakan alat khusus; dan 5) "pengupasan" secara mekanis. Pembersihan *rubber deposit* menimbulkan efek yang merugikan bagi perkerasan disamping biayanya yang mahal. Selain itu juga memerlukan waktu yang cukup lama sehingga dapat mengganggu jadwal penerbangan (Speidel, 2002).

#### **2.3.4 Deformasi Permukaan**

Deformasi adalah peristiwa penurunan lapis struktur perkerasan setelah terjadi pembebanan. Deformasi pada permukaan perkerasan, tetapi tidak kembali lagi ke posisi awal disebut deformasi permanen. Deformasi permanen dapat membentuk alur (*rutting*) pada jalur tapak roda kendaraan. Menurut (Adithya, dkk., 2016), penyebab utama *rutting* adalah:

- 1) Tekanan/ pembebanan berulang yang berdampak terhadap kerusakan pada lapis bawah, karena *subgrade* jelek.
2. Tekanan/ pembebanan berulang yang berdampak terhadap kerusakan pada lapis atas (struktur perkerasan).

Kinerja ketahanan deformasi campuran diketahui dengan tinjauan terhadap stabilitas dinamis (*dynamic stability*), laju deformasi (*rate of deformation*) dan deformasi permanen. Pengujian yang dilakukan untuk mendapatkan parameter tersebut adalah *wheel tracking*, dilakukan pada suhu 45°C untuk melihat kinerja ketahanan deformasi pada campuran (Perdana, dkk., 2012). Pengujian deformasi dengan *Wheel Tracking* ditujukan untuk mengetahui kecepatan deformasi terhadap campuran akibat lintasan kendaraan (Handayani, dkk, 2015) . Pengujian



ini dapat memberikan gambaran terbentuknya alur (*rutting*) pada permukaan jalan akibat deformasi. Uji *rutting* dilakukan menggunakan alat uji *wheel track*. Dari hasil pengujian deformasi dengan alat *wheel tracking* akan didapatkan hubungan antara jumlah lintasan roda dengan deformasi yang terjadi.

Pengujian ini merupakan simulasi deformasi yang terjadi pada perkerasan akibat lintasan kendaraan dan parameter-parameter utama pengujian ini. Nilai yang disyaratkan dalam spesifikasi adalah nilai minimum sebesar 2500 lintasan/mm (Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga Direktorat Bina Teknik, 2010).

## **2.4 Campuran Perkerasan Aspal untuk Bandara**

### **2.4.1 Persyaratan Agregat sebagai Bahan Campuran Aspal**

Agregat adalah sekumpulan butir-butir batu pecah, kerikil, pasir atau mineral lainnya berupa hasil alam atau buatan. Agregat mempunyai peranan yang sangat penting dalam perkerasan jalan, karena proporsi agregat dalam campuran merupakan proporsi terbesar, berkisar antara 90 - 95 % dari berat total campuran, atau 75-85% dari volume campuran (*The Asphalt Institute*, 1983).

Agregat yang digunakan untuk bahan perkerasan aspal beton meliputi: agregat kasar, agregat halus dan filler. Menurut Pedoman Perencanaan Campuran Beraspal dengan Pendekatan Kepadatan Mutlak, berdasarkan ukuran butirnya, jenis-jenis agregat adalah sebagai berikut: 1) Agregat Kasar. Fraksi agregat kasar adalah agregat yang tertahan di atas saringan 2,36 mm (No.8). Fraksi agregat kasar terdiri atas batu pecah atau kerikil pecah dalam ukuran-ukuran nominal; 2) Agregat Halus. Agregat halus terdiri atas pasir alam atau hasil pemecah batu, dalam ukuran nominal maksimum 2,36 mm; 3) Bahan pengisi. Bahan pengisi terdiri atas debu batu kapur, debu dolomit, semen Portland, abu terbang (*fly ash*), debu tanur pembuat semen atau bahan mineral tidak plastis lainnya. Bahan pengisi terdiri atas paling sedikit 95% lolos saringan ukuran 0,28 mm atau No. 50. Bahan pengisi harus kering dan bebas gumpalan-gumpalan, dan minimum 75%

(dianjurkan minimum 85%) lolos saringan 0,075 mm (Departemen Pekerjaan Umum, 1999).

*The Asphalt Institute* dalam Sukirman (2007) menyatakan bahwa jenis-jenis agregat adalah sebagai berikut: 1) Agregat kasar adalah agregat yang tertahan saringan no. 8 (2,36 mm); 2) Agregat halus adalah agregat yang lolos saringan no. 8 (2,36 mm); 3) Bahan pengisi adalah bagian dari agregat halus yang lolos saringan no. 30 (0,60 mm).

Persyaratan agregat sebagai bahan campuran aspal beton untuk perkerasan bandara, ditunjukkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Persyaratan Properties Agregat untuk Bahan Campuran Aspal

No	Pengujian	Persyaratan
<b>Agregat Kasar</b>		
1	Penyerapan air	max 3%
2	Berat Jenis	
a.	Berat jenis <i>Bulk</i>	Min 2,5 gr/cm <sup>3</sup>
b.	Berat jenis SSD	Min 2,5 gr/cm <sup>3</sup>
c.	Berat jenis semu	Min 2,5 gr/cm <sup>3</sup>
d.	Berat jenis efektif	Min 2,5 gr/cm <sup>3</sup>
3	Kelekatan terhadap aspal	Min. 95%
4	Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan Sodium Sulfat (Soundness Test) untuk Surface Course	Maks. 10%
5	Abrasi dengan mesin Los Angeles pada bandar udara dengan berat pesawat lebih dari 28 ton	Maks. 25 %
6	Abrasi dengan mesin Los Angeles pada bandar udara dengan berat pesawat maksimum 28 ton	Maks. 40 %
<b>Agregat Halus</b>		
1	Jumlah bahan lolos saringan no. 200	Maks. 10 %
2	Penyerapan air	Maks. 3 %
3	Berat jenis	2,5 gr/cm <sup>3</sup>
<b>Filler</b>		
1	Penyerapan air	Maks. 3 %
2	Berat jenis	2,5 gr/cm <sup>3</sup>

Sumber: Peraturan Direktur Jenderal Perhubungan Udara, No. : KP 576 (2011)

#### 2.4.2 Agregat Natural

Batu pecah, kerikil dan pasir adalah dua sumber utama agregat alami. Bahan-bahan ini biasanya digunakan sebagai bahan konstruksi. Agregat yang umum dipakai pada campuran aspal panas secara umum berasal dari batuan.

Agregat ini berasal dari batuan yang ada di alam atau batuan natural. Berdasarkan proses terjadinya batuan ini dibedakan atas batuan beku (*igneous rock*), batuan sedimen/ endapan (*sedimentary rock*) dan batuan metamorf/ malihan (*metamorphic rock*) (Malik, 2004) (Achmad, 2010):

1. Batuan beku adalah batuan yang terjadi dari pembekuan magma yang berasal dari bawah permukaan bumi dan membeku di permukaan atau dekat permukaan bumi, contohnya : *granit, basalt, gabro* dan lain-lain. Sifat-sifat teknis batuan beku pada umumnya, adalah :
  - Mempunyai karakteristik material yang baik, keras, padat dan berkualitas baik, bila digunakan sebagai material bangunan.
  - Kapasitas dukung tinggi sehingga sangat baik untuk mendukung pondasi bangunan.
2. Batuan sedimen adalah batuan yang terbentuk karena proses pengendapan, proses kimia dan proses biologi. Umumnya terbentuk dari pecahan-pecahan batuan yang lebih tua, fragmen-fragmen dipisahkan oleh air atau angin, contohnya : serpih, batu pasir, batu gamping dan lain-lain. Sifat-sifat teknis batuan sedimen pada umumnya, adalah :
  - Serpih sering menjadi lunak bila terendam air dalam beberapa hari.
  - Jarak kekar umumnya agak besar untuk batu pasir.
  - Kekuatan batu gamping bervariasi dari lunak sampai keras.
3. Batuan metamorf adalah batuan yang terbentuk dari batuan yang sudah ada sebelumnya. Batuan metamorf terbentuk akibat metamorfosa dari batuan beku dan sedimen. Perubahan ini terjadi akibat proses panas dan tekanan tinggi yang terjadi di kerak bumi. Batuan metamorf mempunyai banyak variasi diantaranya *schist, gneiss, slate, phyllite* dan *marble*. Sifat-sifat teknis batuan metamorf pada umumnya, adalah :
  - Mempunyai karakteristik material yang keras dan kuat dan hampir tidak terpengaruh oleh perubahan cuaca.
  - Kuat geser tergantung dari sambungan-sambungan, lapisan-lapisan dan patahan dalam batuan.
  - Mengandung lapisan-lapisan lemah di antara lapisan-lapisan yang keras.

Disamping agregat alam, saat ini banyak dikembangkan agregat buatan. Agregat buatan terbuat dari berbagai produk sampingan seperti: fly ash, limbah padat pembangkit listrik, abu sekam padi, terak tungku industri peleburan besi, bubuk granit, terak bijih besi, pecahan bata, dan lain lain. Bahan-bahan tersebut dianggap sebagai polutan lingkungan. Di sisi lain, ada permintaan besar untuk agregat alam, di satu sisi, ada masalah pembuangan produk sampingan semacam itu. Dengan menggunakan agregat buatan, masalah pembuangan polutan ini tertatasi. Pada saat bersamaan terjadi penghematan sumber daya alam, mengurangi pencemaran lingkungan, dengan demikian memberi jalan bagi pengembangan industri agregat<sup>1</sup>.

### 2.4.3 Agregat Buatan

Ketersediaan bahan baku untuk konstruksi sedang menghadapi banyak masalah di sebagian besar dunia. Kekurangan agregat alam untuk industri infrastruktur menyebabkan kelangkaan beberapa bahan bangunan, karena menipisnya sumber daya alam (Debieb & Kenai, 2008) (Priyadharshini, dkk, 2012). Deposit pasir dan kerikil umumnya adalah berupa pelapukan batuan yang hanyut bersama air. Karena itu umumnya terdapat di sungai atau aliran lainnya. Batu kapur, granit dan batuan beku lainnya, juga merupakan batuan alam (Langer, 1993).

Pembuatan agregat dengan bahan limbah adalah salah satu jawaban atas permasalahan di atas. Dengan produksi agregat buatan dari limbah, dapat memecahkan dua masalah, yaitu melestarikan lingkungan dari polusi dan mencegah sumber daya alam dari penipisan, sehingga dapat menunjang pembangunan berkelanjutan (Priyadharshini, dkk, 2012). Upaya ini juga dapat menekan biaya pembuangan limbah dan menghindari pencemaran lingkungan (Thomas, 2013). Limbah ini berasal dari bahan-bahan konstruksi, limbah pabrik, hasil bongkaran, reruntuhan bangunan akibat bencana alam (Thomas, 2013). Penggunaan batubara sebagai pengganti bahan bakar minyak menghasilkan *fly ash*. Sementara pemanfaatan *fly ash* saat ini masih kurang dari 50%. Masalah

---

<sup>1</sup> (<https://gharpedia.com/classification-of-aggregates/>).

pembuangan limbah industri telah menjadi isu lingkungan, akibat polusi yang ditimbulkan terutama untuk kota-kota besar dengan tempat pembuangan terbatas (Debieb dan Kenai, 2008) (Priyadharshini, dkk, 2012). Masalah lainnya adalah kekurangan lahan untuk membuangnya. Sehingga perlu terus dilakukan upaya untuk memanfaatkan limbah ini sebagai bahan alternatif pengganti agregat alami (Cachim, 2009). Penggunaan bahan bekas bongkaran bangunan atau reruntuhan akibat gempa, misalnya bata, telah dilakukan untuk mencari bahan alternatif baru berupa agregat kasar dari bahan limbah. Penggunaan hancuran batu bata dapat mengurangi permasalahan dan secara bersamaan membantu pelestarian sumber daya alam. Beberapa kendala untuk penggunaan agregat hancuran batu bata untuk beton adalah keterbatasan pada penyerapan air dan kurangnya pengetahuan tentang perilaku beton yang terbuat dari hancuran batu bata (Debieb dan Kenai, 2008). Telah banyak penelitian dengan menggunakan limbah sebagai agregat buatan. Misalnya, penelitian yang bertujuan untuk membuat agregat ringan buatan dengan melakukan stabilisasi/solidifikasi *bottom ash* yang berasal dari tempat pembakaran (*incinerator*) sampah padat perkotaan. Stabilisasi/ solidifikasi adalah hasil produksi agregat buatan dari piring putar granulator dengan menambahkan pengikat berbahan semen, kapur dan *fly ash* batubara (Cioffi dkk, 2011). Penelitian tentang agregat buatan dengan mendaur ulang limbah lumpur batu (*Stone sludge*) dan limbah lumpur (*Waste silt*), bertujuan untuk menganalisis kuat tekan, penyerapan, serta ketahanan agregat buatan terhadap abrasi di bawah getaran (Chang dkk, 2010). Penggunaan limbah sebagai agregat buatan minimal telah menyelesaikan dua masalah utama yaitu: masalah lingkungan dan masalah kelangkaan agregat natural. Pembuatan agregat ringan dari geopolimer yang memanfaatkan *fly ash* telah dilakukan dengan teknik aglomerasi, meliputi: pengadaan *raw material*, penetapan komposisi, pencampuran, aglomerasi sehingga membentuk pelet.

Untuk mengurangi kebutuhan agregat natural (alam), saat ini perbaikan gradasi dan kualitas agregat dilakukan dengan mencampur agregat alam dengan agregat buatan. Asi (2007) misalnya, membuat gradasi agregat untuk campuran aspal beton dengan mencampur agregat dari batu kapur dengan agregat buatan. Agregat buatan yang digunakan adalah *slag* baja untuk menggantikan 30 % dari

agregat batu kapur. Sebagai pembanding dibuat campuran aspal dengan menggunakan desain *Superpave*, SMA dan *Marshall*. Ditemukan bahwa campuran dengan slag 30% memiliki nilai *Skid resistance* tertinggi. Hasil lain yang ditemukan adalah bahwa peningkatan kadar aspal di atas nilai kadar aspal optimal mengurangi *Skid resistance* dari campuran tersebut.

Material yang digunakan sebagai agregat buatan saat ini kebanyakan dari limbah (Priyadharshini, dkk, 2012), seperti *industrial sludge*, *palm shell*, *pet bottles*, *mining residues*, *fly ash*, *bottom ash*, dan *marine clay*. Sebagai binder umumnya antara lain digunakan *cement*, *clay*, *lime*, dan *bentonite*. Proses produksinya melalui pemanasan yang tidak melewati titik leleh (*sintering*), pemanasan dengan tekanan tinggi (*autoclaving*) atau metode pengikatan dingin (*cold bonded*). Tabel 2.7, menunjukkan sumber bahan, pengikat/ binder, dan metode pembuatannya (Priyadharshini, dkk, 2012).

#### **2.4.4 Gradasi Agregat**

Gradasi agregat adalah distribusi dari variasi ukuran butir agregat. Gradasi agregat berpengaruh pada besarnya rongga dalam campuran dan menentukan *workability* (kemudahan dalam pekerjaan) serta stabilitas campuran. Gradasi agregat ditentukan dengan cara analisa saringan, dengan sampel agregat harus melalui satu set saringan. Ukuran saringan menyatakan ukuran bukaan jaringan kawat. Sedangkan nomor saringan menyatakan banyaknya bukaan jaringan kawat per inchi pesegi dari saringan tersebut.

Menurut (Sukirman, 1992), berdasarkan keberadaan ukuran butir penyusunnya, jenis-jenis gradasi dibedakan atas :

##### **1) Gradasi seragam (*uniform graded*)**

Gradasi seragam adalah gradasi agregat dengan ukuran butir yang hampir sama. Gradasi seragam ini disebut juga gradasi terbuka (*open graded*) karena hanya mengandung sedikit agregat halus sehingga terdapat banyak rongga/ ruang kosong antar agregat.

Tabel 2.7 Variasi Sumber Bahan, Pengikat dan Metode Pembuatan Agegat

Sumber/ Source	Pengikat/ Binder	Pra Proses/ Pre Process	Pembuatan pelet agregat	Pasca proses (Post process)
Lumpur logam berat (25%) Limbah tambang (50%) fly ash (25%)	Air dan kanji ( <i>Water and starch</i> )	Pengeringan penghancuran dan mixing ( <i>Drying pulverizing dan mixing</i> )	Pembentukan pelet selama 15 menit pada 25 <sup>0</sup> C pada kecepatan 15rpm	Formulasi pada 1050 <sup>0</sup> C hingga 1250 <sup>0</sup> C selama 5-25 menit
Lempung laut (50%-90%) Lumpur industri (50%-10%)	-		Memutar dengan tangan ( <i>Hand rolling</i> )	Dipanaskan dalam tanur pada 1200 <sup>0</sup> C selama 1-2 menit ( <i>Heated in kiln at 1200<sup>0</sup>C for 1-2 mins</i> )
Cangkang sawit/ <i>Palm shell</i>	-		Dengan memecahkan cangkang sawit	Dicuci dalam air ( <i>Washed in water</i> )
Kertas sludge/ <i>Paper sludge</i>	Semen ( <i>Cement</i> )	Lumpur kertas dan semen dicampur bersama dalam mixer	Granulasi dengan pembuat pelet ( <i>Granulation using pelletizer</i> )	Dikeringkan dengan oven (100-105 <sup>0</sup> C)
Botol pet/ <i>Pet bottles</i>	Butiran arang dari tungku pembakar/ <i>Granulated Blast Furnace Slag (GBFS)</i>		Memotong dan mencampur dengan GBFS dalam mixer pada 250 <sup>0</sup> C selama 20secs pada kecepatan 30-50 rpm	
Limbah lumpur/ <i>Sewage sludge</i>	Tanah Liat / Pengikat organik ( <i>Clay/ Organic binder</i> )			Formulasi pada wadah berputar pada 1050-1150 <sup>0</sup> C selama 10 -15 menit
Arang Baja/ <i>Steel slag</i>			<i>Rapid cooling dan minimal crushing</i>	
Fly ash	Semen/ Kapur/ Tanah liat ( <i>Cement/ Lime/ Clay</i> )	Pencampuran bahan baku ( <i>Raw material mixed well</i> )	Pembentukan pelet ( <i>Pelletized</i> )	Formulasi pada > 1000 <sup>0</sup> C selama satu jam / penguatan / ikatan dingin
Bottom ash	Kapur / Bentonit / Semen ( <i>Lime/ Bentonite/ Cement</i> )	Dihaluskan ( <i>Pulverised</i> )	Pembentukan pelet ( <i>Pelletized</i> )	Formulasi ( <i>sintered</i> ) pada 800-1100 <sup>0</sup> C selama 120 menit

Sumber: Priyadharshini, dkk (2012)

## 2) Gradasi rapat (*dense graded*)

Dalam gradasi rapat terdapat butiran agregat kasar sampai agregat halus, sehingga sering juga disebut gradasi menerus, atau gradasi baik (*well graded*). Gradasi Menerus adalah suatu komposisi agregat yang menunjukkan pembagian butir yang merata sehingga dapat menghasilkan campuran yang sangat padat. Campuran beraspal dengan gradasi ini memiliki stabilitas yang tinggi, agak kedap terhadap air dan memiliki berat isi yang besar.

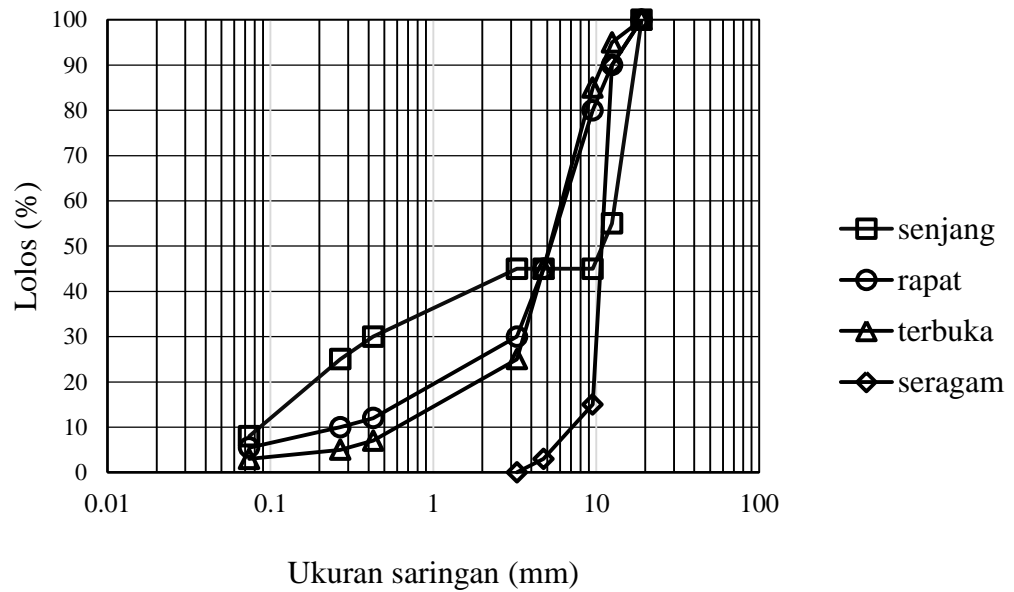
## 3) Gradasi senjang (*gap graded*)

Gradasi senjang adalah gradasi agregat dengan komposisi dengan ukuran agregat yang ada tidak lengkap atau ada fraksi agregat yang tidak ada atau jumlahnya sedikit sekali. Sehingga grafik pembagian butirnya menunjukkan di antara ukuran-ukuran tertentu berbentuk senjang, mempunyai rongga di antara agregat (VMA) lebih besar sehingga dapat mengakomodasi aspal lebih banyak, dan dapat menghasilkan campuran yang lebih awet. Campuran beraspal dengan gradasi ini memiliki kualitas peralihan dari keadaan campuran dengan gradasi seragam dan gradasi rapat.

Dalam perencanaan gradasi digunakan kurva Fuller, yaitu kurva gradasi dengan kondisi campuran memiliki kepadatan maksimum dengan rongga minimum antara mineral agregat (VMA). Campuran laston yang menggunakan agregat dengan gradasi di atas kurva Fuller mempunyai nilai stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan gradasi di bawah kurva Fuller (Utama, 2005). Dianjurkan tidak berimpit dengan kurva Fuller.

Melengkapi penjelasan di atas, pada Gambar 2.10 diberikan contoh grafik gradasi terbuka, gradasi rapat, gradasi senjang, gradasi seragam. Pada Tabel 2.8 ditunjukkan gradasi agregat dari berbagai lembaga dan organisasi yang bergerak dibidang penerbangan internasional dan Indonesia.





Gambar 2.10. Grafik Gradasi Terbuka, Rapat, Senjang dan Seragam (Utama, 2005).

Tabel 2.8 Susunan Gradasi Agregat dari Berbagai Lembaga dan Organisasi

No	Ukuran ayakan		Dithubud, Kemenhub <sup>1)</sup>	FAA <sup>2)</sup>			EB14-BBA Type D <sup>3)</sup>	
	mm	Inchi		Gradasi 1	Gradasi 2	Gradasi 3	Ukuran ayakan (mm)	Lapis Permukaan (Surface Course)
1	25,4	1"	-	100	-	-	-	-
2	19,1	¾"	100	76-98	100	-	-	-
3	12,7	½"	75-95	66-86	77-99	100	14	90-100
4	9,5	3/8"	60-82	57-77	68-88	79-99	6,3	37-42
5	4,76	No.4	42-70	40-60	48-68	58-78	4,0	36-46
6	2,38	No.8	-	26-46	33-53	39-59	2,0	33-43
7	3,26	No.10	30-60	-	-	-	-	-
8	0,74	No.16	-	17-37	20-40	26-46	-	-
9	0,590	No.30	-	11-27	14-30	19-35	-	-
10	0,427	No.40	15-40	-	-	-	-	-
11	0,279	No.50	-	7-19	9-21	12-24	0,25	10-25
12	0,268	No.80	8-26	-	-	-	-	-
13	0,149	No.100	-	6-16	6-16	6-17	-	-
14	0,074	No.200	3-8	3-6	3-6	3-6	0,063	6-9

Sumber: <sup>1)</sup> AC Standard Dithubud Kemenhub; <sup>2)</sup> FAA AC 150/5370-10G;

<sup>3)</sup> *Betons Bitumineux Pour Chaussees Aeronautiques* (BBA).

#### 2.4.5 Campuran Aspal

Perkerasan campuran beraspal beton panas (*hot mix asphalt/ HMA*) adalah campuran yang terdiri atas kombinasi agregat yang dicampur dengan aspal. Komposisi campuran berdasarkan persentase berat adalah sekitar 95 % agregat dan 5 % aspal. Pencampuran dilakukan sedemikian rupa sehingga permukaan agregat terselimuti aspal dengan seragam. Untuk mengeringkan agregat dan memperoleh kekentalan aspal yang mencukupi dalam mencampur dan mengerjakannya, maka kedua-duanya harus dipadatkan masing-masing pada suhu tertentu. Proses pemadatan dilakukan sampai didapatkan kepadatan mutlak. Yang dimaksud kepadatan mutlak adalah kepadatan tertinggi (maksimum) yang dicapai sehingga walaupun dipadatkan terus, campuran tersebut praktis tidak dapat menjadi lebih padat lagi (Departemen Pekerjaan Umum, 1999).

Sifat-sifat mekanis campuran beraspal diperoleh dari gesekan dan ikatan/kohesi bahan-bahan pembentuknya. Gesekan antara agregat tergantung dari gradasi, tekstur permukaan, bentuk butiran dan ukuran agregat maksimum yang digunakan. Sedangkan sifat kohesinya diperoleh dari sifat-sifat aspal yang digunakan. Oleh sebab itu kinerja campuran beraspal sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat agregat dan aspal serta sifat-sifat campuran padat yang sudah terbentuk dari kedua bahan tersebut. Karakteristik aspal dipengaruhi oleh temperatur, pada temperatur tinggi aspal menjadi cair dan pada temperatur rendah aspal menjadi padat/keras (Suaryana, 2014).

Sebagai lapis perkerasan, lapisan aspal beton haruslah memiliki karakteristik sebagai berikut (Sukirman, 2007):

- 1) Stabilitas, lapis perkerasan jalan harus memiliki kemampuan menerima beban lalu-lintas tanpa terjadi perubahan bentuk yang tetap, seperti alur ataupun *bleeding*. Stabilitas lapis perkerasan haruslah seimbang dengan besarnya beban lalu-lintas yang menggunakan jalan tersebut.
- 2) Durabilitas, lapis perkerasan jalan harus tahan terhadap keausan yang diakibatkan oleh pengaruh cuaca, adanya air, perubahan suhu ataupun keausan karena adanya gesekan antara permukaan lapis perkerasan dengan roda kendaraan.

- 3) Fleksibilitas, lapis perkerasan jalan harus bersifat lentur dalam menerima beban, dalam arti perkerasan dapat menerima beban dan mengikuti deformasi akibat adanya pembebanan tanpa berakibat retak atau perubahan volume.
- 4) *Skid resistance* lapis perkerasan jalan harus memiliki permukaan yang tidak licin, sehingga kendaraan tidak mudah selip terutama diwaktu basah.
- 5) Ketahanan lelah (*fatigue*), campuran lapis perkerasan jalan diharapkan memiliki ketahanan terhadap pembebanan berulang-ulang tanpa mengalami alur atau retak.
- 6) Kemudahan dalam pelaksanaan, suatu campuran lapis perkerasan haruslah mudah untuk dicampur, dihampar dan dipadatkan, sehingga kualitas campuran dapat dipertahankan mulai saat dicampur hingga dihamparkan di lapangan.

Berdasarkan jenis gradasinya, campuran beraspal dibedakan menjadi campuran beraspal bergradasi menerus, senjang dan terbuka. Campuran beraspal dengan gradasi menerus seperti AC mendapat kekuatan untuk menahan beban yang diterimanya dari sifat saling kunci antar agregat. Sedangkan campuran beraspal dengan gradasi senjang seperti HRS dan SMA mendapatkan kekuatan untuk menahan beban dari rangka agregat yang kuat dan mortar atau mastik yang kaya aspal, yaitu agregat halus, bahan pengisi dan aspal. Sementara campuran beraspal dengan gradasi terbuka seperti *Porous Asphalt* kekuatannya berasal dari rangka agregat yang kuat dan aspal dengan kelekatan tinggi (Suaryana, 2014).

#### **2.4.5.1 Aspal sebagai Bahan Pengikat Campuran**

Pada temperatur ruang material aspal berbentuk padat sampai agak padat, dan bersifat termoplastis. Aspal akan mencair jika dipanaskan sampai temperatur tertentu, dan kembali membeku jika temperatur turun. Jumlah penggunaan aspal sebagai bahan pengikat agregat dalam campuran perkerasan berkisar antara 4-10% berdasarkan berat campuran atau 10-15% berdasarkan volume campuran (Sukirman, 2003).

Penggunaan aspal perlu memperhatikan kondisi setempat, terutama iklim/suhu. Untuk daerah-daerah yang temperatur udaranya lebih rendah dari 25 ° C, dapat digunakan alternatif bahan aspal dengan nilai penetrasi yang lebih besar dari

AC 60/70. Sesuai dengan kondisi iklim di Indonesia dengan suhu tahunan rata-rata > 25° C, jenis aspal yang digunakan untuk pekerjaan *runway*, *taxiway* dan *apron* adalah AC 60/70, dengan kadar parafin kurang dari 2% dan suhu pencampuran berdasarkan tes viscositas atau biasanya 150°C - 160° C (Peraturan Direktur Jenderal Perhubungan Udara, Nomor: KP 576 Tahun 2011). Tabel 2.9 menunjukkan persyaratan aspal keras penetrasi 60/70 untuk campuran perkerasan aspal beton.

Tabel 2.9 Persyaratan Aspal Keras Pen 60

No	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Spesifikasi		Satuan
			min	max	
1	Penetrasi pada 25°, 100g, 5detik	ASTM D 5-95	60	70	0,1 mm
2	Titik lembek	ASTM D 36-86	48	56	°C
3	Titik nyala (COC)	ASTM D 92-90	232	-	°C
4	Daktalitas pada 25°, 5 cm/ menit	ASTM D 113-86	100	-	cm
5	Berat jenis	ASTM D 70-82	1,01	1,06	-
6	Kelarutan dalam C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>	ASTM D 2042	99	-	%
7	Kehilangan berat (TFOT)	ASTM D 1754-94	-	0,2	%
8	Penetrasi setelah TFOT	ASTM D 5-95	80	-	% asli
9	Daktalitas setelah TFOT	ASTM D 36-36	100	-	cm
10	Kadar parafin	SNI 03-3639-1994	0	2	%

Catatan: TFOT = *Thin Film Over Test*

ASTM = *American Society for Testing and Material*

Sumber: Direktorat Jenderal Perhubungan Udara (2011)

#### 2.4.5.2 Perencanaan Campuran Aspal

Perencanaan campuran dimaksudkan untuk menemukan komposisi sehingga didapatkan properties campuran mempunyai kinerja yang baik dengan material yang tersedia. Kinerja campuran ditentukan dari nilai stabilitas, *flow* dan *Marshall Quotient* dan masih di dalam persyaratan VMA, VIM dan VFB. Untuk mendapatkan hal tersebut perlu dilakukan percobaan sehingga komposisi optimum agregat dan aspal sebagai unsur utama pembentuk campuran. Kadar aspal yang memberikan kinerja terbaik, disebut kadar aspal optimum.

Sehubungan dengan hal tersebut *U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, (2014)*, memberikan penekanan dalam perencanaan campuran aspal beton pada hal-hal sebagai berikut:

- 1) Persentase lolos setiap ukuran saringan untuk gradasi gabungan dan gradasi masing-masing agregat penyusun, dengan kurva gradasinya
- 2) Properties kinerja agregat, berdasarkan hasil pengujian agregat
- 3) Kadar aspal optimum
- 4) Properties yang menyatakan kinerja aspal, berdasarkan hasil pengujian aspal
- 5) Jumlah pukulan pada saat pemadatan per sisi spesimen, sesuai dengan beban penggunaan campuran
- 6) Suhu pencampuran laboratorium.
- 7) Suhu pemadatan laboratorium.
- 8) Hubungan viskositas dengan temperatur pengikatan aspal dalam kisaran yang dapat diterima sesuai suhu pencampuran dan pemadatan.
- 9) Grafik stabilitas, flow, rongga udara dalam campuran (VIM), rongga dalam agregat mineral (VMA), dan hubungan berat volume dengan kadar aspal.

Pembuatan Formula Campuran Rencana (FCR) menurut Pedoman Perencanaan Campuran Beraspal dengan Pendekatan Kepadatan Mutlak (Departemen Pekerjaan Umum, 1999), terdiri dari:

- 1) Penentuan kadar aspal optimum
- 2) Penentuan properties/ parameter *Marshall* campuran aspal

- **Penentuan kadar aspal optimum**

Penentuan kadar aspal optimum mengikuti langkah-langkah sebagai berikut:

- 1) Menghitung perkiraan awal kadar aspal optimum ( $P_b$ ) sebagai berikut :

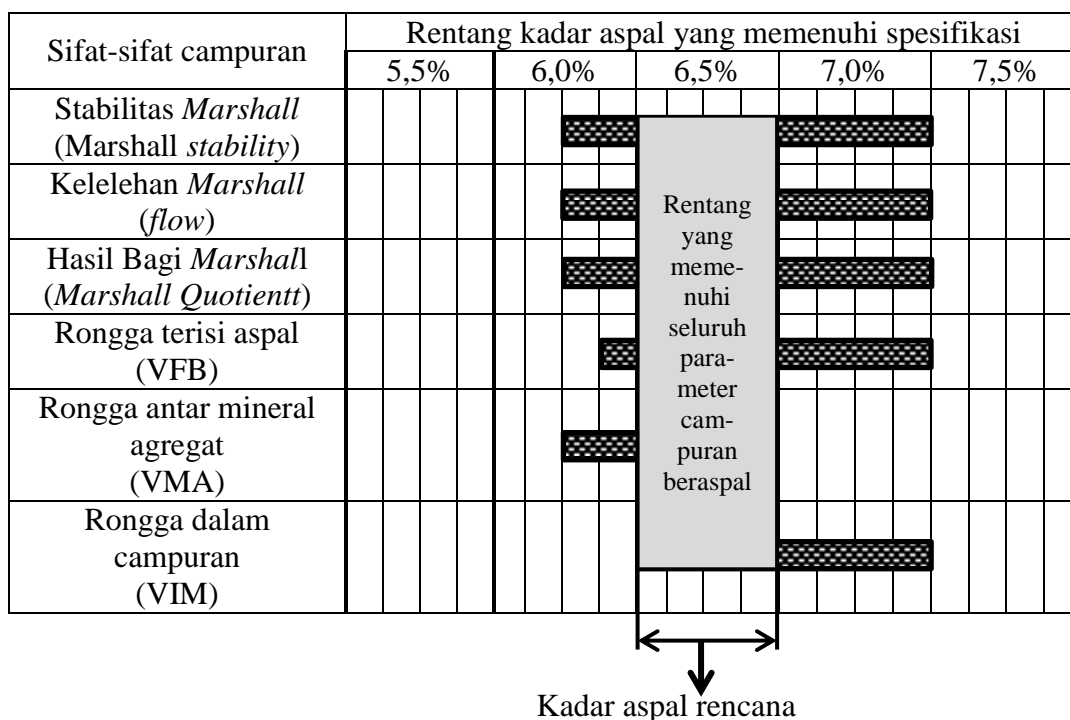
$$P_b = 0,035 (\%CA) + 0,045(\%FA) + 0,18(\%FF) + Konstanta \quad (2.4)$$

dengan:

Nilai konstanta 0,5 sampai 1,0 untuk Laston dan 2,0 sampai 3,0 untuk Lataston. Untuk jenis campuran lain gunakan nilai 1,0 sampai 2,5.

CA = Agregat Kasar, FA = Agregat Halus, FF = Bahan Pengisi

- 2) Perkiraan nilai Pb yang didapatkan dari rumus di atas, dibulatkan sampai 0,5% terdekat. Misalnya, jika hasil perhitungan diperoleh 6,3% maka bulatkan menjadi 6,5%.
- 3) Siapkan benda uji *Marshall* pada kadar aspal Pb-1, Pb-0,5, Pb, Pb+0,5 dan Pb+1. Jadi contoh uji dibuat pada kadar aspal 5,5%; 6,0%; 6,5%; 7,0% dan 7,5%.
- 4) Hitung rongga di antara Mineral Agregat (VMA), dan Rongga dalam Campuran (VIM) serta Rongga Terisi Aspal (VFB),
- 5) Lakukan pengujian Marshal, sesuai dengan SNI 06-2489-1991, untuk menentukan kepadatan, stabilitas, kelelahan, dan *Marshall Quotient* (MQ).
- 6) Gambarkan grafik hubungan antara kadar aspal dengan nilai-nilai parameter *Marshall* sebagai berikut: kepadatan, stabilitas, kelelahan, *Marshall Quotient* (MQ), VFB, VMA dan VIM.



Gambar 2.11. Penentuan Kadar Aspal Rencana  
(Departemen Pekerjaan Umum, 1999)

- 8) Untuk masing-masing parameter poin 6), gambarkan batas-batas spesifikasi ke dalam grafik hubungan kadar aspal dengan parameter.
- 10) Pada grafik tersebut gambarkan rentang kadar aspal yang memenuhi persyaratan.
- 11) Tentukan bahwa kadar aspal rencana berada dekat atau pada titik tengah dari rentang kadar aspal yang memenuhi seluruh parameter yang disyaratkan.
- 12) Kadar aspal rencana (kadar aspal optimum) didapatkan seperti pada Gambar 2.11.

Persyaratan campuran rencana metode *Marshall* untuk perkerasan bandara seperti pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Kriteria Perencanaan untuk Pengujian *Marshall*

Jenis Tes	Satuan	Rancangan perkerasan untuk berat kotor pesawat 60.000 <i>lbs</i> (27216 kg) atau lebih atau tekanan ban 100 <i>psi</i> atau lebih	Rancangan perkerasan untuk berat kotor pesawat kurang dari 60.000 <i>lbs</i> (27216 kg) atau tekanan ban kurang dari 100 <i>psi</i>
Jumlah tumbukan	-	75*	50*
Stabilitas	kg	Min. 975 (956)* / 998**	Min. 612 (600)*
<i>Marshall Quotient</i>	kg/mm	350	350
<i>Flow</i>	0,01 <i>inch</i> (0,25mm)	10-16* = 10x0,25-16x0,25 = 2,5-4 mm*	10-18* = 10x0,25-18x0,25 = 2,5-4,5 mm*
	mm	2-4**	
Rongga dalam campuran/ <i>Void in mix</i> (VIM)	%	3,5* / 3-4**	3,5*
Rongga dalam mineral agregat/ <i>Void in mineral aggregate</i> (VMA)	%	Min. 15*	Min. 15*
Rongga Terisi Aspal/ <i>Void Fill Bitume</i> (VFB)	%	76-82**	76-82**

Sumber: \*) *U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration* (2014)

\*\*) Direktorat Jenderal Perhubungan Udara (2011)

- **Penentuan properties/ parameter *Marshall* campuran aspal**

Penentuan properties/ parameter *Marshall* campuran aspal mengikuti langkah-langkah sebagai berikut:

- 1) Buat benda uji *Marshall* sebanyak 5 buah dengan nilai kadar aspal optimum (k.a.o) yang didapatkan dalam perhitungan di atas.
- 2) Lakukan perhitungan nilai VIM, VMA, VFB dengan cara dan menggunakan rumus-rumus seperti pada penentuan k.a.o.
- 3) Lakukan uji *Marshall* terhadap benda uji untuk mendapatkan nilai stabilitas, *flow* dan *Marshall Quotient*.

#### **2.4.5.3 Pengujian-pengujian Campuran Aspal Beton dengan Metode *Marshall***

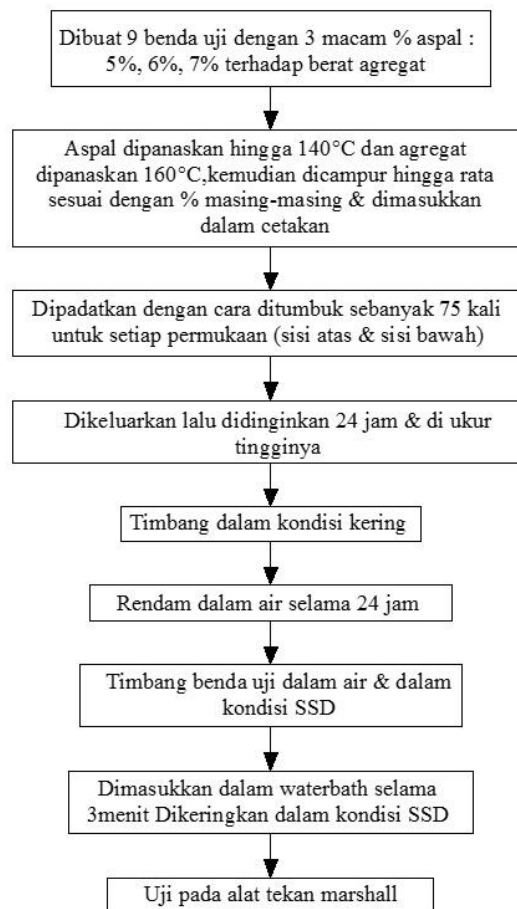
Metode *Marshall* digunakan untuk mengetahui kinerja campuran aspal beton dengan alat *Marshall*. Pengujian-pengujian campuran percobaan meliputi pemeriksaan untuk menentukan ketahanan (stabilitas) terhadap kelelahan plastis (*flow*) campuran aspal dengan agregat (SNI 06-24891991) dan volumetrik campuran. Kelelahan plastis adalah suatu keadaan terjadinya perubahan bentuk suatu campuran akibat bekerjanya beban sampai batas runtuh (Akbar dan Wesli, 2011).

Beberapa hal yang perlu diperhatikan adalah sebagai berikut (Departemen Pekerjaan Umum, 1999):

- a) Komposisi Umum Campuran Beraspal. Campuran beraspal terdiri atas mineral agregat dan aspal. Dalam beberapa hal diperlukan bahan pengisi tambahan (*added filler*) untuk menjamin tercapainya sifat-sifat campuran, tetapi pada umumnya penggunaan mineral bahan pengisi dibatasi. Penggunaan bahan pengisi yang berlebihan dapat memperkaku aspal sehingga campuran menjadi kurang lentur dan mudah retak.
- b) Kadar Aspal Campuran. Kadar aspal campuran rencana harus dipilih sedemikian rupa sehingga kadar aspal efektif (yaitu kadar aspal total setelah dikurangi kadar aspal yang diserap agregat) akan cukup untuk memenuhi seluruh persyaratan dalam spesifikasi. Karena itu besarnya persentase aspal sebenarnya yang ditambahkan ke dalam campuran, tergantung pada tingkat



penyerapan aspal oleh agregat yang digunakan. Agregat dengan tingkat penyerapan yang tinggi memerlukan kadar aspal total yang lebih tinggi. Biasanya agregat yang banyak menyerap aspal juga akan mempunyai variasi penyerapan yang lebih besar.



Gambar 2.12 Diagram Alir Pengujian *Marshall*  
(Departemen Pekerjaan Umum, 1999)

Gambar 2.12 ditunjukkan diagram alir pengujian dengan metode *Marshall*. Pada perencanaan dengan metode *Marshall*, campuran dengan kadar aspal bervariasi dipadatkan dalam suatu cetakan dengan beban standar berat 4,54 kg dan tinggi jatuh 457 mm. Pada perencanaan *Marshall* konvensional, yang

menggunakan agregat berukuran maksimum 25,4 mm, jumlah tumbukan bolak-balik untuk dua sisi sampel sesuai dengan peruntukkan seperti pada Tabel 2.10.

Persiapan peralatan untuk perencanaan pencampuran meliputi antara lain alat untuk mengambil contoh bahan, timbangan, oven, alat pencampur dan alat bantu lainnya. Peralatan utama untuk perencanaan campuran dengan pendekatan kepadatan mutlak memerlukan peralatan *Marshall* (SNI 06-2489-1991) dan peralatan kepadatan mutlak (BS 594 1994). Peralatan untuk pengujian di laboratorium harus sudah dikalibrasi (Departemen Pekerjaan Umum, 1999).

Data stabilitas dan flow yang merupakan properties campuran aspal dalam uji *Marshall*, didapatkan melalui pembacaan arloji pada alat saat pengujian. Sedangkan VMA, VIM dan VFB didapatkan melalui uji volumetrik. Namun sebelumnya harus diketahui terlebih dahulu:

a) Berat jenis *bulk* campuran ( $G_{mb}$ ) setelah pemadatan ( $\text{gr/cm}^3$ ).

$$G_{mb} = \frac{B_k}{(B_{ssd} - B_a)} \quad (2.5)$$

dengan:

$B_k$  = Berat kering

$B_{ssd}$  = Berat kering permukaan (SSD)

$B_a$  = Berat dalam air

b) Berat jenis *bulk* agregat ( $G_{sb}$ ) adalah perbandingan antara berat bahan di udara (termasuk rongga yang kedap dan yang menyerap air) pada satuan volume dan suhu tertentu, dengan berat air suling serta volume yang sama pada suhu tertentu pula ( $\text{gr/cm}^3$ ).

c) Berat jenis maksimum campuran ( $G_{mm}$ ) teoritis setelah pemadatan ( $\text{gr/cm}^3$ ).

d) Berat jenis nyata/ *apparent* ( $G_{sa}$ ) adalah perbandingan antara berat bahan di udara (tidak termasuk rongga yang menyerap air) pada satuan volume dan suhu tertentu, dengan berat air suling serta volume yang sama pada suhu tertentu pula ( $\text{gr/cm}^3$ ).

e) Berat jenis efektif ( $G_{se}$ ) adalah perbandingan antara berat bahan di udara (tidak termasuk rongga yang menyerap aspal) pada satuan volume dan suhu tertentu, dengan berat air destilasi dengan volume yang sama dan suhu tertentu pula.

- f) Kadar aspal efektif ( $P_{be}$ ) adalah kadar aspal total suatu perkerasan dikurangi dengan kadar aspal yang terserap ke dalam partikel agregat dinyatakan dalam persen.

Berdasarkan nilai-nilai di atas, maka properties campuran dapat ditentukan dengan menggunakan rumus-rumus sebagai berikut:

- a) Rongga diantara Mineral Agregat (VMA) adalah volume rongga yang terdapat di antara partikel agregat suatu campuran perkerasan yang telah dipadatkan, yaitu rongga udara dan volume kadar aspal efektif, yang dinyatakan dalam persen terhadap volume total benda uji. Volume agregat dihitung dari Berat jenis *bulk* (bukan berat Jenis efektif atau Berat jenis nyata).

Nilai VMA didapatkan dengan rumus berikut:

- Terhadap campuran Total:

$$VMA = \left( 100 \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \right) \quad (2.6)$$

dengan:

VMA : Rongga udara pada mineral agregat, persentase dari volume total (%)

$G_{mb}$  : Berat jenis *bulk* campuran setelah pemadatan ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

$G_{sb}$  : Berat jenis *bulk* agregat ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

$P_s$  : Proporsi agregat.

- Terhadap Berat Agregat Total:

$$VMA = \left( 100 - \left[ \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \frac{100}{(100+P_b)} 100 \right] \right) \quad (2.7)$$

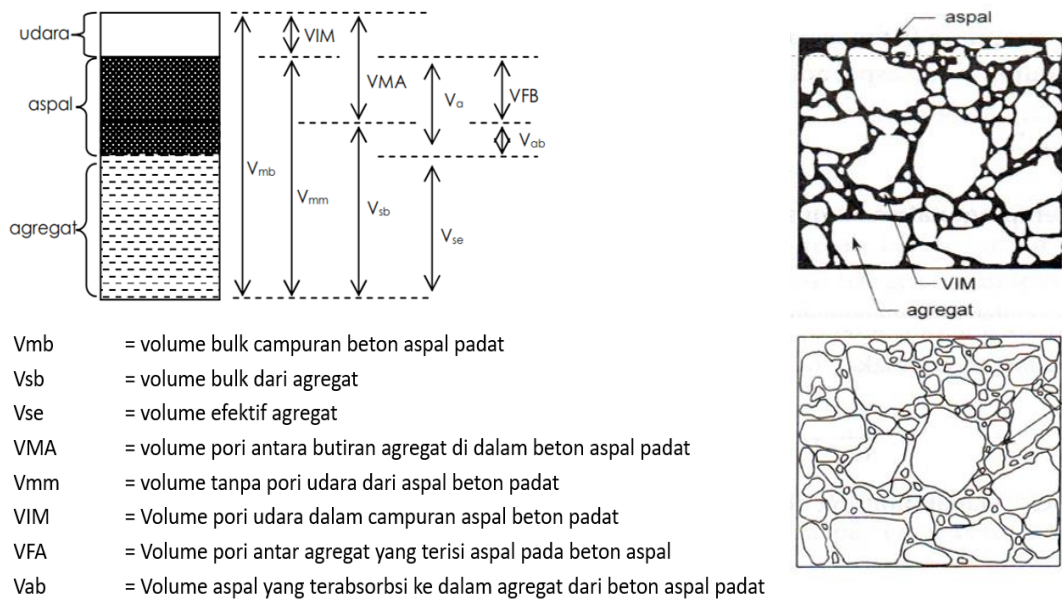
dengan :

VMA : Rongga udara pada mineral agregat, persentase dari volume total (%)

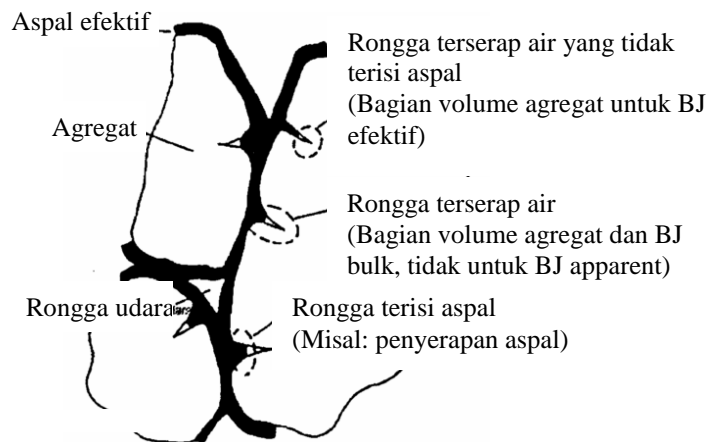
$G_{mb}$  : Berat jenis *bulk* campuran setelah pemadatan ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

$G_{sb}$  : Berat jenis *bulk* agregat ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

$P_b$  : Proporsi bitumen



Gambar 2.13. Skema Volume Beton aspal (Kasan, 2009)



Gambar 2.14 Ilustrasi Berat Jenis *Bulk*, Efektif, Apparent dan VIM, serta Kadar Aspal Efektif (Departemen Pekerjaan Umum, 1999)

b) Rongga Udara (VIM) adalah volume total udara yang berada di antara partikel agregat yang terselimuti aspal dalam suatu perkerasan yang telah dipadatkan, dinyatakan dengan persen volume *bulk* suatu perkerasan.

Nilai VIM dapat ditentukan dengan rumus berikut:

$$VIM = \left( 100 \times \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \right) \% \quad (2.8)$$

dengan:

VIM : Rongga udara pada campuran setelah pemadatan, prosentasi dari volume total (%)

Gmb : Berat jenis *bulk* campuran setelah pemadatan (gr/ cm<sup>3</sup>)

Gmm : Berat jenis campuran maksimum teoritis setelah pemadatan (gr/cm<sup>3</sup>)

c) Rongga Terisi Aspal (VFB) adalah bagian dari rongga yang berada di antara mineral agregat (VMA) yang terisi oleh aspal efektif, dinyatakan dalam persen.

Nilai VFB dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$VFB = \frac{100 (VMA - VIM)}{VMA} \% \quad (2.9)$$

dengan:

VFB : Rongga udara yang terisi aspal, prosentasi dari VMA (%)

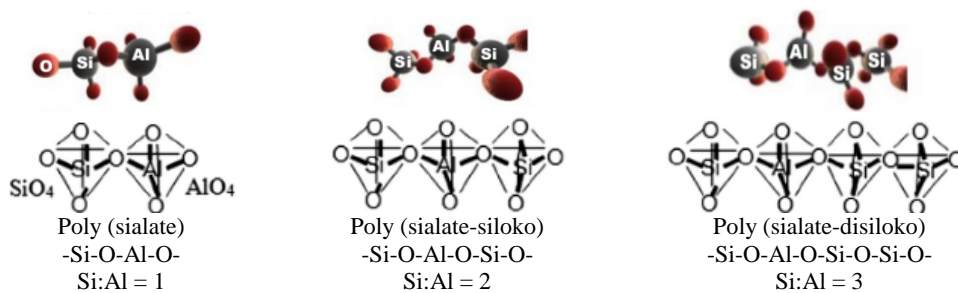
VMA : Rongga udara pada mineral agregat, prosentasi dari volume total

VIM : Rongga di dalam campuran, prosentasi dari volume total campuran.

## 2.5 Geopolimer

Geopolimer dapat didefinisikan sebagai material yang dihasilkan dari geosintesis aluminosilikat polimerik dan alkali-silikat yang menghasilkan kerangka polimer SiO<sub>4</sub> dan AlO<sub>4</sub> yang terikat secara tetrahedral. Geopolimer merupakan polimer aluminosilikat anorganik yang dihasilkan oleh sintesis bahan alami seperti kaolinit tanah liat atau produk industri seperti *fly ash* dan *slag* dengan aktivator yang sangat alkali. Geopolimer diperkenalkan oleh Davidovits tahun 1976 yang mengacu pada rantai 3D polisialat. Proses polimerisasi yang terjadi pada geopolimer meliputi reaksi kimia yang terjadi antara alkali dengan mineral Si-Al sehingga menghasilkan Si-O-Al-O yang konsisten (Davidovits, 1994).

Pada tahun 1978, Davidovits menemukan bahwa cairan alkali dapat digunakan untuk mereaksikan silika ( $\text{SiO}_2$ ) dan Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}$ ) untuk menghasilkan pengikat. Bahan akan menciptakan rantai polimer tiga dimensi yang memiliki karakteristik amorf seperti kaca yang terbentuk pada suhu rendah (Ahyudanari, dkk, 2016). Geopolimerisasi merupakan reaksi kimia oksida alumino-silikat ( $\text{Al}^{3+}$ ) dengan polisilikat alkali yang menghasilkan ikatan polimer Si-O-Al (Davidovits, 1991).



Gambar 2.15 Sistem Ikatan Geopolimer berdasarkan Unit Siloxo Si-Al-O (Joseph Davidovits, 1994)

Jenis alkali aktivator memainkan peran penting dalam proses geopolimerisasi dan memiliki efek signifikan pada kekuatan mekanik geopolimer. Saat ini, basa yang paling umum digunakan sebagai aktivator adalah kombinasi dari larutan Natrium Hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) dan larutan Natrium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dengan rasio masa  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dengan  $\text{NaOH}$  berbeda (Nematollahi dan Sanjayan, 2014). Sistem ikatan geopolimer, berbeda berdasarkan jumlah unit siloxo -Si-O-Al-O- (Ryu, dkk, 2016), ditunjukkan pada Gambar 2.15. Metode karakterisasi terhadap sifat-sifat fisis mekanis geopolimer, dapat dilihat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11 Metode Karakterisasi terhadap Sifat-Sifat Fisis Mekanis Geopolimer

No	Sifat fisis dan mekanis geopolimer	Definisi	Tujuan pengukuran
1	Rapat massa dan porositas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rapat masa didefinisikan sebagai masa total material (termasuk pori) per satuan volume.</li> <li>Porositas adalah sebuah fase dalam material yang dapat dikarakterisasi berdasarkan fraksi volume, ukuran dan distribusi, dibandingkan dengan fase lain yang ada dalam material tersebut.</li> </ul>	Digunakan untuk mengevaluasi kualitas fisik geopolimer.
2	Kekerasan ( <i>Hardness</i> )	Kekerasan ( <i>hardness</i> ) adalah ukuran resistensi sebuah material terhadap deformasi plastik yang terlokalisasi	Digunakan untuk menguji resistensi material geopolimer terhadap deformasi plastik.
3	Kekuatan tekan	Kuat tekan adalah kemampuan suatu benda uji bertahan hingga hancur setelah dibebani dengan beban tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan pada bidang tekannya.	Digunakan untuk memperoleh gambaran tentang kualitas geopolimer. Kekuatan tekan geopolimer bergantung pada porositas. Semakin banyak pori semakin kecil kekuatan tekan geopolimer.
4	Kuat ikatan antar muka ( <i>interfacial Bond Strength</i> )	Kuat ikatan antar muka ( <i>interfacial Bond Strength</i> ) adalah kekuatan ikatan binder geopolimer.	Pengujian ini dilakukan untuk mengukur kuat ikatan antara agregat dengan matriks geopolimer. Besarnya kuat ikatan antar muka geopolimer disebabkan oleh besarnya porositas

Sumber: (Subaer, 2012)

Dengan kemajuan teknologi, penelitian tentang geopolimer yang telah dilakukan dalam beberapa tahun terakhir ini menuju pengembangan material baru. Berbagai bahan canggih baru dapat dihasilkan dengan bantuan reaksi geopolimerisasi. Teknik solidifikasi dengan suhu tinggi tidak lagi diperlukan untuk mendapatkan material menyerupai struktur dan sifat keramik. Proses ini dapat berlangsung di bawah suhu 100<sup>0</sup>C. Bahan generasi baru ini, sudah diaplikasi di semua bidang industri, seperti untuk menyimpan limbah kimia atau radioaktif beracun, pembuatan beton khusus, cetakan untuk pencetakan termoplastik, pembuatan cetakan, perkakas, dalam peleburan dan metalurgi paduan aluminium, dll. Aplikasi ini juga ditemukan pada industri mobil dan dirgantara, peleburan dan

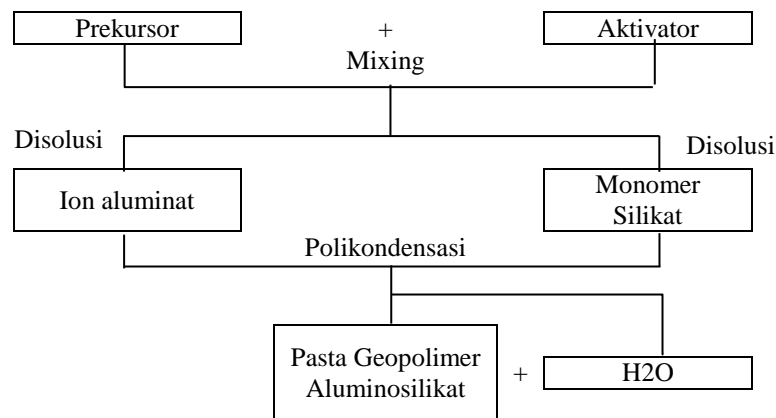
metalurgi non-ferrous, teknik sipil, industri plastik, dan lain lain (Davidovits, 1991).

### **2.5.1 Mekanisme Pengikatan Geopolimer (Geopolimerisasi)**

Bahan mentah (prekursor) untuk membentuk geopolimer dapat berupa mineral aluminosilikat alami atau hasil industri. Unsur aluminosilikat alami misalnya tanah liat, sedangkan *fly ash* adalah salah satu aluminosilikat dari produk industri. Pada geopolimer dari prekursor *fly ash*, ditunjukkan bahwa geopolimerisasi sangat tergantung pada sifat fisikokimia *fly ash*, ketersediaan larutan silikat dan aluminat, serta konsentrasi penambahan natrium hidroksida. Natrium hidroksida meningkatkan jumlah larutan silikat dan aluminat dalam campuran. Peningkatan kelarutan konsentrasi natrium hidroksida dalam *fly ash* juga meningkatkan kekuatan agregat geopolimer yang dihasilkan. Peningkatan natrium silikat, meningkatkan kuat tekan agregat geopolimer sampai maksimal, namun akan menurun lagi ketika jumlah Natrium Silikat ditambahkan (Fansuri dkk, 2012).

Kuat tekan untuk spesimen geopolimer dengan kandungan alkali yang berbeda menunjukkan terjadinya peningkatan hampir linear dengan meningkatnya kadar alkali dari campuran. Peningkatan kadar alkali dari campuran geopolimer, mengakibatkan pembentukan lebih banyak aluminosilikat gel yang mengakibatkan meningkatnya kuat tekan (Thakur dan Ghosh, 2009). Menurut Davidovit, cairan alkali dapat digunakan untuk mengaktifkan silikon (Si) dan aluminium (Al) dalam material alami atau material hasil produksi untuk menghasilkan pengikat. Aktivasi basa adalah suatu proses kimia yang memberikan perubahan yang cepat dari beberapa struktur tertentu. Aktivasi *fly ash* dengan alkali aktivator, berbeda dengan hidrasi pada semen Portland. Alkali aktivator yang paling banyak digunakan adalah campuran dari Natrium atau Kalium Hidroksida (NaOH, KOH) dan Natrium Silikat atau Kalium Silikat (Abdullah, dkk, 2012). Gambar 2.16 menunjukkan reaksi geopolimerisasi.





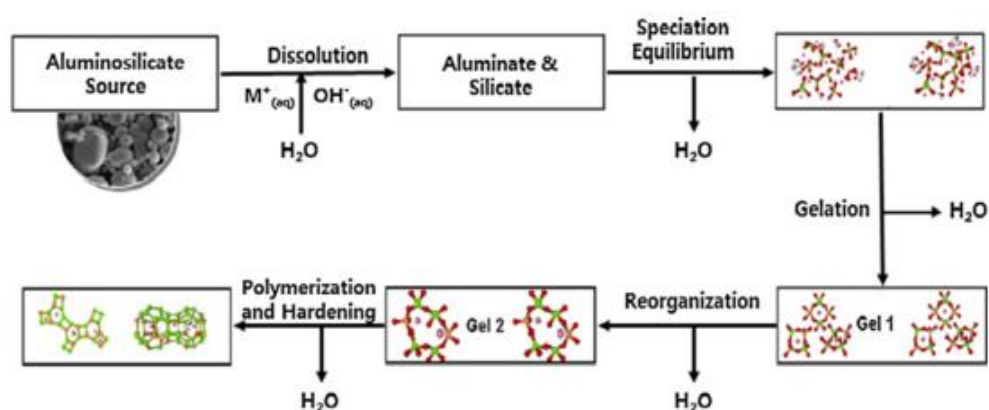
Gambar 2.16. Reaksi Geopolimerisasi dari Geopolimer (Afrizal, 2010)

### 2.5.2 Geopolimer Fly Ash

Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3), diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 101 tahun 2014. *Fly ash* dan *bottom ash* dalam peraturan tersebut termasuk kategori limbah B3. *Fly ash* dikategorikan sebagai limbah B3 dikarenakan mengandung zat berbahaya dan beracun, yang diantaranya memiliki sifat tidak dapat diurai atau *persistent*. Kandungan bahan berbahaya yang ada dalam *fly ash* antara lain : *arsenic, berilium, boron, cadmium, chromium, cobalt, lead, mangan, merkuri, selenium, strontium, thallium, vanadium*, juga mengandung dioksin dan senyawa PAH (*polycyclic aromatic hydrocarbon*). Oleh karena itulah beberapa orang keberatan menggunakannya. Namun penggunaannya dalam bentuk geopolimer, setelah melalui proses polimerisasi, akan mengeras, sehingga campuran berbahaya pada abu terbang tidak akan keluar.

Pemanfaatan *fly ash* sebagai produk hasil pembakaran batubara dari pembangkit listrik tenaga uap sangat menarik. Karena jumlah produksi setiap tahun sangat besar. Produksi tahunan abu batubara seluruh dunia diperkirakan sekitar 600 Mt, dengan sekitar 500 Mt adalah *fly ash*. Salah satu pendekatan pemanfaatannya adalah menggunakan *fly ash* sebagai agregat buatan untuk mengganti agregat alami. Alasan yang mendukung pendekatan ini adalah: (1) *fly ash* mencapai 90%, dari total abu yang dihasilkan; (2) keberadaan agregat alam semakin menipis; dan (3) besarnya jumlah permintaan akan agregat yang

meningkat terus menerus. Mengingat 70-80% massa beton adalah agregat. Penggunaan agregat sangat luas tidak hanya untuk beton saja. Oleh karena itu, pembuatan agregat dari abu terbang tidak hanya mengurangi dampak dari pembuangan abu terbang pada lingkungan tetapi juga memberikan manfaat besar bagi perekonomian (Fansuri, *dkk.*, 2012).



Gambar 2.17 Mekanisme Reaksi Geopolimer berbasis *Fly Ash* (Ryu, *dkk.*, 2016)

Pada sebuah studi dengan menggunakan berbagai komposisi *fly ash* dan rasio molar oksida, mengungkapkan bahwa geopolimerisasi *fly ash* lebih kuat dipengaruhi oleh sifat-sifat internal dari abu terbang itu sendiri daripada rasio molar oksida. Dalam publikasi terbaru, geopolimer dari campuran pasir dan *fly ash* Kalsium tinggi (*fly ash* kelas C) dengan Natrium Silikat dan Natrium Hidroksida. Kinerja dan kekuatan geopolimer bergantung pada jumlah natrium silikat dan natrium hidroksida yang ada dalam campuran (Fansuri, *dkk.*, 2012). Jenis alkali aktivator ini memainkan peran penting dalam proses geopolimerisasi dan memiliki pengaruh signifikan terhadap kekuatan mekanik geopolimer. Saat ini, aktivator dasar yang paling umum digunakan adalah kombinasi larutan Sodium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dan larutan Sodium Hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) dengan perbandingan massa  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan  $\text{NaOH}$  yang berbeda (Abdullah, *dkk.*, 2012). Natrium Hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) banyak digunakan sebagai alkali aktivator dengan beberapa alasan seperti harganya yang murah, viskositasnya rendah, dan tersedia

dalam jumlah banyak. Elemen penting dalam proses geopolimerisasi pada NaOH adalah ion OH<sup>-</sup>, karena perannya dalam meningkatkan laju reaksi dari penguraian ikatan Alumina dan Silika (Arjunan, dkk, 2001). Disamping NaOH, Natrium Silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) merupakan salah satu materi yang digunakan dalam proses geopolimerisasi. Sodium silikat dalam sistem geopolimer tidak hanya berguna untuk meningkatkan kekuatan pasta tetapi juga digunakan untuk mengikat material sampai terbentuk pasta padat (Jo, dkk, 2007).

Shuaibu (2014) menyatakan, selain pengaruh rasio Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dan NaOH, kekuatan optimal geopolimer juga dipengaruhi oleh molaritas NaOH, rasio fly ash dan aktivator alkali (Abdullah, dkk, 2012). Molaritas aktivator NaOH sangat berpengaruh pada kuat mekanik binder maupun beton geopolimer, dengan semakin tinggi molaritas NaOH semakin tinggi kuat mekanik beton maupun binder geopolimer (Ekaputri dan Triwulan, 2013). Pernyataan tersebut didukung oleh sebuah studi yang menyatakan bahwa peningkatan molaritas NaOH dari 8M menjadi 14M dengan rasio Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dan NaOH yang sama 2,5 meningkatkan kekuatan tekan sebesar 10 MPa, dari 57 MPa menjadi 67 MPa (Shuaibu, 2014). Selain itu perbandingan rasio aktivator Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH juga memberi pengaruh terhadap beton maupun binder geopolimer. Namun semakin tinggi perbandingan rasio Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH tidak selalu menghasilkan kuat tekan yang tinggi (Ekaputri dan Triwulan, 2013). Kuat tekan geopolimer berbasis *fly ash* dapat ditingkatkan dengan mengatur rasio Na<sub>2</sub>O/ SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>O/ Na<sub>2</sub>O sehingga menghasilkan kuat tekan hingga 103 MPa (Khan dkk. 2016).

### **2.5.3 Agregat Buatan Geopolimer Berbahan Dasar *Fly Ash***

*Fly ash* adalah bahan yang merupakan sumber aluminosilikat. Sifat geopolimer *fly ash* telah dipelajari secara ekstensif dalam dekade terakhir. *Fly ash* cocok digunakan untuk membuat geopolimer, dan geopolimer yang dihasilkan menimbulkan sifat mekanik dan daya tahan tinggi (Pu dkk., 2016). Pemanfaatan geopolimer *fly ash* dengan alkali aktivator dilakukan dengan berbagai metode.

Metode hemat biaya adalah menggunakan energi rendah. Salah satu metode hemat energi yang digunakan dalam pembuatan pasta geopolimer *fly ash* adalah metode ikatan dingin (*cold bonding*) (Bijen, 1986).

Tabel 2.12 Sifat Agregat Buatan dan Agregat Natural

No	Properties agregat (Aggregate Properties)	Agregat buatan (Artificial aggregates)					Agregat natural (Natural aggregates)
		Ikatan dingin (Cold bonded) (Perumal dan Anandan, 2014)	Peletisasi dengan pemanasan (Sintered pellets) (Singh, 2016)	Aardelite Aggregate (Singh, 2016)	Proses peletisasi (Pelletization process) (Gomathi dan Sivakumar, 2012)	Peletisasi dengan pemanasan (Sintered fly ash aggre-gate) (Rafiza , dkk, 2013)	Batu pecah (Crushed stone) (Rafiza , dkk, 2013) (Singh, 2016)
1	Kuat tekan (Compressive strength) (MPa)	22.81	-	-	13.72	26,7	33.0
2	Penerapan air (Water absorption) (%)	<13.01	14%-18%	18%	-	15%-16%.	-
3	Berat jenis (Specific Gravity)	-	1.30-1.60	1.7	2,12	1,66	2.75-2.95
4	Bentuk (Shape)	-	Bulat (Round)	Bulat (Round)	Bulat (Round)	-	Bersudut (Angular)
5	Kepadatan (Bulk Density) (kg/m3)	-	750-900	1050	942.68	-	1450-1750
6	Ukuran partikel (Particle size) (mm)	-	5-15	-	-	-	5-40 dan lebih besar

Sampai dengan saat ini, banyak dilakukan penelitian untuk membuat agregat buatan. Perumal dan Anandan (2014), membuat agregat dari geopolimer *fly ash*, dengan kuat tekan 22,8 MPa, diperoleh agregat dengan nilai absorpsi air <13,0%. Sedangkan Srinivasan, dkk (2016), dalam penelitiannya menggunakan agregat buatan dengan kuat tekan > 20 MPa, mendapatkan kekekalan agregat buatan sebesar 31,8%, lebih rendah dari agregat alami, namun mempunyai nilai *impact* 26,4% lebih tinggi. Sementara persentase penyerapan air agregat 9 kali lebih tinggi dari agregat alam, namun dapat dieliminasi dengan berbagai metode perbaikan misalnya dengan sodium silikat dan lain-lain. Penelitian lain (Singh, 2016) menghasilkan berat jenis agregat 1,7, kerapatan (*bulk density*) 1050 kg/m<sup>3</sup>, penyerapan air 18%, nilai abrasi <40% dan ketahanan agregat <12%. Sudrajat, (2016), mendapatkan berat jenis agregat buatan terendah sebesar 2,092 pada suhu 80<sup>0</sup> dan mengalami penurunan setiap penambahan suhu. Karakteristik lainnya, menyatakan bahwa agregat buatan memenuhi persyaratan dalam hal keausan (abrasi), kekekalan. Namun penyerapan air dan kelekatan terhadap aspal, belum sesuai spesifikasi. Disebutkan juga bahwa, rasio *fly ash* terhadap alkali aktivator terbaik adalah antara 0,2 dan 0,3. Jika kurang dari 0,2 menghasilkan agregat yang kering dan rapuh, sedangkan jika lebih besar dari 0,3, agregat sulit tergranulasi, karena melekat pada pan granulator.

Tabel 2.12 menunjukkan sifat komparatif agregat buatan dengan agregat alami. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kekuatan tekan agregat buatan lebih rendah dari pada agregat alam. Dilihat dari sifat lainnya adalah: penyerapan air, berat jenis dan kerapatan juga menunjukkan nilai yang lebih rendah. Nilai ini linier dengan nilai kuat tekan. Dengan molaritas NaOH yang sama 8 M dan variasi rasio Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> terhadap NaOH, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, dan 2,5, ditemukan bahwa kekuatan tekan pasta meningkat dari rasio 0,5 sampai 2,0, kemudian mengalami penurunan pada rasio 2,5. Namun, hasil yang berbeda bila menggunakan molaritas NaOH 10M, dengan kekuatan tekan meningkat sesuai dengan kenaikan rasio Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> menjadi NaOH. Kekuatan tekan tertinggi diperoleh pada rasio 2,5 sebesar 30,9 MPa (Risdanareni, dkk, 2015). Ini berarti bahwa kekuatan tekan geopolimer dapat ditingkatkan dengan memodifikasi campuran dengan mengubah rasio Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> menjadi NaOH dan juga molaritas

NaOH. Sehingga kekuatan tekan agregat alam sebesar 33,0 MPa dapat dicapai dengan pasta geopolimer *fly ash*. Bahkan pasta geopolimer *fly ash* yang dibuat sangat mungkin memiliki kekuatan tekan yang lebih tinggi. Kajian hasil penelitian terutama dengan meninjau kekuatan tekan silinder, memperkuat hipotesis bahwa agregat buatan dengan bahan geopolimer *fly ash* berpotensi menggantikan agregat alami. Kekuatan tekan berkorelasi dengan sifat agregat lainnya, sehingga agregat yang diperoleh memiliki sifat yang lebih baik daripada agregat alami. Hasil ini secara bersamaan menunjukkan bahwa agregat buatan geopolimer *fly ash* memenuhi syarat sebagai campuran aspal. Penalaran ini didukung oleh hasil uji kekuatan tekan yang lebih tinggi daripada uji kuat tekan untuk agregat dalam beberapa penelitian ini. Selanjutnya, kekuatan tekan geopolimer dapat ditambahkan lebih lanjut dengan memvariasikan campuran dengan memodifikasi rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan NaOH, molaritas NaOH, rasio *fly ash* dan alkali aktivator dan temperatur perawatan.

Percobaan ini dapat ditingkatkan dengan merancang agregat buatan. Kualitas agregat buatan geopolimer *fly ash* berbanding lurus dengan kekuatan tekan pasta geopolimer yang digunakan. Fakta bahwa kekuatan kompresi pasta dapat ditingkatkan, sehingga memungkinkan untuk mendapatkan kualitas agregat yang baik. Keberhasilannya dapat ditingkatkan dengan menggunakan proses peletisasi yang merupakan cara efektif menghasilkan agregat buatan (Vali dan Rahim, 2017). Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan geopolimer *fly ash* memiliki prospek untuk digunakan sebagai bahan agregat buatan. Karena formula pasta geopolimer *fly ash* dengan kekuatan tekan tinggi bisa dibuat. Sehingga agregat buatan memiliki sifat seperti agregat alam dan bisa dijadikan campuran aspal untuk jalan dan bandar udara. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa penggunaan geopolimer *fly ash* sebagai pengisi pada campuran aspal beton dapat meningkatkan hampir dua kali stabilitas uji *Marshall* (Ahyudanari, dkk, 2016).

Pernyataan Aodah, dkk., (2012) mendukung gagasan keberhasilan penggunaan agregat buatan dari *fly ash*. Dengan dinyatakan bahwa determinan kinerja campuran aspal tidak hanya berdasarkan sifat, melainkan dengan gradasi agregat. Dalam hal ini adalah parameter yang merupakan rasio gradien, yang

berkorelasi dengan parameter kekuatan dan kinerja campuran. Di sisi lain, kemampuan kerja merupakan salah satu parameter penting dalam perencanaan campuran aspal beton (Setiawan, dkk, 2016). Ini lebih mudah dicapai dengan agregat buatan, karena ukuran butirannya bisa direncanakan mengikuti gradasi yang diinginkan. Kajian beberapa makalah oleh Vali and Murugan-S (2017), yang memungkinkan penggunaan agregat ringan sebagai elemen struktur modern. Pemanfaatan abu terbang untuk agregat buatan merupakan bentuk perhatian terhadap sumber daya agregat alami yang berkurang. Keberhasilan ini, akan mengurangi penggunaan agregat alam, di tengah perbaikan industri infrastruktur.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

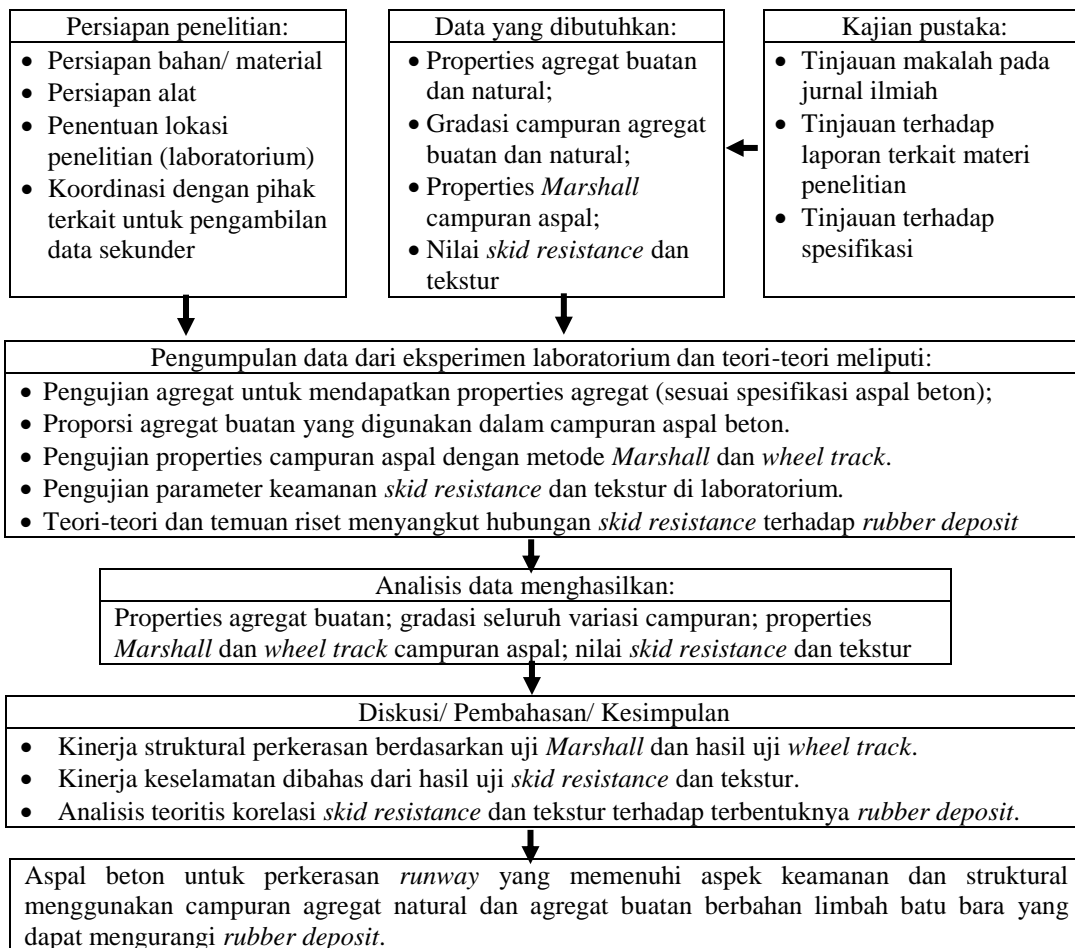


## BAB 3

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Kerangka Konseptual Penelitian

Konsep penelitian mulai dari persiapan, pengambilan data, penelusuran pustaka, pengumpulan data, analisa data hingga pembahasan untuk mencapai tujuan, ditunjukkan dalam kerangka konseptual penelitian, pada Gambar 3.1.



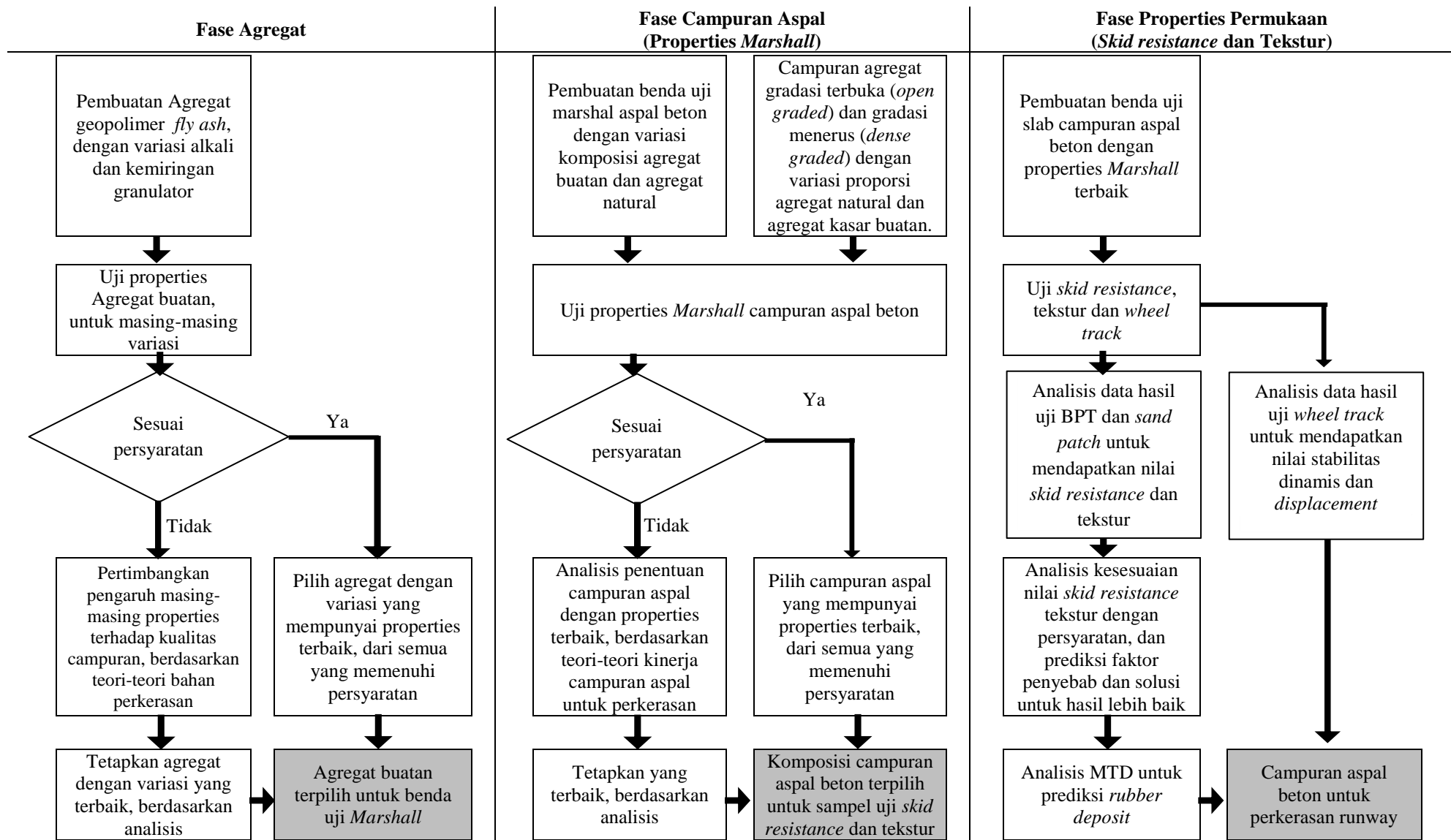
Gambar 3.1 Kerangka Konseptual

Kajian terhadap beberapa pustaka, dalam rangka mendapatkan metode ataupun teori sehubungan dengan penelitian meliputi: tinjauan makalah pada jurnal ilmiah, tinjauan terhadap laporan terkait materi penelitian dan tinjauan terhadap spesifikasi terkait perkerasan bandara. Parameter penelitian tersebut: 1) Properties agregat buatan dan natural; 2) Komposisi agregat buatan dan natural untuk gradasi campuran aspal; 3) Properties *Marshall* campuran aspal; dan 4) Nilai *skid resistance* dan tekstur. Pengambilan data untuk mendapatkan parameter tersebut dilakukan dengan melakukan eksperimen di laboratorium. Laboratorium tempat pengujian agregat adalah Laboratorium Perhubungan dan Bahan Jalan FTSPK-ITS dan Laboratorium Puslitbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan), Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. Sedangkan pembuatan agregat dilakukan di Laboratorium Struktur FTSPK ITS.

Langkah berikutnya sesuai dengan Tabel 3.1 dan Gambar 3.2, adalah melakukan eksperimen. Terdapat 4 eksperimen yang akan dilakukan dalam penelitian ini, yaitu: 1) Pengujian agregat untuk mendapatkan properties agregat (sesuai spesifikasi beton aspal); 2) Eksperimen penyusunan gradasi campuran agregat natural dengan agregat buatan dengan variasi penggunaan agregat buatan; 3) Pengujian properties campuran aspal dengan metode *Marshall* untuk mendapatkan properties campuran aspal (seperti: Stabilitas, Flow, MQ, VIM, VMA, VFB dan uji *wheel track*); dan 4) Pengujian parameter keamanan dengan mengukur *skid resistance* dengan BPT dan tekstur dengan metode *sand patch*, dengan benda uji slab . Data yang telah didapatkan di atas, selanjutnya dianalisa sebagai bahan pembahasan. Pembahasan utama itu diperoleh dari pembahasan terhadap rincian tujuan utama. Pembahasan mengarah ke tujuan utama dengan menggunakan hasil analisis *skid resistance* dan tekstur yang dihasilkan oleh variasi campuran aspal yang dibuat.

Tabel 3.1 Rancangan Pelaksanaan Penelitian

No.	Parameter	Sampel dan metode pengujian	Hasil
1	Agregat Buatan <ul style="list-style-type: none"> <li>• Komposisi FA:Alkali (%)</li> <li>• Komposisi NaOH:Na<sub>2</sub>SiO</li> <li>• Properties agstabilitas dinamisregat sesuai dengan ketentuan dalam spesifikasi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sampel dibuat dengan Komposisi dasar FA:Alkali = 75%:25%, sedangkan Molaritas NaOH 8M dan Rasio NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> adalah 1,5, 2,0, 2,5. Kemiringan granulator 45<sup>0</sup>,50<sup>0</sup>,55<sup>0</sup></li> <li>• Pengujian dilakukan sesuai standar yang berlaku</li> </ul>	Tabel dan grafik hasil analisis pengujian properties agregat natural dengan agregat buatan
	Agregat Natural <ul style="list-style-type: none"> <li>• Properties agregat sesuai dengan ketentuan dalam spesifikasi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sampel menggunakan agregat natural yang akan digunakan dalam campuran aspal</li> <li>• Pengujian dilakukan sesuai standar yang berlaku</li> </ul>	
2	Gradasi agregat <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gradasi campuran agregat natural dengan buatan (0%:100%;25%:75%;50%:50%; 75%:25%; 100%:0%)</li> <li>• Gradasi rapat (<i>dense graded</i>) dan gradasi terbuka (<i>open graded</i>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sampel agregat natural dengan penambahan 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% agregat buatan.</li> <li>• Analisa saringan untuk mendapatkan ukuran agregat dan menyusun dalam gradasi terbuka (<i>open graded</i>) dan gradasi rapat (<i>dense graded</i>)</li> </ul>	Grafik gradasi yang terbentuk dari seluruh varian.
3	Campuran aspal <i>Marshall</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kadar aspal optimum (k.a.o)</li> <li>• Komposisi agregat : aspal berdasarkan kadar aspal optimum</li> <li>• Properties campuran aspal sesuai dengan item pengujian.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sampel untuk mendapatkan k.a.o., dibuat dengan komposisi agregat : aspal, dengan persentase kadar aspal empiris, berdasarkan perhitungan</li> <li>• Sampel campuran aspal dengan k.a.o berdasarkan variasi komposisi dan variasi gradasi.</li> <li>• Pengujian properties campuran aspal</li> </ul>	Grafik hubungan variasi gradasi dengan properties
4	Benda uji dengan pemadat uji <i>wheel track</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Komposisi Agregat:aspal (%)</li> <li>• Nilai <i>skid resistance</i> sampel</li> <li>• Nilai tekstur sampel</li> <li>• Uji stabilitas dinamis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sampel dalam bentuk pelat dengan ukuran 30x30x5 cm<sup>3</sup>, dibuat dengan alat pemadat untuk uji <i>wheel track</i>. Untuk seluruh variasi campuran aspal</li> <li>• Sampel campuran dengan k.a.o dengan gradasi campuran agregat natural dan penambahan 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% agregat buatan.</li> <li>• Pengujian yang dilakukan ialah uji uji <i>skid resistance</i> dan tekstur.</li> <li>• Terakhir dilakukan uji stabilitas dinamis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grafik hubungan proporsi agregat buatan dalam gradasi campuran dengan <i>skid resistance</i>, dengan tekstur, dengan stabilitas dinamis.</li> <li>• Grafik hubungan <i>skid resistance</i> dengan tekstur dan proporsi agregat buatan dalam gradasi campuran.</li> </ul>
5	<i>Rubber deposit</i> , didapatkan dengan analisis teoritis dari hasil-hasil riset sebelumnya.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengumpulkan teori-teori dari riset sebelumnya yang mengkaji <i>skid resistance</i> dan <i>rubber deposit</i>.</li> <li>• Melakukan analisis teoritik prediksi jumlah <i>rubber deposit</i> berdasarkan <i>skid resistance</i> dan tekstur permukaan.</li> </ul>	Hubungan <i>skid resistance</i> dan tekstur dengan peningkatan <i>rubber deposit</i>



Gambar 3.2 Fase Eksperimen dan Pengambilan Keputusan

### 3.2 Langkah Penyelesaian Masalah dan Pencapaian Tujuan Penelitian

Sesuai dengan perumusan masalah serta tujuan dan manfaat penelitian, maka penyelesaian masalah dan pencapaian tujuan penelitian dapat dirumuskan berdasarkan Tabel 3.2. Rumusan masalah utama adalah: Bagaimana membuat perkerasan aspal beton untuk *runway* yang memenuhi aspek keamanan dan struktural menggunakan campuran agregat natural dan agregat buatan berbahan limbah batu bara yang dapat mengurangi *rubber deposit*?

Tujuan yang ingin dicapai adalah menemukan aspal beton untuk perkerasan *runway* yang memenuhi aspek keamanan dan struktural menggunakan campuran agregat natural dan agregat buatan berbahan limbah batu bara yang dapat mengurangi *rubber deposit*.

Tabel 3.2 Langkah Penyelesaian Masalah dan Pencapaian Tujuan Penelitian

No.	Perumusan Masalah	Tujuan Penelitian	Langkah Penyelesaian Masalah (Metoda Penelitian)	Keterangan
1	Bagaimana properties agregat buatan dan agregat natural sebagai bahan beton aspal?	Mencari properties agregat natural dan agregat buatan berbahan geopolimer <i>fly ash</i> sebagai bahan campuran aspal beton.	Eksperimen membuat agregat buatan geopolimer dari <i>fly ash</i> dan alkali aktivator. Menguji properties gregat buatan dan agregat natural untuk mengetahui kelayakannya digunakan sebagai bahan aspal beton.	Prosedur pembuatan agregat buatan dan pengujian properties agregat Gambar 3.6
2	Bagaimana menyusun gradasi terbuka ( <i>open graded</i> ) dan gradasi rapat ( <i>dense graded</i> ) dari agregat kasar buatan dan agregat natural dengan variasi komposisi untuk campuran aspal beton lapis permukaan <i>runway</i> ?	Mendapatkan gradasi terbuka ( <i>open graded</i> ) dan gradasi rapat ( <i>dense graded</i> ) campuran agregat natural dengan variasi penambahan agregat buatan untuk campuran aspal beton lapis permukaan <i>runway</i> .	Membuat gradasi terbuka ( <i>open graded</i> ) dan gradasi rapat ( <i>dense graded</i> ) campuran agregat natural dengan variasi penambahan agregat buatan untuk campuran aspal beton lapis permukaan <i>runway</i> .	Prosedur pembuatan gradasi agregat gabungan Gambar 3.9

Tabel 3.2 Langkah Penyelesaian Masalah dan Pencapaian Tujuan Penelitian (lanjutan)

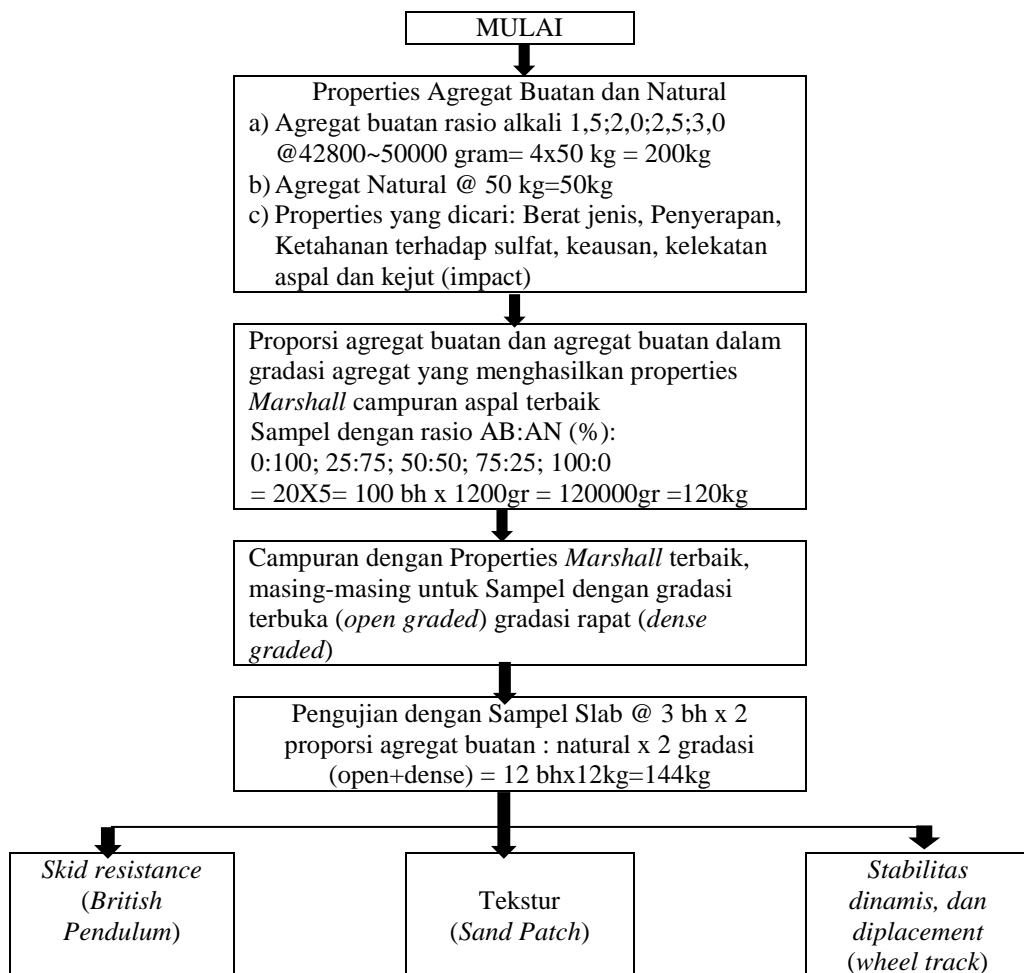
No.	Perumusan Masalah	Tujuan Penelitian	Cara Penyelesaian Masalah (Metoda Penelitian)	Keterangan
3	Bagaimana properties <i>Marshall</i> campuran aspal beton yang dihasilkan dari gradasi terbuka ( <i>open graded</i> ) dan gradasi rapat ( <i>dense graded</i> ) dari agregat kasar buatan dan agregat natural dengan variasi komposisi campuran?	Mendapatkan properties <i>Marshall</i> campuran aspal beton yang dihasilkan dari gradasi terbuka ( <i>open graded</i> ) dan gradasi rapat ( <i>dense graded</i> ) dari agregat kasar buatan dan agregat natural dengan variasi komposisi campuran,	Pengujian dengan metode <i>Marshall</i> untuk mendapatkan properties campuran aspal dengan gradasi terbuka ( <i>open graded</i> ) dan gradasi rapat ( <i>dense graded</i> ) dari agregat kasar buatan dan agregat natural dengan variasi komposisi campuran.	Proses pelaksanaan pengujian properties campuran aspal Metode <i>Marshall</i> Gambar 3.11
4	Bagaimana <i>skid resistance</i> dan tekstur permukaan perkerasan aspal, serta nilai stabilitas dinamis dari uji <i>wheel track</i> ?	Mendapatkan <i>skid resistance</i> dan tekstur permukaan perkerasan aspal, serta nilai <i>stabilitas dinamis</i> dari uji <i>wheel track</i>	Melakukan pengukuran nilai <i>skid resistance</i> dengan BPT dan tekstur permukaan pada sampel slab dengan metode <i>sand patch</i> . Nilai <i>stabilitas dinamis</i> didapatkan dari uji lintasan berulang <i>wheel track</i>	Proses pelaksanaan eksperimen pengukuran nilai <i>skid resistance</i> dan tekstur permukaan perkerasan dengan sampel <i>slab</i> serta uji <i>wheel track</i> untuk mendapatkan <i>stabilitas dinamis</i> (Gambar 3.14)
5	Berapa perkiraan penumpukan karet yang terjadi dengan melakukan analisa teoritis berdasarkan nilai <i>skid resistance</i> dan tekstur?	Mengestimasi secara teoritis besarnya tumpukan karet berdasarkan nilai <i>skid resistance</i> dan tekstur permukaan hasil uji.	Analisis dilakukan setelah didapatkan data <i>skid resistance</i> dan tekstur. Berdasarkan data tersebut dilakukan analisis hubungan dan pengaruh <i>skid resistance</i> dan tekstur, sehingga diketahui bagaimana efeknya terhadap <i>rubber deposit</i> .	Melakukan analisis dengan teori-teori dan temuan dari penelitian lain yang berkaitan dengan <i>skid resistance</i> , tekstur dan <i>rubber deposit</i>

Permasalahan utama di atas menjadi 2 bagian besar yaitu properties mekanik dapat dilihat dari hasil pengujian *Marshall*. Sedangkan dari aspek keselamatan dapat dilakukan pembahasan dari hasil uji *skid resistance* dan tekstur terhadap permukaan pelat sampel aspal beton yang dibuat dengan alat pematik

untuk uji *wheel track*. Dari analisis secara teoritis antara *skid resistance* dan korelasi dengan *rubber deposit*, maka dapat diprediksi jumlah penumpukannya.

### 3.3. Rancangan Eksperimen

Rancangan eksperimen dalam penelitian ini, ditampilkan pada Gambar 3.3. Rancangan ini meliputi penjelasan tentang pengujian yang dilakukan, prosedur pengujian, alat dan bahan yang digunakan, jumlah sampel yang digunakan.



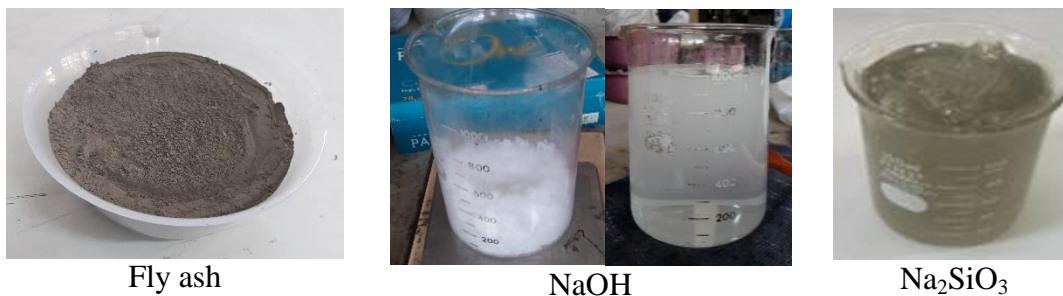
Gambar 3.3 Rancangan Eksperimen

### 3.3.1. Properties Agregat Buatan dan Agregat Natural

Pada eksperimen ini digunakan alat utama berupa granulator. Gambar 3.3. adalah granulator untuk membuat agregat tersebut. Sedangkan bahan yang digunakan adalah fly ash dari PLTU Suralaya serta larutan alkali sebagai aktivatornya. Aktivator yang digunakan adalah larutan NaOH 8 M dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> tipe BE 52. Gambar 3.4 menunjukkan bahan yang digunakan. Untuk *fly ash* dilakukan pengujian *X-Ray Fluorescence (XRF)*, *Scanning Electron Microscopy (SEM)* dan Uji *X-Ray Diffraction (XRD)*.



Gambar 3.4 Pan Granulator untuk Membuat Agregat



Gambar 3.5 Bahan untuk Membuat Agregat



Sesuai dengan properties yang ingin diketahui, pengujian yang dilakukan meliputi: analisis saringan, berat jenis dan penyerapan (*absorption*), kekekalan (*durability*), keausan/ abrasi (*hardness*) dan kelekatan terhadap aspal (*adhesion*). Jumlah sampel yang digunakan untuk masing-masing pengujian sebanyak 2 sampel. Sehingga kebutuhan material untuk sampel adalah seperti pada Tabel 3.3. Peralatan laboratorium untuk uji properties serta cara pengujian dijelaskan pada detail tahapan penelitian.

Tabel 3.3 Jumlah Kebutuhan Agregat Buatan dan Natural untuk Sampel

No	Jenis Eksperimen dan ukuran sampel	Jumlah sampel	Per sampel		Total	
			Agregat Buatan (gram)	Agregat Natural (gram)	Agregat Buatan (gram)	Agregat Natural (gram)
1	Berat jenis dan penyerapan					
	SNI 1969:2008					
	lolos 1/2" tertahan no. 4	2	2000	2000	4000	4000
2	Keausan agregat dengan mesin Abrasi					
	SNI 2417 2008					
	3/4"-1/2"	2	2500	2500	5000	5000
	1/2"-3/8"	2	2500	2500	5000	5000
3	Kekekalan pasca rendaman dalam sulfat					
	SNI 3407:2008					
	no 4- 3/8"	2	300	300	600	600
	3/8"-1/2"	2	330	330	660	660
	1/2"-3/4	2	670	670	1340	1340
4	Kelekatan terhadap aspal					
	SNI 03-2439-1991					
	3/8"-1/4"	2	100	100	200	200
5	Analisis saringan					
	SNI 03-1968-1990					
	Gradasi	2	2500	2500	5000	5000
	Total untuk 1 perlakuan				21800	21800
	Total untuk seluruh variasi		agregat buatan 5 variasi (Rasio 1,5, 2,0, 2,5 dan 3,0), agregat natural 1 variasi		109000	21800
					109,0 kg	21,8 kg

Sesuai dengan perhitungan detail kebutuhan agregat dalam Tabel 3.3, maka total kebutuhan agregat buatan adalah 109.000 gram = 109 kg. Sedangkan agregat natural 21.800 gram = 21,8 kg.

Tabel 3.4 Gradasi agregat yang digunakan dalam penelitian

No. Ayakan		Gradasi menerus/					Gradasi senjang/				
		Gradasi rapat ( <i>dense graded</i> )/FAA Gradasi 2 <sup>*)</sup>					Gradasi terbuka ( <i>open graded</i> )/BBA Kelas 1 <sup>**)</sup>				
		Batas bawah (%)	Batas tengah (%)	Batas atas (%)	Tertahan pd masing-masing saringan		batas bawah (%)	Batas tengah (%)	Batas atas (%)	Tertahan pada masing-masing saringan	
(%)	(gr)				(%)	(gr)					
¾"	19,10	100	100	100	0	0	100	100	100	0	0
½"	12,70	79	89	99	11	132	80	90	100	10	120
3/8"	9,50	68	78	88	11	132	60	65	70	25	300
No.4	4,76	48	58	68	20	240	36	40	44	25	300
No.8	2,38	33	43	53	15	180					
No.10	2,00						33	36.5	40	3.5	42
No.16	0,74	20	30	40	13	156					
No.30	0,590	14	22	30	8	96					
No.50	0,279	9	15	21	7	84					
No.80	0,268						10	17,5	25	19	228
No.100	0,149	6	11	16	4	48					
No.200	0,074	3	4,5	6	6,5	78	6	7,5	9	10	120
Pan					4,5	54				7,5	90
Jumlah					100	1200				100	1200

Catatan: <sup>\*)</sup> FAA 2014; <sup>\*\*)</sup> BBA (Modifikasi)

### 3.3.2. Properties campuran aspal (*Marshall*)

Pada eksperimen ini digunakan peralatan laboratorium untuk uji *Marshall* lengkap, diuraikan pada detail tahapan penelitian. Sedangkan bahan yang digunakan adalah aspal, agregat buatan berupa agregat kasar, agregat natural berupa agregat kasar, agregat halus dan filler.

Sesuai dengan properties yang ingin diketahui, pengujian yang dilakukan adalah untuk mendapatkan : stabilitas, flow, *Marshall Quotient*, VMA, VIM dan VFB. Pengujian dilakukan terhadap benda uji *Marshall* berbentuk silinder. Dalam penelitian ini akan dicoba 2 tipe gradasi yaitu gradasi terbuka (*open graded*) dan gradasi rapat (*dense graded*). Untuk masing-masing tipe gradasi dibuat 5 variasi campuran antara agregat buatan dan agregat natural. Sehingga terdapat 10 varian gradasi. Komposisi campuran agregat buatan berbanding agregat natural adalah: 0%;100%, 25%;75%, 50%;50%, 75%;25% dan 100%;0%.

Pada pengujian properties campuran aspal beton metode *Marshall*, sebelumnya dilakukan pengujian untuk mendapatkan kadar aspal optimum. Untuk pengujian aspal optimum ini dibutuhkan 15 sampel. Karena dicoba 5 kadar aspal, dimana masing-masing kadar aspal menggunakan 3 benda uji. Setelah didapatkan kadar aspal optimumnya, kemudian dicari propertiesnya. Untuk mencari propertiesnya digunakan 3 sampel campuran menggunakan kadar aspal optimum. Sehingga untuk 1 varian dibutuhkan 18 sampel. Maka total sampel yang harus dibuat adalah 180 buah dengan rincian 10 varian dikalikan dengan 18 sampel. Kebutuhan material untuk sampel tersebut adalah seperti pada Tabel 3.5 untuk sampel gradasi rapat dan Tabel 3.6 untuk sampel gradasi terbuka.

Berdasarkan Tabel 3.5, jumlah agregat buatan yang dibutuhkan untuk sampel gradasi rapat adalah  $0+171+342+513+684 = 1710$  gram x 18 sampel = 30780 gram = 30,8 kg. Sedangkan agregat natural yang dibutuhkan adalah  $1200+1029+858+687+516=4290$  gram x 18 sampel = 77220 gram = 77,2 kg.

Tabel 3.5. Kebutuhan agregat untuk sampel uji *Marshall* dengan gradasi rapat

No. Ayakan		Batas Tengah (%)	Tertahan pd masing-masing saringan (%)		Rasio 0% : 100%		Rasio 25% : 75%		Rasio 50% : 50%		Rasio 75% : 25%		Rasio 100% : 0%	
Inch	mm		(%)	(gr)	AB (gr)	AN (gr)	AB (gr)	AN (gr)	AB (gr)	AN (gr)	AB (gr)	AN (gr)	AB (gr)	AN (gr)
¾"	19,1	100	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
½"	12,7	89	11	132	0	132	33	99	66	66	99	33	132	0
3/8"	9,5	78	11	132	0	132	33	99	66	66	99	33	132	0
No.4	4,76	58	20	240	0	240	60	180	120	120	180	60	240	0
No.8	2,38	43	15	180	0	180	45	135	90	90	135	45	180	0
No.16	0,74	30	13	156	0	156	0	156	0	156	0	156	0	156
No.30	0,59	22	8	96	0	96	0	96	0	96	0	96	0	96
No.50	0,279	15	7	84	0	84	0	84	0	84	0	84	0	84
No.100	0,149	11	4	48	0	48	0	48	0	48	0	48	0	48
No.200	0,074	4,5	6,5	78	0	78	0	78	0	78	0	78	0	78
Pan			4,5	54	0	54	0	54	0	54	0	54	0	54
Jumlah			100	1200	0,8	1200	171	1029	342	858	513	687	684	516

Tabel 3.6. Kebutuhan agregat untuk sampel uji *Marshall* dengan gradasi terbuka

No. Ayakan		Batas Tengah (%)	Tertahan pd masing-masing saringan (%)		Rasio 0% : 100%		Rasio 25% : 75%		Rasio 50% : 50%		Rasio 75% : 25%		Rasio 100% : 0%	
in	mm		(gr)	(gr)	AB (gr)	AN (gr)	AB (gr)	AN (gr)	AB (gr)	AN (gr)	AB (gr)	AN (gr)	AN (gr)	AB (gr)
½"	12,7	90	10	120	0	120	30	90	60	60	90	30	120	0
3/8"	9,5	65	25	300	0	300	75	225	150	150	225	75	300	0
No.4	4,76	40	25	300	0	300	75	225	150	150	225	75	300	0
No.10	2	36,5	3,5	42	0	42	0	42	0	42	0	42	0	42
No.80	0,268	17,5	19	228	0	228	0	228	0	228	0	228	0	228
No.200	0,074	7,5	10	120	0	120	0	120	0	120	0	120	0	120
Pan			7,5	90	0	90	0	90	0	90	0	90	0	90
Jumlah			100	1200	0	1200	180	1020	360	840	540	660	720	480

Sedangkan, jumlah agregat buatan yang dibutuhkan untuk sampel gradasi terbuka, berdasarkan Tabel 3.6, adalah  $0+180+360+540+720 = 1800$  gram x 18 sampel = 32400 gram = 32,4 kg. Sedangkan agregat natural yang dibutuhkan adalah  $1200+1020+840+660+480=4200$  gram x 18 sampel = 75600 gram = 75,6 kg.

### 3.3.3. Kebutuhan Agregat untuk Sampel Slab

Pembuatan sampel dalam bentuk slab ini menggunakan alat pemadat untuk uji *wheel track*. Sehingga sampel yang dibuat di samping untuk pengujian alur (*ruting*), sebelumnya digunakan untuk pengujian *skid resistance* dan tekstur permukaan. Peralatan dan cara prosedur pengujiannya diuraikan pada detail tahapan penelitian.

Sampel *slab* ini juga dibuat dari 2 tipe gradasi yaitu gradasi menerus (rapat) dan gradasi senjang (terbuka). Kebutuhan agregat untuk membuat sampel ini dapat dilihat pada Tabel 3.7 dan Tabel 3.8. Tiap tipe akan diwakili oleh 1 atau 2 variasi gradasi, yaitu yang mempunyai kinerja terbaik dalam uji *Marshall* di atas.

Berdasarkan Tabel 3.7, karena yang akan digunakan 1 atau 2 variasi saja, maka prediksi jumlah maksimum agregat buatan yang akan digunakan untuk sampel gradasi rapat adalah  $3960+5280= 9240$  gram x 10 sampel = 92.400 gram = 92,4 kg. Sedangkan agregat natural yang dibutuhkan adalah  $12000+10680= 22.680$  gram x 10 = 226.800 gram = 226,8 kg.

Berdasarkan Tabel 3.8, karena yang akan digunakan 1 atau 2 variasi saja, maka prediksi jumlah maksimum agregat buatan yang akan digunakan untuk sampel gradasi terbuka adalah  $3465+4620= 8085$  gram x 10 sampel = 80.850 gram = 80,9 kg. Sedangkan agregat natural yang dibutuhkan adalah  $12000+10845= 22.845$  gram x 10 = 228.450 gram = 228,5 kg.

Tabel 3.7. Kebutuhan Agregat untuk Sampel *Slab Wheel Track* dengan Gradasi Rapat

No. Ayakan		Batas Tengah (%)	Tertahan pd masing-masing saringan (%)		Rasio 0% : 100%		Rasio 25% : 75%		Rasio 50% : 50%		Rasio 75% : 25%		Rasio 100% : 0%	
Inch	mm		(%)	(gr)	AB	AN	AB	AN	AB	AN	AB	AN	AB	AN
			(%)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)
¾"	19,1	100	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
½"	12,7	89	11	1320	0	1320	330	990	660	660	990	330	1320	0
3/8"	9,5	78	11	1320	0	1320	330	990	660	660	990	330	1320	0
No.4	4,76	58	20	2400	0	2400	600	1800	1200	1200	1800	600	2400	0
No.8	2,38	43	15	1800	0	1800	450	1350	900	900	1350	450	1800	0
No.16	0,74	30	13	1560	0	1560	0	1560	0	1560	0	1560	0	1560
No.30	0,59	22	8	960	0	960	0	960	0	960	0	960	0	960
No.50	0,279	15	7	840	0	840	0	840	0	840	0	840	0	840
No.100	0,149	11	4	480	0	480	0	480	0	480	0	480	0	480
No.200	0,074	4,5	6,5	780	0	780	0	780	0	780	0	780	0	780
Pan			4,5	540	0	540	0	540	0	540	0	540	0	540
Jumlah			100	12000	0,8	12000	1710	10290	3420	8580	5130	6870	6840	5160

Tabel 3.8. Kebutuhan Agregat untuk Sampel *Slab Wheel Track* dengan Gradasi Terbuka

No. Ayakan		Batas Tengah (%)	Tertahan pd masing-masing saringan (%)		Rasio 0% : 100%	Rasio 25% : 75%	Rasio 50% : 50%	Rasio 75% : 25%	Rasio 100% : 0%	Rasio 0% : 100%	Rasio 25% : 75%	Rasio 50% : 50%	Rasio 75% : 25%	Rasio 100% : 0%
in	mm		(gr)	(gr)	AB	AN	AB	AN	AB	AB	AN	AB	AN	AN
			(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)
½"	12,7	90	10	1200	0	1200	300	900	600	600	900	300	1200	0
3/8"	9,5	65	25	3000	0	3000	750	2250	1500	1500	2250	750	3000	0
No.4	4,76	40	25	3000	0	3000	750	2250	1500	1500	2250	750	3000	0
No.10	2	36,5	3,5	420	0	420	0	420	0	420	0	420	0	420
No.80	0,268	17,5	19	2280	0	2280	0	2280	0	2280	0	2280	0	2280
No.200	0,074	7,5	10	1200	0	1200	0	1200	0	1200	0	1200	0	1200
Pan			7,5	900	0	900	0	900	0	900	0	900	0	900
Jumlah			100	12000	0	12000	1800	10200	3600	8400	5400	6600	7200	4800

### 3.4 Detail Tahapan Penelitian

Mengacu pada kerangka konseptual Gambar 3.1 dan cara pencapaian tujuan pada Tabel 3.1, maka pada bagian ini dijelaskan secara detail tentang apa yang akan dilakukan dan bagaimana cara melakukannya. Tahapan penelitian secara keseluruhan terdiri dari 3 fase, yaitu: 1) Fase Agregat; 2) Fase Gradasi Agregat; dan 3) Fase Campuran Aspal. Penjelasan secara detail pada masing-masing fase terdiri dari 1) Data yang dibutuhkan dan cara mengumpulkan/mendapatkannya; 2) Analisis yang diperlukan, alat analisis, dan cara melakukannya; 3) Pembahasan terhadap hasil analisis, referensi yang digunakan dan pengambilan kesimpulan. Penjelasan rinci dari setiap tahapan kegiatan tersebut, dijelaskan dalam sub bab pada uraian di bawah ini.

#### 3.4.1 Fase Agregat

Pada fase ini dicari properties dari agregat, baik agregat natural maupun agregat buatan geopolimer *fly ash*. Properties yang dicari berdasarkan persyaratan agregat pada spesifikasi/ peraturan/ pedoman yang berlaku di Indonesia, meliputi: analisis saringan, berat jenis dan penyerapan (*absorption*), kekekalan (*durability*), keausan/ abrasi (*hardness*) dan kelekatan terhadap aspal (*adhesion*).

Untuk kebutuhan pengujian tersebut diperlukan agregat buatan maupun agregat natural sebagai berikut:

##### 1) Agregat buatan

Jumlah agregat yang dibuat berdasarkan rancangan eksperimen adalah sebagai berikut:

- Pengujian karakteristik agregat : 109.000 gram = 109,0 kg.
- Pembuatan benda uji *Marshall*
  - Gradasi rapat : 26.400 gram = 26,4 kg.
  - Gradasi terbuka : 23.100 gram = 23,1 kg.
- Pembuatan benda uji *wheel track*
  - Gradasi rapat : 92.400 gram = 92,4 kg.
  - Gradasi terbuka : 80.850 gram = 80,9 kg.

Sehingga total agregat buatan yang dibutuhkan sebanyak 331.8 gram atau 332 kg.

## 2) Agregat natural

Jumlah agregat yang dibuat berdasarkan rancangan eksperimen adalah sebagai berikut:

- Pengujian karakteristik agregat : 21.800 gram = 21,8 kg.
- Pembuatan benda uji *Marshall*
  - Gradasi rapat : 93.600 gram = 93,6 kg.
  - Gradasi terbuka : 96.900 gram = 96,9 kg.
- Pembuatan benda uji *wheel track*
  - Gradasi rapat : 226.800 gram = 226,8 kg.
  - Gradasi terbuka : 228.450 gram = 228,5 kg.

Sehingga total agregat buatan yang dibutuhkan sebanyak 667.6 gram atau 668 kg.

### 3.4.1.1 Proses Pembuatan Agregat Buatan

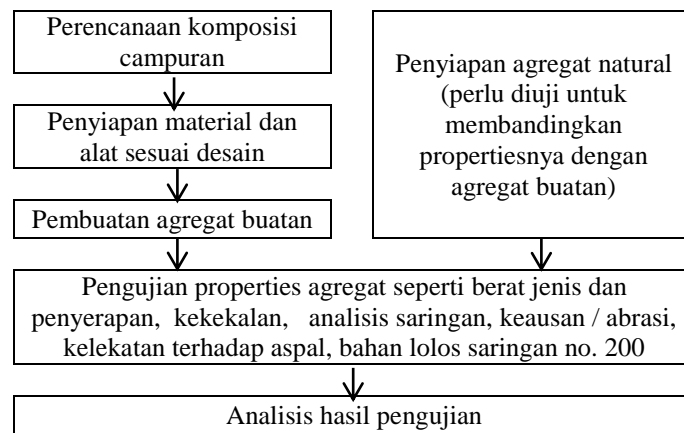
Prosedur pembuatan agregat buatan ditunjukkan oleh Gambar 3.6. Pekerjaan terdiri dari perencanaan komposisi campuran, penyiapan material dan peralatan sesuai desain, pembuatan agregat buatan dan pengujian, sebagai berikut:

#### a. Perencanaan komposisi campuran

Komposisi campuran dilakukan berdasarkan pengembangan terhadap referensi penelitian pembuatan agregat geopolimer sebelumnya. Komposisi *fly ash* dan alkali aktivator adalah 75%:25%. Sedangkan rasio alkali ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ) dipilih antara 1,5, 2,0 dan 2,5 berdasarkan hasil pengujian karakteristik pasta. Molaritas larutan NaOH digunakan sebesar 8 M.

Untuk mengetahui kemiringan yang memberikan properties terbaik secara keseluruhan, terlebih dahulu dilakukan eksperimen dengan variasi kemiringan. Variasi yang digunakan yaitu:  $45^\circ$ ,  $50^\circ$  dan  $55^\circ$ . Komposisi *fly ash* dan alkali aktivator adalah 75%:25%, dengan rasio alkali 1,5, 2,0 dan 2,5. Dengan molaritas NaOH 8M.





Gambar 3.6 Prosedur Pembuatan Agregat dan Pengujian Properties Agregat

b. Penyiapan material dan alat

1) Material

Material yang digunakan adalah *fly ash*. Sebagai alkali aktivator digunakan sodium hidroksida (NaOH) dan sodium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).

Jumlah kebutuhan material untuk campuran geopolimer berbahan *fly ash* adalah sesuai dengan jumlah agregat yang akan dibuat. Berikut ilustrasi perhitungan kebutuhan material untuk pembuatan agregat buatan.

Sebagai contoh diberikan ilustrasi seperti di bawah ini:

Dalam 1 kali proses granulasi, *fly ash* yang dimasukkan ke dalam mesin granulator berkisar antara 1,5 - 1,7 kg, dan menjadi 1,8-2 kg agregat buatan (Sudrajat, 2016). Sehingga untuk 2 kg atau 2000 gram campuran pasta agregat dalam 1 kali pencampuran dibutuhkan:

$$\text{Fly ash} = 75\% \times 2000 \text{ gram} = 1500 \text{ gram}$$

$$\text{Alkali} = 25\% \times 2000 \text{ gram} = 500 \text{ gram}$$

Jika rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2,5$ , maka:

$$\text{NaOH} = 1/3,5 \times 500 \text{ gram} = 142,9 \text{ gram}$$

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 2,5/3,5 \times 500 \text{ gram} = 357,1 \text{ gram}$$

Jika dengan pasta tersebut dihasilkan agregat 1700 gram, maka dengan kebutuhan total agregat buatan sebanyak 331.750 gram, diperlukan sekitar  $331.750/1700= 195$  kali produksi.

Jadi kebutuhan total material untuk pembuatan agregat:

$$\text{Fly ash} = 195 \times 1500 \text{ gram} = 292.500 \text{ gram} = 292,5 \text{ kg}$$

$$\text{NaOH} = 195 \times 142,86 \text{ gram} = 27.860 \text{ gram} = 27,9 \text{ kg}$$

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 195 \times 357,14 \text{ gram} = 69.640 \text{ gram} = 69,6 \text{ kg}$$

## 2) Peralatan

Peralatan utama yang digunakan adalah pan granulator ditunjukkan pada Gambar 3.3. Mesin granulator ini terdiri dari pan granulator digerakkan dengan kecepatan putar 26 putaran per menit, diameter pan 120 cm, bobot sekitar 200-250 kg. Dapat dioperasikan dengan kemiringan pan yang berbeda-beda. Peralatan lainnya adalah peralatan untuk pengujian karakteristik agregat sesuai dengan persyaratan dalam standar yang berlaku.

### c. Pembuatan agregat geopolimer *fly ash*

Proses pembuatan agregat buatan dari geopolimer berbasis *fly ash* adalah sebagai berikut:

#### (1) Pembuatan larutan NaOH

Pembuatan larutan NaOH, dilakukan dengan molaritas larutan 8 mol/liter (8M). Jumlah NaOH yang dibutuhkan sesuai perhitungan di atas. Larutan NaOH dibuat dengan NaOH kristal yang dilarutkan dengan aquades. Cara membuat larutannya adalah sebagai berikut:

- a) Timbang NaOH kristal sebanyak 320 gram, yang merupakan hasil perkalian 40 gram/mol, yaitu masa atom NaOH dengan 8 mol, yaitu molaritasnya. Masa atom NaOH terdiri dari : Na= 23 + O=16 + H= 1.
- b) Tempatkan NaOH kristal tersebut ke dalam gelas beker 1000 ml = 1 liter.
- c) Tuangkan perlahan aquades ke dalam gelas beker yang telah terisi NaOH kristal sambil diaduk hingga isi larutannya menunjukkan 1000 ml.

d) Diamkan hingga temperaturnya turun sesuai suhu ruang, selanjutnya disimpan dalam wadah, dan dibiarkan minimal sehari sebelum digunakan.

(2) Prosedur penyiapan bahan campuran agregat buatan

Sebelum pencampuran dengan *fly ash*, terlebih dahulu dilakukan pencampuran  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan  $\text{NaOH}$  dengan perbandingan sesuai dengan perencanaan komposisi campuran.

Proses pencampuran:

Timbang larutan  $\text{NaOH}$  dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  sesuai dengan perhitungan di atas. Kemudian campur larutan sodium hidroksida dan sodium silikat yang telah ditimbang dan diaduk hingga menyatu. Selanjutnya timbang *fly ash* sesuai dengan hasil perhitungan pada perencanaan campuran.

(3) Proses pembuatan agregat dengan pan granulator

Diawali dengan menyiapkan pan granulator. Pastikan granulator dapat beroperasi. Diperiksa apakah sudut kemiringannya bisa dirubah. Dalam penelitian ini digunakan variasi kemiringan  $45^\circ$ ,  $50^\circ$  dan  $55^\circ$ . Pemilihan variasi kemiringan tersebut didasari dengan pertimbangan bahwa kemiringan berpengaruh terhadap kecepatan putar pan granulator. Putaran pan yang terlalu cepat menyebabkan bahan sulit menggranul atau ukuran granulnya terlalu kecil. Sebaliknya putaran yang terlalu lambat, menyebabkan proses granulasi akan berjalan lambat dan ukuran granulnya tidak seragam. Tingkat kemiringan yang terlalu tegak akan menyulitkan material untuk menggranul, sementara yang terlalu landai akan membuat granul berukuran besar namun kurang padat<sup>1</sup>. Budi dan Purbasari (2009), menggunakan sudut kemiringan  $60^\circ$  dalam proses pembuatan pupuk fosfat menghasilkan material dengan ukuran 2-4 mm.

Setelah peralatan siap, selanjutnya siapkan material yang sudah ditimbang sesuai kebutuhan untuk 1 kali produksi. Jumlah material dalam hal ini *fly ash*,  $\text{NaOH}$ , dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , sesuai dengan hasil perhitungan di atas. Setel posisi hidup sehingga pan granulator berputar. Masukkan *fly ash* dalam

---

<sup>1</sup> (<https://isroi.com/2010/01/12/tip-produksi-pupuk-organik-granul-pog-agar-granul-seragam-sedikit-yg-rejek/>, 2010).

keadaan benar-benar kering secara perlahan ke granulator yang sedang berputar. Langkah selanjutnya adalah memasukkan alkali aktivator kedalam pan granulator. Proses ini dilakukan secara perlahan-lahan dengan menyemprotkan sehingga tidak mengenai tempat yang kosong. Setelah proses penyemprotan selesai dan *fly ash* tergranulasi dengan baik, maka butiran-butiran agregat dikeringkan dengan cara digulirkan di atas *fly ash*, selanjutnya dilakukan perawatan.

(4) Perawatan (*Curing*) agregat buatan

Perawatan terhadap agregat dilakukan dengan mendinginkan agregat buatan pada suhu ruangan. Pengujian untuk mendapatkan propertiesnya dapat dilakukan setelah masa perawatan selama 28 hari.

d. Pengujian Propertis agregat buatan dan natural

Pengujian properties dilakukan terhadap agregat buatan dan agregat natural. Karena kedua macam agregat tersebut akan digunakan dalam pembuatan campuran aspal. Dalam penggunaannya juga dikombinasikan dalam penyusunan gradasi. Pemeriksaan agregat dibagi menjadi tiga, yaitu agregat kasar, agregat halus dan *filler*.

Tabel 3.9 Pengujian properties agregat dan standar yang digunakan

No	Properties	Standar	Keterangan
1	Agregat kasar		
a	Berat jenis dan penyerapan	SNI 1969:2008	Agregat buatan dan natural
b	Keausan agregat dengan mesin Abrasi	SNI 2417 2008	Agregat buatan dan natural
c	Kekekalan pasca rendaman dalam sulfat	SNI 3407:2008	Agregat buatan dan natural
d	Kelekatan terhadap aspal	SNI 03-2439-1991	Agregat buatan dan natural
e	Analisis saringan	SNI ASTM C136:2012	Agregat buatan dan natural
2	Agregat halus		
a	Berat jenis dan penyerapan	SNI 03-1 970-1990	Agregat natural
b	Jumlah bahan lolos saringan no. 200	SNI 03-4428-1997	Agregat natural
c	Analisis saringan	SNI ASTM C136:2012	Agregat natural
3	<i>Filler</i>		
a	Berat jenis dan penyerapan	SNI 03-1 970-1990	Agregat natural
b	Analisis saringan	SNI ASTM C136:2012	Agregat natural

(Adithya, dkk., 2016)

Agregat buatan yang digunakan untuk pembuatan campuran aspal, hanya agregat kasarnya. Sehingga hanya properties agregat kasarnya saja yang dicari. Jenis pengujian, standar yang digunakan, serta agregat yang diuji, dapat dilihat dalam Tabel 3.9.

#### **3.4.1.2 Pengujian Agregat Buatan**

Dilakukan analisis terhadap data uji properties terhadap agregat kasar, agregat halus dan *filler*. Mengacu pada Tabel 3.9, analisis yang dilakukan adalah untuk mendapatkan properties agregat sebagai berikut:

a. Analisis data uji berat jenis dan penyerapan

Pengujian ini untuk agregat kasar, agregat halus dan filler. Karena agregat buatan yang diuji hanya agregat kasar, maka properties ini hanya agregat kasar saja. Sedangkan untuk agregat natural, agregat kasar dan halusnya diuji. Pelaksanaan analisis data eksperimen, adalah dengan melakukan perhitungan terhadap nilai berat jenis dan penyerapan, berdasarkan nilai berat kering pasca oven, berat SSD dan berat dalam air. Prosedur analisis mengacu SNI 1969:2008, 2008, untuk agregat kasar. Sedangkan untuk agregat halus dan filler menggunakan SNI 03-1970-1990. Dari analisa ini didapatkan berat jenis curah (*bulk*), berat jenis kering permukaan jenuh (SSD), berat jenis semu (*apparent*) dari agregat serta angka penyerapan dari agregat.

b. Analisis hasil pengujian keausan agregat dengan mesin abrasi

Pengujian ini hanya untuk agregat kasar baik agregat buatan maupun agregat natural. Pelaksanaan analisis data eksperimen, adalah dengan melakukan perhitungan terhadap selisih berat agregat tertahan saringan No. 12 sebelum dilakukan pengujian dan setelah selesai pengujian. Selisih tersebut merupakan jumlah agregat yang hancur. Selanjutnya dijadikan dalam persentase, yang merupakan persentase hancurnya agregat (nilai keausan). Prosedur analisis mengacu pada (SNI 2417:2008, 2008).

c. Analisis data kekekalan agregat pasca rendaman dalam sulfat

Pengujian ini hanya untuk agregat kasar baik agregat buatan maupun agregat natural. Pelaksanaan analisis data eksperimen, adalah dengan melakukan perhitungan terhadap selisih berat agregat tertahan saringan, sebagai berikut:

Saringan yang digunakan ukuran 31,50 mm (63,00 mm – 37,00 mm); 16,00 mm ( 37,50 mm – 19,00 mm); 8,00 mm (19,00 mm – 9,50 mm); 4,00 mm (9,50 mm – 4,75 mm) sebelum dan setelah dilakukan perendaman dalam larutan sulfat ( $\text{NaSO}_4$  atau  $\text{MgSO}_4$ ). Perendaman ini dimaksudkan untuk mempercepat proses pelapukan agregat sehingga dapat lebih cepat diamati. Selisih tersebut merupakan jumlah agregat yang lapuk/ hancur, selanjutnya dijadikan dalam persentase. Prosedur analisis mengacu pada SNI 3407:2008.

d. Analisis hasil Pengujian kelekatan agregat terhadap aspal.

Pengujian ini hanya untuk agregat kasar baik agregat buatan maupun agregat natural. Pelaksanaan analisis data eksperimen, adalah dengan melakukan pengamatan secara visual permukaan agregat yang diselimuti aspal. Jumlah permukaan yang terlapsi aspal dinyatakan dalam prosen. Prosedur analisis mengacu pada SNI 03-2439-1991.

e. Analisis hasil pengujian jumlah bahan lolos saringan no. 200.

Pengujian jumlah bahan dalam agregat yang lolos saringan No. 200, dilakukan dengan prosedur sesuai dengan SNI 03-4428-1997. Dari analisa ini didapatkan jumlah bahan dalam agregat yang lolos saringan No. 200.

f. Analisis hasil pengujian analisis saringan

Pengujian ini untuk agregat kasar, agregat halus dan filler. Untuk agregat buatan yang diuji hanya agregat kasarnya saja. Sedangkan untuk agregat natural, agregat kasar, halus dan *fillernya* diuji. Pelaksanaan analisis data eksperimen, adalah dengan melakukan perhitungan terhadap berat agregat pada masing-masing saringan. Kemudian didapatkan persentase tertahan saringan. Untuk mendapatkan persentase lolos maka kurangkan 100% dengan persentase tertahan. Demikian selanjutnya sehingga didapatkan susunan gradasi berdasarkan persentase lolos pada masing-masing saringan. Pengujian sesuai dengan SNI ASTM C136:2012.

### **3.4.1.3 Pembahasan Hasil Analisis Pengujian Agregat**

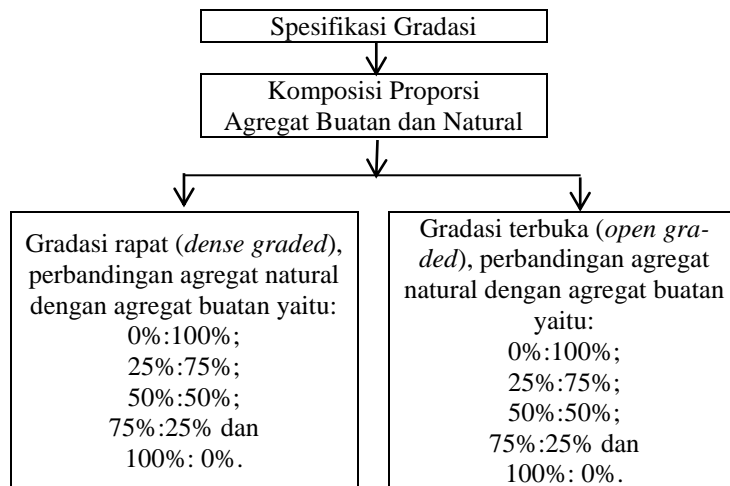
Pembahasan untuk mendapatkan jawaban rumusan 1 yaitu mencari properties agregat natural dan agregat buatan geopolimer berbahan *fly ash* sebagai bahan campuran aspal beton. Disini dibahas hasil analisis propertis agregat yang dihasilkan.

Penekanan pada properties berkaitan kekerasannya (*hardnes*) yang ditunjukkan dari pengujian keausan (*Los Angeles*). Disamping itu juga nilai keawetan (*durability*), berdasarkan pengujian kekekalan terhadap pelapukan dengan  $MgSO_4$  atau  $NaSO_4$ . Sifat adhesif agregat terhadap aspal dilihat dari uji kelekatan aspal terhadap agregat. Properties lainnya seperti penyerapan (*absorption*) dan berat jenis erat kaitannya dengan kadar aspal dan volume pori campuran. Sebagai acuan kesesuaian untuk dapat digunakan sebagai bahan campuran aspal beton untuk perkerasan bandara, dapat digunakan Tabel 3.9.

### **3.4.2 Fase Gradasi Agregat**

#### **3.4.2.1 Penyusunan Gradasi Agregat**

Pada eksperimen fase gradasi ini, dicari data sekaitan dengan pembuatan gradasi dengan agregat natural dicampur dengan agregat buatan geopolimer. Akan dibuat masing-masing 5 variasi agregat penyusun gradasi, seperti uraian sebelumnya, yaitu agregat natural berbanding agregat buatan berturut-turut : 0%:100%; 25%:75%; 50%:50%; 75%:25% dan 100%: 0%. Dengan 2 gradasi yaitu gradasi rapat (*dense graded*) dan gradasi terbuka (*open graded*). Gradasi menerus yang menghasilkan gradasi rapat (*dense graded*) berorientasi pada standar dari Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. Sedangkan gradasi terbuka (*open graded*), berorientasi pada EB14-BBA Tipe D. BBA adalah campuran beton aspal yang khusus digunakan untuk lapisan perkerasan bandara.



Gambar 3.7 Rancangan Komposisi Gradasi

a. Material

Material yang digunakan adalah agregat natural dan agregat buatan dari geopolimer *fly ash*. Pengujian dan perhitungan jumlah kebutuhannya sudah dilakukan pada tahap sebelumnya.

b. Peralatan dan perlengkapan lainnya

Peralatan yang digunakan adalah susunan ayakan dengan ukuran sesuai dengan standar gradasi standar dari Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. Peralatan dimaksud seperti pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Peralatan untuk Penyusunan Gradasi Agregat



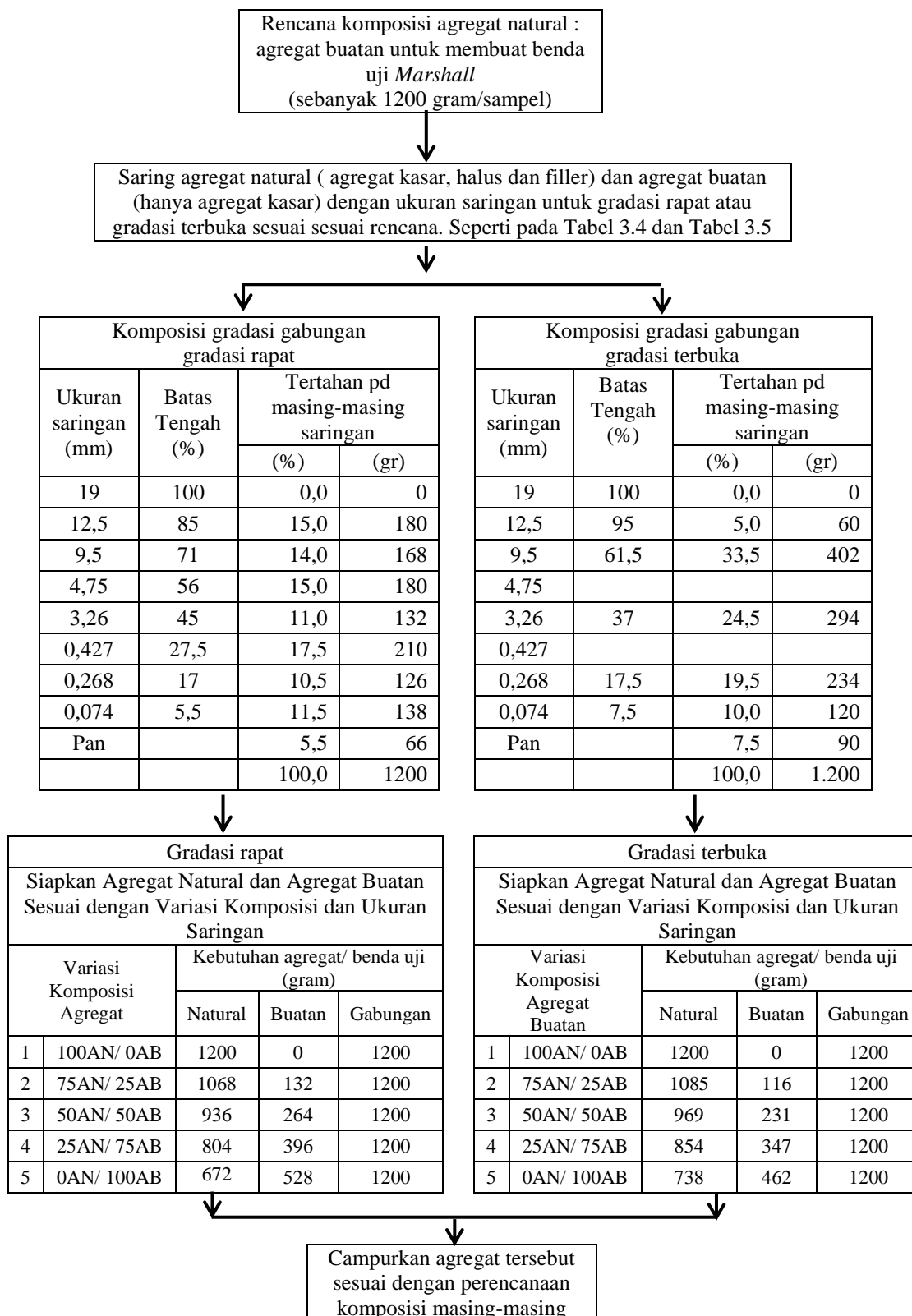
c. Prosedur pembuatan gradasi agregat

Prosedur pembuatan gradasi agregat dapat dilihat pada Gambar 3.9. Standar yang digunakan adalah SNI 03-1968-1990 untuk analisa saringan agregat kasar dan agregat halus. Kegiatan dimulai dengan penyiapan agregat dengan jumlah sesuai rencana komposisi agregat. Sesuai rancangan percobaan, agregat buatan yang digunakan hanya agregat kasarnya saja, dengan ukuran butir lebih besar atau sama dengan saringan nomor 4. Untuk 1 benda uji disiapkan 1200 gram agregat. Kemudian menyusun ayakan berurut sesuai dengan ukuran yang ditentukan dalam spesifikasi campuran aspal untuk perkerasan permukaan bandara. Saring agregat natural dan agregat buatan dalam rangkaian ayakan dengan ukuran saringan tersebut. Kemudian digetarkan atau digoyangkan. Penggetaran atau penggoyangan dilakukan sekitar 15 menit.

Selanjutnya dilakukan penimbangan berat agregat yang tertahan pada masing-masing ukuran ayakan, masing-masing untuk agregat natural dan agregat buatan. Timbang berdasarkan kebutuhan yang disesuaikan dengan ukuran butirnya, kemudian dilakukan penggabungan agregat natural dengan agregat buatan. Jumlah agregat natural dan agregat buatan pada masing-masing gabungan agregat dihitung sesuai dengan proporsi masing-masing.

Sebagai contoh, misalnya untuk gradasi rapat dari gabungan agregat natural : agregat buatan dengan perbandingan 75%:25%, maka kebutuhan masing-masing agregat dan ukurannya untuk setiap benda uji *Marshall* adalah sebagai berikut:

- 1) Menentukan jumlah masing-masing agregat yang dibutuhkan untuk tiap-tiap ukuran saringan seperti pada Tabel 3.10.
- 2) Menentukan kebutuhan agregat natural dan agregat buatan berdasarkan perbandingan yang dikehendaki, dalam hal ini agregat natural : agregat buatan dengan perbandingan 75%:25%. Tabel 3.11 menunjukkan komposisi agregat natural dan buatan untuk masing-masing ukuran saringan.



Gambar 3.9 Prosedur Pembuatan Gradasi Agregat Gabungan

Tabel 3.10 Jumlah Agregat yang Dibutuhkan untuk Tiap Ukuran Saringan

Ukuran Saringan	Batas gradasi (%)	Tengah Lolos Kumulatif (%)	Tengah Tertahan Kumulatif (%)	Tertahan Masing-Masing Saringan (%)	Tertahan untuk Benda Uji 1200 gram (gram)
¾" (19.0 mm)	100	100	0	0	0
½" (12.5 mm)	75-95	85	15	15	180
3/8" (9.5 mm)	60 – 82	71	29	14	168
No.4 (4.75 mm)	42 – 70	56	44	15	180
No. 10 (3,26)	30-60	45	55	11	132
No. 40 (0,427)	15-40	27,5	72,5	17,5	210
No. 80 (0,268)	8 – 26	17	83	10,5	126
No.200 (0,074)	3-8	5,5	94,5	11,5	138
Pan			100	5,5	66
			Total	100	1200

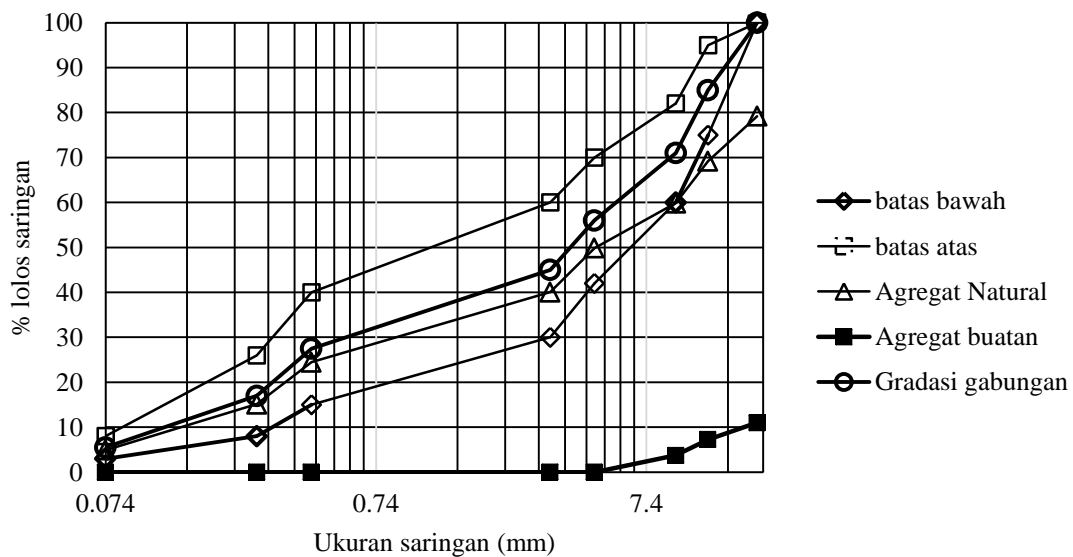
Pembuatan campuran agregat natural dengan agregat buatan untuk benda uji *slab* dilakukan dengan cara yang sama. Bedanya hanya pada berat total agregat yang dibuat. Dimana berat sampel agregat yang diperlukan untuk 1 buah sampel *slab* adalah sebanyak 12.000 gram.

Tabel 3.11 Kebutuhan Agregat Natural dan Agregat Buatan Tiap Sampel

No	Ukuran Saringan	Agregat yang Dibutuhkan	75% Agregat Natural	25% Agregat Buatan
1	¾" (19.0 mm)	-	-	-
2	½" (12.5 mm)	180	135	45
3	3/8" (9.5 mm)	168	126	42
4	No.4 (4.75 mm)	180	135	45
5	No. 10 (3,26)	132	132	-
6	No. 40 (0,427)	210	210	-
7	No. 80 (0,268)	126	126	-
8	No.200 (0,074)	138	138	-
9	Pan	66	66	-
	Jumlah	1.200	1.068	132

### 3.4.2.2 Analisis Gradasi Agregat

Data analisis saringan yaitu berat tertahan pada masing-masing ayakan yang digunakan. Jumlahkan total berat dari masing-masing ayakan sebagai pembagi untuk menghitung persentase. Persentase lolos ayakan teratas adalah berat total agregat dikurangi berat tertahan pada saringan teratas, dibagi berat total agregat, dikalikan 100%. Untuk ayakan selanjutnya adalah berat total agregat dikurangi berat tertahan pada ayakan tersebut, dikurangi berat ayakan di atasnya, dibagi jumlah total agregat, dikalikan 100%. Demikian selanjutnya untuk saringan yang lain. Dari masing-masing persentase lolos tersebut maka akan terlihat susunan gradasi agregat tersebut. Ploting dalam grafik hubungan ukuran saringan sesuai dengan spesifikasi dengan persentase lolos. Ploting juga batas atas dan bawah gradasi sesuai spesifikasi untuk menentukan batas-batas amplop gradasi. Kurva gradasi gabungan harus berada di antara amplop gradasi. Gambar 3.10 adalah contoh ploting kurva untuk gradasi agregat natural, agregat buatan dan gabungan untuk proporsi 75% agregat natural dan 25% agregat buatan.



Gambar 3.10 Gradasi Agregat Natural, Buatan dan Gabungan, Proporsi 75%:25%

### **3.4.2.3 Pembahasan untuk Menentukan Proporsi Agregat Buatan**

Pembahasan untuk mendapatkan jawaban rumusan 2 yaitu bagaimana proporsi agregat buatan dan agregat natural yang digunakan dalam menyusun gradasi agregat sebagai bahan campuran aspal beton lapis permukaan *runway*? Yang dibahas adalah hasil analisis gradasi 1 sampai dengan gradasi 5. Pembahasan dilakukan berdasarkan gambar grafik gradasi, dengan mengamati kesesuaian dengan batas atas dan batas bawah spesifikasi. Gradasi yang memenuhi persyaratan adalah yang berada dalam amplop gradasi. Kemudian memberikan komentar berdasarkan referensi apa penyebab gradasi memenuhi atau tidak memenuhi persyaratan. Misalnya terdapat kekurangan atau kelebihan persentase lolos pada saringan tertentu.

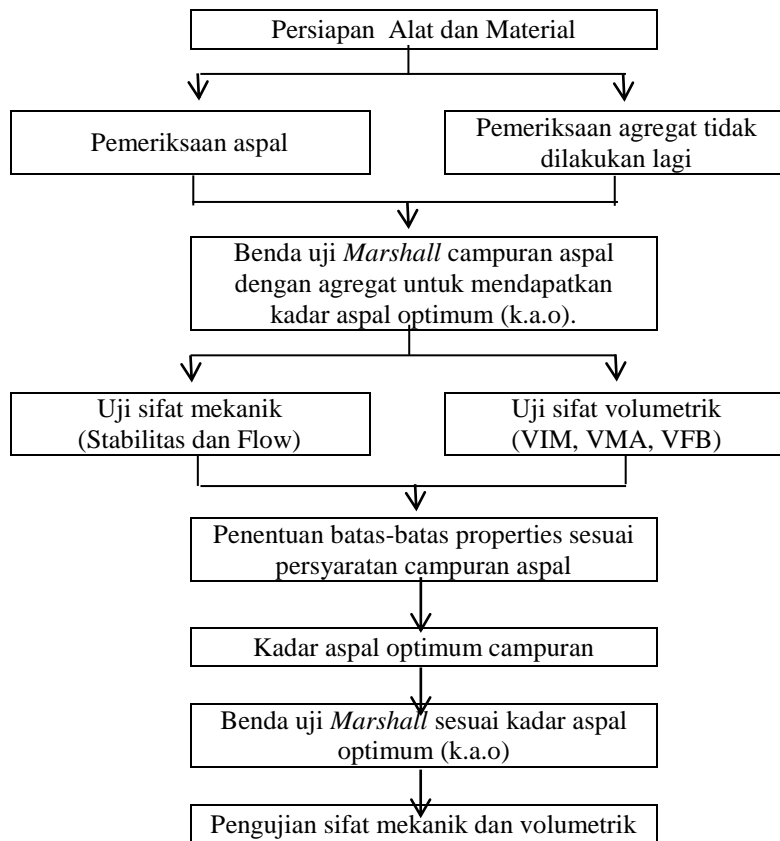
### **3.4.3 Fase Campuran Aspal Beton**

#### **3.4.3.1 Pengujian Properties Campuran Aspal Beton**

##### **A. Pengumpulan Data Properties Uji *Marshall***

Pada eksperimen ini akan didapatkan data properties campuran aspal dengan melakukan uji *Marshall*. Pengujian *Marshall* merupakan pengujian tekan terhadap benda uji aspal beton dengan menggunakan benda uji *Marshall* berbentuk silinder berdiameter 10,2 cm dan tebal 6,35 cm.

Prosedur pengujian *Marshall* berdasarkan Bina Marga, (1991) (SNI 06-2489-1991). Urutan pelaksanaan percobaan yang dilakukan seperti pada Gambar 3.11. Pengujian agregat tidak perlu dilakukan lagi karena sudah dilakukan pada tahap sebelumnya. Yang dilakukan pengujian materialnya hanya aspal saja. Properties *Marshall* yang dicari yaitu: nilai stabilitas, *flow*, *Marshall Quotient* (*MQ*), *Void Mix Agregat* (*VMA*), *Void in Mix* (*VIM*) dan *Void Fill Bitumen* (*VFB*). Nilai stabilitas dan *flow* dengan uji tekan *Marshall*, sedangkan *Marshall Quotient* didapatkan dengan membagi nilai stabilitas dengan *flow*. Sifat volumetriknya seperti *VMA*, *VIM* dan *VFB* dilakukan dengan melakukan penimbangan benda uji.



Gambar 3.11 Urutan Pelaksanaan Eksperimen Pengujian Properties Campuran Aspal Metode *Marshall*

Dalam penelitian *Marshall* ini, diadakan pembuatan sampel dalam 2 kelompok, untuk keperluan yang berbeda. Kelompok 1, adalah sampel yang dibuat untuk mendapatkan kadar aspal optimum (ideal). Sedangkan kelompok 2 adalah menentukan properties campuran menggunakan kadar aspal optimum yang didapatkan pada pengujian kelompok 1.

a. Material

Material yang digunakan adalah agregat dan aspal. Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa gradasi agregat pada eksperimen ini sudah disiapkan pada eksperimen sebelumnya. Dimana agregat yang digunakan terdiri dari agregat natural dan agregat buatan dari geopolimer *fly ash*. Sehingga yang perlu dilakukan penyiapan material aspalnya.



Titik nyala dan titik bakar  
SNI 06-2433-1991/1992



Berat jenis  
SNI 06-2441-1991



Kehilangan berat  
SNI 06-2441-1991



Titik lembek  
SNI 06-2434-1991



Penetrasi  
SNI 06-2456-1991



Duktilitas  
SNI 06-2432-1991

Gambar 3.12 Macam-macam Pengujian Aspal

Material aspal yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70 produksi PT. Pertamina. Pengujian karakteristik aspal meliputi: Penetrasi pada 25<sup>0</sup>C (mm), Titik Lembek (<sup>0</sup>C), Duktilitas pada 25<sup>0</sup>C (cm), Titik Nyala (<sup>0</sup>C), Titik bakar (<sup>0</sup>C), Berat Jenis, dan berat yang hilang (%). Jenis-jenis pengujian aspal tersebut dapat dilihat dalam Gambar 3.12.

b. Peralatan dan perlengkapan lainnya

Peralatan yang dibutuhkan dalam pengujian adalah: 1) Tiga buah cetakan benda uji yang berdiameter 10,16 dan tinggi 7,62 cm, lengkap dengan pelat alas dan leher sambung; 2) Mesin pemadat manual atau otomatis lengkap dengan landasan dan penumbuknya dengan berat 4,536 kg dan tinggi jatuh bebas 45,7 cm; 3) Alat pengeluaran benda uji (ekstruder) yang berdiameter 10 cm. 4) Alat *Marshall* lengkap dengan : (1) kepala penekan (breaking head) berbentuk lengkung (2) cincin penguji (proving ring) kapasitas 2500 kg dan atau 5000 kg, dilengkapi arloji (dial) tekan dengan ketelitian 0,0025 mm. (3) arloji pengukur alir (flow) dengan ketelitian 0,25 mm beserta perlengkapannya; 5) oven, yang dilengkapi dengan pengatur suhu yang mampu memanasi sampai 200<sup>0</sup>C ( $\pm 3^0$ C); 6) bak perendam (water bath) dilengkapi dengan pengatur suhu

mulai 20-60<sup>0</sup> C ( $\pm 1^0$ C); 7) timbangan yang dilengkapi dengan penggantung benda uji berkapasitas 2 kg dengan ketelitian 0,1 gram dan timbangan berkapasitas 5 kg dengan ketelitian 1 gram; 8) pengukur suhu dari logam (metal thermometer) berkapasitas 250<sup>0</sup>C dan 100<sup>0</sup>C dengan ketelitian 1% dari kapasitas; 9) perlengkapan lain : (1) panci-panci untuk memanaskan agregat, aspal dan campuran aspal; (2) sendok pengaduk dan spatula; (3) kompor atau pemanas (hot plate); (4) sarung tangan dari asbes; sarung tangan dari karet dan pelindung pernapasan (masker). Seperti ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Perangkat Peralatan Uji *Marshall*

c. Prosedur pembuatan campuran aspal

Secara garis besar pengujian *Marshall* meliputi: persiapan benda uji, penentuan berat jenis bulk dari benda uji, pemeriksaan nilai stabilitas dan flow, dan perhitungan sifat volumetric benda uji. Pada persiapan benda uji, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan antara lain: 1) Jumlah benda uji yang disiapkan; 2) Persiapan agregat yang akan digunakan; 3) Penentuan temperatur pencampuran dan pematatan; 4) Persiapan campuran aspal beton; 5) Pematatan benda uji; 6) Persiapan untuk pengujian *Marshall*.



Jumlah benda uji yang disiapkan ditentukan dari tujuan dilakukannya uji *Marshall* tersebut. *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) menetapkan minimal 3 buah benda uji untuk setiap kadar aspal yang digunakan. Agregat yang akan digunakan dalam campuran dikeringkan di dalam oven pada temperatur 105-110<sup>0</sup>C. Setelah dikeringkan agregat dipisah-pisahkan sesuai fraksi ukurannya dengan mempergunakan saringan. Temperatur pencampuran berkisar antara 145<sup>0</sup>C -155<sup>0</sup>C, sedangkan suhu pemadatan antara 110<sup>0</sup>C -135<sup>0</sup>C.

Proses pencampuran diawali dengan penyiapan agregat sebanyak  $\pm$  1200 gram untuk setiap benda uji, sehingga menghasilkan tinggi benda uji kira-kira 63,5 mm  $\pm$  1,27 mm. Panaskan panci pencampur beserta agregat kira-kira 28<sup>0</sup>C di atas suhu pencampuran untuk aspal padat. Tuangkan aspal yang sudah mencapai tingkat kekentalan sebanyak yang dibutuhkan ke dalam agregat yang sudah dipanaskan, kemudian aduklah dengan cepat sampai agregat terselimuti aspal secara merata.

Pada pekerjaan pemadatan, dilakukan dengan cara sebagai berikut: 1) bersihkan perlengkapan cetakan benda uji serta bagian muka penumbuk dengan seksama dan panaskan sampai suhu antara 93,3<sup>0</sup>C – 148,9<sup>0</sup>C; 2) letakkan cetakan di atas landasan pematat tahan dengan pemegang cetakan; 3) letakkan selebar kertas saring atau kertas penghisap yang sudah digunting menurut ukuran cetakan ke dalam dasar cetakan; 4) masukkan seluruh campuran ke dalam cetakan dan tusuk-tusuk campuran keras-keras dengan spatula yang dipanaskan sebanyak 15 kali keliling pinggirannya dan 10 kali di bagian tengahnya; 5) lakukan pemadatan dengan alat penumbuk sebanyak 75 kali tumbukkan untuk lalu lintas berat, dengan tinggi jatuh 457,2 mm. Selama pemadatan harus diperhatikan agar sumbu palu pematat selalu tegak lurus pada alas cetakan; 6) pelat alas berikut leher sambung dilepas dari cetakan benda uji, kemudian cetakan yang berisi benda uji dibalik dan pasang kembali pelat alas berikut leher sambung pada cetakan yang dibalik tadi; 7) terhadap permukaan benda uji yang sudah dibalik ini, ditumbuk dengan jumlah tumbukkan yang sama. 8) sesudah pemadatan, lepaskan keping alas dan pasanglah alat pengeluar benda uji pada permukaan ujung ini; 9)

kemudian dengan hati-hati keluarkan dan letakan benda uji di atas permukaan yang rata dan biarkan selama kira-kira 24 jam pada suhu ruang; 10) bila diperlukan pendinginan yang lebih cepat dapat dipergunakan kipas angin meja.

c. Pengujian campuran aspal

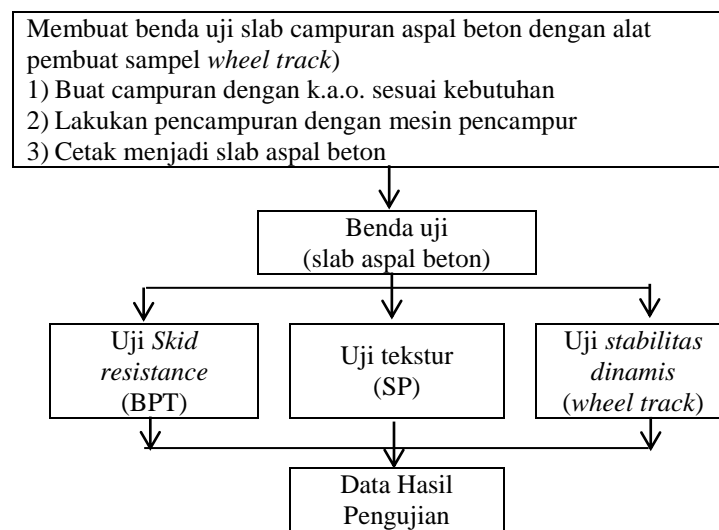
Sebelumnya dilakukan persiapan pengujian, meliputi : 1) Bersihkan benda uji dari kotoran-kotoran yang menempel; 2) Berilah tanda pengenal pada masing-masing benda uji; 3) Ukur tinggi benda uji dengan ketelitian 0,1 mm; 4) Timbang benda uji; 5) Rendam dalam air kira-kira 24 jam pada suhu ruangan; 6) Timbang dalam air untuk mendapatkan isi; 7) Timbang benda uji dalam kondisi kering permukaan jenuh; 8) Bersihkan batang penuntun (*guide rod*) dan permukaan dalam dari kepala penekan, sehingga kepala penekan yang atas dapat meluncur bebas (bila dikehendaki kepala penekan direndam bersama-sama benda uji pada suhu 21,1-37,8<sup>0</sup>C untuk mengurangi lengketnya benda uji terhadap permukaan dalam kepala penekan).

Perlu diperhatikan bahwa dalam proses pengujian, waktu dari saat diangkatnya benda uji dari bak perendaman atau oven (langkah 2) sampai tercapainya beban maksimum (langkah 7) tidak boleh melebihi 30 detik. Pengujian dilakukan dengan cara sebagai berikut : 1) Rendamlah benda uji dalam bak perendam (*water bath*) selama 30 – 40 menit dengan suhu tetap 60<sup>0</sup>C ( $\pm 1^0$ C) untuk benda uji yang menggunakan aspal padat, untuk benda uji yang menggunakan aspal cair masukkan benda uji ke dalam oven selama minimum 2 jam dengan suhu tetap 25<sup>0</sup>C ( $\pm 1^0$ C); 2) Keluarkan benda uji dari bak perendam atau dari oven dan letakkan ke dalam segmen bawah kepala penekan; 3) Pasang segmen atas di atas benda uji, dan letakkan keseluruhannya dalam mesin penguji; 4) Pasang arloji pengukur alir (*flow*) pada kedudukannya di atas salah satu batang penuntun dan atur kedudukan jarum penunjuk pada angka nol, sementara selubung tangkai arloji (*sleeve*) dipegang teguh terhadap segmen atas kepala penekan; 5) Sebelum pembebanan diberikan, kepala penekan beserta benda ujinya dinaikkan sehingga menyentuh alas cincin penguji; 6) Atur jarum arloji tekan pada kedudukan angka nol; 7) Berikan pembebanan pada benda uji dengan

kecepatan tetap sekitar 50 mm per menit sampai pembebanan maksimum tercapai atau pembebanan menurun seperti yang ditunjukkan oleh jarum arloji tekan dan catat pembebanan maksimum (*stability*) yang dicapai; 8) Catat nilai alir (*flow*) yang ditunjukkan oleh jarum arloji pengukur alir pada saat pembebanan maksimum tercapai.

#### B. Pengumpulan Data *Skid resistance* dan tekstur

Pada eksperimen ini akan dicari nilai *skid resistance* dengan *British Pendulum Tester*, makrotekstur permukaan dengan metode *sand patch* perkerasan campuran aspal beton. Hasil tersebut diperoleh dari pengujian sampel berupa *slab* yang dibuat dengan alat pemadat untuk uji *wheel track*. Gambar 3.13 menunjukkan proses pelaksanaan eksperimen.



Gambar 3.14 Proses Pelaksanaan Eksperimen Properties Campuran Aspal

##### a. Material

Material yang digunakan seperti pada campuran metode *Marshall* yaitu agregat dan aspal. Kebutuhan agregat untuk setiap sampel *slab* ukuran 30cmx30cmx5cm adalah sebanyak 12.000 gram = 12 kg, diprediksi

berdasarkan volume slab dan berat jenis agregat 1,08 gr/cm<sup>3</sup>, seperti pada Tabel 3.6. (Gradasi rapat) dan Tabel 3.7. (Gradasi terbuka).

b. Peralatan dan perlengkapan lainnya

Peralatan yang digunakan untuk pembuatan sampel terdiri dari: alat pencampur campuran aspal, alat pencetak dan pemadat sampel, alat *loading wheel track*, British pendulum dan seperangkat alat uji *sand patch*. Gambar 3.14 adalah peralatan yang digunakan.



Pencampur campuran aspal



Pemadat sampel



Cetakan Sampel



*Loading wheel track*



British pendulum



Alat uji *sand patch*

Gambar 3.15 Peralatan Uji Properties Campuran Aspal dengan Sampel *Slab*

c. Prosedur pembuatan sampel dengan pemadat uji *wheel track*

Sampel yang disiapkan digunakan untuk pengujian: *skid resistance*, tekstur dan kedalaman *wheel track*.

Hal-hal yang perlu diperhatikan antara lain: 1) Jumlah benda uji yang disiapkan; 2) Persiapan agregat yang akan digunakan; 3) Penentuan temperatur

pencampuran dan pemadatan; 4) Persiapan campuran aspal beton; 5) Pencetakan benda uji; 6) Persiapan untuk pengujian.

Untuk gradasi rapat dan gradasi terbuka, masing-masing digunakan 5 buah sampel. Diambil masing-masing 2 variasi untuk gradasi terbuka dan gradasi tertutup. Sehingga jumlah sampel total adalah 5 buah x 2 tipe gradasi x 2 variasi = 20 buah sampel *slab*.

Proses pencampuran diawali dengan penyiapan agregat sesuai kebutuhan untuk setiap benda uji, sehingga menghasilkan benda uji *slab* (pelat) beton aspal setebal 5 cm dan sisi dengan ukuran 30cmx30cm. Agregat yang digunakan dalam campuran dikeringkan di dalam oven pada temperatur 105-110<sup>0</sup>C. Agregat dimasukkan ke dalam alat pencampur, kemudian panaskan dengan temperatur kira-kira 28<sup>0</sup>C di atas suhu pencampuran untuk aspal padat. Temperatur pencampuran berkisar antara 145<sup>0</sup>C -155<sup>0</sup>C. Tuangkan aspal yang sudah mencapai tingkat kekentalan sebanyak yang dibutuhkan ke dalam agregat yang sudah dipanaskan dalam *mixer*, kemudian lanjutkan dengan proses pengadukan sampai agregat terselimuti aspal secara merata.

Selanjutnya dilakukan pencetakan dan pemadatan dengan menggunakan mesin pemadat, pada suhu antara 110<sup>0</sup>C -135<sup>0</sup>C, dengan cara sebagai berikut: 1) bersihkan perlengkapan cetakan benda uji; 3) masukkan seluruh campuran ke dalam cetakan; 4) letakan cetakan yang sudah terisi campuran pada alat pemadat; 5) operasikan alat pemadat untuk melakukan pemadatan; 6) kemudian dengan hati-hati keluarkan dan letakan benda uji yang masih dalam cetakan; 7) biarkan selama kira-kira 24 jam pada suhu ruang; 10) bila diperlukan pendinginan yang lebih cepat dapat dipergunakan kipas angin meja.

d. Pengujian sampel *slab wheel track* campuran aspal

Tiga jenis pengujian dilakukan terhadap masing-masing sampel, yaitu: pengujian tekstur permukaan, *skid resistance* dan kedalaman alur (ruting). Pemeriksaan terhadap kedalaman alur dilakukan setelah dilakukan pengukuran tekstur dan *skid resistance*.

Selengkapnya sebagai berikut (Pandia, dkk, 2016):

1) *Sand Patch Method* (pengukuran kedalaman tekstur)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kedalaman tekstur rata-rata permukaan seluas yang tertutup oleh lingkaran pasir. Adapun prosedur pengujian *Sand Patch Method* adalah sebagai berikut:

- a) Periksa permukaan sampel slab cukup kering dan bebas dari kotoran. Sikat setiap material halus dari permukaan yang diperiksa.
- b) Isi silinder dengan pasir dan ketuk-ketuk secara ringan hingga pasir berhenti memadat. Isi silinder hingga penuh dan sapu rata dengan hati-hati permukaan silinder dengan papan penggaris.
- c) Tuangkan pasir dengan bentuk kerucut pada tengah-tengah daerah yang akan diperiksa.



Gambar 3.16 Pengukuran Tekstur dengan *Sand Patch Method*

- d) Sebarkan pasir dalam bentuk lingkaran hingga cekungan-cekungan permukaan diisi rata hingga bagian atas permukaan perkerasan. Batuan yang menonjol pada permukaan harus persis terlihat melalui lapisan pasir.
- e) Ukurlah garis tengah jejak lingkaran sebanyak 2 kali, arah dari yang kedua kira-kira yang tegak lurus terhadap yang pertama. Ambil harga

rata-rata dari pengukuran ini untuk memberikan harga D, yang merupakan garis tengah lingkaran pasir.

2) Uji *skid resistance* dengan *British Pendulum* (pengukuran kekesatan)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui *skid resistance* (kekesatan) permukaan sampel slab aspal beton. Prosedur pengujiannya mengacu pada Cara Uji Kekesatan Permukaan Perkerasan Menggunakan Alat *British Pendulum Tester* (BPT) revisi SNI 03-4427-1997 dan Pandia, dkk (2016).

Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

- a) Pastikan bahwa permukaan sampel yang akan diperiksa cukup kering.
- b) Bersihkan area pengujian setelah *Sand Patch Method* selesai dilakukan. Letakkan alat BPT pada titik pengujian dan atur keseimbangannya hingga gelembung udara berada di tengah.
- c) Pengaturan titik nol pada alat. Pengaturan berupa longgar atau tidaknya pendulum dalam keadaan jatuh bebas tanpa menyentuh perkerasan.
- d) Pengaturan bidang kontak karet pendulum terhadap permukaan jalan. Panjang bidang kontak karet pendulum dengan permukaan jalan adalah 125 mm.
- e) Pengujian dilakukan dengan meluncurkan pendulum.
- f) Basahi permukaan sampel dengan air yang cukup dan ratakan dengan kuas.
- g) Ukur dan catat temperatur permukaan benda uji. Bila sudah menunjukkan angka yang tetap, lakukan pengujian.
- h) Lakukan peluncuran batang pendulum dan catat hasilnya. Ulangi sebanyak 4 kali.

3) *Stabilitas dinamis test* (pengukuran kedalaman deformasi)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kedalaman deformasi setelah dilakukan pembebanan melalui roda yang bergerak dengan siklus tertentu. Pengujian dilakukan dengan alat *Wheel tracking* (*Japan Road Association, 1980*) terhadap sampel slab ukuran 30x30x5cm yang digunakan pada uji

*sand patch* dan *skid resistance* di atas. Pembebanan dengan beban bergerak sebesar  $6,4 \pm 0,15$  kg/cm<sup>2</sup> melalui roda berdiameter 20 cm dengan lebar 5 cm. Tebal roda karet 1,5 cm bergerak dengan kecepatan  $21 \pm 0,2$  siklus/menit. Temperatur pengujian  $60^{\circ}$  selama 60 menit. Selama pengujian kedalaman alur dicatat secara otomatis sehingga dapat digambarkan perkembangan alur selama pengujian.

### 3.4.3.2 Analisis Properties Campuran Aspal Beton

#### A. Analisis data pengujian *Marshall*

Properties campuran aspal diketahui dengan melakukan pengujian sifat mekanik dan volumetrik dengan metode *Marshall*. Nilai-nilai parameter *Marshall* dihitung berdasarkan data yang didapatkan dari hasil eksperimen tersebut, sebagai berikut:

##### 1) Stabilitas

Nilai stabilitas dengan satuan kilogram (kg), didapatkan dengan mengalikan hasil bacaan arloji stabilitas dikalikan dengan kalibrasi serta koreksi benda uji.

##### 2) *Flow*

Nilai *flow* dengan satuan mm, didapatkan dengan mengalikan hasil bacaan *flow* dengan skala 0,01.

##### 3) MQ

*Marshall Quotient* adalah hasil pembagian stabilitas dengan *flow*, dengan satuan kilogram/mm.

##### 4) Sifat-sifat volumetrik campuran aspal seperti: Rongga antar agregat (*Void in Mineral Aggregate/ VMA*), Rongga dalam Campuran (*Void in Mixtures/ VIM*) serta Rongga Terisi Aspal (*Void Filled Asphalt/ VFA*), dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.3 sampai 2.6.

Hasil analisis properties campuran aspal dengan berbagai gradasi tersebut di atas, kemudian dibahas untuk mendapatkan jawaban rumusan 3 yaitu bagaimana properties campuran aspal beton yang dihasilkan dengan agregat buatan dan variasi gradasi. Caranya dengan membuat grafik hubungan antara



gradasi agregat dengan masing-masing properties. Misalnya hubungan antara stabilitas dengan gradasi. Diberikan ulasan gradasi mana yang mempunyai stabilitas seperti yang disyaratkan untuk perkerasan bandara. Selanjutnya dilakukan hal yang sama untuk properties yang lain. Persyaratan properties campuran aspal yang dipakai dalam pembahasan ditunjukkan dalam Tabel 2.10. Dalam pembahasan ini akan muncul properties campuran aspal terbaik dari seluruh variasi gradasi agregat.

B. Analisis data pengujian *skid resistance*, tekstur dan *wheel track*

Properties yang didapatkan dengan sampel *slab* ini dapat dikelompokkan atas properties permukaan campuran aspal dari sisi keamanan yaitu *skid resistance* dan teksturnya, serta properties campuran dari sisi struktur yaitu kedalaman deformasi yang mengakibatkan *wheel track*. Analisis data dan pembahasannya adalah sebagai berikut:

a) *Skid resistance*

Nilai *skid resistance* dengan satuan *Skid Number* (SN) didapatkan dari pembacaan jarum *skid number* dengan menggunakan alat *British Pendulum*. Pengujian dilakukan di atas permukaan sampel pelat (*slab*) campuran aspal. Hasil pengukuran, dari SN kemudian dikonversi ke ukuran *Mu Tester* menyesuaikan dengan pengukuran di lapangan, dengan model yang dihasilkan (Lu, Steven, & Davis, 2006).

Tabel 3.12 Tabel Uji Kekesatan Permukaan dengan Alat *British Pendulum Tester*

No	Tekstur permukaan	Temperatur permukaan (°C)	Pembacaan kekesatan (BPN)					Rata-rata	Koreksi	Nilai BPN	Keterangan
			1	2	3	4	5				

Analisis berdasarkan SNI 4427:2008, 2008, menggunakan Tabel 3.12. Pada kolom No. adalah nomor sampel, pada kolom tekstur diisi kasar/ halus, kolom

temperatur untuk pencatatan temperatur saat pengujian. Pada kolom pembacaan kekesatan diisi pencatatan nilai 5 kali pengujian. Kemudian pada kolom rata-rata, 5 hasil pengujian dirata-ratakan. Selanjutnya dilakukan koreksi. Angka koreksi ditentukan berdasarkan temperatur permukaan sampel yaitu: 0 untuk  $<27^{\circ}\text{C}$ ; +1 untuk  $27^{\circ}\text{C}-32^{\circ}\text{C}$ ; +2 untuk  $32^{\circ}\text{C}-37^{\circ}\text{C}$  dan +3 untuk  $>37^{\circ}\text{C}$ . Nilai BPN didapat dari perkalian rata-rata pengujian dengan koreksi.

b) Tekstur

Nilai tekstur adalah makrotekstur (tekstur permukaan perkerasan) dengan satuan mm didapatkan dengan menghitung dari data pengukuran dengan metode *sand patch*. Pengukuran data berupa volume pasir yang digunakan serta rata-rata diameter lingkaran yang terbentuk. Kedalaman tekstur rata-rata adalah volume pasir dibagi dengan luas lingkaran yang dihitung dengan menggunakan diameter rata-rata. Seperti penjelasan sebelumnya, pengukuran kedalaman tekstur yang didapatkan dengan metode *sand patch* adalah *Mean Texture Dept* (MTD), dengan hasil dalam satuan mm.

c) Data pengujian wheel track machine (WTM)

Data yang didapatkan pada uji ini adalah deformasi (*displacement*) dan stabilitas dinamis akibat lintasan pada temperature  $60^{\circ}\text{C}$ . Data yang dimaksud adalah jumlah lintasan (*track*), stabilitas dinamis dan kedalaman deformasi. Pengujian merupakan simulasi lintasan dan deformasi yang terjadi pada perkerasan. Sehingga hasil analisis adalah jumlah lintasan dan deformasi yang ditimbulkan dalam lintasan/mm.

### **3.4.3.3 Pembahasan tentang Properties dan Karakteristik Permukaan Campuran Aspal Menggunakan Agregat Buatan**

A. Pembahasan properties campuran aspal beton menggunakan agregat buatan.

Pembahasan ini adalah untuk menjawab permasalahan nomor 3 yaitu bagaimana properties campuran aspal beton yang dihasilkan dengan proporsi penambahan agregat buatan dan variasi gradasi. Dalam pembahasan digunakan hasil analisis data properties dari uji *Marshall* dan *wheel track* campuran aspal beton. Berdasarkan pembahasan hasil analisis properties tersebut, maka dapat

diketahui kinerja struktural campuran aspal beton berdasarkan proporsi penambahan agregat buatan dan variasi gradasinya. Sehingga dapat ditentukan mana diantaranya yang memiliki properties terbaik untuk digunakan sebagai perkerasan *runway*. Penekanan dalam pembahasan adalah bagaimana pengaruh penggunaan agregat buatan terhadap properties campuran aspal beton.

#### B. Pembahasan hubungan (*trend*) *skid resistance* dan tekstur.

Pembahasan dilakukan untuk menganalisa kecenderungan hubungan (*trend*) *skid resistance* dan tekstur permukaan hasil pengukuran terhadap variasi campuran aspal di laboratorium dibandingkan hasil pengukuran di lapangan dari penelitian sebelumnya. Pembahasan yang dilakukan sesuai dengan permasalahan nomor 4 adalah mendapatkan kinerja campuran aspal berdasarkan hasil pengujian *skid resistance* dan tekstur di laboratorium. Selanjutnya dibandingkan dengan hasil pengukuran di lapangan dari hasil riset yang pernah dilakukan sebelumnya. *Skid resistance* dan tekstur ini erat kaitannya. Sebab selama *runway* beroperasi akan terjadi penutupan tekstur oleh karet roda, yang mengakibatkan turunnya *skid resistance*. Karena itu hasil pengujian terbaik adalah yang menghasilkan tekstur terdalam dan *skid resistance* tertinggi. Kedalaman tekstur mengindikasikan jangka waktu hingga dipenuhi *rubber*. Linier dengan penurunan *skid resistance*, jika *skid resistance* tinggi, maka akan lebih lama interval waktu pembersihan karetnya. Maka, berdasarkan pertimbangan tersebut, dapat diketahui berapa proporsi agregat buatan dan gradasi mana yang memiliki kinerja terbaik.

#### **3.4.4. Hubungan Tekstur dan *Skid Resistance* terhadap *Rubber Deposit*.**

Pembahasan untuk menjawab permasalahan nomor 5 yaitu timbulan karet pada masing-masing variasi campuran akibat nilai *skid resistance* dan nilai tekstur. Inti pembahasan adalah mendapat *trend* hubungan tekstur terhadap *skid resistance* di laboratorium (hasil pengujian) dan hasil pengukuran di lapangan berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Yager dkk. (1990). Hubungan tekstur dan *skid resistance* hasil pengukuran di lapangan ditunjukkan dalam Gambar 2.15.

Dalam penelitian ini, tidak dilakukan pengamatan ketebalan *rubber deposit* di laboratorium. Ketebalan *rubber deposit* yang terjadi apabila masing-masing variasi campuran diaplikasikan di lapangan dihitung secara analitis. Pendekatan yang digunakan adalah *trend* matematis hubungan *skid resistance* dan *rubber deposit* hasil penelitian Joubert dkk (2004). Verifikasi dicoba dilakukan berdasarkan data dari Bandara Juanda, yaitu dengan data penerbangan dan hasil pemeriksaan *skid resistance* dengan MU meter. *Rubber deposit* yang timbul di lapangan diprediksi berdasarkan hasil pengukuran *skid resistance* dan tekstur 4 variasi campuran yang diuji di laboratorium berdasarkan hubungan matematis tersebut. Campuran aspal terbaik dapat direkomendasikan berdasarkan ketebalan *rubber* yang mampu diantisipasi.

Proses di atas akan menghasilkan luaran yang merupakan *novelty* dalam penelitian ini, yaitu: material perkerasan *runway* dengan aspal beton dari campuran agregat kasar buatan geopolimer *fly ash* dan agregat natural untuk mengurangi *rubber deposit* pada *runway*.

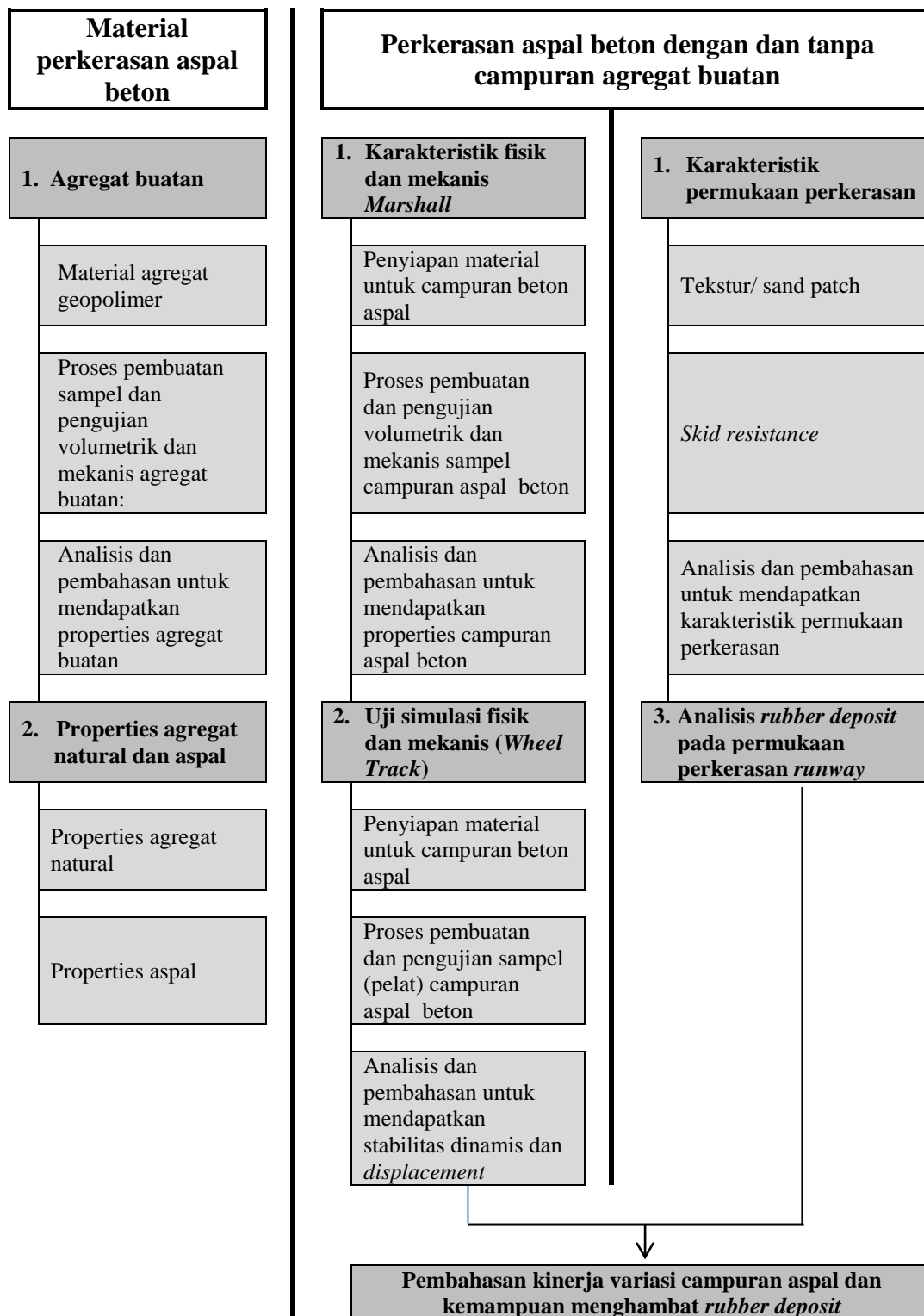
## **BAB 4**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1. Pengantar : Pelaksanaan Penelitian, Analisis Hasil dan Pembahasan**

Telah dijelaskan bahwa tujuan penelitian ini adalah menemukan perkerasan aspal beton dengan campuran agregat buatan dengan properties dapat digunakan untuk *runway* dan dapat menghambat efek *rubber deposit*. Penelitian ini seluruhnya dilakukan di laboratorium. Sesuai dengan tujuan penelitian, maka dalam penelitian ini dilakukan pembuatan agregat dengan bahan *fly ash*, termasuk pengujian properties (karakteristik) fisik dan mekanik maupun mikrostruktur agregat buatan. Agregat dengan properties terbaik digunakan sebagai pengganti sebagian agregat natural dalam campuran aspal. Campuran aspal dibuat dengan 2 gradasi yaitu *Federal Aviation Administration (FAA)* dan *Béton Bitumineux pour Chaussées Aéronautiques (BBA)*, serta dengan menggunakan agregat natural dan buatan. Selanjutnya dicari properties (karakteristik) fisik dan mekanik campuran aspal dengan agregat natural dicampur agregat buatan, maupun yang seluruhnya menggunakan agregat buatan, Hal ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana dapat digunakan sebagai bahan perkerasan. Untuk mengetahui properties (karakteristik) mekanik ini dilakukan uji *Marshall* (stabilitas, *flow*) dan karakteristik volumetriknya (VIM, VMA dan VFB). Dilakukan juga pengujian untuk mengetahui karakteristik permukaan perkerasan kaitannya dengan aspek keselamatan, yaitu *skid resistance* dan tekstur. Sebagai tambahan dilakukan uji *Wheel Tracking Machine/ WTM* untuk mengetahui stabilitas dinamis dan *displacemen*.

Sehubungan dengan hal tersebut, maka dalam bagian ini akan diuraikan secara detail dan sistematis tentang proses pengujian untuk mendapatkan data, tabulasi dan analisa data, pembahasan hasil analisis. Gambar 4.1. menunjukkan urutan-urutan proses pengumpulan data, analisis data dan pembahasannya sehingga didapatkan kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini.



**Gambar 4.1.** Sistematika Analisis dan Pembahasan untuk Mencapai Tujuan Penelitian

## 4.2. Properties Agregat

### 4.2.1. Agregat Natural

Agregat natural mempunyai proporsi dominan dalam campuran aspal beton, karena seluruh ukuran digunakan, mulai dari agregat kasar, agregat halus hingga filler. Untuk mengetahui apakah agregat dapat digunakan dalam campuran aspal beton untuk bandara, maka dilakukan pengujian terhadap propertiesnya. Tabel 4.1 menunjukkan hasil pengujian properties agregat natural, dimana secara keseluruhan memenuhi persyaratan sebagai bahan perkerasan bandara.

Tabel 4.1. Ringkasan Hasil Analisis Data Pengujian Agregat Natural

No	Properties	Satuan	Hasil pengujian properties agregat	Spesifikasi <sup>*)</sup>
1.	Agregat Kasar			
a	Berat Jenis Bulk	gr/c m <sup>3</sup>	2,5	min. 2,5
b	Penyerapan Air	%	2,3	maks. 3
c	Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan Magnesium Sulfat,	%	9,7	maks. 10
d	Abrasi dengan Mesin Los Angeles	%	30,8	<25 (pesawat >28t) <40 (pesawat <28t)
e	Kelekatan agregat terhadap aspal,	%	99	min. 95
2.	Agregat Halus			
a	Berat Jenis Bulk	gr/cm <sup>3</sup>	2,6	min. 2,5
b	Penyerapan Air	%	2,9	maks. 3
3.	Filler			
a	Berat jenis Bulk	gr/cm <sup>3</sup>	2,6	min. 2,5

<sup>\*)</sup>Ditjenhubud, Kemenhub (2005)

### 4.2.2. Agregat Buatan

Dalam subbab ini diuraikan pembuatan agregat geopolimer yang untuk mendapatkan properties terbaik. Sesuai dengan penjelasan sebelumnya, bahwa agregat dibuat dari bahan baku *fly ash* yang diaktivasi dengan larutan alkali. Larutan alkali yang digunakan adalah Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dan NaOH. Agregat buatan dibuat di Laboratorium Struktur, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil,

Lingkungan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Agregat yang diproduksi digunakan untuk campuran aspal beton perkerasan *runway* bandara. Oleh karena itu, agregat yang dibuat harus memenuhi persyaratan sebagai bahan perkerasan *runway*.

Untuk mencapai tujuan tersebut, dalam pembuatannya dicoba dengan 2 tahap yaitu: 1) variasi kemiringan pan granulator; dan 2) variasi rasio alkali. Pada variasi kemiringan pan granulator, rasio alkali aktivator, dalam hal ini  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ , ditetapkan sebesar 2,5. Dengan rasio tersebut dicari pada kemiringan berapa pan granulator menghasilkan properties terbaik. Sedangkan untuk variasi rasio alkali, digunakan kemiringan yang menghasilkan properties terbaik, dengan 4 rasio alkali aktivator yaitu 1,5, 2,0, 2,5 dan 3,0.

#### **4.2.2.1. Fly Ash**

Seperti yang diuraikan pada Bab 2, *fly ash* umumnya digunakan sebagai material pengikat pada campuran *geopolymer*. Dalam penelitian ini juga menggunakan *fly ash* sebagai bahan pengikat. Pada studi ini digunakan *fly ash* produk dari *power plan* Suralaya unit 1 sampai 4.

Kandungan senyawa seperti  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  dan lain-lain yang terdapat dalam *fly ash* berpengaruh terhadap proses geopolimerisasi. Oleh karena itu kandungan senyawa dalam *fly ash* harus diketahui. Kandungan senyawa *fly ash* dapat diketahui dengan melakukan analisa *X-Ray Fluorescence* (XRF) yang dilakukan di laboratorium. Dalam penelitian ini analisa XRF dilakukan di Laboratorium Energi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Tabel 4.2 menyajikan komposisi kimia hasil uji XRF *fly ash* dari pembangkit listrik Suralaya. Data dalam Tabel 4.2 menunjukkan bahwa komposisi kimia gabungan dari  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  mencapai lebih dari 70% sehingga termasuk dalam karakteristik Kelas F sesuai dengan ASTM C618-12a (Standard Specification for Coal *Fly ash* and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete-Designation: C618 – 12a, 2014)



Tabel 4.2. Komposisi Kimia *Fly ash*

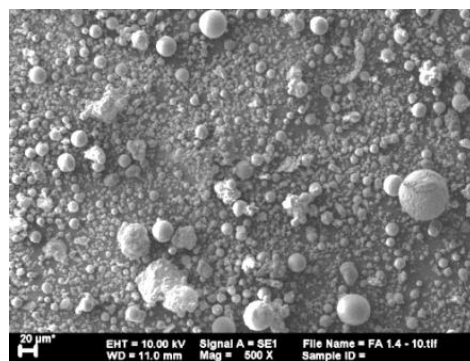
No	Komponen	Kandungan (%)	No	Komponen	Kandungan (%)
1	SiO <sub>2</sub>	45,00	9	BaO	0,27
2	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,45	10	Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	0,25
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,05	11	MgO	0,20
4	CaO	10,85	12	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07
5	MoO <sub>3</sub>	3,29	13	ZnO	0,05
6	TiO <sub>2</sub>	1,70	14	CuO	0,04
7	K <sub>2</sub> O	1,47	15	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03
8	MnO	0,35	16	Na <sub>2</sub> O	0,00

Sumber : Hasil pengujian XRF di Laboratorium Energi - ITS

Kondisi real dan mikro struktur dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dari *fly ash* disajikan pada Gambar 4.2.(a). Morfologi partikel *fly ash* seperti diilustrasikan pada Gambar 4.2.(b) menunjukkan bahwa distribusi partikel *fly ash* adalah heterogen dan tidak seragam. Bentuk-bentuk partikel bulat dengan ukuran bervariasi. Ukuran butir yang tidak teratur ini terjadi akibat pembakaran yang tidak sempurna selama proses produksi (Alsafi dkk., 2017).



(a) Kondisi asli



(b) Mikrostruktur dengan SEM 500X

Gambar 4.2. Kondisi Asli dan Visualisasi Mikrostruktur *Fly ash* Suralaya

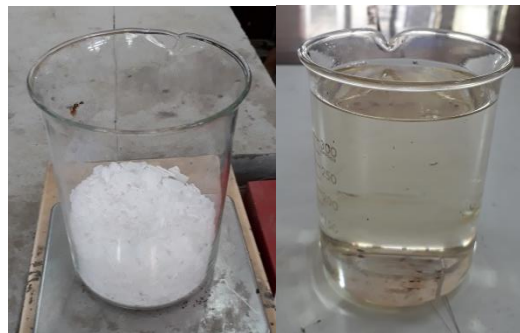
#### 4.2.2.2. Alkali Aktivator

Sebagai activator digunakan larutan alkali yang terdiri dari natrium silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) dan natrium hidroksida (NaOH), seperti ditunjukkan dalam Gambar

4.3.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  adalah larutan sedangkan NaOH berbentuk serpihan (*flaks*). NaOH berperan mereaksikan senyawa Al dan Si dalam *fly ash* sehingga mampu menghasilkan ikatan polimer yang kuat.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  atau biasa dikenal dengan sodium silikat merupakan salah satu larutan alkali yang berperan penting dalam proses polimerisasi karena mampu mempercepat reaksi polimerisasi (Wijaya, 2017).



Sodium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )



Sodium hidroksida (NaOH)

Gambar 4.3. Sodium Silikat dan Larutan Sodium Hidroksida 8 M dari Flaks yang Dilarutkan dengan Aquades.

Larutan NaOH dibuat dengan cara melarutkan, flaks NaOH dalam air suling. Konsentrasi larutan NaOH konstan pada 8 M. Satu liter larutan NaOH dibuat dengan melarutkan flaks natrium hidroksida sebanyak 320 gram dengan air suling. Jumlah 320 gram didapatkan dari masa atom  $\text{NaOH} = 40 \text{ gram/mol}$  dan konsentrasi 8 mol.

#### 4.2.2.3. Komposisi Campuran

Material yang digunakan dalam campuran adalah *fly ash* dan alkali aktivator. Material ini sudah dijelaskan pada sub bab sebelumnya. Komposisi campuran dalam berat yang digunakan adalah *fly ash* : alkali = 75%:25%. Rasio larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH adalah 1,5:1, 2,0:1, 2,5:1 dan 3,0:1. Berdasarkan desain campuran, bahan disiapkan sesuai kebutuhan. Tabel 4.3 menunjukkan jumlah

bahan yang dibutuhkan untuk setiap variasi kemiringan granulator dan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ .

Tabel 4.3. Jumlah Kebutuhan Bahan untuk Sekali Granulasi

a) Kebutuhan berdasarkan kemiringan pan granulator				
Kemiringan Pan granulator	<i>Fly ash</i> (grams)	Alkaline (grams)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (grams)	NaOH (grams)
45	1500	500	357	143
50	1500	500	357	143
55	1500	500	357	143
b) Kebutuhan berdasarkan rasio alkali				
Alkaline ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ )	<i>Fly ash</i> (grams)	Alkaline (grams)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (grams)	NaOH (grams)
1,5	1500	500	300	200
2,0	1500	500	333	167
2,5	1500	500	357	143
3,0	1500	500	375	125

#### 4.2.2.4. Proses Pembuatan dan Pengujian

Sesuai dengan rancangan percobaan, tujuan pembuatan agregat adalah untuk mendapatkan agregat dengan properties terbaik. Pendekatan dilakukan melalui variasi sudut kemiringan granulator serta variasi rasio alkali aktivator dalam hal ini sodium silikat dengan sodium hidroksida. Produksi agregat dilakukan dengan sistem granulasi, menggunakan mesin granulator. Mesin granulator dengan berat sekitar 20-50 kg, terdiri atas pan granulator berdiameter 120 cm yang digerakkan pada kecepatan rotasi 26 rpm. Peralatan yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 4.4.

Sebelumnya telah disebutkan bahwa percobaan ini dilakukan dalam 2 tahap yaitu: 1) membuat agregat dengan mengatur kemiringan; dan 2) membuat agregat dengan variasi rasio. Pada percobaan untuk mendapatkan kemiringan pan granulator terbaik dilakukan dengan cara mengunci nilai  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  pada rasio 2,5 : 1 dan variasi kemiringan pan granulator pada  $45^\circ$ ,  $50^\circ$  dan  $55^\circ$ . Produksi agregat dimulai dengan mengatur kemiringan pan granulator sebesar  $45^\circ$ . Selanjutnya hidupkan mesin sehingga pan granulator berputar dengan 26 rotasi per menit. Masukkan 1500 gram *fly ash* ke dalam pan granulator. Langkah

selanjutnya adalah menambahkan alkali aktivator pada *fly ash* dalam pan granulator yang masih dalam keadaan berputar. Penambahan alkali ini dilakukan dengan cara menyemprotkan secara terus menerus hingga larutan activator sebanyak 500 gram habis dan butiran terbentuk. Pembentukan butiran menunjukkan bahwa proses geopolimerisasi telah terjadi. Granul agregat yang dihasilkan kemudian dipindahkan dari pan granulator dan dihampar sehingga tidak menyatu. Setelah kering dapat dikumpulkan dan disimpan untuk digunakan lebih lanjut. Proses yang sama diulangi untuk kemiringan pan 50° dan 55°.



Gambar 4.4 Granulator untuk Pembuatan Agregat  
(Laboratorium Struktur, Departemen Teknik Sipil, FTSLK, ITS)

Sedangkan untuk percobaan berikutnya proses pembuatannya sama dengan cara sebelumnya. Pan granulator menggunakan sudut terbaik yang didapatkan pada percobaan sebelumnya. Alkali activator dengan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH dengan variasi 1,5 : 1; 2,0 : 1; 2,5 : 1 dan 3,0 : 1. Produksi agregat dimulai dengan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH sebesar 1,5 : 1. Selanjutnya dilakukan dengan cara yang sama seperti pada produksi sebelumnya. Proses yang sama dilakukan juga untuk rasio 1,5 : 1; 2,0 : 1; dan 3,0 : 1. Rasio 2,5 : 1 tidak perlu dibuat karena sudah dibuat pada saat percobaan untuk mendapatkan kemiringan pan optimum.

Agregat yang dihasilkan selanjutnya dilakukan proses perawatan (curing). Pengujian untuk mengetahui properties agregat geopolimer *fly ash* dilakukan setelah mencapai umur 28 hari perawatan pada suhu normal (Davidovits, 1999;

Hardjito dkk., 2004; Lăzărescu dkk., 2017). Pengujian karakteristik agregat meliputi berat jenis (*specific gravity*), penyerapan (*absorption*), daya tahan agregat (*durability*), keausan agregat (*hardness*), kelekatan agregat terhadap aspal (*bitumen adhesion*), dan kekuatan (*strength*). Uji berat jenis dan penyerapan agregat dimaksudkan untuk menentukan berat jenis agregat buatan dan kemampuannya untuk menyerap air (SNI 1969:2008, 2008). Uji daya tahan agregat bertujuan untuk menentukan ketahanan agregat terhadap larutan natrium sulfat (SNI 3407, 2008). Uji keausan agregat bertujuan untuk menentukan resistensi agregat terhadap beban dengan mesin Los Angeles (SNI 2417:2008, 2008). Sedangkan pengujian kelekatan agregat terhadap aspal bertujuan untuk menentukan persentase luas permukaan agregat yang dicakup oleh aspal pada permukaan agregat (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2018).

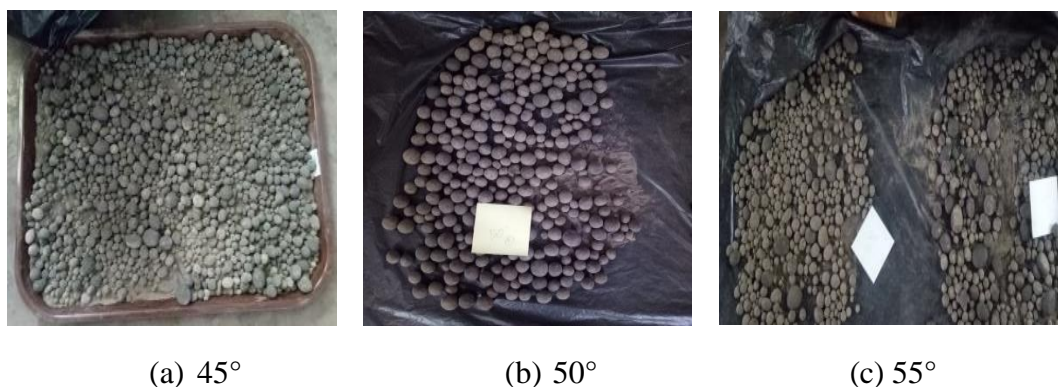
#### **4.2.2.5. Hasil Pembuatan dan Pengujian Agregat**

##### **1) Agregat buatan berdasarkan variasi kemiringan pan granulator**

Sudah dijelaskan sebelumnya bahwa dicoba 3 variasi kemiringan pan granulator yaitu 45°, 50° dan 55°. Pada proses pembuatan agregat menggunakan rencana campuran dengan komposisi 75% *fly ash* dan 25% larutan alkali. Dalam beberapa kali granulasi, proses geopolimer sudah terjadi sebelum larutan alkali habis digunakan. Proses geopolimerisasi ditandai dengan terbentuknya granul. Agregat yang diproduksi berbentuk bulat hampir menyerupai agregat alami. Ukuran agregat dominan yang dihasilkan dari semua kemiringan antara 3/4 inci (19,1 mm) - No.8 (2,36 mm). Agregat dengan ukuran 2,36 mm terbentuk dari bahan yang belum tergranulasi dengan baik selama proses produksi. Perlakuan khusus juga dapat dilakukan untuk mendapatkan agregat dengan ukuran ini, yaitu dengan membiarkan *fly ash* yang belum tergranulasi diputar pada pan granulator dengan kecepatan yang sama sambil ditaburi *fly ash* baru.

Agregat yang diproduksi pada kemiringan yang berbeda dan diputar pada kecepatan yang sama menghasilkan agregat dalam jumlah yang berbeda pada setiap ukuran agregat. Perbedaan tersebut disebabkan oleh durasi dalam proses pembuatan agregat. Umumnya agregat telah tergranulasi dengan baik dalam

durasi waktu kurang dari 15 menit dengan ukuran sampai 12,5 mm atau 19,1 mm. Jika durasi proses granulasinya lebih dari 15 menit, maka agregat tersebut retak dan menjadi butiran baru yang lebih kecil dengan bentuk yang kurang baik.



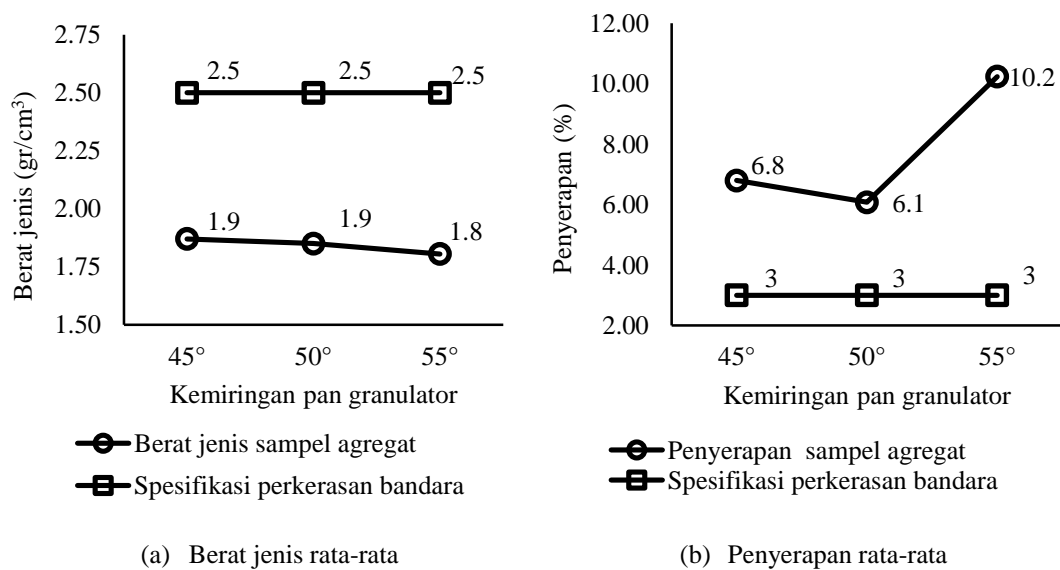
Gambar 4.5. Agregat Buatan Berdasarkan Variasi Kemiringan Granulator

Dalam proses granulasi, bahan *fly ash* juga dapat menempel pada pan granulator sehingga tidak membentuk butiran, sehingga mengurangi jumlah agregat yang dihasilkan. Lebih jelas tentang hasil pembuatan agregat berdasarkan variasi kemiringan pan granulator ditunjukkan pada Gambar 4.5.

Tabel 4.4. Properties Agregat Buatan berdasarkan Kemiringan Pan Granulator

Kemi- ringan pan Granu- lator	Properties Agregat									
	Berat jenis (gr/cm <sup>3</sup> )		Penyerapan (%)		Ketahanan terhadap Sulfat (%)		Keausan (%)		Kelekatan aspal (%)	
	Hasil	Rata- rata	Hasil	Rata- rata	Hasil	Rata- rata	Hasil	Rata- rata	Hasil	Rata- rata
45°	1,88	1,87	6,9	6,8	6,1	6,1	23,5	23,3	97	96
	1,86		6,7		6,2		23,0		94	
50°	1,84	1,85	6,1	6,1	5,3	5,2	23,0	22,8	98	97
	1,86		6,0		5,1		22,6		96	
55°	1,81	1,81	10,2	10,2	3,4	3,3	23,6	24,4	98	98
	1,80		10,3		3,1		25,1		97	
Spesi- fikasi	Min. 2,5 gr/cm <sup>3</sup>		Maks. 3%		Maks. 10%		Maks. 25%		Min. 95%	

Pengujian agregat buatan geopolimer yang dilakukan untuk variasi kemiringan ini meliputi: berat jenis (*specific gravity*), penyerapan (*absorption*), ketahanan agregat (*durability*), keausan agregat (*hardness*), kelekatan aspal terhadap agregat (*bitumen adhesion*). Data pengujian agregat ditunjukkan dalam Lampiran A.6 sampai A.9. Tabel 4.4 menyajikan ringkasan hasil pengujian untuk agregat buatan yang dibuat dengan sudut 45°, 50° dan 55°.

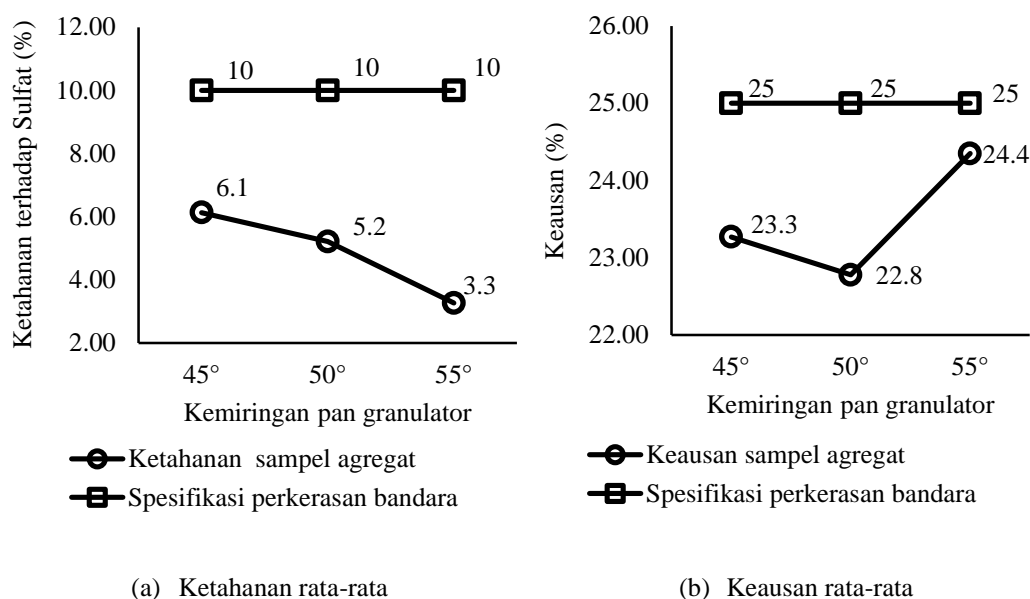


Gambar 4.6. Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Berdasarkan Beda Kemiringan Granulator.

Gambar 4.6. (a) menunjukkan, semakin tinggi kemiringan pan granulator, semakin rendah berat jenisnya. Ini artinya semakin besar kemiringan pan granulator, maka agregat yang terbentuk semakin berat. Ada beberapa penyebab antara lain proses reaksi geopolimerisasi sehingga menyebabkan variasi ukuran pori. Ukuran pori kumulatif lebih besar, jika kemiringan semakin besar, sehingga agregat semakin ringan. Perbedaan hasil tidak signifikan, hanya berbeda pada kisaran 1,1%-3,2%.

Penyerapan air oleh agregat secara keseluruhan di atas persyaratan (minimal 3%). Namun pada kemiringan 50° menunjukkan hasil terbaik

(penyerapan terendah). Kekedapan permukaan berpengaruh terhadap jumlah penyerapan air oleh agregat. Seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6. (b), perbedaan hasil untuk perbedaan kemiringan pan granulator cukup besar yaitu antara 11,5% sampai 67,2%.

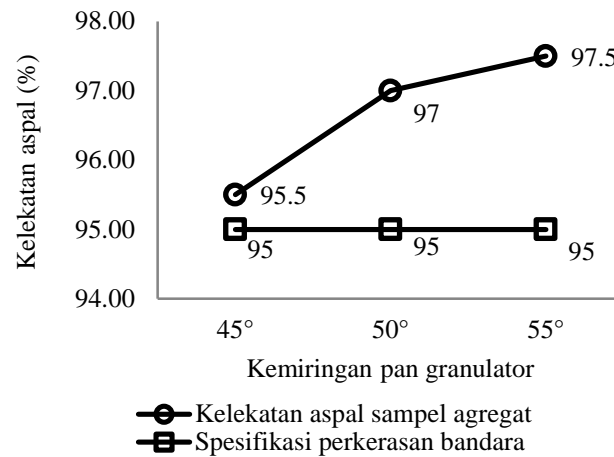


Gambar 4.7. Hasil Pengujian Ketahanan terhadap Sulfat dan Keausan Berdasarkan Beda Kemiringan Granulator.

Pengujian ketahanan terhadap sulfat dimaksudkan untuk mengetahui ketahanan terhadap proses pelapukan. Properties terbaik didapatkan pada kemiringan pan 55° seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.7 (a). Sedangkan pengujian keausan ditujukan untuk melihat ketahanan terhadap gesekan dan tumbukan beban. Properties terbaik untuk uji keausan dihasilkan pada kemiringan pan 50° seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.7 (b). Dalam hal ini dipilih agregat yang dihasilkan dengan kemiringan pan 50°, karena secara praktis ketahanan terhadap aus lebih berperan dalam menunjang fungsi agregat sebagai lapis permukaan. Di samping itu, properties agregat dengan kemiringan pan 50° masih memenuhi persyaratan ketahanan terhadap sulfat.



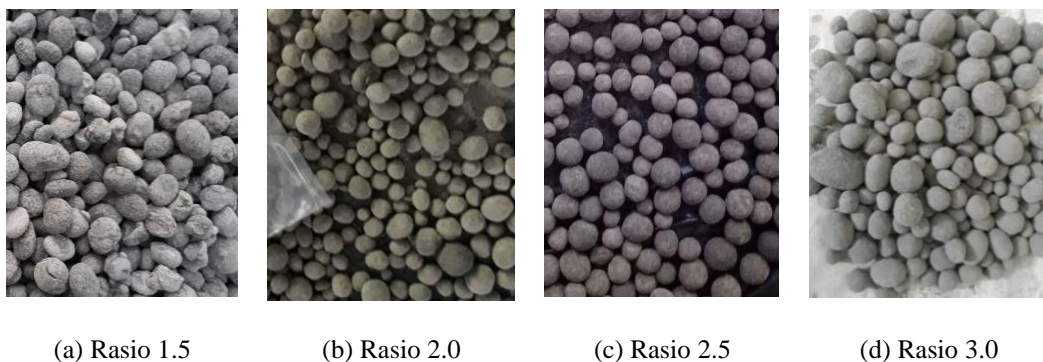
Gambar 4.8. menunjukkan bahwa kelekatan agregat terhadap aspal di atas 95%, sehingga memenuhi persyaratan digunakan sebagai bahan campuran aspal beton. Semakin besar sudut kemiringan pan granulator, maka agregat yang terbentuk semakin baik kelekatannya terhadap aspal.



Gambar 4.8. Hasil Pengujian Kelekatan Agregat terhadap Aspal Berdasarkan Beda Kemiringan Granulator.

## 2) Agregat buatan berdasarkan variasi rasio alkali

Hasil pembuatan agregat pada komposisi aktivator alkali yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 4.9. Selanjutnya, Tabel 4.5 menyajikan ringkasan hasil pengujian untuk agregat buatan yang dibuat dengan *fly ash* dan alkali aktivator dengan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  1,5, 2,0, 2,5 dan 3,0.



Gambar 4.9. Agregat Buatan dengan Rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$

Tabel 4.5. Properti Agregat Buatan berdasarkan Rasio Alkali Aktivator

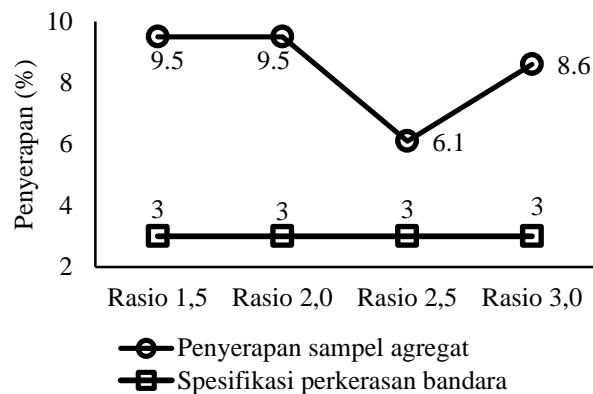
Rasio Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH	Properties Agregat							
	Penyerapan (%)		Keausan (%)		Ketahanan terhadap Sulfat (%)		Ketahanan terhadap Kejut (%)	
	Hasil	Rerata	Hasil	Rerata	Hasil	Rerata	Hasil	Rerata
1,5 : 1	9,6	9,5	22,5	22,8	2,9	3,4	12,5	11,9
	9,4		23,1		3,8		11,2	
2,0 : 1	9,4	9,5	24,3	24,3	8,2	8,1	12,4	12,9
	9,6		24,3		7,9		13,4	
2,5 : 1	6,6	6,1	24,1	22,8	6,7	5,2	15,2	15,8
	5,6		21,5		3,6		16,4	
3,0 : 1	9,2	8,7	27,8	29,2	2,3	2,8	15,1	15,7
	8,1		30,5		3,3		16,3	
Spesifikasi	Maks. 3%		Maks. 25%		Maks. 10%		Maks. 30%	

Sifat-sifat agregat buatan geopolimer *fly ash* yang diuji (Tabel 4.5) adalah: penyerapan, keausan, daya tahan dan kekuatan pada rasio Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> / NaOH 1,5, 2,0, 2,5 dan 3,0. Data detail hasil pengujian dapat dilihat dalam Lampiran A.10-A14. Penjelasan terhadap hasil tersebut terkait dengan persyaratan sebagai bahan perkerasan adalah sebagai berikut:

#### 1) Penyerapan air

Porositas berhubungan erat dengan penyerapan dalam agregat. Porositas mempengaruhi kemampuan agregat untuk menyerap pengikat aspal dalam aspal campuran panas (Fadhil dkk., 2015). Hal ini sangat perlu diperhatikan karena aspal berfungsi memfasilitasi pembentukan ikatan antara agregat. Walaupun demikian, porositas rendah lebih diinginkan, sebaliknya agregat yang mempunyai penyerapan tinggi umumnya dihindari (Widyatmoko, 2008) (Troeger dan Widyatmoko, 2012). Penyerapan maksimum yang diijinkan untuk bahan perkerasan biasanya 2% atau 3%. Nilai hasil uji dan spesifikasi penyerapan pada Gambar 4.10, dari semua rasio tidak ada yang memenuhi spesifikasi untuk bahan perkerasan. Sementara itu, hasil terbaik untuk penyerapan air yang ditemukan dalam penelitian ini adalah 6,1% yaitu agregat yang diproduksi dengan rasio Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> / NaOH 2,5. Penyerapan air yang tinggi dapat mengurangi daya tahan agregat, terutama pada kondisi perubahan

lingkungan yang ekstrim. Dalam riset ini belum didapatkan penyerapan yang <3%. Untuk percobaan selanjutnya dapat dilakukan dengan formula atau metode lain sehingga dihasilkan agregat buatan dengan penyerapan air <3%.

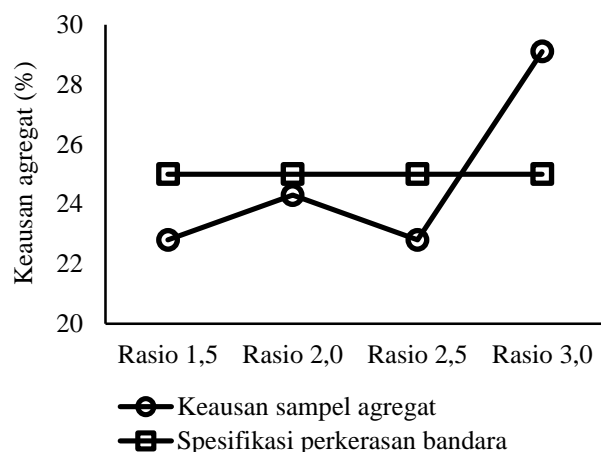


Gambar 4.10. Hasil Uji Penyerapan Air Agregat Buatan dan Spesifikasinya

## 2) Keausan Agregat

Keausan agregat diuji dengan uji *Los Angeles*. Semakin banyak prosentase agregat yang hancur dalam pengujian, menunjukkan bahwa agregat semakin aus. Agregat yang tidak memenuhi persyaratan keausan jika digunakan sebagai bahan perkerasan dapat berisiko hancur saat pencampuran, penghamparan, pemadatan dan saat menerima beban lalu lintas sepanjang umur rencana. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai keausan terbaik berasal dari agregat yang dibuat dengan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  1,5, seperti ditunjukkan Gambar 4.11.

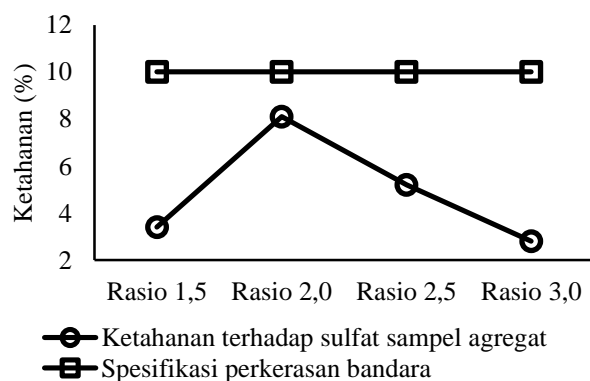
Agregat buatan yang dibuat dari *fly ash*, yang dicampur alkali dengan 4 rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ , sesuai hasil pengujian memenuhi persyaratan sebagai bahan perkerasan jalan, karena nilainya di bawah 30%. Namun, untuk perkerasan lapangan terbang, agregat buatan yang terbuat dari *fly ash* yang diaktifkan alkali dengan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  3,0, tidak memenuhi persyaratan, karena nilainya di atas 25%. Dengan demikian, agregat dengan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  dari: 1,5; 2,0 dan 2,5 dapat digunakan sebagai bahan perkerasan lapangan terbang.



Gambar 4.11. Hasil Uji Keausan Agregat Buatan dan Spesifikasinya

### 3) Ketahanan Agregat terhadap Sulfat

Agregat harus tahan terhadap pelapukan karena kondisi lingkungan jika digunakan sebagai bahan perkerasan. Ketahanan agregat terhadap kondisi lingkungan diuji dengan uji soundness. Gambar 4.12 adalah hasil pengujian ketahanan agregat.



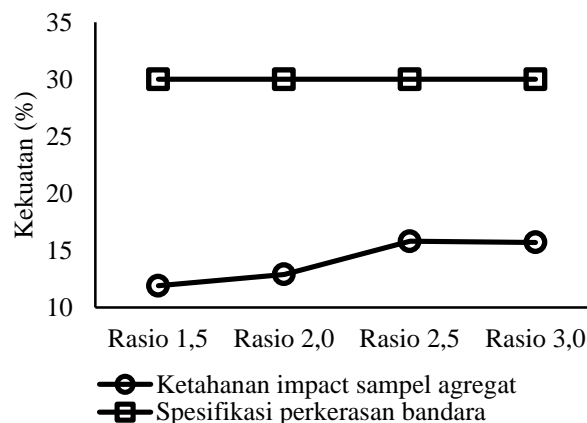
Gambar 4.12. Hasil Uji Ketahanan terhadap Sulfat Agregat Buatan dan Spesifikasinya

Pada pengujian yang dilakukan menunjukkan ketahanan agregat yang dibuat dari *fly ash* dan alkali untuk semua rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  memenuhi

persyaratan sebagai bahan perkerasan jalan dan lapangan terbang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12. Agregat buatan dengan ketahanan (*durability*) terburuk adalah 7,8% dengan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  adalah 2,0. Sifat agregat dengan ketahanan terbaik adalah yang dibuat dengan campuran *fly ash* dan alkali dengan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  3,0.

#### 4) Ketahanan Agregat terhadap Kejut (*Impact*)

Ketahanan agregat terhadap beban kejut diuji dengan uji impact. Gambar 4.13 menunjukkan, ketahanan terhadap kejut agregat dengan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  1,5 mencapai 11,9% artinya 88,1% yang bertahan dari kehancuran. Ini adalah nilai terbaik untuk semua rentang rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ . Semakin tinggi rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ , semakin banyak jumlah agregat yang hancur saat diberikan beban tumbukan. Ini berarti bahwa ada penurunan kinerja agregat sebagai bahan perkerasan.

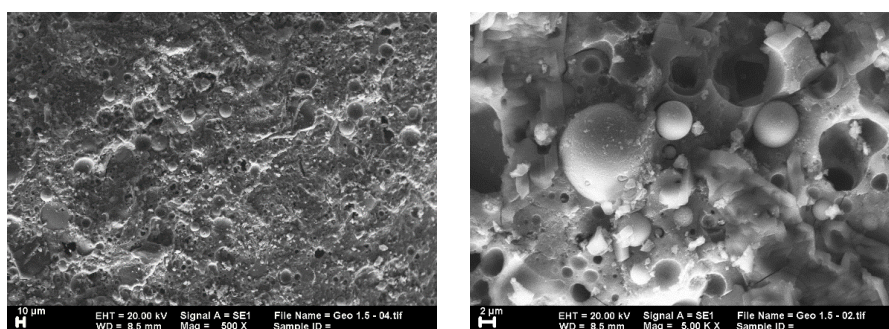


Gambar. 4.13. Hasil Uji Ketahanan terhadap Kejut/ *Impact* Agregat Buatan dan Spesifikasinya

#### 4.2.2.6. Mikrostruktur Agregat Buatan

Proses reaksi geopolimerisasi dapat diamati dari perubahan partikel *fly ash*, yang berbentuk bola, seperti yang terlihat pada Gambar 4.2(b). Ada perubahan dalam struktur mikro dari sistem *fly ash* sebagai konsekuensi dari pembubaran

partikel kaustik oleh aktivator alkali. Proses ini tergantung pada tingkat reaktivitasnya. Proses geopolimerisasi dimulai dengan pembubaran cangkang bola oleh aktivator alkali untuk mengekspos partikel yang lebih kecil. Selama reaksi ini, Natrium Silicoaluminat berbentuk gel. Gel yang terbentuk akhirnya mengisi partikel *fly ash* dan membentuk massa Aluminosilikat.

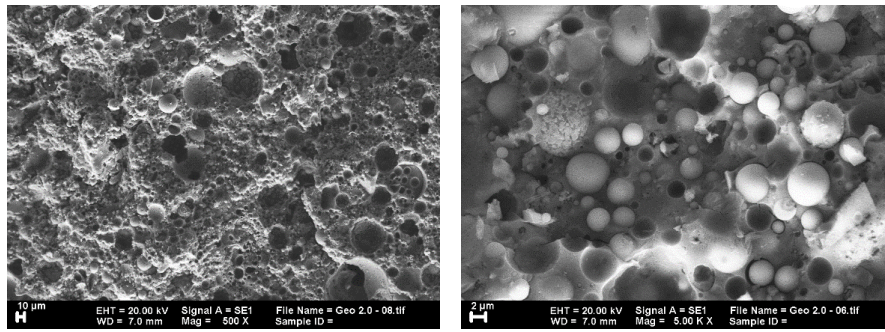


(a)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$  (500x)    (b)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$  (5,000x)

Gambar 4.14. Hasil SEM Agregat Buatan Geopolimer dengan Rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.5$

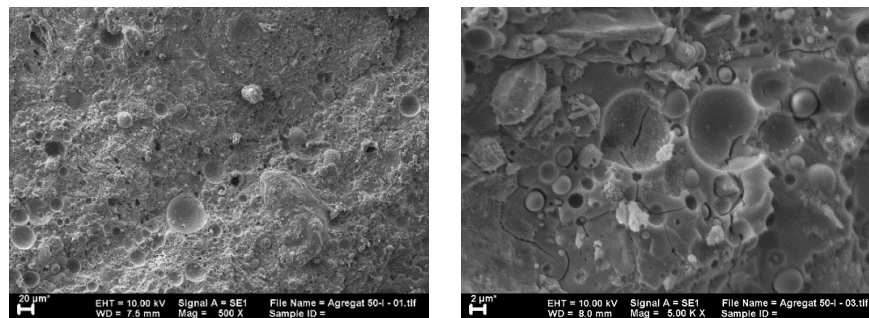
Gambar 4.14-4.17, adalah hasil SEM sampel di Laboratorium Energi, ITS yang menunjukkan kepadatan pasta geopolimer dalam berbagai rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ . Hasil SEM agregat buatan dengan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  1,5 pada Gambar 4.14, menunjukkan kepadatan yang lebih baik daripada rasio 2.0, 2.5, dan 3. Ini terbukti dari pengurangan tertinggi dari partikel bola *fly ash* pada permukaan mikroskopis agregat buatan dengan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  1,5. Dalam gambar SEM juga tampak bahwa matriks telah terbentuk dengan baik tetapi masih ada partikel *fly ash* yang belum bereaksi.

Gambar 4.15-4.16, menampilkan gambar SEM untuk sampel agregat dari *fly ash* dan alkali aktivator dengan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/ \text{NaOH}$  2.0 dan 2.5. Dalam rasio itu, partikel terbentuk dengan baik tetapi masih ada partikel *fly ash* yang belum bereaksi. Ukuran diameter *fly ash* yang bereaksi berukuran antara 10 µm hingga 21 µm. Dengan pembesaran 5.000 kali, terlihat terbentuk celah (rongga).



(a)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.0$  (500x) (b)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.0$  (5,000x)

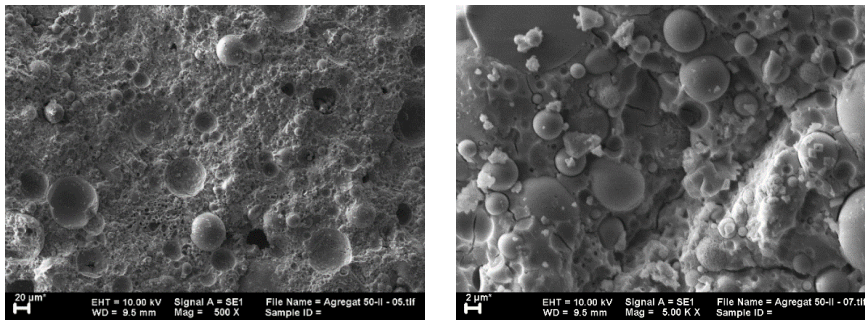
Gambar 4.15. Hasil SEM Agregat Buatan Geopolimer dengan Rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2,0$



(a)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$  (500x) (b)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$  (5,000x)

Gambar 4.16. Hasil SEM Agregat Buatan Geopolimer dengan Rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$

Permukaan mikroskopis dari gambar SEM pada Gambar 4.17. menunjukkan reaksi *fly ash* terhadap aktivator dengan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  3,0. Reaksi aluminosilikat yang terjadi ditandai dengan perubahan partikel bulat dari *fly ash*. Semakin sempurna reaksinya, semakin banyak perubahan partikel-partikel bola *fly ash*. Dalam rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/ \text{NaOH}$  3,0, terdapat lebih banyak partikel bola *fly ash* yang belum bereaksi dengan ukuran diameter antara 25 µm hingga 57 µm. Pada perbesaran gambar SEM 5.000 kali, retakan tampak lebih besar dari rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  lainnya. Dapat dilihat juga campurannya lebih padat dan kurang cair. Dalam hal ini, penyusutan terjadi dan terbentuk lebih banyak pori-pori dalam produk geopolimer.



(a)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 3.0$  (500x) (b)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 3.0$  (5,000x)

Gambar 4.17. Hasil SEM Agregat Buatan Geopolimer dengan Rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 3,0$

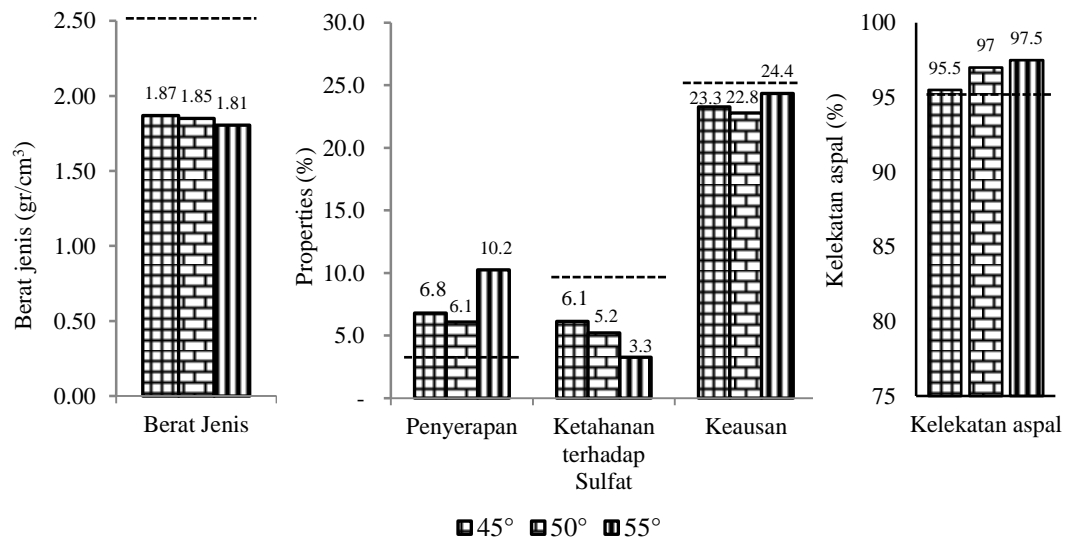
Berdasarkan morfologi yang terlihat pada gambar SEM menunjukkan bahwa, terjadi reaksi yang baik antara partikel *fly ash* dan aktivator alkali. Proses peleburan partikel bulat *fly ash* (cenospheres), membentuk aluminosilikat (Mustafa dkk., 2011; Vaiyapuri dkk., 2014; Tajunnisa dkk., 2016). Partikel bola *fly ash* (cenospheres) yang masih terlihat merupakan partikel yang belum bereaksi, yang dipengaruhi oleh rasio alkali. Peningkatan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  mengakibatkan berkurangnya reaksi partikel *fly ash*. Ini karena berkurangnya jumlah NaOH dalam larutan pengaktif, menyebabkan kekurangan untuk melarutkan senyawa dalam *fly ash*. Larutan Silikat membantu dalam polikondensasi geopolimer. Meskipun demikian, itu hanya dapat terjadi jika Silikat dan Aluminat dalam bahan baku dilarutkan oleh NaOH. Ini bisa terjadi dengan baik sangat tergantung pada kecukupan jumlah NaOH. Di sisi lain, NaOH yang berlebihan menyebabkan proses pengerasan menjadi cepat, sehingga menghasilkan penurunan kekuatan (Pavithra dkk., 2016)

#### 4.2.3. Properties Agregat Buatan sebagai Bahan Campuran Aspal

Sebagai bahan campuran aspal beton, properties agregat harus memenuhi persyaratan yang ditentukan. Karena itu properties agregat, harus diketahui. Agregat natural yang digunakan adalah agregat yang biasa digunakan dan telah memenuhi persyaratan untuk bahan campuran aspal beton. Namun, untuk agregat buatan dari *fly ash* dan alkali aktivator, perlu dicari karena propertiesnya



dipengaruhi berbagai hal. Misalnya, komposisi *fly ash* dengan alkali aktivator, rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  dalam alkali aktivator dan kemiringan pan granulator. Properties terbaik dari berbagai faktor tersebut dapat diketahui dari hasil eksperimen.



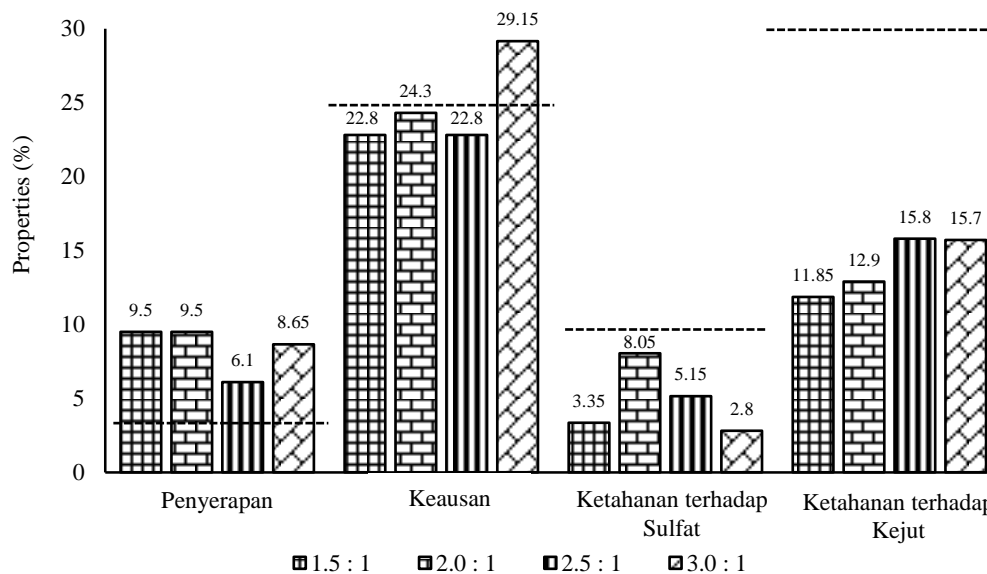
Gambar 4.18. Properties Agregat Geopolimer *Fly Ash* dengan Variasi Kemiringan

Gambar 4.18. menunjukkan hasil uji properties berdasarkan variasi kemiringan granulator, sebesar 40°, 50°, 55°. Mengacu pada hasil pengujian karakteristik agregat dari Gambar 4.18 menunjukkan bahwa berat jenis dan penyerapan agregat semua variasi kemiringan agregat tidak memenuhi persyaratan. Nilai berat jenis tertinggi didapat pada kemiringan 45° adalah 1,87. Nilai ini belum memenuhi persyaratan, dimana berat jenis harus lebih besar dari 2,5 gr/cm<sup>3</sup>. Nilai penyerapan terendah dihasilkan pada kemiringan 50°. Penyerapan terbaik sebesar 6,08%, lebih tinggi dari persyaratan (3%) didapat pada kemiringan 50°. Penyerapan yang tinggi dan berat jenis yang rendah disebabkan antara lain oleh faktor pori dalam agregat buatan geopolimer (Aravindan dkk., 2015). Granulator dengan sudut kurang ataupun lebih dari 50° akan menghasilkan agregat dengan pori lebih banyak. Sehingga bersifat porous yang mengakibatkan

penyerapannya lebih tinggi. Pori yang besar kurang baik untuk bahan campuran aspal beton karena membutuhkan lebih banyak aspal dalam campuran.

Kemiringan granulator yang lebih besar dari 50° (55°), proses pembuatannya lebih mudah. Sedangkan untuk sudut kemiringan di bawah 50° (45°) proses produksinya lebih sulit. Oleh karena itu, perlu untuk mengubah desain campuran seperti perubahan nilai rasio atau konsentrasi larutan NaOH untuk mendapatkan berat jenis dan penyerapan sesuai dengan spesifikasi.

Ketahanan agregat terhadap sulfat (durabilitas), diperoleh pada kemiringan 55° dengan nilai 3,27% dan terburuk pada kemiringan 45° adalah 6,13%. Nilai keausan agregat (*hardness*) dengan pengujian keausan (*Los Angeles test*), terbaik diperoleh pada kemiringan 50° dengan nilai 22,78%, kemudian 45° sama dengan 23,27% dan 55 ° dengan nilai 24,35%. Sedangkan nilai kelekatan aspal terhadap agregat terbaik diperoleh pada kemiringan 55° adalah 97,50%, dan terendah pada kemiringan 45° adalah 95,50%.



Gambar 4.19. Hasil Uji Properti Agregat Buatan Geopolimer *Fly Ash* dengan Variasi Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/ NaOH

Sudut kemiringan granulator terbaik dalam proses pembuatan agregat buatan geopolimer adalah 50°. Kemiringan ini menghasilkan agregat yang memiliki bentuk dan permukaan terbaik. Disamping itu, nilai karakteristik agregat relatif lebih baik daripada agregat buatan yang dihasilkan dengan sudut kemiringan lainnya. Dimana agregat geopolimer buatan memiliki nilai keausan terbaik dengan nilai penyerapan rendah dan berat jenis yang relatif kecil.

Gambar 4.19. adalah properties hasil uji menunjukkan nilai keausan, daya tahan dan kekuatan meningkat dari rasio 1,5 hingga 3. Ini sesuai dengan peningkatan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ . Sedangkan nilai absorpsi mulai dari  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  ratio 1,5 hingga 3 adalah 9,5%; 9,45%; 6,08%; dan 8,60%. Nilai keausan, daya tahan dan kekuatan, sesuai dengan jumlah agregat yang melewati ayakan tertentu (hancur) selama proses pengujian.

Semua pengujian properti agregat, kecuali absorpsi, berkorelasi linier dengan penambahan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ . Semakin tinggi nilai sifat keausan, daya tahan dan kekuatan, artinya semakin banyak agregat yang hancur saat diberikan perawatan, baik mekanik maupun kimia. Hasil ini menunjukkan bahwa keausan, kekuatan dan ketahanan agregat lebih rendah jika rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  meningkat. Tetapi dalam penelitian lain, pasta abu terbang geopolimer menggunakan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  0,5, 1, 1,5, 2, dan 2,5 memiliki nilai optimal pada 2 dan 2,5. Rasio aktivator 2.5 memiliki kekuatan tekan tertinggi (Risdanareni dkk., 2015) (Risdanareni dan Ekaputri, 2015).

Hasil uji sifat absorpsi menunjukkan hasil yang tidak linier. Hasil lengkap menunjukkan bahwa agregat dengan rasio  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  2,5 memiliki struktur paling padat dibandingkan dengan agregat dengan rasio 1,5, 2.0, 2,5, 3.0. Karena itu, pada agregat geopolimer dengan rasio 2,5, didapatkan penyerapan terendah. Hal ini dapat dilihat dari hasil SEM yang menunjukkan reaksi yang baik antara partikel *fly ash* dan aktivator alkali.

Secara umum dapat dilihat bahwa properties agregat geopolimer yang dibuat dengan kemiringan pan granulator 50° dan rasio alkali 2,5, memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai campuran aspal beton untuk bandara. Alasan lain adalah kondisi ini menghasilkan nilai penyerapan terendah, meskipun masih diatas 3% (syarat penyerapan agregat untuk aspal beton).

Sesuai dengan hasil eksperimen di atas dan penelitian (Priyadharshini dkk., 2011), yang menyatakan agregat buatan geopolimer mempunyai kinerja lebih baik dibandingkan dengan agregat alami. Ini menunjukkan bahwa perlu dilakukan riset berikutnya untuk mendapatkan performa yang lebih baik terutama dari sisi penyerapan agregat hingga lebih rendah dari 3%.

#### **4.3. Gradasi dan Proporsi Penggunaan Agregat untuk Campuran Aspal Beton**

Dalam penelitian dibuat campuran aspal beton dengan gradasi rapat (*Dense Graded*) mengacu pada FAA dan gradasi terbuka (*Open Graded*) mengikuti BBA. Agregat yang digunakan adalah campuran dari agregat natural (AN) dan agregat buatan (AB) dengan variasi komposisi. Dalam sub bagian ini diuraikan analisis data hasil eksperimen untuk mendapatkan komposisi agregat kasar buatan dan natural yang digunakan pada masing-masing ukuran butiran sesuai gradasi yang digunakan. Dari beberapa varian yang dibuat ditentukan komposisi agregat kasar buatan dan agregat natural untuk gradasi rapat (*Dense Graded*) dan gradasi terbuka (*Open Graded*).

##### **4.3.1. Data Material Campuran Aspal Beton**

Material yang digunakan dalam campuran adalah agregat kasar, agregat halus, filler dan aspal. Agregat kasar yang digunakan terdiri dari agregat buatan dan agregat natural. Agregat halus dan *filler* hanya dari agregat natural. Properties agregat natural ditunjukkan dalam Tabel 4.1. Sedangkan untuk agregat buatan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan 4.5. Rincian pengujian properties masing-masing dapat dilihat dalam Lampiran A1-A14. Properties aspal untuk campuran aspal beton ditunjukkan dalam Tabel 4.6. Rincian pengujian dapat dilihat dalam Lampiran A15-A19.

Hasil pengujian sifat-sifat fisik atau karakteristik agregat kasar, agregat halus, dan bahan pengisi pada Tabel 4.1., 4.4. dan 4.5. dapat dijelaskan sebagai berikut:

#### 1. Berat jenis dan penyerapan air

Hasil pengujian berat jenis terhadap agregat natural baik agregat kasar, agregat halus dan filler (Lampiran A.1, A.4, dan A.5), menunjukkan nilai  $\geq 2,5 \text{ g/cm}^3$ . Sedangkan hasil untuk pengujian penyerapan menunjukkan nilai  $< 3\%$ . Artinya agregat natural memenuhi persyaratan sebagai bahan perkerasan landasan lapangan terbang. Pada agregat kasar buatan kedua persyaratan tersebut tidak terpenuhi, karena berat jenis yang didapatkan  $< 2,5$  dan penyerapannya  $> 3\%$ . Hal ini disebabkan karena agregat buatan lebih ringan karena memiliki pori lebih banyak. Pori memang dibutuhkan untuk menyerap aspal, namun pori yang berlebih menyebabkan kebutuhan aspal meningkat karena banyak terserap oleh agregat. ber sehingga terbentuk ikatan antar aspal dan butiran agregat. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan tercantum dalam Tabel 4.6. Perbedaan berat jenis (*d<sub>kk</sub>*) agregat kasar dan halus adalah 0,015. Nilai tersebut memenuhi spesifikasi yang mensyaratkan perbedaan berat jenis agregat kasar dan halus tidak boleh lebih dari 0,2. Sedangkan uji penyerapan air agregat yang diperoleh adalah sebesar 2.35% untuk agregat kasar dan 2.97% untuk agregat halus (Lampiran A.1 dan A.4). Nilai tersebut memenuhi spesifikasi untuk penyerapan air oleh agregat sebesar maksimum 3%. Pengujian ini juga dilakukan pada agregat buatan fraksi kasar, dari hasil pengujian didapatkan berat jenis sebesar  $1,85 \text{ gr/cm}^3$  dan penyerapan air sebesar 6,08%.

#### 2. Keausan agregat dengan alat Abrasi Los Angeles

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui durabilitas agregat. Pada agregat kasar alami didapatkan nilai sebesar 30,8% dan sebesar 22,78% untuk agregat buatan. Nilai tersebut telah memenuhi spesifikasi yang menetapkan persyaratan maksimal 25% (*U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2014*)(Kementerian Perhubungan; Direktorat Jenderal Perhubungan Udara; Peraturan Dirjen Perhubungan Udara No. : KP 576 Tahun

2011, 2011). Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat yang digunakan mempunyai nilai keausan cukup kecil sehingga tidak mudah pecah selama pemadatan atau akibat beban lalu lintas. Dengan demikian maka gradasi agregat di dalam perkerasan tidak akan berubah secara signifikan, sehingga dapat mempertahankan gradasi rencana dengan baik.

### 3. Kelekatan agregat terhadap aspal

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya kelekatan agregat terhadap aspal. Dari hasil pengujian diperoleh nilai 98% untuk agregat kasar alami dan sebesar 97% pada agregat buatan. Nilai ini lebih besar dari 95% yang menjadi persyaratan dalam spesifikasi. Hal ini menunjukkan bahwa agregat yang diuji memiliki sifat kelekatan terhadap aspal yang cukup besar sehingga agregat cukup tahan terhadap pemisahan aspal, misalnya akibat pengaruh air.

Tabel 4.6. Ringkasan Hasil Analisis Data Pengujian Aspal

No	Properties	Satuan	Nilai	Spesifikasi <sup>*)</sup>
1	Penetrasi pada 25°C	0,1 mm	64	60 – 70
2	Daktalitas pada 25°C	cm	107	100
3	Titik Lembek	°C	51	48-58
4	Titik Nyala	°C	256	>232
5	Titik Bakar	°C	303	-
6	Berat Jenis	gr/cm <sup>3</sup>	1,033	>1,0
7	Kehilangan Berat	%	0,164	-

Sumber (Kementerian Perhubungan; Direktorat Jenderal Perhubungan Udara; Peraturan Dirjen Perhubungan Udara No. : KP 576 Tahun 2011, 2011)

Penjelasan hasil pengujian sifat-sifat fisik atau karakteristik aspal pada Tabel 4.6. adalah sebagai berikut:

#### 1. Pengujian Penetrasi

Pengujian penetrasi dimaksudkan untuk menetapkan nilai keausan aspal. Semakin besar nilai penetrasi maka aspal semakin lunak dan begitu juga sebaliknya, semakin kecil nilai penetrasi maka aspal semakin keras. Pada

pengujian penetrasi aspal di laboratorium didapatkan hasil bacaan pada alat penetrasi rata-rata aspal yang diuji adalah 64. Dari hasil pengujian bisa diketahui aspal yang digunakan memenuhi syarat aspal penetrasi 60/70, yaitu nilai penetrasinya harus berada diantara 60 sampai dengan 70.

## 2. Pengujian Titik Lembek

Pengujian titik lembek aspal bertujuan untuk mengetahui suhu dimana aspal mulai mencapai titik lembeknya sehingga bisa dijadikan patokan dalam pekerjaan di lapangan untuk menentukan suhu maksimum yang digunakan sebelum aspal menjadi lembek. Dari hasil pengujian titik lembek didapatkan nilai yaitu 52°C. Nilai ini sudah memenuhi spesifikasi dimana nilai titik lembek untuk aspal penetrasi 60/70 yaitu antara 48°C – 58°C.

## 3. Pengujian Titik Nyala dengan *Cleveland Open Cup*

Dari hasil pengujian titik nyala didapatkan suhu titik nyala pada aspal pertamina pen. 60/70 adalah 256°C. Hasil ini sudah sesuai dengan spesifikasi untuk aspal penetrasi 60/70 yaitu titik nyala harus >232°C.

## 4. Pengujian Daktilitas

Pengujian daktilitas pada aspal bertujuan untuk mengetahui ketahanan aspal dalam mempertahankan sifat aslinya terhadap perubahan misalnya air dan untuk mengetahui elastisitas bahan aspal. Sesuai persyaratan pada spesifikasi, aspal yang baik untuk digunakan adalah aspal dengan nilai daktilitas =100 cm. Pada pengujian ini aspal yang diuji sudah memenuhi syarat dengan nilai minimal 100 cm.

## 5. Pengujian Berat Jenis Aspal

Berat jenis aspal yang digunakan pada penelitian ini yaitu sebesar 1,033 gr/cm<sup>3</sup>. Berdasarkan SNI 06-2441-1991(Departemen Pekerjaan Umum, 1991), berat jenis aspal yang digunakan memenuhi syarat minimum berat jenis aspal yaitu 1 gr/cm<sup>3</sup>.

### 4.3.2. Penentuan Proporsi Agregat Buatan dan Natural dalam Campuran

Penelitian ini mencoba untuk mencari sejauh mana pengaruh penggunaan agregat buatan dalam campuran aspal beton terhadap kinerja berdasarkan properties yang disyaratkan dalam perencanaan. Dalam upaya mengurangi jumlah sampel dalam pengujian, terlebih dahulu dicoba beberapa komposisi, untuk mendapatkan properties terbaik, dari variasi komposisi agregat buatan (AB) dan agregat natural (AN). Variasi tersebut adalah: 1) 0%AB:100%AN; 2) 25%AB:75%AN; 3) 50%AB: 50%AN; 4) 75%AB:25%AN dan; 5) 100%AB:0%AN.

Tabel 4.7. Hasil Pengujian Properties Aspal Beton untuk Semua Variasi Campuran

Variasi	Kadar aspal	Stabilitas (Kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)
Persyaratan		975*)	2,5-4*)		min 3.5%*)	15%*)	76%-
		998**)	2-4**)		3%-4%**)	15%**)	82%**)
0% AB: 100% AN	5	1279	3,7	348	4,9	18,1	72,9
	6	1582	3,9	406	4,3	17,6	75,6
	7	1662	4,1	405	2,3	15,9	85,5
25% AB: 75% AN	5	1548	2,6	595	6,3	17,0	63,0
	6	1536	3,8	404	3,0	16,1	81,3
	7	1626	5,5	296	1,7	17,0	89,8
50% AB: 50% AN	5	1296	3,9	332	7,4	17,7	58,3
	6	1023	4,0	256	5,3	17,8	70,2
	7	1520	4,8	317	3,2	17,8	82,3
75% AB: 25% AN	5	1064	3,9	273	9,1	18,9	52,0
	6	945	4,3	220	6,1	18,1	66,6
	7	1435	5,3	271	3,6	17,8	80,0
100% AB: 0% AN	5	1008	4,2	240	9,6	19,1	49,9
	6	1020	4,9	208	7,2	18,8	61,9
	7	1020	5,9	173	4,5	18,2	75,5

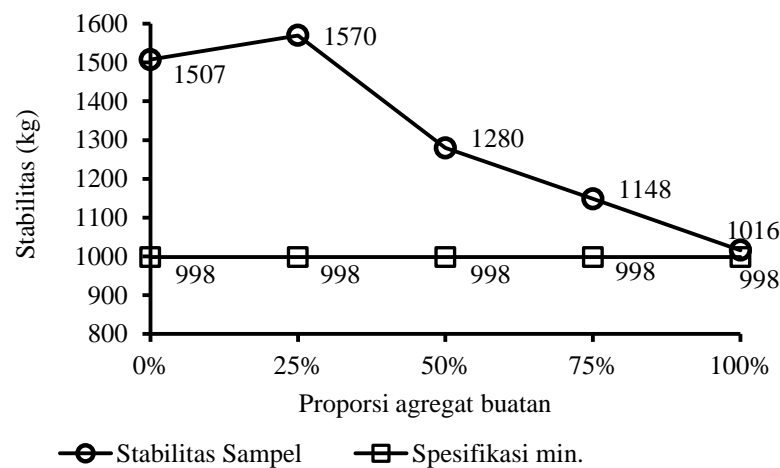
Catatan : \*) (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2014); \*\*) (Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, 2011)

Tabel 4.7. adalah hasil pengujian properties untuk semua variasi campuran aspal beton (Putri, dkk, 2019). Dalam pengujian, benda uji yang digunakan masing-masing dengan 3 kadar aspal yang berbeda yaitu: 5%, 6% dan 7%. Setiap kadar aspal menggunakan 3 benda uji. Sehingga total benda uji yang digunakan adalah 45 benda uji dengan rincian : 3 (kadar aspal) x 3 (masing-masing kadar



aspal) x 5 (variasi jumlah agregat kasar buatan). Nilai properties masing-masing kadar aspal adalah merupakan nilai rata-rata dari 3 benda uji.

Gambar 4.20-4.22, menunjukkan rata-rata properties mekanis, meliputi stabilitas, *flow* dan *Marshall quotient*. Gambar 4.24-4.26 adalah properties volumetrik dari campuran aspal beton, dengan variasi komposisi agregat buatan dan agregat natural. Variasi penggunaan agregat buatan adalah hanya pada agregat kasarnya saja.

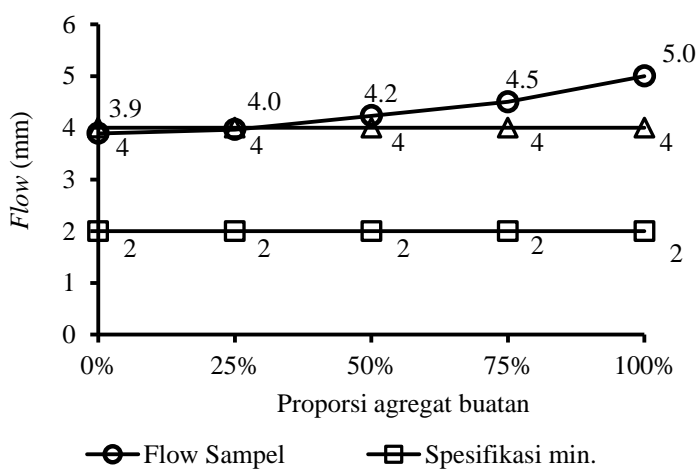


Gambar 4.20. Nilai Stabilitas Variasi Campuran Hasil Uji *Marshall*

Stabilitas adalah kemampuan campuran aspal untuk menerima beban sampai terjadi kelelahan plastis (Wahjoedi, 2009). Nilai stabilitas didapatkan dari hasil pembacaan arloji Marshall pada saat pengujian sampel. Nilai stabilitas adalah pembacaan arloji stabilitas dikalikan dengan koreksi volume benda uji dan kalibrasi alat. Sebagai contoh untuk pembacaan arloji = 610 (Nomor benda uji A.1.1 pada Lampiran B1), dengan tinggi benda uji 6,8 cm, koreksi volume benda uji = 0,96 dan kalibrasi alat = 7,28 lbs x 0,454 = 3,305. Maka nilai stabilitasnya adalah  $610 \times 0,96 \times 3,305 = 1935$  kg. Nilai pada Lampiran B1-B8, dilakukan dengan cara yang sama, seperti contoh.

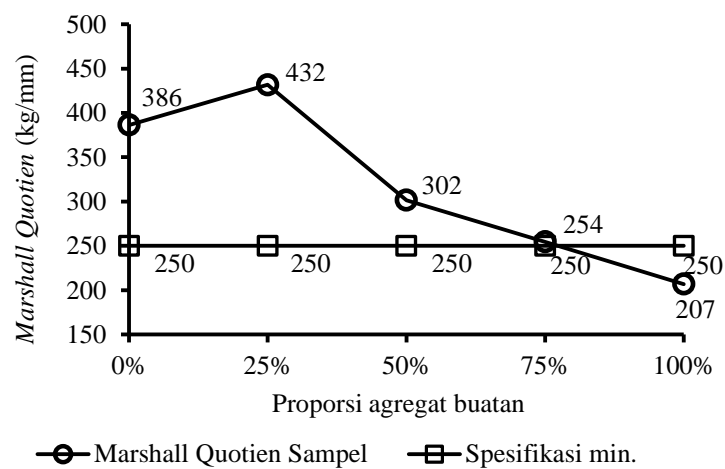
Nilai stabilitas pada Gambar 4.20. menunjukan untuk semua variasi komposisi agregat buatan, mulai dari 0% hingga 100% menunjukan nilai yang memenuhi syarat untuk digunakan sebagai bahan perkerasan bandara (>998kg). Penambahan agregat kasar buatan pada campuran aspal mengakibatkan nilai stabilitas menurun, kecuali pada tambahan agregat kasar buatan sebesar 25%. Penurunan nilai stabilitas ini disebabkan oleh peningkatan rongga/ void (Gambar 4.23 dan 4.24), sehingga dapat mengurangi sifat saling mengunci (*interlocking*) dari partikel-partikel agregat. Sebaliknya peningkatan nilai stabilitas terjadi pada penambahan agregat kasar buatan sebesar 25%. Artinya kemampuan campuran dengan komposisi 25% agregat buatan lebih baik untuk menerima beban lalu-lintas tanpa mengalami perubahan bentuk tetap (deformasi permanen) seperti gelombang, alur (*rutting*), maupun mengalami bleeding, dibandingkan dengan variasi campuran yang lain.

*Flow* adalah perubahan bentuk plastis suatu campuran aspal yang terjadi akibat beban sampai batas runtuh (Wahjoedi, 2009). Nilai kelelahan plastisitas (*flow*) berbanding lurus dengan ketahanan (stabilitas). Semakin besar stabilitas, semakin besar pula *flow*nya, dan begitu juga sebaliknya. Dengan demikian maka jika *flow* semakin tinggi maka aspal beton semakin mampu menahan beban. Nilai *flow* didapatkan dengan pembacaan langsung pada arloji *flow* pada alat *Marshall* bersamaan dengan pembacaan nilai stabilitas.



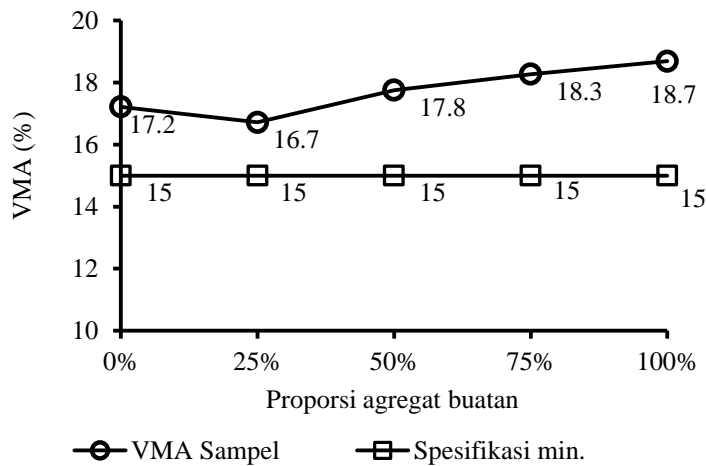
Gambar 4.21. Nilai *Flow* Variasi Campuran Hasil Uji *Marshall*

Nilai *flow* pada Gambar 4.21. menunjukkan yang memenuhi syarat hanya variasi komposisi tanpa agregat buatan (0%) dan dengan agregat buatan 25%. Nilainya 3,9 mm untuk agregat natural seluruhnya (0% agregat buatan) dan 4 mm untuk proporsi 25% agregat buatan. Nilai *flow* yang memenuhi syarat untuk digunakan sebagai bahan perkerasan bandara adalah 2-4 mm. Nilai *flow* semakin tinggi sejalan dengan peningkatan jumlah proporsi agregat buatan.



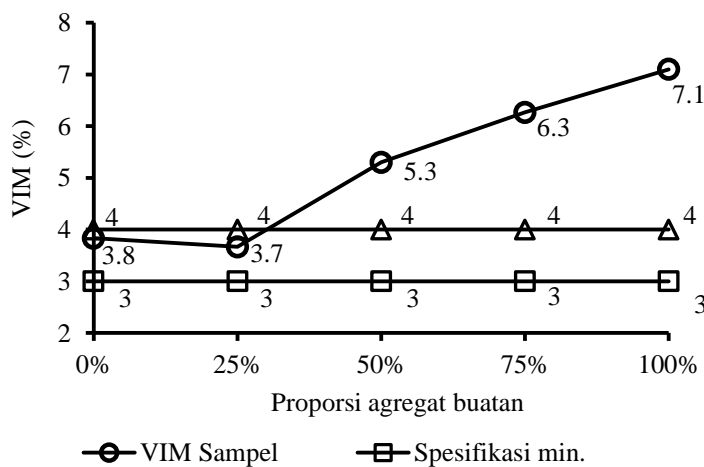
Gambar 4.22. Nilai *Marshall Quotien* Variasi Campuran Hasil Uji *Marshall*

Nilai *Marshall Quotien* pada Gambar 4.22. adalah nilai stabilitas dibagi dengan *flow*. Karena itu nilainya liner dengan stabilitas. Nilai ini untuk menyatakan sifat kekakuan suatu campuran. Bila nilai MQ terlalu tinggi, maka campuran akan cenderung terlalu kaku dan mudah retak. Sebaliknya bila nilai MQ terlalu rendah, maka perkerasan menjadi terlalu lentur dan cenderung kurang stabil. Penjelasan nilai *Marshall Quotien* tentang kondisi ini mengikuti penjelasan stabilitas, menunjukkan untuk semua variasi komposisi agregat buatan, mulai dari 0% hingga 100% menunjukkan nilai yang memenuhi syarat untuk digunakan sebagai bahan perkerasan bandara. Penambahan agregat kasar buatan pada campuran aspal mengakibatkan nilai stabilitas menurun, kecuali pada tambahan agregat kasar buatan sebesar 25%.



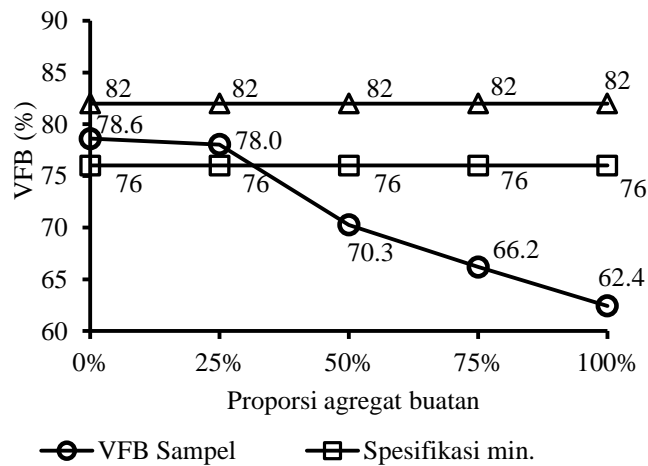
Gambar 4.23. Nilai VMA Variasi Campuran Hasil Uji Marshall

Nilai *void in mineral aggregate* (VMA) pada Gambar 4.23. menunjukkan untuk semua variasi komposisi agregat buatan, mulai dari 0% hingga 100% di atas 15% (syarat sebagai bahan perkerasan bandara >15%). Penambahan agregat kasar buatan pada campuran aspal mengakibatkan nilai VMA meningkat, kecuali pada tambahan agregat kasar buatan sebesar 25%. Peningkatan nilai VMA ini artinya terdapat lebih banyak pori apabila proporasi agregat buatan ditambahkan di atas 25%. Namun justru mempunyai kepadatan lebih tinggi (void rendah) ketika ditambahkan 25% agregat buatan, dibandingkan dengan 100% agregat natural.



Gambar 4.24. Nilai VIM Variasi Campuran Hasil Uji Marshall

*Void in the mix* (VIM) adalah presentase rongga dalam campuran. Semakin tinggi nilai VIM menunjukkan semakin besar rongga dalam campuran sehingga campuran bersifat porus. Nilai VIM berpengaruh terhadap keawetan dari campuran aspal agregat. Nilai VIM pada Gambar 4.24. menunjukkan untuk semua variasi komposisi agregat buatan, mulai dari 0% hingga 100% menunjukkan nilai antara 3,8%-7,1%. Namun yang memenuhi syarat hanya yang tanpa agregat buatan dan yang menggunakan agregat buatan 25% (syarat VIM >3.5% atau 3-4%). Penambahan agregat kasar buatan pada campuran aspal mengakibatkan nilai VIM meningkat, kecuali pada tambahan agregat kasar buatan sebesar 25%.

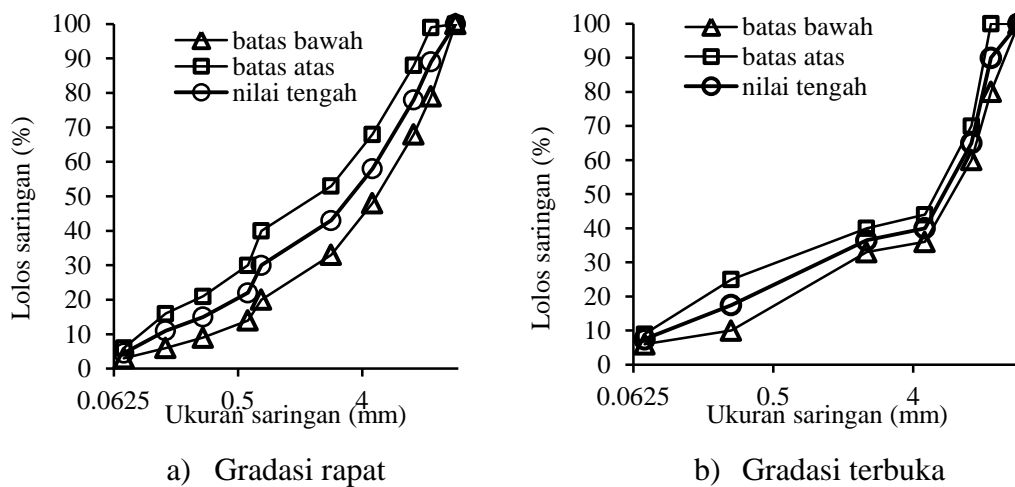


Gambar 4.25. Nilai VFB Variasi Campuran Hasil Uji *Marshall*

*Void filled with Bitumen* (VFB). VFB adalah rongga terisi aspal pada campuran setelah mengalami proses pemadatan. Nilai VFB pada Gambar 4.25. menunjukkan untuk semua variasi komposisi agregat buatan, mulai dari 0% hingga 100% menunjukkan nilai yang memenuhi syarat untuk digunakan sebagai bahan perkerasan bandara (76-82%). Penambahan agregat kasar buatan pada campuran aspal mengakibatkan nilai VFB menurun, kecuali pada tambahan agregat kasar buatan sebesar 25%. VFB dipengaruhi oleh antara lain kadar aspal, gradasi agregat, energi pematat (jumlah dan temperatur pemadatan), dan absorpsi agregat.

### 4.3.3. Gradasi untuk Campuran Aspal Beton

Gradasi yang digunakan adalah gradasi rapat (*Dense Graded*) mengacu pada FAA dan gradasi terbuka (*Open Graded*) modifikasi BBA. Mengacu pada Tabel 3.4 (Bab 3), Gambar 4.26 adalah kurva distribusi ukuran butir penyusun gradasi.



Gambar 4.26. Kurva Gradasi Campuran Aspal Beton yang Digunakan

Agregat kasar yang digunakan untuk menyusun gradasi pada Gambar 4.26 menggunakan agregat natural dan agregat buatan. Susunan ukuran butir dan jumlah penggunaan agregat buatan dan agregat natural seperti pada Tabel 3.5 untuk gradasi rapat dan Tabel 3.6 untuk gradasi terbuka.

### 4.3.4. Gradasi dan Proporsi Agregat Buatan dan Agregat Natural yang Digunakan

Pentingnya peran gradasi terhadap kinerja campuran aspal beton, sehingga diperlukan perhatian dalam perencanaannya. Dalam riset ini perhatiannya ditekankan pada komposisi agregat kasar buatan dan natural dengan agregat halus natural dan *filler* sebagai bahan campuran aspal beton lapis permukaan *runway*. Gradasi yang direncanakan meliputi gradasi terbuka (*Open Graded*) dan gradasi rapat (*Dense Graded*). Digunakan stabilitas, *flow*, *void in material agregat*

(VMA), *void in mix* (VIM), *void filled with asphalt* (VFA) dan *Marshall quotient*, sebagai parameter untuk mengukur kinerja.

Hasil analisis properties campuran seperti ditunjukkan Tabel 4.7. menunjukkan bahwa untuk campuran aspal dengan 25% agregat buatan dan 75% agregat natural serta kadar aspal 6% seluruh properties memenuhi persyaratan sebagai bahan perkerasan. Nilai yang diberikan berturut-turut adalah stabilitas 1536 kg, *flow* 3.8 mm, MQ 416,1, VIM 3,0%, VMA 16.1%, VFB 81,3%.

Rongga dalam campuran dipengaruhi oleh gradasi agregat. Rongga berpengaruh terhadap nilai stabilitas dan menentukan *workability* (kemudahan dalam pekerjaan). Semakin kecil void, maka kinerja struktural campuran menjadi lebih baik. Nilai *void* (VMA dan VIM) terendah didapatkan pada proporsi 25% agregat buatan dan 75% agregat natural. Pada penambahan agregat di atas 25%, void yang terbentuk semakin besar. Sehingga penambahan 25% agregat buatan menghasilkan stabilitas tertinggi. Oleh karena itu dalam rancangan percobaan selanjutnya digunakan 25% agregat buatan : 75% agregat natural. Sebagai pembandingan dalam analisa selanjutnya digunakan 100% agregat natural.

#### **4.4. Properties Campuran Aspal Beton dengan Agregat Buatan**

Campuran aspal beton yang dibuat terdiri dari agregat kasar, agregat halus, *filler* dan aspal. Agregat kasar terdiri dari campuran agregat buatan dan agregat natural. Sedangkan untuk agregat halus dan *filler* seluruhnya menggunakan agregat natural. Digunakan dua variasi gradasi seperti pada uraian sebelumnya yaitu gradasi rapat (*Dense Graded*) mengacu pada FAA dan gradasi terbuka (*Open Graded*) mengikuti BBA. Pembuatan campuran aspal beton mengikuti prosedur, menggunakan peralatan dan cara pengujian seperti diuraian dalam BAB 3 (Metode Penelitian). Campuran aspal beton yang dibuat diperuntukkan untuk bahan perkerasan landas pacu (*runway*). Sehingga spesifikasi untuk campuran aspalnya harus sesuai dengan spesifikasi sebagai bahan *runway*.

#### **4.4.1. Karakteristik Campuran Aspal Beton Metode *Marshall* (Empirik)**

##### **4.4.1.1. Pembuatan dan pengujian sampel**

Pelaksanaan pengambilan data sesuai dengan uraian pada BAB 3. Oven agregat hasil ayakan, mulai dari agregat kasar, halus dan *filler*. Selanjutnya ditimbang sesuai ukuran saringan setiap gradasi yang telah ditentukan. Untuk agregat dengan campuran agregat buatan, jumlah agregat kasarnya digunakan sesuai dengan prosentase yang ditentukan. Agregat kasar, agregat halus dan *filler* ditempatkan dalam wadah diaduk sehingga tersebar secara merata untuk seluruh fraksinya. Kemudian dipanaskan dan ditambahkan aspal sesuai kadar aspal yang sudah ditentukan hingga mencapai temperatur 150°C. Setelah tercampur merata dilakukan pemadatan dengan 75 tumbukan pada temperatur sekitar 135°C. Setelah padat, dikeluarkan dari cetakan.

Tahap selanjutnya adalah pengujian sampel meliputi uji volumetrik dan mekanis. Uji volumetrik dilakukan dengan penimbangan benda uji kering udara, benda uji SSD dan benda uji dalam air. Berdasarkan hasil pengukuran berat tersebut, dengan Persamaan 2.6-2.9 pada Bab 2, didapatkan nilai-nilai volumetrik tersebut. Sedangkan karakteristik mekaniknya didapatkan dengan melakukan pengujian menggunakan metode empiric dengan alat uji *Marshall*. Nilai yang didapatkan adalah stabilitas dan *flow*.

##### **4.4.1.2. Karakteristik Campuran Aspal Beton dengan Agregat Kasar Buatan**

Dalam penentuan karakteristik campuran aspal beton ini digunakan uji empirik dengan metode *Marshall*. Campuran aspal beton dibuat dengan 2 gradasi yaitu mengacu pada Standard Direktorat Perhubungan Udara, Kementerian Perhubungan, Republik Indonesia yang merujuk pada FAA dan BBA merupakan standar baru dari Perancis yang telah diterapkan di beberapa bandara di Eropa.

Berdasarkan eksperimen penentuan proporsi agregat buatan dalam campuran aspal beton, maka dibuat 4 variasi campuran, yaitu: 1) FAA 0%AB:100AN; 2) FAA 25%AB:75AN; 3) BBA 0%AB:100AN; dan BBA 25%AB:75AN.



Tahapan pengujian untuk mendapatkan karakteristik campuran aspal beton dengan kadar aspal optimum adalah sebagai berikut:

- a. Menentukan kadar aspal optimum
- b. Menentukan karakteristik campuran aspal beton dengan kadar aspal optimum

1) Penentuan kadar aspal optimum

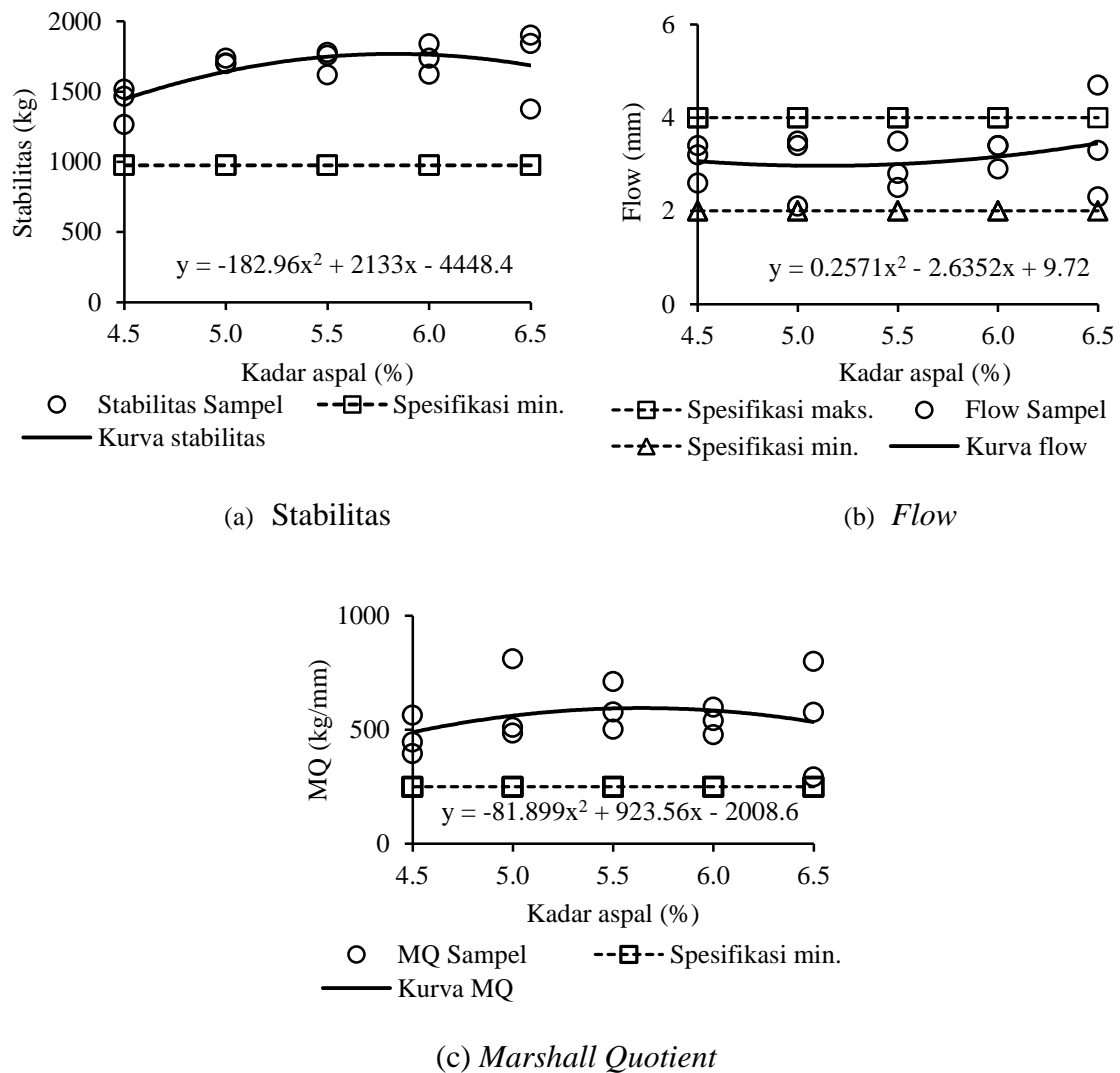
Kadar aspal optimum dicari untuk masing-masing variasi campuran, dengan 5 kadar aspal yang berbeda. Sehingga diperlukan 4 (variasi campuran) x 3 (sampel) = 12 benda uji. Contoh hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.8. Hasil pengujian selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran B1-B4.

Tabel 4.8. Hasil Analisis Pengujian Sampel untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum Campuran Aspal 25% AB : 75% AN Gradasi FAA

Benda Uji	Kadar Aspal (%)		VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ
	Terhadap Campuran	Terhadap Agregat	$\geq 3,5^*$ ; 3-4 <sup>**</sup> )	>15%	76-82	2150 lb (975 kg)/ 9560N (978 kg) <sup>*</sup> ; 2200 lb (998 kg) <sup>**</sup> )	(10-16) 0,25mm; 2-4 <sup>**</sup> )	-
1	4,5	4,7	9,6	19,9	51,5	1264	3,2	395
2	4,5	4,7	6,7	17,3	61,2	1465	2,6	564
3	4,5	4,7	7,9	18,3	56,9	1516	3,4	446
Rerata	4,5	4,7	8,1	18,5	56,5	1415	3,1	468
1	5,0	5,3	3,0	15,0	79,9	1737	3,4	511
2	5,0	5,3	2,7	14,7	81,7	1698	3,5	485
3	5,0	5,3	1,8	14,0	87,2	1702	2,1	811
Rerata	5,0	5,3	2,5	14,6	82,9	1712	3,0	602
1	5,5	5,8	1,1	14,3	92,7	1778	2,5	711
2	5,5	5,8	2,2	15,3	85,7	1758	3,5	502
3	5,5	5,8	1,3	14,6	90,9	1618	2,8	578
Rerata	5,5	5,8	1,5	14,7	89,8	1718	2,9	597
1	6,0	6,4	3,8	17,7	78,4	1738	2,9	599
2	6,0	6,4	5,0	18,8	73,1	1839	3,4	541
3	6,0	6,4	4,5	18,3	75,3	1624	3,4	478
Rerata	6,0	6,4	4,5	18,3	75,6	1733	3,2	539
1	6,5	7,0	3,2	18,1	82,4	1901	3,3	576
2	6,5	7,0	2,8	17,8	84,2	1841	2,3	800
3	6,5	7,0	1,2	16,5	92,7	1375	4,7	293
Rerata	6,5	7,0	2,4	17,5	86,4	1706	3,4	556

Sumber : \*) U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, (2014); \*\*) Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, (2011)

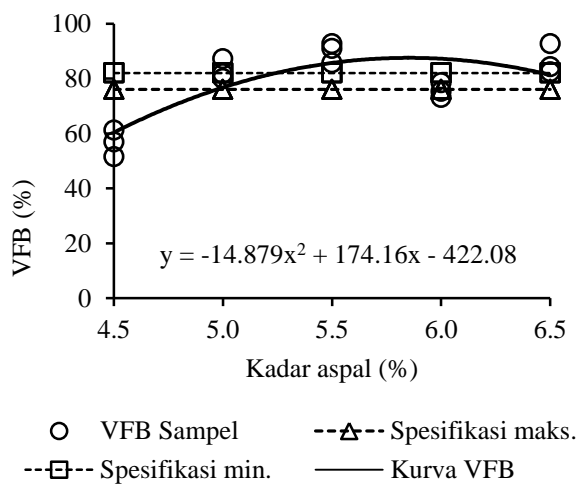
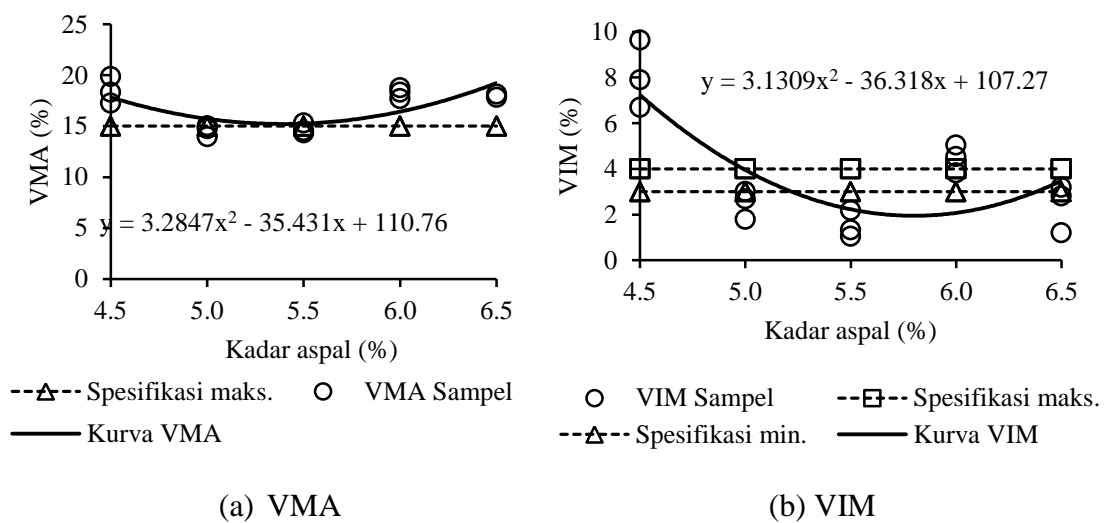
Berdasarkan data properties campuran aspal beton seperti pada Tabel 4.8. dapat dibuat gambar batas-batas properties masing-masing campuran, seperti pada Gambar 4.27. dan 4.28. Disini digunakan sebagai contoh adalah FAA 25%AB: 75%AN. Selanjutnya batas-batas tersebut, digunakan untuk mencari kadar aspal optimum, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.29.



Gambar 4.27. Hubungan Properties Mekanik Dengan Kadar Aspal dengan Uji *Marshall*

Gambar 4.27. adalah hasil pengujian properties mekanik campuran aspal beton. Properties mekanik pada uji *Marshall* terdiri dari stabilitas, flow dan *Marshall* quotient. Pada Gambar 4.27. (a), grafik rata-rata nilai stabilitas,

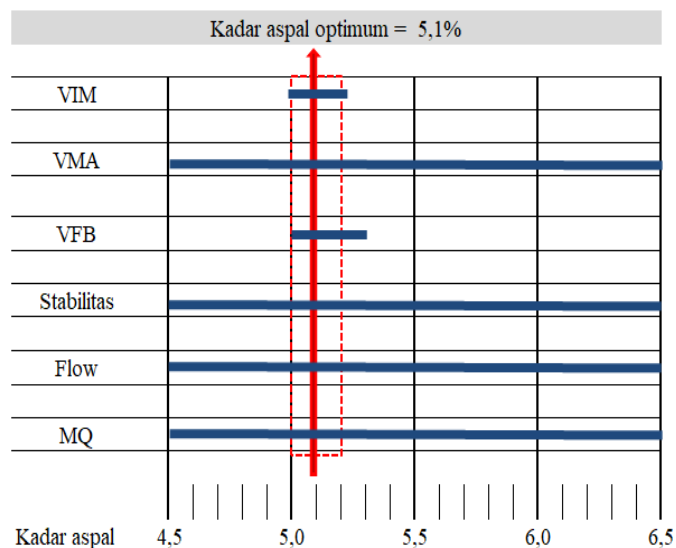
menunjukkan bahwa nilai stabilitas terpenuhi untuk semua kadar aspal, karena semua nilai di atas spesifikasi ( $> 978$  kg). Sehingga interval kadar aspal untuk stabilitas adalah 4,5%-6,5%. Gambar 4.27. (b), rata-rata nilai *flow* terpenuhi untuk semua kadar aspal, karena nilai *flow* dalam interval spesifikasi (2 mm- 4 mm), sehingga interval kadar aspal untuk *flow* adalah 4,5%-6,5%. Sama halnya dengan *Marshall quotient* Gambar 4.27. (c), semua nilainya terpenuhi untuk semua kadar aspal, sehingga interval kadar aspal untuk *Marshall quotient* adalah 4,5%-6,5%.



Gambar 4.28. Hubungan Properties Mekanik dengan Kadar Aspal dengan Uji *Marshall*

Gambar 4.28. adalah hasil pengujian properties volumetrik campuran aspal beton. Properties volumetrik pada uji *Marshall* terdiri dari VMA, VIM dan VFB. Pada Gambar 4.28. (a), menunjukkan nilai rata-rata VMA yang memenuhi persyaratan (>15%) terpenuhi untuk kadar aspal antara 4,5%-6,5%. Gambar 4.28. (b) untuk rata-rata nilai VIM setiap kadar aspal, menunjukkan bahwa kadar aspal yang memenuhi persyaratan (3%-4%) yaitu mulai 5%-5,2%. Sedangkan Gambar 4.28. (c) untuk VFB kadar aspal yang memenuhi adalah 5%-5,3% dengan interval 76%-82%.

Selanjutnya digambar interval-interval kadar aspal untuk semua properties campuran aspal beton FAA 25%AB dan 75%AN, seperti Gambar 4.29. Selanjutnya dicari interval kadar aspal yang memenuhi seluruh properties campuran aspal beton. Sesuai dengan Pedoman Perencanaan Campuran Beraspal dengan Pendekatan Kepadatan Mutlak (Departemen Pekerjaan Umum, 1999), kadar aspal optimumnya adalah nilai tengah interval kadar aspal. Sehingga kadar aspal optimum FAA 25%AB:75%AN adalah 5,1%. Dengan cara yang sama, maka untuk variasi campuran BBA 25%AB:75%AN = 6,1%; BBA 0%AB:100%AN = 6,0%; dan FAA 0%AB:100%AN= 5,9%.

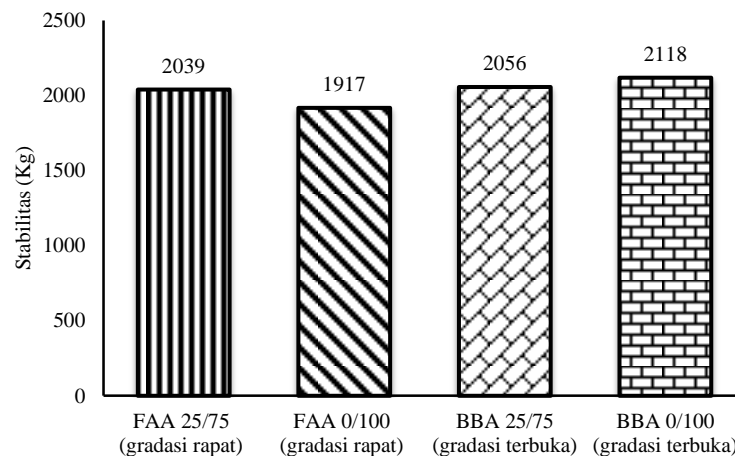


Gambar 4.29. Kadar Aspal Optimum Berdasarkan Batas-batas Spesifikasi

## 2) Karakteristik campuran aspal beton dengan kadar aspal optimum

Properties terbaik diprediksi didapatkan pada campuran dengan kadar aspal optimum. Oleh karena itu benda uji dibuat dengan menggunakan kadar aspal optimum. Masing-masing variasi menggunakan 5 benda uji, sehingga total benda uji yang digunakan adalah 5 (jumlah benda uji per variasi) x 4 (jumlah variasi).

Gambar 4.30 menunjukkan perbandingan stabilitas untuk gradasi terbuka dengan agregat buatan atau tanpa agregat buatan. Dimana ditunjukkan bahwa tanpa agregat buatan (100% agregat natural) menunjukkan nilai yang lebih tinggi. Namun jika dibandingkan agregat dengan gradasi menerus (rapat) memiliki nilai stabilitas lebih besar dari pada dengan gradasi senjang (terbuka). Hal ini disebabkan karena gradasi menerus (*Dense Graded*) memiliki *interlocking* yang lebih baik.



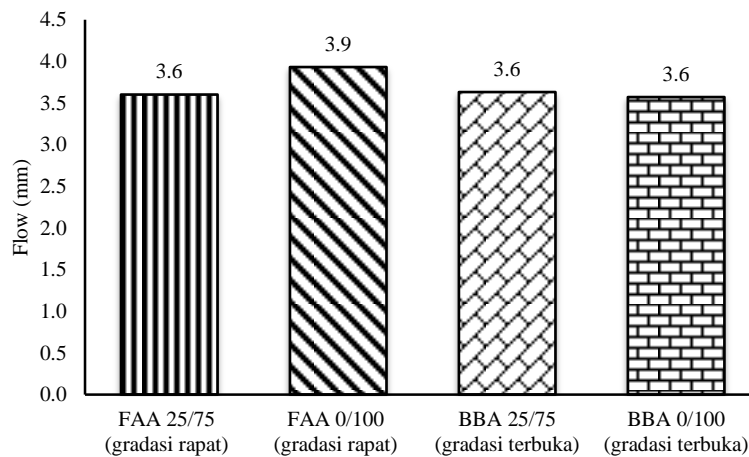
Gambar 4.30. Nilai Stabilitas Gradasi Rapat dan Terbuka dengan dan Tanpa Agregat Buatan

Gambar 4.30, menunjukkan hasil analisis stabilitas variasi campuran. Hasil analisis menunjukkan bahwa tidak terjadi perbedaan nilai yang signifikan untuk stabilitas antara 4 variasi campuran aspal beton. Deviasi antara nilai tertinggi (2118 kg) BBA 100%AN dengan nilai terendah (1917 kg) FAA 100%AN, sebesar 9,4%.

Perbandingan nilai untuk gradasi FAA (menerus), antara proporsi 0% agregat buatan dengan 25% agregat buatan adalah 1917 kg (tanpa agregat buatan/ 0%AB) dengan 2039 kg (dengan 25% agregat buatan) adalah 5,98%. Sedangkan untuk gradasi BBA (terbuka), antara proporsi 0% agregat buatan dengan 25% agregat buatan adalah 2118 kg (tanpa agregat buatan/ 0%AB) dengan 2056 kg (dengan 25% agregat buatan) adalah 2,92%.

Perbandingan nilai untuk proporsi penambahan agregat buatan 0% (tanpa agregat buatan) gradasi FAA dengan BBA adalah 1917 kg (FAA/ menerus), dan 2118 kg (BBA/ terbuka) adalah 9,49%. Sedangkan untuk proporsi penambahan agregat buatan 25% gradasi FAA dengan BBA adalah 2039 kg (FAA/ menerus), dan 2056 kg (BBA/ terbuka) adalah 0,83%.

Nilai stabilitas BBA > FAA, baik dengan maupun tanpa agregat buatan. Penambahan Agregat buatan 25% pada FAA meningkatkan stabilitas 6%. Namun pada BBA terjadi penurunan 3%.



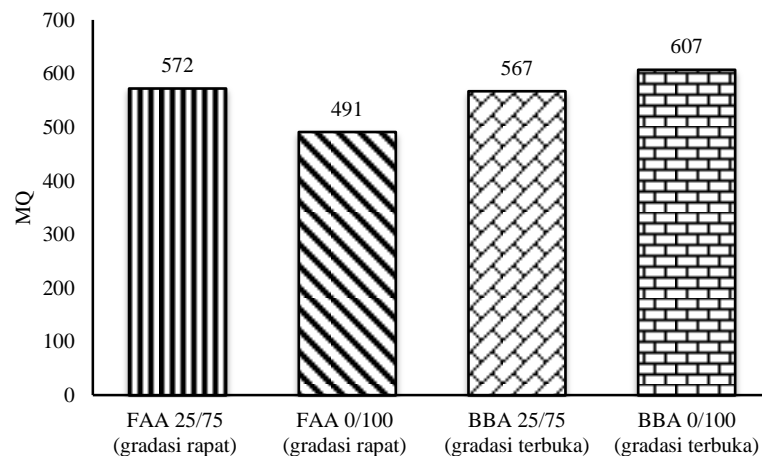
Gambar 4.31. Nilai *Flow* Gradasi Rapat dan Terbuka dengan dan Tanpa Agregat Buatan

Gambar 4.31, menunjukkan hasil analisis *flow* variasi campuran. Hasil analisis menunjukkan bahwa tidak terjadi perbedaan nilai *flow* yang signifikan antara 4 variasi campuran aspal beton. Deviasi antara nilai tertinggi (3,93 mm)

FAA 100% agregat natural (AN) dengan nilai terendah (3,57 mm) BBA 100% AN, sebesar 9,1%.

Perbandingan nilai untuk gradasi FAA (menerus), antara proporsi dengan 25% agregat buatan (AB) sebesar 3,6 mm dan tanpa agregat buatan (100% AN) sebesar 3,93 mm adalah 8,3%. Sedangkan untuk gradasi BBA (terbuka), antara proporsi dengan 25% agregat buatan (AB) sebesar 3,63 mm dan tanpa agregat buatan (100% AN) sebesar 3,57 mm adalah 1,6%.

Perbandingan nilai untuk proporsi penambahan agregat buatan 0% (tanpa agregat buatan) gradasi FAA (menerus) sebesar 3,93 mm dengan BBA (terbuka) sebesar 3,57 mm adalah 9,1%. Sedangkan untuk proporsi penambahan agregat buatan 25% gradasi FAA (3,6 mm) dengan BBA (3,63 mm) adalah 0,8%.

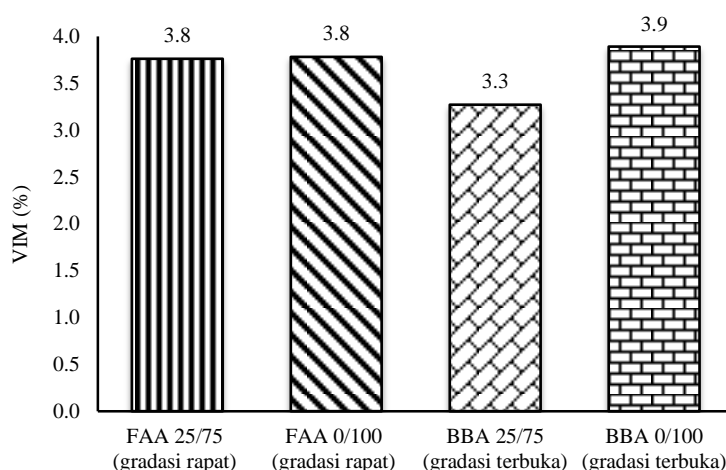


Gambar 4.32. Nilai MQ Gradasi Rapat dan Terbuka dengan dan Tanpa Agregat Buatan

Gambar 4.32, menunjukkan hasil analisis *Marshall quotient* (MQ) variasi campuran. Hasil analisis menunjukkan bahwa terjadi perbedaan nilai di atas 10% untuk *Marshall quotient* antara 4 variasi campuran aspal beton. Deviasi antara nilai tertinggi (607) BBA 100% AN dengan nilai terendah (491) FAA 100% AN, sebesar 19,6%.

Perbandingan nilai untuk gradasi FAA (menerus), antara proporsi 0% agregat buatan (491) dengan 25% agregat buatan (572) adalah 14,2%. Gradasi BBA (terbuka), antara proporsi 0% agregat buatan (607) dengan 25% agregat buatan (567) adalah 6,59%.

Perbandingan nilai untuk proporsi penambahan agregat buatan 0% (tanpa agregat buatan) gradasi FAA sebesar 491 dengan BBA 607 adalah 19,11%. Sedangkan untuk proporsi penambahan agregat buatan 25% gradasi FAA (572) dengan BBA (567) adalah 0,87%.



Gambar 4.33. Nilai VIM Gradasi Rapat dan Terbuka dengan dan Tanpa Agregat Buatan

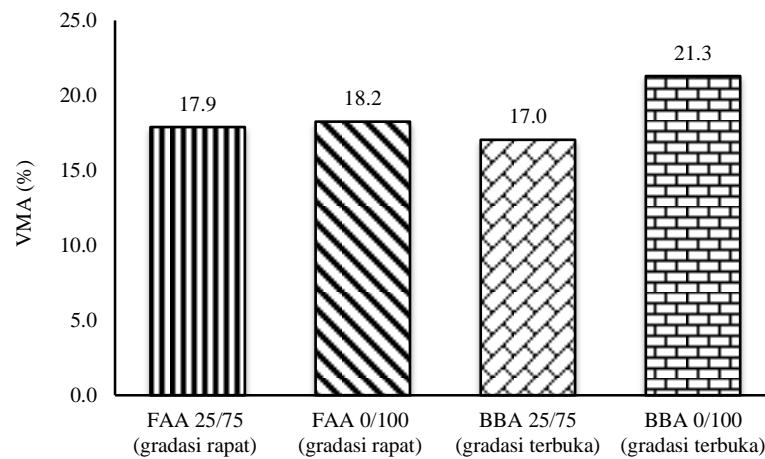
Gambar 4.33, menunjukkan hasil analisis VIM variasi campuran. Hasil analisis menunjukkan bahwa terjadi perbedaan nilai di atas 10% untuk VIM antara 4 variasi campuran aspal beton. Deviasi antara nilai tertinggi (3,89%) BBA 100%AN dengan nilai terendah (3,27%) BBA 25%AB, sebesar 15,9%.

Perbandingan nilai untuk gradasi FAA (menerus), antara proporsi 0% agregat buatan (3,78%) dengan 25% agregat buatan (3,76%) adalah 0,53%. Sedangkan untuk gradasi BBA (terbuka), antara proporsi 0% agregat buatan (3,89) dengan 25% agregat buatan (3,27) adalah 15,9%.



Perbandingan nilai untuk proporsi penambahan 100% agregat natural (tanpa agregat buatan) gradasi FAA (3,78%) dengan BBA (3,89%) adalah 2,8%. Sedangkan untuk proporsi penambahan agregat buatan 25% gradasi FAA (3,76%) dengan BBA (3,27%) adalah 13,0%.

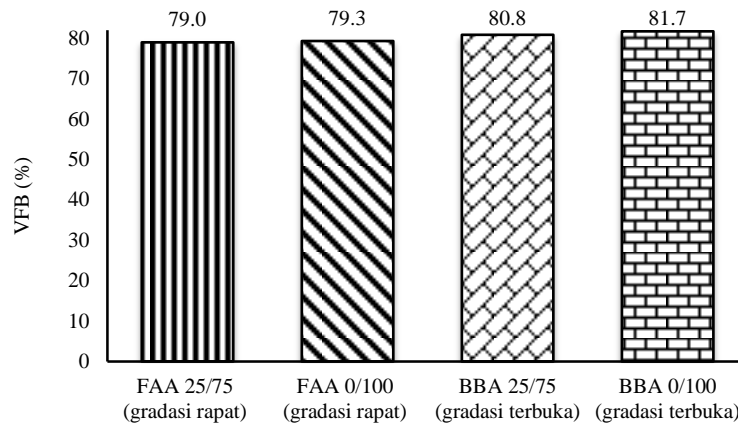
Gambar 4.34, menunjukkan hasil analisis VMA variasi campuran. Hasil analisis menunjukkan bahwa terjadi perbedaan nilai di atas 10 untuk VMA antara 4 variasi campuran aspal beton. Deviasi antara nilai tertinggi (21,3%) BBA 100% AN dengan nilai terendah (17,0%) BBA 25% AB/ 75% AN, sebesar 20,18%.



Gambar 4.34. Nilai VMA Gradasi Rapat dan Terbuka dengan dan Tanpa Agregat Buatan

Perbandingan nilai untuk gradasi FAA (menerus), antara proporsi 0% agregat buatan (18,2%) dengan 25% agregat buatan (17,9%) adalah 1,6%. Sedangkan untuk gradasi BBA (terbuka), antara proporsi 0% agregat buatan (21,3%) dengan 25% agregat buatan (17%) adalah 20,18%.

Perbandingan nilai untuk proporsi penambahan agregat buatan 0% (tanpa agregat buatan) gradasi FAA (18,2%) dengan BBA (21,3%) adalah 14,5%. Sedangkan untuk proporsi penambahan agregat buatan 25% gradasi FAA (17,9%) dengan BBA (17%) adalah 5,02%.



Gambar 4.35. Nilai VFB Gradasi Rapat dan Terbuka dengan dan Tanpa Agregat Buatan

Gambar 4.35, menunjukkan hasil analisis VFB variasi campuran. Hasil analisis menunjukkan bahwa tidak terjadi perbedaan nilai yang signifikan untuk VMA antara 4 variasi campuran aspal beton. Deviasi antara nilai tertinggi (81,7%) BBA 100%AN dengan nilai terendah (79%) BBA 25%AB/ 75%AN, hanya sebesar 3,3%.

Perbandingan nilai untuk gradasi FAA (menerus), antara proporsi 0% agregat buatan (79,3%) dengan 25% agregat buatan (79,0%) adalah 0,4%. Sedangkan untuk gradasi BBA (terbuka), antara proporsi 0% agregat buatan (81,7%) dengan 25% agregat buatan (80,8%) adalah 1,1%.

Perbandingan nilai untuk proporsi penambahan agregat buatan 0% (tanpa agregat buatan) gradasi FAA (79,3%) dengan BBA (81,7%) adalah 2,9%. Sedangkan untuk proporsi penambahan agregat buatan 25% gradasi FAA (79%) dengan BBA (80,8%) adalah 2,2%.

#### 4.4.2. Karakteristik Campuran Aspal Beton dengan Uji *Wheel track*

##### 4.4.2.1. Pembuatan dan Pengujian Sampel

Seperti halnya pada pelaksanaan pengambilan data saat uji empiris (*Marshall*), maka sebelumnya harus dibuat sampel yang akan diuji. Gambar 4.36 menunjukkan proses pembuatan sampel. Dimulai dengan mengeringkan agregat

hasil ayakan, mulai dari agregat kasar, halus dan *filler*. Selanjutnya ditimbang sesuai ukuran saringan setiap gradasi yang telah ditentukan. Untuk agregat dengan campuran agregat buatan, jumlah agregat kasarnya digunakan sesuai dengan prosentase yang ditentukan. Agregat kasar, agregat halus dan *filler* ditempatkan dalam wadah. Selanjutnya agregat dan wadahnya dipanaskan dalam oven hingga temperature minimal 150°C. Kemudian dimasukkan ke alat pencampur (*mixer*) dan ditambahkan dengan aspal panas sesuai dengan kadar aspal optimum rencana. Setelah tercampur merata dilakukan pemadatan dengan dengan alat pemadat. Setelah padat, dikeluarkan dari cetakan.



Menyiapkan agregat dan aspal sesuai komposisi



Pencampuran agregat dan aspal dengan *mixer*



Pemadatan campuran



Sampel siap di uji



Pengujian dengan WTM

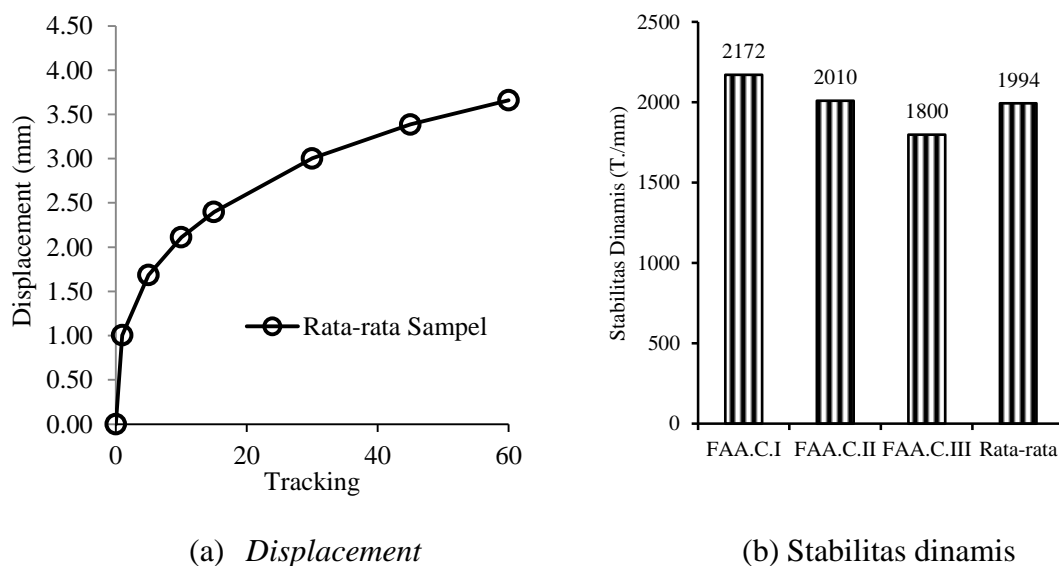
Gambar 4.36. Pembuatan dan Pengujian Sampel Campuran Aspal Beton

Tahap selanjutnya adalah pengujian sampel dengan alat WTM. Sebelum dan sesudah uji WTM dilakukan pengujian sand patch dan *British pendulum*, yang akan diuraikan detail dalam sub bab selanjutnya (Karakteristik permukaan perkerasan).

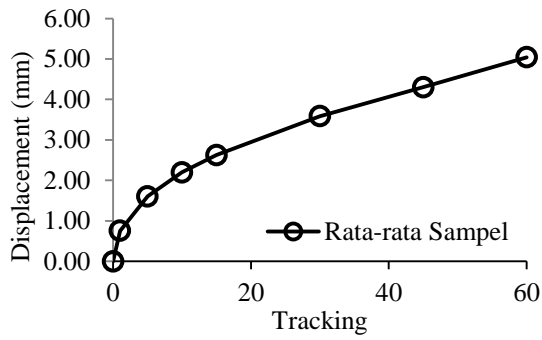
Sampel diuji dengan alat WTM yang perangkat untuk lintasan roda ruangan yang temperaturnya bisa diatur. Pada pengujian ini temperature diatur  $60^{\circ}$  dengan lama 60 menit, sehingga jumlah lintasan  $21 \times 60$  menit = 1260 lintasan.

#### 4.4.2.2. Analisis Data dan Interpretasi Hasil Pengujian *Wheel track*

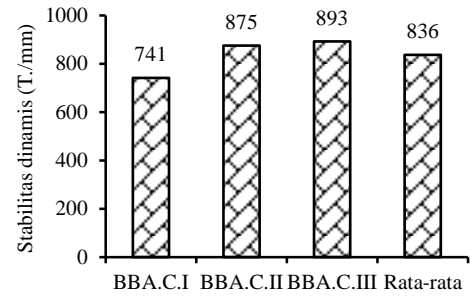
Nilai yang dicari adalah stabilitas dinamis, *displacement* dan kecepatan penurunan. Gambar 4.37-4.40 adalah hasil analisis data pengujian *wheel track* untuk 4 variasi campuran masing-masing dengan 3 sampel plat aspal beton. Gambar 4.37-4.40 (a) adalah hubungan antara nilai penurunan (*displacement*) dengan jumlah lintasan (*tracking*) yang diberikan. Semakin besar jumlah lintasan (*tracking*), maka semakin besar *displacement* yang terjadi. Penurunan ini erat kaitannya dengan stabilitas dinamis seperti pada Gambar 4.37-4.40 (b).



Gambar 4.37. *Displacement* dan Stabilitas Dinamis Gradasi FAA 25%AB:75%AN

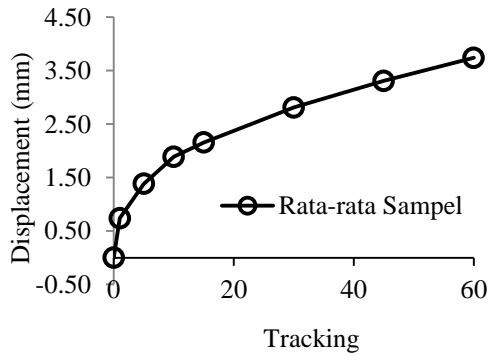


(a) Displacement

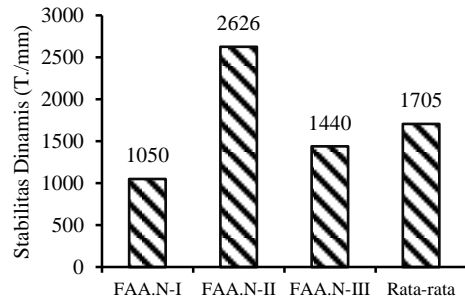


(b) Stabilitas dinamis

Gambar 4.38. Displacement dan Stabilitas Dinamis Gradasi BBA 25% AB:75% AN

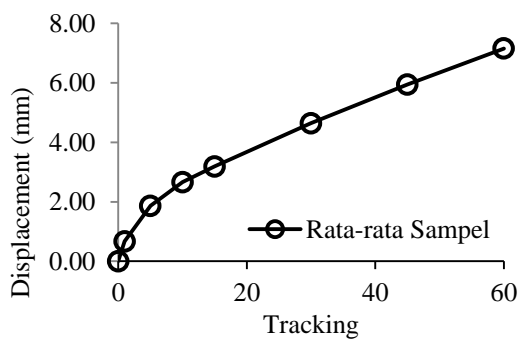


(a) Displacement

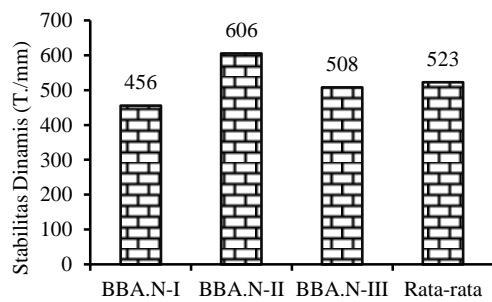


(b) Stabilitas dinamis

Gambar 4.39. Displacement dan Stabilitas Dinamis Gradasi FAA 0% AB:100% AN



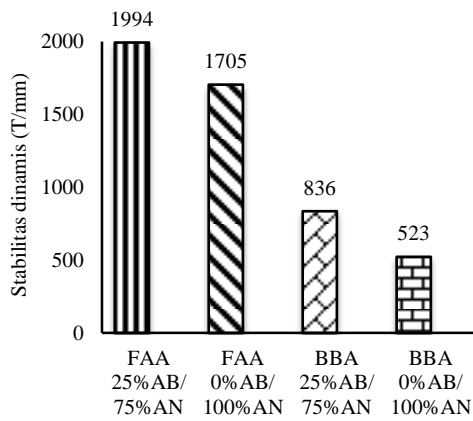
(a) Displacement



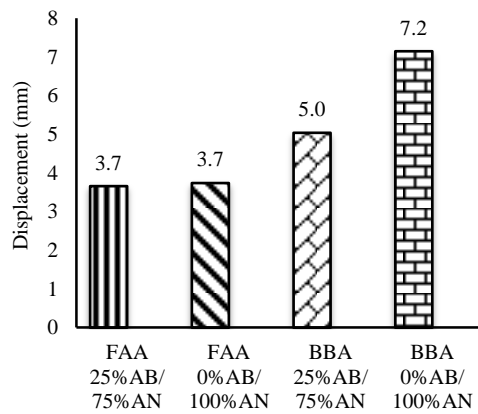
(b) Stabilitas dinamis

Gambar 4.40. Displacement dan Stabilitas Dinamis Gradasi BBA 0% AB:100% AN

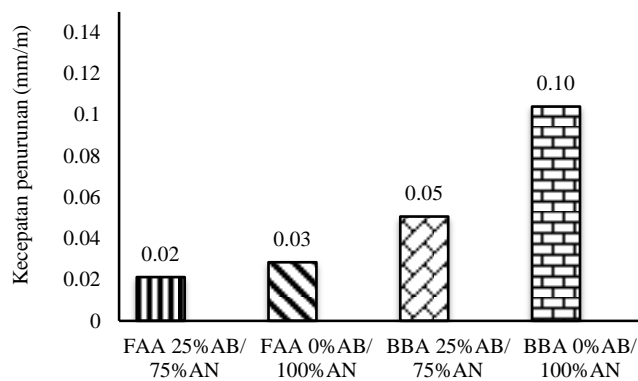
Properties gradasi berdasarkan uji menunjukkan bahwa gradasi FAA lebih tahan terhadap penurunan akibat beban dinamis daripada gradasi BBA. BBA (*Open Graded*) kurang mampu menahan beban dinamis karena mempunyai pori yang lebih besar dari FAA (*continuous graded*). Akibatnya pada gradasi BBA terjadi *displacement* yang lebih besar. *Displacement* terendah dan stabilitas dinamis tertinggi didapatkan pada gradasi FAA dengan 25% agregat buatan dan 75% agregat natural. Penggunaan agregat buatan mengakibatkan peningkatan stabilitas dinamis 37,4% untuk BBA dan 14,5% untuk FAA.



(a) Stabilitas dinamis (T/mm)



(b) *Displacement* (mm)



(c) Kecepatan penurunan (mm/m)

Gambar 4.41. Perbandingan Nilai *Displacement*, Stabilitas Dinamis dan Kecepatan Penurunan untuk Seluruh Variasi

Berdasarkan persentase terhadap tebal pelat (50 mm), perkerasan type EB-BBA type D, hasil yang didapat menunjukkan untuk BBA 25% agregat buatan adalah  $5 \text{ mm (displacemet) / } 50 \text{ mm (tebal pelat) } \times 100\% = 10\%$ , sehingga masih dapat digunakan dalam kategori K2 (minimal 10%). Sedangkan BBA tanpa agregat buatan adalah  $7,2 \text{ mm (displacement) / } 50 \text{ mm (tebal pelat) } \times 100\% = 14,4\%$ , masih dapat digunakan dengan kategori K1 (minimal 15%).

Stabilitas dinamis adalah hasil bagi jumlah lintasan dengan *displacement*. Semakin tinggi *displacement* maka stabilitas dinamis semakin rendah. Stabilitas dinamis pada hakekatnya adalah bukan murni pengukuran struktural campuran, tetapi lebih kepada durabilitasnya. Berbeda dengan stabilitas *Marshall* yang terkait dengan ketahanannya hingga runtuh/ leleh. Gambar 4.41. menunjukkan perbandingan nilai rata-rata stabilitas dinamis, *displacement* dan kecepatan penurunan.

#### **4.4.3. Properties Aspal Beton dengan Agregat Buatan dan Variasi Gradasi**

Sebagai bahan perkerasan, campuran aspal harus memenuhi properties seperti yang disyaratkan. Properties dipengaruhi oleh gradasi dan jenis agregat yang digunakan. Karena itu perlu diketahui bagaimana properties aspal beton dengan agregat buatan dan variasi gradasi. Gradasi yang digunakan dalam penelitian adalah gradasi terbuka (*Open Graded*) dan gradasi rapat (*Dense Graded*). Jenis agregat yang digunakan agregat kasar buatan dan agregat natural dengan variasi komposisi.

Tabel 4.9 merupakan rangkuman hasil uji properties 4 variasi campuran aspal dan proporsi penambahan agregat buatan. Properties tersebut berupa karakteristik fisik dan mekanik campuran aspal berdasarkan hasil analisis data pengujian sampel. Pengujian yang dilakukan meliputi uji *Marshall* (meliputi: stabilitas, *flow*, MQ, VMA, VIM dan VFB) dan *wheel track* (meliputi: stabilitas dinamis, *displacement* (deformasi) dan kecepatan deformasi (penurunan). Hasil dan analisis selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran B9 – B12.

Ringkasan hasil dalam Tabel 4.9. menunjukkan bahwa 4 gradasi yang ditinjau, memiliki nilai properties mekanik yang mendekati dan memenuhi spesifikasi sehingga dapat digunakan sebagai bahan perkerasan. Gradasi BBA

mempunyai properties lebih baik dari pada FAA pada uji Marshall, namun pada uji *wheel track*, gradasi FAA lebih baik. Penggunaan agregat buatan 25% pada gradasi BBA dapat memperbaiki stabilitas dinamis dan *displacement*. Penggunaan agregat buatan 25% pada gradasi FAA memberikan properties yang lebih baik dibandingkan campuran aspal yang hanya menggunakan agregat natural. Sehingga secara keseluruhan dari sisi kemampuan menerima beban (mekanik) penambahan agregat buatan dapat meningkatkan kinerja campuran aspal beton.

Tabel 4.9. Karakteristik Fisik dan Mekanis Campuran Aspal Beton

No.	Properties	Unit	FAA 25% AB: 75% AN	FAA 0% AB: 100% AN	BBA 25% AB: 75% AN	BBA 0% AB: 100% AN	Spesifikasi
1	Kadar aspal optimum	%	5.10	5.88	6.10	5.95	-
2	Kepadatan	gram/ cm <sup>3</sup>	2.18	2.33	2.22	2.32	-
3	Stabilitas (Kg)	kg	2039	1917	2056	2118	975 <sup>*)</sup> 998 <sup>**)</sup>
4	Flow (mm)	mm	3.6	3.9	3.6	3.6	2.5-4 <sup>*)</sup> 2-4 <sup>**)</sup>
5	MQ	-	572	491	567	607	-
6	VIM (%)	%	3.8	3.8	3.3	3.9	Min 3.5% <sup>*)</sup> 3%-4% <sup>**)</sup>
7	VMA (%)	%	17.9	18.2	17.0	21.3	15% <sup>*)</sup> 15% <sup>**)</sup>
8	VFB (%)	%	79.0	79.3	80.8	81.7	76%-82% <sup>**)</sup>
9	Stabilitas dinamis	T/mm (lintasan/ mm)	1994	1705	836	523	Nilai minimum disyaratkan hanya untuk campuran dengan aspal modifikasi
10	<i>Displacement</i>	mm	3.66	3.74	5.04	7.15	<i>Displacement</i> EB- BBA type D (% terhadap tebal pelat = 50mm) •7,5%=3,75 mm (K3) •10%=5,0 mm (K2) •15%=7,5 mm (K1)
11	Disp. awal	Do (mm)	2.42	2.03	2.01	2.27	
12	Kecepatan penurunan alur	Rd (mm/m)	0.0212	0.0284	0.0506	0.1040	

Sumber: \*) U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, (2014); \*\*) Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, (2011)

#### 4.5. Karakteristik Permukaan Perkerasan Aspal Beton dengan Agregat Buatan

Sesuai dengan penjelasan sebelumnya, karakteristik permukaan aspal beton yang dicari adalah tekstur dan *skid resistance*. Pengukuran tekstur menggunakan metode *sand patch*, sedangkan *skid resistance* menggunakan *British pendulum tester*. Paparan tentang proses pembuatan sampel, pengukuran data, analisa data dan pembahasan hasil analisis, diuraikan secara detail pada paparan selanjutnya.



#### 4.5.1. Pengukuran Data Tekstur dan *Skid resistance* Permukaan

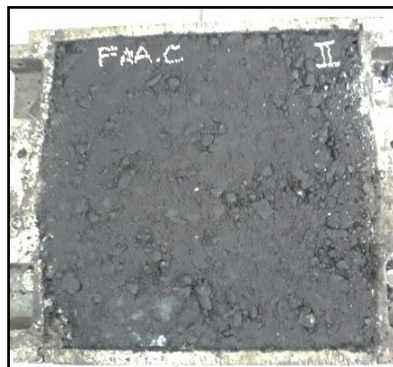
Sampel untuk pengujian tekstur dan *skid resistance* adalah sampel pelat (*slab*) yang digunakan pada uji WTM. Cara pembuatannya telah dijelaskan secara detail sebelumnya.



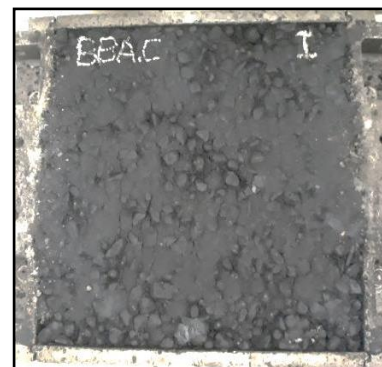
Sampel FAA AB/AN = 0/100



Sampel BBA AB/AN = 0/100



Sampel FAA AB/AN = 25/75



Sampel BBA AB/AN = 25/75

Gambar 4.42. Sampel *Slab* untuk Pengujian Tekstur dan *Skid resistance*

Sampel dalam bentuk pelat campuran aspal beton dengan dimensi 30 cm x 30 cm x 5cm. Jumlah sampel yang dibuat sebanyak 12, terdiri dari masing-masing 3 sampel untuk FAA dan BBA dengan 25% agregat buatan : 75% agregat natural. Serta masing-masing 3 sampel untuk FAA dan BBA tanpa agregat buatan (100% agregat natural). Pengujian dilakukan sebelum diberikan lintasan (*tracking*) dan setelah dilakukan *tracking*. Sampel yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.42.

1) Pengukuran tekstur permukaan

Tekstur permukaan diukur dengan menggunakan metode *sand patch*. Prinsip pengujian adalah mencari luas sebaran pasir di atas permukaan. Kedalaman tekstur rata-rata/ *mean Texture depth* (MTD) didapatkan dengan membagi volume pasir yang digunakan dengan luasan sebaran pasir. Pengukuran dilakukan sebelum dilakukan uji WTM (*pra tracking*) dan setelah dilakukan uji WTM (*pasca tracking*). Pada uji *pra tracking* pengujian dilakukan pada bagian tengah pelat sampel. Sedangkan *pasca tracking* dilakukan dua kali yaitu pada salah satu sisi antara tepi dan jejak lintasan. Gambar 4.43-4.44 menunjukkan pengukuran tersebut.



(lingkaran di tepi sampel)



(persegi di alur roda pada sampel)

Gambar 4.43. Pengujian Tekstur dengan Metode *Sand Patch Post Tracking*



Gambar 4.44. Pengukuran Tekstur dengan Metode *Sand Patch Pre Tracking* (lingkaran di tengah sampel)

2) Pengukuran *Skid resistance*

Nilai *skid resistance* didapatkan dengan menggunakan alat *British pendulum tester*. Prinsip pengujian adalah mencari posisi bandul tergelincir. Makin jauh bandul bergerak dari titik kontak, maka makin licin permukaan yang diukur, artinya *skid resistencenya* rendah.

Nilai *skid resistancenya* selanjutnya dihitung dengan mengalikan bacaan jarum penunjuk dengan angka koreksi berdasarkan temperature. Gambar 4.45-4.46 menunjukkan pengujian *skid resistance* untuk mendapat data tekstur yang dilakukan dalam penelitian ini. Hasil analisis data pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.11. Data selengkapnya dalam lampiran.



Gambar 4.45. Persiapan Alat dan Sampel Uji *British Pendulum Tester*



Pengujian BP Pra *Tracking*



Pengujian BP Pasca *Tracking*

Gambar 4.46. Pengujian *Skid resistance* dengan *British Pendulum Tester*

#### 4.5.2. Hasil Pengukuran Tekstur dan *Skid Resistance*

Tabel 4.10. adalah karakteristik permukaan perkerasan aspal beton dengan berbagai variasi berdasarkan hasil analisis data pengujian sampel dengan variasi gradasi agregat dan prosentase penggunaan agregat buatan.

Tabel 4.10. Karakteristik Permukaan Perkerasan Aspal Beton

Pengukuran	FAA 25%AB/75%AN		FAA 0%AB/100%AN		BBA 25%AB/75%AN		BBA 0%AB/100%AN		
	pra <i>tracking</i>	pasca <i>tracking</i>	pra <i>tracking</i>	pasca <i>tracking</i>	pra <i>tracking</i>	pasca <i>tracking</i>	pra <i>tracking</i>	pasca <i>tracking</i>	
	SR (BPN)	68.4	64.6	71.4	70.5	79.1	72.3	84.7	69.0
SR (GN)	<i>(towed)</i>	0.55	0.52	0.58	0.58	0.66	0.59	0.72	0.56
	<i>(pushed)</i>	0.58	0.55	0.61	0.61	0.69	0.62	0.75	0.59
	Rerata	0.57	0.53	0.60	0.59	0.68	0.61	0.73	0.58
Texture (mm)	lingkaran	0.27	0.24	0.29	0.26	0.30	0.27	0.32	0.25
	persegi	0.27	0.21	0.29	0.18	0.30	0.17	0.32	0.18

Data tekstur diukur dengan metode *sand patch* didapatkan dalam satuan cm kemudian dikonversi ke mm. Sedangkan data *skid resistance* diukur dengan *British Pendulum Tester* dengan satuan *British Pendulum Number* (BPN)

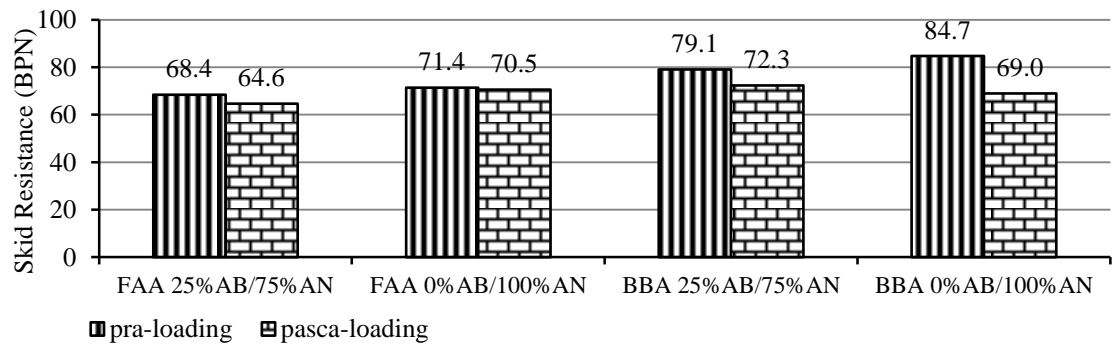
kemudian di konversi ke satuan *Grip Number* (GN), dengan menggunakan Persamaan (Lu & Steven, 1971) :

$$GN_{towed} = Y = 0,01X - 0,13 \quad (4.1)$$

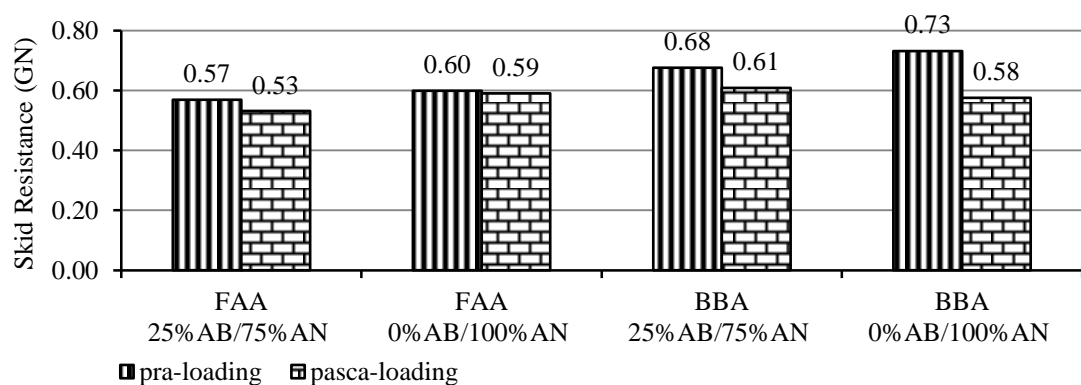
$$GN_{pushed} = Y = 0,01X - 0,10 \quad (4.2)$$

Dimana Y = *Grip Number* (GN), dan X nilai BPN hasil pengukuran

Gambar 4.47. dan Gambar 4.48. adalah *skid resistance* pra-tracking dan pasca-tracking setiap variasi campuran dalam skala BPN dan GN. Sedangkan Gambar 4.49. adalah tekstur rata-rata (MTD = *mean texture depth*)



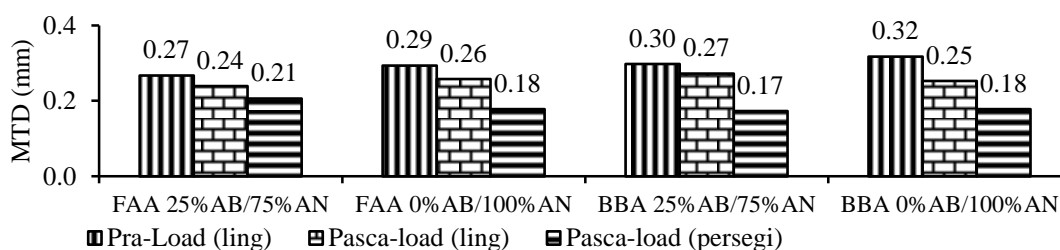
Gambar 4.47. *Skid Resistance* Awal dan Akhir (BPN) Setiap Variasi Campuran



Gambar 4.48. *Skid Resistance* Awal dan Akhir (GN) Setiap Variasi Campuran

Pada Gambar 4.47. dan 4.48. terlihat bahwa *skid resistance* menurun setelah dilakukan pengujian dengan memberikan lintasan roda sebanyak 21 kali x 60 menit= 1260/jam. Tekanan roda dalam 1 kali lintasan adalah  $6,5 \pm 0,15 \text{ kg/cm}^2$  . Menurunnya *skid resistance* ini disebabkan oleh berkurangnya kedalaman tekstur (menjadi lebih halus) setelah dilintasi roda (*tracking*).

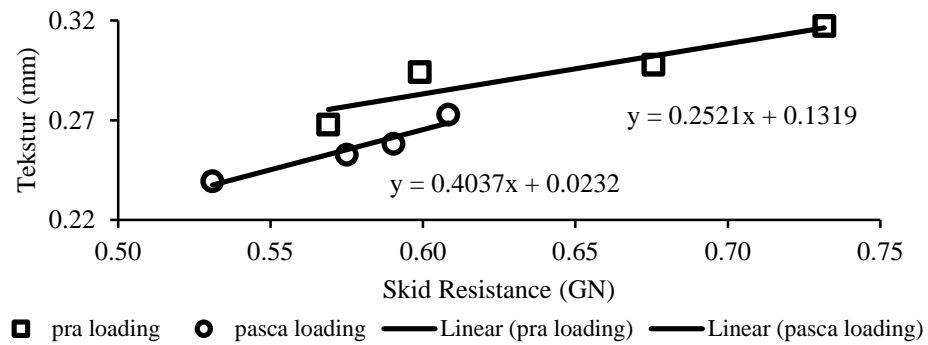
Seperti penjelasan di atas terjadinya penurunan tekstur disebabkan oleh gerusan saat roda melintas di atas permukaan benda uji (Gambar 4.49). Hal ini menyebabkan kedalaman tekstur berkurang. Hal lain yang ditemukan adalah tekstur BBA (*Open Graded*) lebih dalam daripada FAA (*Dense Graded*). Hal ini disebabkan karena pori yang terbentuk lebih besar pada campuran aspal dengan gradasi terbuka dibandingkan dengan gradasi menerus. Hal yang sangat logis mengingat pada gradasi menerus variasi ukuran agregat dapat mengisi secara maksimal rongga yang dibentuk oleh agregat yang lebih besar.



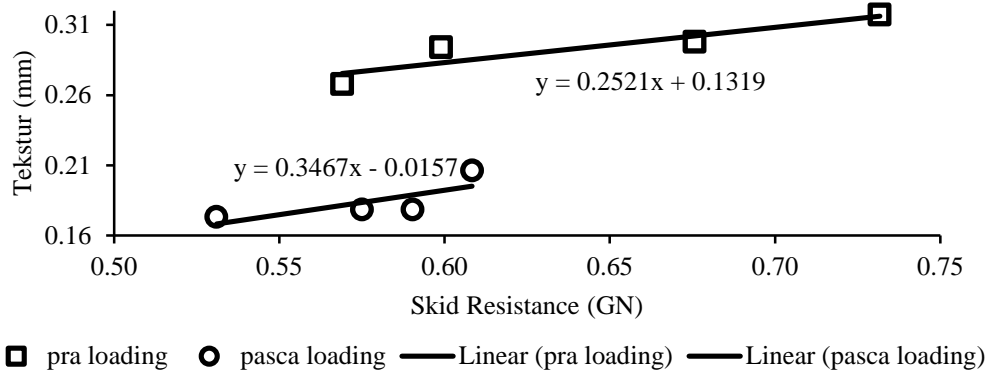
Gambar 4.49. MTD Awal dan Akhir (mm) untuk Setiap Variasi Campuran

#### 4.5.3. Analisis Hubungan Tekstur dengan *Skid Resistance* Permukaan Aspal Beton Menggunakan Agregat Buatan

Gambar 4.50. dan 4.51. merupakan hubungan antara *Skid Resistance* dengan tekstur berdasarkan hasil pengukuran sampel *slab* (pelat) di laboratorium. Pada gambar dapat dilihat bahwa *skid resistance* dan tekstur berbanding lurus. Dapat dilihat juga bahwa *pasca tracking* terjadi penurunan *skid resistance* dan tekstur (MTD).



Gambar 4.50. *Skid Resistance* (GN) dan Tekstur pada Luar Lintasan



Gambar 4.51. *Skid Resistance* (GN) dan Tekstur pada Alur Lintasan

Hasil pengujian yang dilakukan di laboratorium (Gambar 4.50. dan 4.51.), sesuai dengan hasil pengujian di lapangan yang dilakukan oleh Yager dkk. (1990) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15. Hasil penelitian tersebut menyatakan kecenderungan (*trend*) hubungan tekstur terhadap nilai *skid resistance*, yaitu semakin dalam tekstur semakin tinggi nilai *skid resistance*. Berdasarkan hal tersebut persamaan (2.9) dapat digunakan untuk simulasi di lapangan.

Lebih jauh dinyatakan, bahwa peningkatan tekstur mengakibatkan *skid resistance* meningkat, karena terjadi gesekan (*friction*) yang lebih tinggi antara karet roda dan permukaan perkerasan. Namun, makin tinggi tekstur, makin tinggi juga penurunan gesekan (*friction*) antara permukaan kering dengan setelah basah. Faktor lain, yaitu kecepatan sangat berpengaruh terhadap *friction* sehingga secara tidak langsung juga berpengaruh terhadap *skid resistance*.

Gambar 4.47 dan 4.48 menunjukkan *skid resistance* campuran aspal dengan *open graded* (BBA) lebih tinggi dari pada *dense graded* (FAA), demikian juga halnya dengan tekstur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.49. Hasil pengujian pada perkerasan baru (*pra-tracking*) menunjukkan bahwa tekstur dan *skid resistance* campuran aspal beton yang menggunakan 25% agregat buatan, lebih rendah dari pada yang seluruhnya menggunakan agregat natural. Namun pada uji *pasca tracking*, *open graded* (BBA) menunjukkan nilai tekstur dan *skid resistance* untuk campuran dengan 25% agregat buatan yang lebih tinggi dari pada jika seluruhnya dengan agregat natural. Dimana untuk tekstur lingkaran lebih besar 7,4%, dan *skid resistance* lebih besar 4,6%.

Perbedaan nilai tekstur dan *skid resistance* pada BBA dengan penambahan agregat buatan dapat disebabkan oleh karakteristik agregat yang digunakan baik dari sifat mekanik maupun bentuknya, Penggunaan agregat dalam bentuk bulat menyebabkan terjadinya perubahan permukaan sampel pelat aspal beton setelah dilintasi lebih besar dari pada yang seluruhnya dengan agregat natural (batu pecah).

Berdasarkan hasil analisis terhadap 4 variasi campuran aspal yang telah dilakukan, penyertaan agregat buatan 25% dengan *open graded* (BBA) untuk campuran aspal beton permukaan *runway*, dapat dipertimbangkan untuk memenuhi kinerja keselamatan pergerakan pesawat di *runway* (*skid resistance*). Argumennya adalah properties permukaan campuran dengan agregat buatan mempunyai tekstur lebih dalam dan *skid resistance* yang lebih besar.

Penelitian yang lebih detail lagi perlu dilakukan mengingat dalam penelitian ini hanya mempertimbangkan variasi gradasi dan penambahan agregat buatan. Masih banyak faktor yang berpengaruh terhadap *skid resistance* dan tekstur, misalnya: bertambahnya umur lapisan permukaan, akumulasi endapan karet di *runway* lambat laun mengurangi bahkan menghilangkan tekstur permukaan, ketahanan agregat terhadap gosokan roda, sehingga menjadi licin (*polishing*).



#### **4.6. Kemampuan Variasi Campuran Aspal Beton Menekan *Rubber deposit***

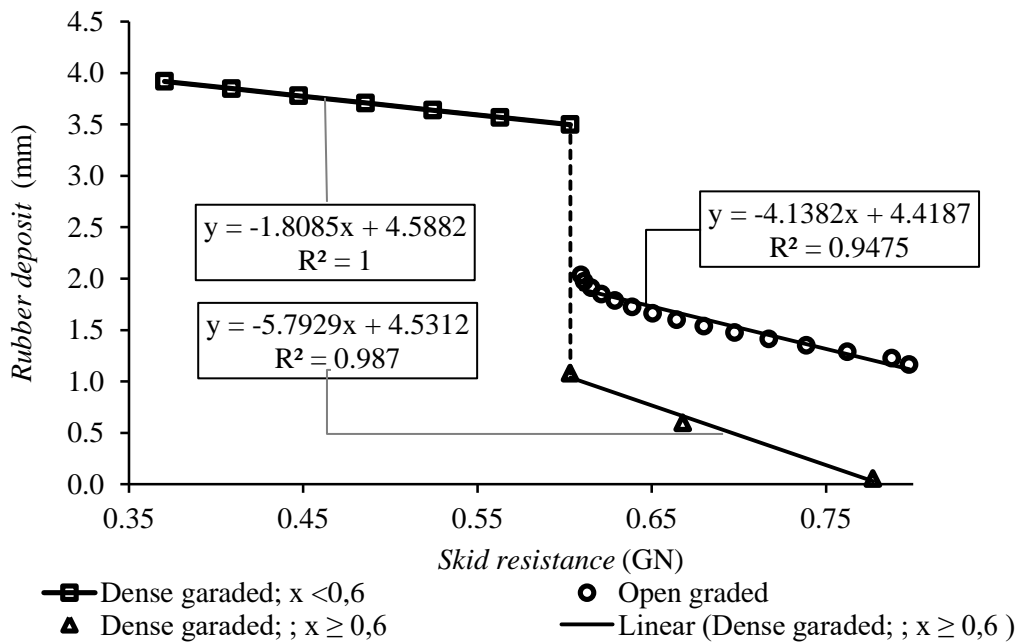
Pada sub bab ini dilakukan pembahasan terhadap hasil analisis data pengujian permukaan campuran aspal untuk mendapatkan *novelty*. *Novelty* dalam riset ini adalah komposisi penambahan agregat kasar buatan dan gradasi yang menghasilkan campuran aspal beton terbaik, sebagai antisipasi pembersihan *rubber deposit*. Dengan kemampuan ini maka jangka waktu pembersihannya menjadi lebih panjang. Sehingga dapat menghemat biaya operasional dan mengurangi terganggunya pelayanan bandara.

##### **4.6.1. Kecenderungan Hubungan *Skid Resistance* dan Tekstur terhadap *Rubber deposit***

Kemampuan campuran aspal beton dalam meredam *rubber deposit* dalam penelitian ini dicari menggunakan kecenderungan (*trend*) hubungan *rubber deposit* dengan *skid resistance* dan hubungan *rubber deposit* dan tekstur. Hubungan ini dibentuk berdasarkan hasil riset dari (Joubert dkk., 2004) dan (Yager dkk., 1990). Dengan memasukkan nilai *skid resistance* yang didapat dari pengujian sampel di laboratorium, maka besarnya *rubber deposit* dapat diprediksi. Penentuan *rubber deposit* dijelaskan secara detail pada uraian berikut.

##### **a. Pembentukan persamaan hubungan *rubber deposit* dengan *skid resistance***

Gambar 4.53. adalah hubungan antara *skid resistance* dan *rubber deposit*. Dibentuk dari hasil analisis data penelitian yang dilakukan oleh (Joubert dkk., 2004), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.16 dan 2.17. Data ini merupakan hasil pengamatan selama 5 bulan terhadap ketebalan *rubber deposit*, *skid resistance* dan tekstur di Bandara Johannesberg.



Gambar 4.52. Hubungan *Skid Resistance* dan *Rubber Deposit*, Hasil Analisis Berdasarkan Penelitian (Joubert dkk., 2004)

Berdasarkan Gambar 4.52. didapatkan hubungan *skid resistance* dengan *rubber deposit* sebagai berikut:

- Gradasi menerus (*Dense Graded*)

- $y = -1,8085x + 4,5882$  (4.3)

- $R^2 = 1 ; x < 0,6$

- $y = -5,7929x + 4,5312$  (4.4)

- $R^2 = 0,987 ; x \geq 0,6$

- Gradasi terbuka (*Open Graded*)

- $y = -4.1382x + 4.4187$  (4.5)

- $R^2 = 0.9475$

b. Pembentukan persamaan hubungan *rubber deposit* dengan tekstur

Pada Gambar 2.7 ditunjukkan hubungan antara tekstur dengan *skid resistance*, berdasarkan hasil penelitian Yager dkk. (1990). Dengan asumsi kecepatan pendaratan 80 knot, maka digunakan Persamaan 2.9, yaitu  $y = 0,3961x + 0,3169$ , untuk mendapatkan tekstur berdasarkan nilai *skid resistance*.

Selanjutnya dengan menggunakan Persamaan 4.10, 4.11 dan 4.12, hubungan antara tekstur dengan *rubber deposit* dapat dicari. Hasil perhitungan yang dimaksud dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11. Hubungan *Skid Resistance*, Tekstur dan *Rubber Deposit*

<i>Skid resistance</i> ( <i>x</i> )	<i>Dense Graded</i>		<i>Open Graded</i>	
	<i>Rubber deposit</i> (*)	Tekstur (**)	<i>Rubber deposit</i> (***)	Tekstur (****)
0,78	0,03	0,62	1,20	0,62
0,67	0,66	0,58	1,66	0,58
0,60	1,04	0,56	1,92	0,56
0,60	3,50	0,56	1,92	0,56
0,56	3,57	0,54	2,09	0,54
0,52	3,64	0,52	2,25	0,52
0,49	3,71	0,51	2,41	0,51
0,45	3,78	0,49	2,57	0,49
0,41	3,85	0,48	2,73	0,48
0,37	3,92	0,46	2,89	0,46

Catatan :

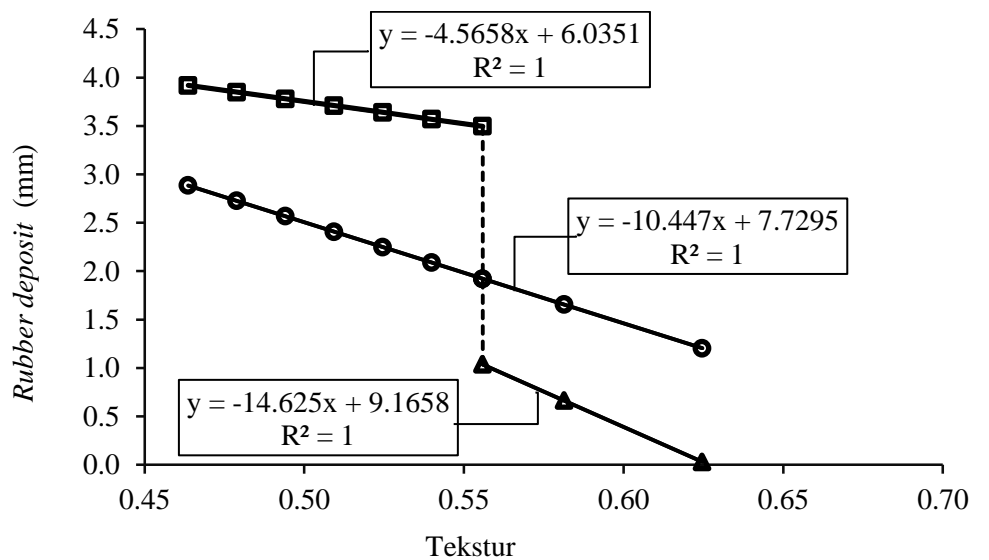
(\*) Persamaan 4.6 (*Dense Graded* < 0,6) dan Persamaan 4.7 (*Dense Graded* ≥ 0,6)

(\*\*) Persamaan 2.9 (Hubungan *Skid resistance* dengan Tekstur)

(\*\*\*) Persamaan 4.8 (*Open Graded*)

(Joubert dkk., 2004) dan (Yager dkk., 1990)

Dengan hasil perhitungan tersebut, maka dapat dibuat persamaan hubungan tekstur dengan *rubber deposit*. Gambar 4.53 adalah hubungan antara tekstur dan *rubber deposit*. Dibentuk dari hasil analisis data yang dilakukan oleh (Joubert dkk., 2004) dan, berdasarkan hasil pengamatan selama 5 bulan terhadap *skid resistance* dan tekstur di Bandara Johannesberg.



—■— Dense garaded;  $x < 0,56$  —▲— Dense garaded; ;  $x \geq 0,56$  —●— Open graded

Gambar 4.53 Hubungan Tekstur dan *Rubber deposit*, Hasil Analisis Berdasarkan Data Penelitian (Joubert dkk., 2004) dan (Yager dkk., 1990)

Berdasarkan Gambar 4.53. didapatkan hubungan *rubber deposit* dengan tekstur sebagai berikut:

▪ Gradasi menerus (*Dense Graded*)

○  $y = -4,5658x + 6,0351$  (4.6)

$R^2 = 1$  ;  $x < 0,56$

○  $y = -14,625x + 9,1658$  (4.7)

$R^2 = 1$  ;  $x \geq 0,56$

▪ Gradasi terbuka (*Open Graded*)

○  $y = -10,447x + 7,7295$  (4.8)

$R^2 = 1$

Hasil analisis berdasarkan hasil penelitian (Joubert dkk., 2004) dan (Yager dkk., 1990), yang menghasilkan Gambar 4.52 dan 4.53, menunjukkan:

- 1) semakin tinggi *skid resistance* (tekstur semakin dalam), maka *rubber deposit* makin rendah;
- 2) semakin dalam tekstur, maka *rubber deposit* makin rendah

Hasil tersebut menunjukkan bahwa *skid resistance* meningkat jika *rubber deposit* makin tipis. Hal ini terjadi bila tekstur semakin dalam, karena semakin banyak *rubber* yang masuk kedalam tekstur, sehingga lebih sedikit yang muncul di permukaan. Kedalaman tekstur menampung gerusan karet, hingga akhirnya menutup permukaan perkerasan, sehingga terjadi penurunan *skid resistance*.

#### 4.6.2. Verifikasi Pengujian Skala Laboratorium dengan Skala Lapangan

Persamaan yang telah terbentuk di atas akan digunakan untuk menghitung *rubber deposit* berdasarkan kondisi operasional lapangan. Untuk itu, perlu dilakukan verifikasi, dalam hal ini dilakukan terhadap landas pacu Bandar Udara Internasional Juanda. Data yang digunakan bersumber dari PT. Angkasa Pura I (Kristiawan, 2017).

##### 4.6.2.1. Analisis Akumulasi Ketebalan *Rubber deposit*

Akumulasi ketebalan *rubber deposit* dipengaruhi oleh jumlah roda pesawat, panjang pendaratan, berat jenis karet roda pesawat dan lebar jejak roda. Jumlah roda tergantung pada jenis pesawatnya. Panjang pendaratan (*Dlanding*) terdiri dari jarak transisi dan jarak pengereman. Jarak transisi adalah dari *touchdown* ke titik pengurangan kecepatan pesawat (s/d 20 knot). Jarak pengereman adalah dari titik pengurangan kecepatan hingga diperbolehkan ke *taxiway*. Sedangkan lebar pendaratan dipengaruhi oleh jarak roda dari sumbu (garis tengah) *runway*. Berat jenis roda pesawat (BJ karet) adalah 1522 kg/ m<sup>3</sup>. Menurut Wilding dkk (2008) setiap kali pendaratan pesawat meninggalkan *rubber deposit* 700 gram (Wilding dkk., 2008). Sehingga ketebalan *rubber deposit* yang tertinggal pada setiap jenis pendaratan pesawat dapat dihitung dengan Persamaan 4.9 (Kristiawan, 2017).

$$Akumulasi = B_{J_{karet}} \cdot \left( \frac{Rubber\ Deposit \times Jumlah\ Roda}{D_{landing} \times L_{landasan}} \right) \quad (4.9)$$

Maka, dengan mengalikan akumulasi *rubber deposit* yang ditinggalkan tiap-tiap pesawat, dengan *annual departure* didapatkan *rubber deposit* yang tertinggal untuk satu tahun (Kristiawan, 2017). Sehingga tebal *rubber* untuk seluruh

pesawat yang beroperasi pada suatu bandara dapat dihitung dengan Persamaan 4.10.

$$Tebal\ rubber = \sum(Ak1.Jp1 + Ak2.Jp2 + Akn.JPn) \quad (4.10)$$

Tabel 4.12. Jumlah dan Jenis Pesawat Tahun 2016 di Bandara Juanda

Jenis pesawat	Jumlah/ Tahun
Airbus A320-200	9192
Airbus A330-200	96
Airbus A330-300	328
Boeing 737-300	6824
Boeing 737-500	1996
Boeing 737-800	9364
Boeing 737-900	15344

Sumber : Angkasa Pura I (Kristiawan, 2017).

Sebagai contoh menghitung akumulasi karet pada *runway* bandara, yang beroperasi untuk melayani pesawat dengan data seperti pada Tabel 4.12.

1) Menghitung luas segitiga *rubber deposit*

Endapan karet pada landasan diasumsikan berbentuk segitiga. Pada *touchdown* tumpukan karet paling tebal dan semakin jauh semakin tipis. Luas segitiga *rubber deposit* dapat dilihat pada Tabel 4.13 yang dihitung dengan Persamaan 4.11. (Arianto, 2018).

$$\text{Luas } \Delta \text{ rubber deposit} = \frac{\text{Berat rubber deposit}}{\text{Jumlah roda} \times \text{Lebar roda} \times \text{Berat jenis karet roda}} \quad (4.11)$$

Dengan:

Luas  $\Delta$  *rubber deposit* yang ditimbulkan tiap pesawat dalam  $m^2$

Berat *rubber deposit* = 700 gram tiap pendaratan

Berat jenis karet roda = 481000 gr/  $m^3$

Tabel 4.13. Luas Segitiga *Rubber deposit* Tiap Pesawat Berdasarkan Jenisnya

No	Pesawat	Lebar Roda (m)	Type Roda	Jumlah roda (buah)	Luas segitiga <i>rubber deposit</i> (m <sup>2</sup> )
1	Airbus A320-200	0.41	<i>Dual wheel</i>	4	0.0008874
2	Airbus A330-200	0.53	<i>Dual tandem</i>	8	0.0003432
3	Airbus A330-300	0.53	<i>Dual tandem</i>	8	0.0003432
4	Boeing 737-300	0.37	<i>Dual wheel</i>	4	0.0009833
5	Boeing 737-500	0.37	<i>Dual wheel</i>	4	0.0009833
6	Boeing 737-800	0.42	<i>Dual wheel</i>	4	0.0008663
7	Boeing 737-900	0.42	<i>Dual wheel</i>	4	0.0008663

2) Menghitung ketebalan karet pada *Touchdown*

Tebal endapan karet pada *Touchdown* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.12. Karena itu terlebih dahulu dihitung panjang pendaratannya (Arianto, 2018).

$$\text{Tebal } rubber \text{ deposit} = \frac{\text{Luas } \Delta \text{ rubber deposit}}{\frac{1}{2} \text{ Panjang pendaratan}} \quad (4.12)$$

Jarak yang dibutuhkan dari ambang pendaratan (*landing threshold*) ke titik belok (*turn-off*) dari garis tengah landasan pacu (*runway*) dapat ditentukan sesuai dengan metode Metode Tiga Segmen (*Three Segment Method*) yang diilustrasikan pada Gambar 4.55.

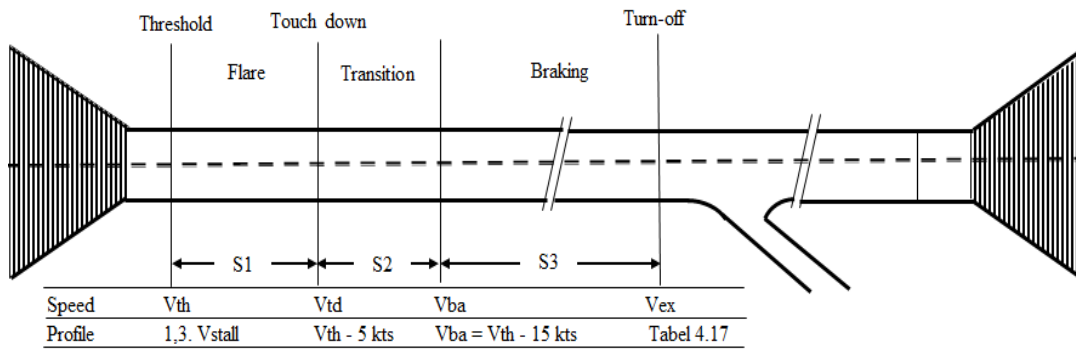
Panjang pendaratan pada Gambar 4.55, merupakan Metode Tiga Segmen (*Three Segment Method*) dengan rincian sebagai berikut:

Segmen 1: (Jarak S1) adalah jarak yang dibutuhkan dari ambang pendaratan (*landing threshold*) sampai roda utama pesawat menyentuh landas pacu (*main gear touchdown*).

Segmen 2: Jarak yang diperlukan untuk transisi dari *main gear touchdown* untuk menetapkan konfigurasi pengereman yang stabil (S2).

Segmen 3: Jarak yang dibutuhkan untuk deselerasi dari pengereman normal sampai kecepatan belokan (*turn-off*) menuju *taxiway* (S3).

Berdasarkan ketentuan tersebut maka, panjang pendaratan dapat dihitung. S1 dipakai 450 m (Tabel 4.14) untuk kelas pesawat C dan D (Tabel 4.15), jika tidak ada koreksi kemiringan dan angin (koreksi = 0).



Keterangan:

- V<sub>th</sub> : Ambang batas kecepatan, berdasarkan 1,3 kali kecepatan awal saat pendaratan, diasumsikan sama dengan 85 persen dari pendaratan maksimum. Kecepatan dikoreksi menurut ketinggian dan suhu lokasi bandara.
- V<sub>td</sub> : Kecepatan pada fase transisi, diasumsikan sama dengan V<sub>th</sub>-5 kts (konservatif). Penurunan kecepatan dianggap mewakili untuk sebagian besar jenis pesawat.
- V<sub>ba</sub> : Kecepatan pada fase pengereman, diasumsikan sebesar V<sub>th</sub>-15 kts (rem roda dan/ atau dorong mundur).
- V<sub>ex</sub> : Kecepatan nominal turn-off; Code number 3 or 4: 30 kts; Code number 1 or 2: 15 kts

Gambar 4.54. Panjang Pendaratan  
(International Civil Aviation Organization, 2005)

Tabel 4.14. Penentuan Panjang Segmen 1 (S1)

Aircraft category	S1	Correction for slope	Correction for tailwind
C and D	450 m	+ 50 m / - 0.25%	+ 50 m / + 5 kts
A and B	250 m	+ 30 m / - 0.25%	+ 30 m / + 5 kts

Sumber: International Civil Aviation Organization (2005)



Tabel 4.15. Grup Pesawat Menurut ICAO

Desain Grup	Wingspan (m)	Roda Dasar (m)	Contoh Pesawat
A	<15	<4,5	Seluruh pesawat mesin tunggal, beberapa pesawat bisnis
B	15-24	4,5-6	Pesawat commuter, pesawat bisnis besar (EMB-120, Saab 2000, Saab 340, dll)
C	24-36	6-9	Pesawat jarak menengah (B727, B737, MD-80, A320)
D	36-52	9-14	Pesawat berat (B757, B767, A300)
E	52-65	9-14	Pesawat berat (B747, L-1011, MD-11, DC-10)
F	>65	>14	A 380

Sumber: *International Civil Aviation Organization* (2005)

Selanjutnya hitung S2 dan S3 dengan menggunakan Persamaan 4.7 dan Persamaan 4.8. Panjang pendaratan yaitu jumlah S2 dan S3. Hasil selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.16.

$$S2 = 5 \times (V_{th}-10) \quad (4.13)$$

$$S3 = (V_{th}-15)^2 - V_{ex}^2 \quad (4.14)$$

Dengan:

Vex = angka nominal *turn off* (knot)

Vth = ambang kecepatan (knot)

1 Knot = 0,51 m/dt

Tabel 4.16. Panjang Pendaratan Tiap Pesawat Berdasarkan Jenisnya

No	Pesawat	Grup Pesawat	S1 <sup>*)</sup> (m)	Vth (knot)	S2 (m)	Vex (knot)	a	S3 (m)	Panjang Landing (S2+S3) (m)
1	Airbus A320-200	C	450	137	635	20	1,5	1207	1842
2	Airbus A330-200	C	450	140	650	20	1,5	1269	1919
3	Airbus A330-300	C	450	140	650	20	1,5	1269	1919
4	ATR 72-500	B	250	120	550	20	1,5	885	1435
5	Boeing 737-300	C	450	132	610	20	1,5	1107	1717
6	Boeing 737-500	C	450	128	590	20	1,5	1031	1621
7	Boeing 737-800	D	450	147	685	20	1,5	1419	2104
8	Boeing 737-900	D	450	150	700	20	1,5	1485	2185

Tabel 4.17. Tebal *Rubber Deposit* pada *Touchdown* Tiap Pesawat Berdasarkan Jenisnya

No	Pesawat	Panjang pendaratan (m)	Luas segitiga <i>rubber deposit</i> (m <sup>2</sup> )	Tebal <i>Rubber deposit</i> pada Titik <i>Touchdown</i> (m)	Tebal <i>Rubber deposit</i> pada Titik <i>Touchdown</i> (mm)
1	Airbus A320-200	1842	0.0008874	0.00000096	0.00096
2	Airbus A330-200	1919	0.0003432	0.00000036	0.00036
3	Airbus A330-300	1919	0.0003432	0.00000036	0.00036
4	Boeing 737-300	1717	0.0009833	0.00000115	0.00115
5	Boeing 737-500	1621	0.0009833	0.00000121	0.00121
6	Boeing 737-800	2104	0.0008663	0.00000082	0.00082
7	Boeing 737-900	2185	0.0008663	0.00000079	0.00079

Perhitungan dimulai dengan menghitung tebal *rubber deposit* yang diakibatkan oleh pendaratan 1 pesawat. Dihitung tebal *rubber* yang ditimbulkan oleh seluruh jenis pesawat yang menggunakan *runway*. Hasil perhitungan seluruhnya ditunjukkan pada Tabel 4.17.

### 3) Distribusi pendaratan pada ke dua ujung *runway*

Pada operasi penerbangan, dilakukan pendaratan dari kedua ujung *runway* tergantung arah angin. Untuk itu maka perlu dihitung prosentase pendaratan dari masing-masing ujung *runway*. Tabel 4.18 menunjukkan hasil perhitungannya. Digunakan data tahun 2005-2007.

Tabel 4.18. Prosentase Pergerakan Pesawat pada Ujung *Runway*

No	Tahun	Jumlah keberangkatan/ tahun		Prosentase keberangkatan/ tahun	
		R10-28	R28-10	R10-28	R28-10
1	2005	66460	14547	82%	18%
2	2006	75055	15150	83%	17%
3	2007	70339	14875	83%	17%
			Rata-rata	83%	17%

Sumber : Angka Pura I ( Arianto, 2018).

Berdasarkan prosentase yang didapatkan pada Tabel 4.18, dicari jumlah pergerakan pesawat untuk masing-masing ujung landasan, seperti pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19. Distribusi Pergerakan Pesawat untuk Masing-Masing Ujung *Runway*

No	Jenis pesawat	Jumlah pergerakan	Jumlah pada ujung landasan/ tahun		Jumlah pada ujung landasan/ hari	
			R10-28 (83%)	R28-10 (17%)	R10-28 (83%)	R28-10 (17%)
1	Airbus A320-200	9192	7592	1600	21	4
2	Airbus A330-200	96	79	17	1	1
3	Airbus A330-300	328	271	57	1	1
5	Boeing 737-300	6824	5636	1188	15	3
6	Boeing 737-500	1996	1649	347	5	1
7	Boeing 737-800	9364	7734	1630	21	4
8	Boeing 737-900	15344	12674	2670	35	7

4) *Rubber deposit* akibat pergerakan total pesawat pada masing-masing ujung *runway*

Berdasarkan distribusi pergerakan pesawat pada masing-masing ujung landasan pada Tabel 4.18, maka tebal *rubber deposit* akibat pergerakan total pesawat pada masing-masing ujung *runway* adalah seperti pada Tabel 4.19.

Kemudian tebal *rubber deposit* yang diakibatkan oleh pendaratan 1 pesawat dikalikan dengan jumlah keberangkatan pertahun berdasarkan persentase pergerakan pesawat pada ujung *runway* dalam setahun (analisis dalam Tabel 4.19), didapatkan tebal *rubber deposit* pada ujung landasan. Hasil perhitungan selengkapnya untuk seluruh pesawat dapat dilihat pada Tabel 4.20.

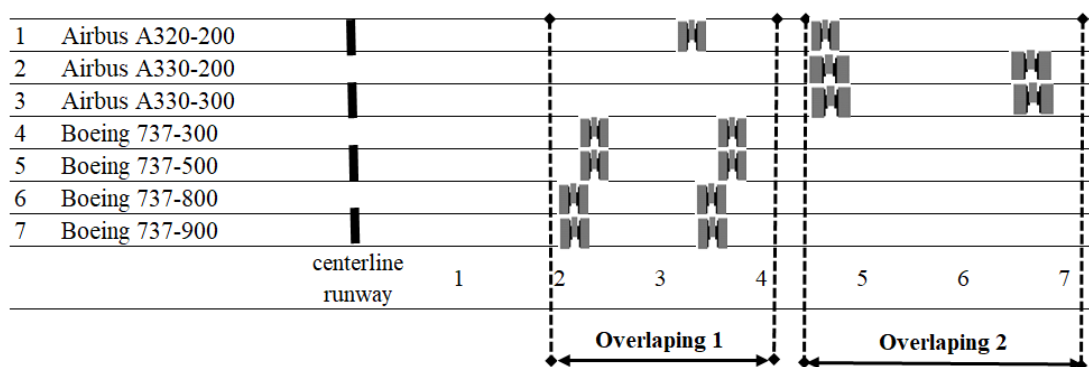
Tabel 4.20. *Rubber deposit* Akibat Pergerakan Pesawat Masing-Masing Ujung *Runway*

No	Jenis pesawat	Tebal <i>Rubber deposit</i> pada <i>Touchdown</i> / pesawat (mm)	Jumlah pergerakan ujung landasan/ hari		Tebal total <i>rubber deposit</i> ujung landasan/ hari (mm)	
			R10-28	R28-10	R10-28	R28-10
1	Airbus A320-200	0.00096	21	4	0.0200415	0.0042227
2	Airbus A330-200	0.00036	1	1	0.0003578	0.0003578
3	Airbus A330-300	0.00036	1	1	0.0003578	0.0003578
4	Boeing 737-300	0.00115	15	3	0.0176830	0.0037258
5	Boeing 737-500	0.00121	5	1	0.0054807	0.0012134
6	Boeing 737-800	0.00082	21	4	0.0174514	0.0036770
7	Boeing 737-900	0.00079	35	7	0.0275264	0.0057997

5) Lebar sebaran karet dan *overlapping* pada permukaan *runway*

Tumpukan karet tidak menyebar merata diatas permukaan *runway*, namun akan terakumulasi pada lintasan roda pesawat. Oleh karena itu perlu dilakukan pendetailan sehingga didapatkan ketebalan pada bagian permukaan yang dilapisi *rubber*.

Hal yang perlu diketahui adalah batas-batas lintasan pesawat, kemudian *overlapping* dari lintasan pesawat satu dengan lainnya. Berdasarkan data jarak antar roda, maka posisi roda dari garis tengah (*center line*) *runway* dapat diketahui. Berdasarkan posisi roda tersebut dapat ditentukan *overlapping* yang terjadi, seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.55. Sehingga tebal *rubber deposit* pada masing-masing segmen *overlapping* pada permukaan *runway* seperti pada Tabel 4.21.



Gambar 4.55. Area *Overlapping* Lintasan Roda (Arianto, 2018)

Tabel 4.21. Tebal *rubber deposit* pada segmen *overlapping* masing-masing ujung *runway*

No	Jenis pesawat	Total tebal <i>rubber deposit</i> pada <i>overlapping</i> 1 (mm)/hari		Total tebal <i>rubber deposit</i> pada <i>overlapping</i> 2 (mm)/hari	
		R10-28	R28-10	R10-28	R28-10
1	Airbus A320-200	0.020042	0.004223	0.020042	0.004223
2	Airbus A330-200			0.000358	0.000358
3	Airbus A330-300			0.000358	0.000358
4	Boeing 737-300	0.017683	0.003726		
5	Boeing 737-500	0.005481	0.001213		
6	Boeing 737-800	0.017451	0.003677		
7	Boeing 737-900	0.027526	0.005800		
8	Total	0.088183	0.018639	0.020757	0.004938

#### 4.6.2.2. Verifikasi Hubungan terhadap Kondisi Real di Lapangan

Perkiraan tebal *rubber deposit* dalam setahun di Bandara Juanda berdasarkan data operasional pesawat adalah 58.86 mm (Kristiawan, 2017). Sehingga *rubber deposit Runway 10* adalah 83% dari 58,86 mm adalah 48,85 mm dan 10,01mm (17%) untuk *Runway 28*. Berdasarkan KP no 94 tahun 2015, pembersihan *rubber deposit* secara efektif, mampu menghilangkan 3.2–4.8 mm. Jika diasumsi dengan kemampuan 4,8 mm, maka harus dilakukan pembersihan *runway* sebanyak 48,85 mm/4,8 mm yaitu 10,2 kali setahun. Dapat diasumsi 1 kali sebulan. Waktu pembersihan tersebut sesuai dengan yang diwajibkan berdasarkan jumlah pesawat yang beroperasi (Tabel 2.12). Sedangkan untuk *Runway 28* hanya perlu 10,01 mm/ 4,8 mm yaitu 2,08 atau < 6 bulan (dipakai 5 bulan).

Perhitungan prediksi ketebalan *rubber deposit* dilapangan untuk *runway 10, overlapping 1* adalah sebagai berikut:

- Interval waktu pembersihan = 1 bulan (30 hari)
- Total tebal *rubber deposit* = 0.088183 mm/ hari
- Sehingga tebal saat pembersihan pada *runway 10, overlapping 1* adalah 30 hari x 0.088183 mm/ hari = 2,65 mm

Selanjutnya untuk *runway 10, overlapping 2* dan *runway 28, overlapping 1* dan 2 dapat dilihat dalam Tabel 4.22.

Tabel 4.22. Prediksi Tebal *Rubber deposit* Saat Pembersihan

No	Lokasi	Interval waktu pembersihan (hari)	Tebal <i>rubber deposit</i> (mm/hari)	Tebal <i>rubber deposit</i> saat pembersihan (mm)
1	<i>Runway 10-28, overlapping 1</i>	30	0,088183	2,65
2	<i>Runway 10-28, overlapping 2</i>	30	0,020757	0,62
3	<i>Runway 28-10, overlapping 1</i>	150	0,018639	2,80
4	<i>Runway 28-10, overlapping 2</i>	150	0,004938	0,74

Karena yang ditinjau adalah perkerasan dengan gradasi menerus dan seluruhnya menggunakan agregat natural (kondisi lapangan), maka persamaan yang digunakan adalah :  $y = -1,8085x + 4,5882$ ; untuk  $x < 0,6$  (Persamaan 4.3) atau  $y = -5,7929x + 4,5312$ ; untuk  $x \geq 0,6$  (Persamaan 4.4). Hasil uji *skid resistance* dengan *Grip tester* dapat dilihat pada Gambar 4.57-4.58, dan hasil pengujian lainnya dilampirkan. Nilai *skid resistance* yang digunakan adalah hasil ukur dengan MU meter, seperti pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23. Data pengukuran *Skid Friction* permukaan *runway*

Arah Runway	Posisi	Skid Friction	Arah Runway	Posisi	Skid Friction
10-28	6 m dari C.I kiri	0,63	28-10	6 m dari C.I kiri	0,60
10-28	3 m dari C.I kiri	0,53	28-10	3 m dari C.I kiri	0,47
10-28	Center line (C.I)	0,55	28-10	Center line (C.I)	0,51
10-28	3 m dari C.I kanan	0,52	28-10	3 m dari C.I kanan	0,46
10-28	6 m dari C.I kanan	0,59	28-10	6 m dari C.I kanan	0,59

Sumber: Data sekunder dari PT Angkasa Pura I, (Kristiawan, 2017)



Gambar 4.56. Hasil Pengukuran *Skid Resistance* dengan MU Meter 6 m Sebelah Kiri *Center line* dari R10–R28 Bandara Internasional Juanda (PT Angkasa Pura I, 2016)



Gambar 4.57. Hasil Pengukuran *Skid Resistance* dengan MU Meter 3 m Sebelah Kiri *Center line* dari R10–R28 Bandara Internasional Juanda (PT Angkasa Pura I, 2016)

Tabel 4.24. *Rubber deposit* Berdasarkan *Skid Resistance* dan Operasional Bandara untuk Gradasi FAA

Posisi	Simulasi Tebal <i>Rubber deposit</i>				
	Berdasarkan data ukur lapangan			Berdasarkan Operasional	
	<i>Skid Friction</i>	Persamaan	Tebal (mm)	Posisi	Tebal (mm)
<b>Arah Runway 10-28</b>					
6 m dari C.1 kiri	0,63	(4.4)	0,88	Ov. 2	2,65
3 m dari C.1 kiri	0,53	(4.3)	3,63	Ov. 1	2,65
3 m dari C.1 kanan	0,52	(4.3)	3,65	Ov. 1	2,65
6 m dari C.1 kanan	0,59	(4.3)	3,52	Ov. 2	2,65
Rata-rata			2,92	Rata-rata	2,65
<b>Arah Runway 28-10</b>					
6 m dari C.1 kiri	0,60	(4.4)	1,06	Ov. 2	2,8
3 m dari C.1 kiri	0,47	(4.3)	3,74	Ov. 1	2,8
3 m dari C.1 kanan	0,46	(4.3)	3,76	Ov. 1	2,8
6 m dari C.1 kanan	0,59	(4.3)	3,52	Ov. 2	2,8
Rata-rata			3,02	Rata-rata	2,8
Persamaan (4.3)	$y = -1,8085x + 4,5882$ ; <i>Dense Graded, Skid resistance &lt; 0,6</i>				
Persamaan (4.4)	$y = -5,7929x + 4,5312$ ; <i>Dense Graded, Skid resistance ≥ 0,6</i>				

Tabel 4.25 adalah hasil analisis ketebalan *rubber deposit* berdasarkan nilai tekstur. Tekstur dihitung dengan persamaan (2.9) berdasarkan nilai *skid resistance*. Sebagai contoh untuk *skid resistance* 0,6 maka dengan Persamaan 2.9,  $y =$

$0,3961x+0,3169$ , dimana  $x$  adalah skid resistance, maka didapat tekstur ( $y$ ) = 0,55. Dengan cara yang sama didapatkan nilai untuk tekstur yang lain. Selanjutnya dengan Persamaan (4.6) dan (4.7) didapatkan *rubber deposit* pada posisi masing-masing.

Tabel 4.25. *Rubber deposit* Berdasarkan Tekstur dan Operasional Bandara untuk Gradasi FAA

Posisi	Simulasi Tebal <i>Rubber deposit</i>					
	Berdasarkan data ukur lapangan				Berdasarkan Operasional	
	<i>Skid Friction</i>	Tekstur	Persamaan	Tebal (mm)	Posisi	Tebal (mm)
<i>Arah Runway 10-28</i>						
6 m dari C.I kiri	0,63	0,57	(4.7)	0,88	Ov. 2	2,65
3 m dari C.I kiri	0,53	0,53	(4.6)	3,64	Ov. 1	2,65
3 m dari C.I kanan	0,52	0,52	(4.6)	3,64	Ov. 1	2,65
6 m dari C.I kanan	0,59	0,55	(4.6)	3,59	Ov. 2	2,65
			Rata-rata	2,94	Rata-rata	2,65
<i>Arah Runway 28-10</i>						
6 m dari C.I kiri	0,60	0,55	(4.6)	3,59	Ov. 2	2,8
3 m dari C.I kiri	0,47	0,50	(4.6)	3,68	Ov. 1	2,8
3 m dari C.I kanan	0,46	0,50	(4.6)	3,69	Ov. 1	2,8
6 m dari C.I kanan	0,59	0,55	(4.6)	3,59	Ov. 2	2,8
			Rata-rata	3,64	Rata-rata	2,8
Persamaan (4.6)	$y = -4,5658x + 6,0351$ ; <i>Dense Graded, Skid resistance &lt; 0,56</i>					
Persamaan (4.7)	$y = -14,625x + 9,1658$ ; <i>Dense Graded, Skid resistance ≥ 0,56</i>					

Selanjutnya untuk verifikasi dibandingkan nilai *rubber deposit* berdasarkan prediksi kondisi lapangan. Untuk kondisi lapangan menggunakan nilai *rubber deposit* yang lebih tinggi, sehingga untuk *Runway 10-28* digunakan 2,65 dan untuk *Runway 28-10* digunakan 2,80 mm. Dalam Tabel 4.24. dapat dilihat perbandingan hasil perhitungan *rubber deposit* dengan persamaan berdasarkan data pengukuran *skid resistance* dan dengan kondisi operasional lapangan, dalam kurun waktu yang sama. Sedangkan Tabel 4.25. adalah perbandingan *rubber deposit* berdasarkan perhitungan kondisi operasional lapangan dengan hasil perhitungan dengan persamaan berdasarkan tekstur yang dihitung dari data pengukuran *skid resistance*. Dapat dilihat bahwa nilainya cukup



mendekati. Sehingga persamaan yang digunakan untuk memprediksi dinyatakan sesuai (atau dapat digunakan).

#### 4.6.3. Analisis Variasi Campuran terhadap Jumlah *Rubber deposit*

Mengingat pentingnya *skid resistance* kaitannya dengan keselamatan operasional pesawat, maka harus selalu dijaga agar tetap memenuhi persyaratan. Lapisan *rubber deposit* pada permukaan *runway* merupakan salah satu penyebab berkurangnya *skid resistance*. Timbulnya *rubber deposit* erat kaitannya dengan tekstur permukaan yang dipengaruhi juga oleh gradasi agregat. Sehubungan dengan hal tersebut dilakukan analisis besarnya *rubber deposit* 4 variasi campuran yang dihasilkan berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan di laboratorium.

Potensi terbentuknya *rubber deposit* berdasarkan *skid resistance* pada masing-masing jenis gradasi campuran aspal dihitung dengan menggunakan persamaan matematis yang didapat dari hasil analisis. Contoh untuk campuran aspal dengan menggunakan 25% agregat buatan dan 75% agregat natural, dengan gradasi BBA. Nilai rata-rata hasil pengukuran *skid resistance* terhadap 3 sampel *slab* beton aspal dengan *British pendulum* adalah 79,1 BPN. Nilai ini sama dengan 0,66 GN, dengan menggunakan Persamaan 4.1,  $Y=0,01X-0,13$ , dimana Y nilai dalam GN dan X dalam BPN. Sehingga *rubber deposit* yang dapat ditampung dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.5. (*Open Graded*):

$y = -4.1382x + 4.4187$ , dimana y adalah tebal *rubber deposit* dalam mm dan x adalah nilai *skid resistance* dalam GN, maka:  $y = -4.1382 \cdot 0,66 + 4.4187 = 1.69$  mm = 1,7 mm. Hasil selengkapnya ditunjukkan pada Tabel 4.26.

Tabel 4.26. Nilai *Rubber deposit* untuk Seluruh Variasi Campuran Aspal Beton Berdasarkan *Skid Resistance*

Variasi campuran	<i>Skid resistance</i>		Persamaan korelasi <i>Skid resistance</i> dengan <i>rubber deposit</i>	<i>Rubber deposit</i> (mm)
	BPN	GN <sup>*</sup> )		
FAA-0%AB:100%AN	71,4	0,58	$y = -1,8085x + 4,5882$	3,5
FAA-25%AB:75%AN	68,4	0,55	$y = -1,8085x + 4,5882$	3,6
BBA-0%AB:100%AN	84,7	0,72	$y = -4.1382x + 4.4187$	1,4
BBA-25%AB:75%AN	79,1	0,66	$y = -4.1382x + 4.4187$	1,7

Dengan cara yang sama nilai *rubber deposit* pada masing-masing campuran berdasarkan tekstur permukaan sampel dapat disimulasikan dengan persamaan 4.6 sampai 4.8. Hasil selengkapnya ditunjukkan pada Tabel 4.27.

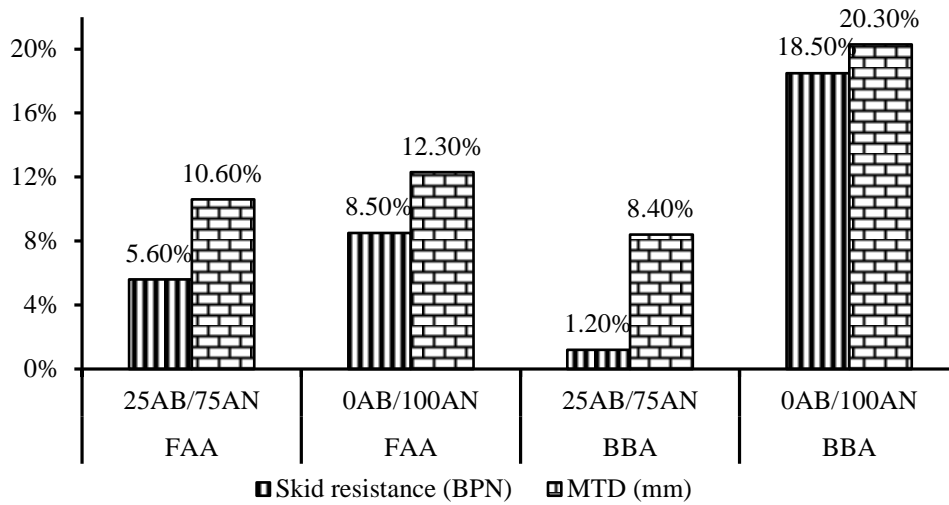
Tabel 4.27. Nilai *Rubber deposit* untuk Seluruh Variasi Campuran Aspal Beton Berdasarkan Tekstur

Variasi campuran	Tekstur Rata-rata/ MTD (mm)	Persamaan korelasi tekstur dengan <i>rubber deposi</i>	<i>Rubber deposit</i> (mm)
FAA-0% AB:100% AN	0,29	$y = -4,5658x + 6,0351$	4,7
FAA-25% AB:75% AN	0,27	$y = -4,5658x + 6,0351$	4,8
BBA-0% AB:100% AN	0,32	$y = -10,447x + 7,7295$	4,4
BBA-25% AB:75% AN	0,30	$y = -10,447x + 7,7295$	4,6

*Rubber deposit* pada dense graded (FAA) lebih tebal dibandingkan dengan open graded (BBA). Hal ini disebabkan karena tekstur BBA lebih besar dari pada FAA, sehingga BBA *rubber deposit* lebih banyak berada pada ruang tekstur dari pada yang menutup permukaan.

Campuran aspal beton dengan 25% agregat buatan, untuk FAA menghasilkan *rubber deposit* 4,2% dari lebih tebal pada BBA. Sedangkan untuk campuran aspal beton tanpa agregat buatan (agregat natural seluruhnya) untuk FAA menghasilkan *rubber deposit* 6,4% dari pada BBA.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa makin dalam tekstur rata-rata (MTD), maka makin besar *skid resistance* atau sebaliknya. Kaitannya dengan endapan karet adalah terjadinya penurunan *skid resistance* akibat tekstur tertutup oleh *rubber deposit*. Campuran perkerasan dengan gradasi terbuka (BBA) memberikan tekstur yang lebih besar dibandingkan dengan gradasi menerus (FAA).



Gambar 4.58. Deviasi *Skid Resistance* dan Tekstur Pra-Pasca *Tracking*

Prosentase penurunan *skid resistance* variasi campuran, pra dan pasca *tracking* pada uji *wheel track*, ditunjukkan pada Gambar 4.59. Dapat dilihat bahwa rata-rata kedalaman tekstur berbanding lurus dengan *skid resistance*. Dapat dilihat pula bahwa pada gradasi menerus maupun gradasi terbuka, diviasi penurunan *skid resistance* dan tekstur berbeda untuk campuran yang menggunakan agregat buatan atau seluruhnya agregat natural. Pada gradasi menerus (FAA) penurunan *skid resistance* lebih tinggi 4,4% (5,6%-1,2%) untuk campuran dengan agregat buatan. Sedangkan pada gradasi terbuka (BBA) penurunan *skid resistance* lebih rendah 10% (18,5%-8,5%) untuk campuran dengan agregat buatan.

Penggunaan 100% agregat natural (tanpa agregat buatan), gradasi terbuka (BBA) memiliki prosentase penurunan lebih besar dibandingkan dengan gradasi menerus (FAA). Ini artinya tektur BBA setelah dilewati lebih cepat hilang dari pada FAA. Namun, terjadi sebaliknya jika ditambahkan agregat buatan 25% dengan 75% agregat natural dimana penurunan tekstur dan *skid resistance* terjadi lebih banyak pada FAA.

Tabel 4.28. *Skid Resistance* dan % Penurunan Pra dan Pasca *Tracking*

Jenis Perkerasan	Pengukuran <i>Skid resistance</i>		Penurunan (%)	Syarat*)	ICAO	Dephub
	Pra-track.	Pasca-track.				
FAA 25AB/75AN	0,57	0,53	7	>0,24/>0,55	terpenuhi	tidak
FAA 0AB/100AN	0,60	0,59	2	>0,24/>0,55	terpenuhi	terpenuhi
BBA 25AB/75AN	0,68	0,61	10	>0,24/>0,55	terpenuhi	terpenuhi
BBA 0AB/100AN	0,73	0,58	21	>0,24/>0,55	terpenuhi	terpenuhi

Note \*) *Skid resistance* menurut Standar ICAO untuk *Grip Number* (GN) dengan kecepatan pengujian 95 km / jam (Joubert, dkk, 2004): a) bagus (*good*): 0,70; b) pada tingkat perlu pemeliharaan (*maintenance intervention level*): 0,37; c) tingkat minimum yang diijinkan (*minimum allowable level*): 0,24. Departemen Perhubungan: a) >0,6 : kemungkinan kecelakaan kecil; b) 0,55-0,60: kemungkinan mulai terjadi kecelakaan; c) 0,4-0,55: terjadi kecelakaan dan fatal.

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 4.28 ditunjukkan bahwa *skid resistance* terbaik terjadi pada campuran BBA tanpa agregat, namun prosentase penurunan pra dan pasca *tracking*nya paling tinggi sehingga akan sangat cepat tidak memenuhi persyaratan. Campuran aspal beton *open graded* (BBA) memiliki tekstur terdalam sehingga mempunyai *skid resistance* awal tertinggi. BBA dengan 25% agregat buatan, mempunyai nilai *skid resistance* lebih tinggi dibandingkan FAA tanpa agregat buatan maupun dengan agregat buatan 25%.

Saat ini digunakan gradasi menerus (gradasi rapat) tanpa menggunakan agregat buatan mengacu pada FAA untuk lapis perkerasan permukaan *runway*. Penggunaan 25% agregat buatan pada campuran aspal beton dengan gradasi terbuka (BBA), dapat menurunkan 2,1% rubber deposit dibandingkan dengan FAA tanpa agregat buatan.

Pemilihan variasi terbaik didasarkan pada aspek struktural, keselamatan dan operasional. Dalam aspek struktural, yang diperhatikan adalah terpenuhinya persyaratan sebagai bahan perkerasan menyangkut sifat-sifat mekaniknya. Dari segi keselamatan adalah terpenuhinya persyaratan permukaan *runway* sehingga tidak menimbulkan kejadian (*incident*) atau kecelakaan (*accident*) pesawat, misalnya akibat *skid resistance* kurang. Sedangkan dalam sisi operasional menyangkut biaya pemeliharaan dan gangguan jadwal penerbangan akibat aktifitas di *runway*.

Campuran agregat buatan sebesar 25% dengan gradasi terbuka (BBA) memberikan hasil yang dapat mengurangi penumpukan *rubber deposit* sebesar 4,1% dibandingkan dengan FAA dengan 25% agregat buatan, dan 2,1% dibandingkan dengan FAA tanpa agregat buatan. Dengan demikian penggunaan BBA dengan 25 % agregat buatan, akan mengurangi frekwensi pembersihan runway dalam setahun (waktu/ periode pemeliharaannya lebih lama).

Penggunaan campuran aspal beton BBA dengan 25% agregat buatan dengan ketebalan 10 cm, dapat mengurangi limbah fly ash sebanyak 23 kg/ m<sup>2</sup> permukaan runway. Nilai tersebut didapatkan dari volume campuran aspal per m<sup>2</sup> sebesar 0,1 m<sup>3</sup>. Dengan kepadatan campuran aspal 2,22 t/m<sup>3</sup>, maka berat campuran aspal setiap m<sup>2</sup> adalah 0,1 m<sup>3</sup> x 2,22 t/m<sup>3</sup> = 0,222 ton = 222 kg. Dengan kadar aspal 6,1%, maka jumlah agregat dalam campuran adalah 93,9% atau 222 kg x 93,9% = 208 kg. Agregat kasar sebanyak 60% dari jumlah total agregat atau 208 kg x 60% = 125 kg. Agregat buatan yang digunakan adalah 25% atau 125 kg x 25% = 31 kg. Dalam agregat buatan terkandung 75% fly ash, sehingga jumlah fly ash yang digunakan adalah 31 kg x 75% = 23 kg.

Maka, penggunaan 25% agregat buatan dalam campuran aspal beton BBA dengan ketebalan 10 cm untuk lapis permukaan runway, dapat mengurangi limbah fly ash sebanyak 23 kg/ m<sup>2</sup>. Jika digunakan pada suatu bandara dengan panjang runway 2000 meter dan lebar 40 meter (luas 80.000 m<sup>2</sup>), maka digunakan sebanyak 23 kg/ m<sup>2</sup> x 80.000 m<sup>2</sup> = 1.876.000 kg atau 1876 ton fly ash. Penggunaan agregat buatan ini secara masal di seluruh bandara di Indonesia secara signifikan dapat mengurangi jumlah limbah fly ash.

Penelitian dalam disertasi ini adalah berdasarkan kajian laboratorium. Pada kenyataannya di lapangan, seiring waktu, beberapa hal dapat menyebabkan menurunnya *skid resistance* pada landas pacu (Morrow, 1988), sebagai berikut:

- 1) Tindakan keausan dan gosokan (penghalusan) mekanis akibat gosokan ban pada permukaan perkerasan saat pengereman pesawat menyebabkan hilangnya tekstur.
- 2) Akumulasi kontaminan, seperti karet, bahan bakar jet, tumpahan minyak, bahan kimia, dan partikel debu sehingga runway menjadi licin.

- 3) Pengaruh cuaca : suhu sekitar, angin, panas matahari, intensitas curah hujan, dan lain-lain dapat menyebabkan kerusakan pada permukaan perkerasan.
- 4) Pemeliharaan permukaan perkerasan yang dilakukan secara kontinyu seperti pembersihan riber deposit menyebabkan hilangnya tekstur.
- 5) Defisiensi struktural permukaan perkerasan: *rutting*, *raveling* dan *cracking*.

Berdasarkan beberapa faktor yang menyebabkan penurunan *skid resistance* di atas, maka kajian lebih detail masih perlu dilakukan untuk menyempurnakan hasil dari riset ini.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

- Metode pembuatan agregat geopolimer berbahan *fly ash* dan alkali activator dengan sistem granulasi, yang menghasilkan properties agregat optimum adalah dengan sudut kemiringan pan granulator  $50^\circ$  dan rasio alkali ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ) 2,5. Adapun properties agregat tersebut adalah: berat jenis 1,85 gr/cm<sup>3</sup>, penyerapan 6,1%, ketahanan terhadap sulfat 5,2%, keausan 22,8%, kelekatan aspal terhadap agregat 97%.
- Penambahan 25% agregat buatan menghasilkan stabilitas tertinggi, karena rongga antar agregat (VMA) dan rongga dalam campuran (VIM) yang terbentuk lebih kecil dibandingkan dengan proporsi penambahan agregat yang lain. Pada penambahan agregat di atas 25%, rongga yang terbentuk semakin besar. Proporsi ini adalah proporsi optimum untuk mendapatkan kinerja struktural (stabilitas) hubungannya dengan jumlah penggunaan limbah batubara (*fly ash*). Sehingga proporsi ini digunakan dalam rancangan campuran dalam eksperimen baik untuk gradasi menerus maupun gradasi terbuka.
- Properties mekanik hasil uji Marshall (stabilitas) untuk *dense graded* (FAA) dan *open graded* (BBA), tidak berbeda secara signifikan. Nilai stabilitas  $\text{BBA} > \text{FAA}$ , baik dengan maupun tanpa agregat buatan. Penambahan agregat buatan 25% pada FAA meningkatkan stabilitas 6%. Namun pada BBA terjadi penurunan 3%. Properties mekanik hasil uji *wheel track*, menunjukkan stabilitas dinamis  $\text{BBA} < \text{FAA}$ , karena BBA mengalami *displacement* lebih tinggi dari pada FAA. Penggunaan agregat buatan mengakibatkan peningkatan stabilitas dinamis 37,4% untuk BBA dan 14,5% untuk FAA.
- Terdapat hubungan linier *Skid resistance* dan tekstur. Berdasarkan gradasinya, *skid resistance* dan tekstur campuran aspal *open graded* (BBA) lebih tinggi dari pada *dense graded* (FAA). Hasil uji *pra-traking*, penggunaan

25% agregat buatan pada campuran aspal beton menghasilkan tekstur dan *skid resistance*, lebih rendah dibandingkan jika seluruhnya menggunakan agregat natural. Namun pada uji *pasca traking*, penggunaan 25% agregat buatan untuk *open graded* (BBA) menghasilkan tekstur dan *skid resistance* yang lebih tinggi. Adapun untuk tekstur lebih besar 7,4% dan *skid resistance* lebih besar 4,6%.

- Campuran aspal beton *open graded* (BBA) tanpa agregat buatan memiliki tekstur terdalam sehingga mempunyai *skid resistance* awal tertinggi. Penggunaan 25% agregat buatan merupakan proporsi optimum dalam campuran aspal beton BBA. Campuran ini memberikan hasil yang dapat mengurangi penumpukan *rubber deposit* sebesar 4,1% dibandingkan dengan FAA dengan 25% agregat buatan, dan 2,1% dibandingkan dengan FAA tanpa agregat buatan. Menunjukkan bahwa penggunaan agregat buatan berpotensi untuk menekan *rubber deposit*. Sehingga akan mengurangi frekwensi pembersihan *runway* dalam setahun.

## 5.2. Saran

- Dari sisi properties agregat buatan geopolimer *fly ash* mempunyai kinerja lebih baik dibandingkan dengan agregat alami, sehingga potensial untuk dikembangkan. Dalam upaya memanfaatkan *fly ash* perlu dilanjutkan riset berikutnya untuk mendapatkan performa agregat yang lebih baik terutama dari sisi penyerapan agregat hingga lebih rendah dari 3%.
- Mengingat dalam penelitian ini hanya mempertimbangkan variasi gradasi dan penambahan agregat buatan dalam skala laboratorium, maka perlu dilakukan penelitian dalam skala lapangan sehingga dapat mengakomodir faktor lain seperti umur lapisan permukaan, ketahanan agregat terhadap gosokan roda, akumulasi endapan karet di *runway* yang dapat mengurangi hingga menghilangkan tekstur permukaan.



## DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M. M. A. B., Kamarudin, H., Bnhussain, M., Nizar, I. K., Rafiza, A. R. dan Zarina, Y. (2012). *The Processing , Characterization , and Properties of Fly Ash Based Geopolymer Concrete*. *Advanced Materials Science*, 30(1), 90–97.
- Abdullah, M. M. A. B., Kamarudin, H., Bnhussain, M., Rafiza, A. R. dan Zarina, Y. (2012). *Effect of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH ratios and NaOH molarities on compressive strength of fly-ash-based geopolymer*. *ACI Materials Journal*, 109: 503–508.
- Abdullah, M. M. A. B., Kamarudin, H., Nizar, K. dan Binhussain, M. (2011). *Correlation between Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH Ratio and Fly Ash/Alkaline Activator Ratio to the Strength of Geopolymer*. *Advanced Materials Research*, 341–342: 189–193.
- Achmad, F. (2010). *Tinjauan Sifat-Sifat Agregat Untuk Campuran Aspal Panas (Studi Kasus Beberapa Quarry Di Gorontalo)*. *Saintek*, 5.
- Adithya, A. P., Subagio, B. S., Kosasih, D. dan Hendarto, S. (2016). *Evaluasi Karakteristik Modulus Resilien dan Deformasi Permanen Campuran Beton Beraspal (AC - Binder Course) Menggunakan Campuran Agregat Berabrasi Tinggi*. *Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 23: 223–232.
- Afrizal, K. (2010). *Studi Perilaku Kuat Tekan Semen Rapid-Setting Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash dan Metakaolin*. <http://lib.ui.ac.id/detail.jsp?id=20248437>.
- Ahammed, M. A. & Tighe, S. L. (2008). *Pavement Surface Mixture, Texture, and Skid Resistance: A Factorial Analysis in Airfield and Highway Pavements: Efficient Pavements Supporting Transportation's Future - Proceedings of the 2008 Airfield and Highway Pavements Conference*.
- Ahyudanari, E., Ekaputri, J. J. dan Tardas, M. (2016). *Analysis of Coal Waste Solidification as an Alternative Filler Material in Asphalt Concrete Mixture*. *Materials Science Forum*, 841: 65–71.
- Akbar, S. J. dan Wesli (2011). *Studi Komparasi Nilai Marshall Lapangan dan Laboratorium pada Overlay Run Way (Studi Bandara Malikussaleh Lhokseumawe)*. *Teras Jurnal* (on-line), 1: 125–134. <https://id.scribd.com/doc/298662245/6-Studi-Komparasi-Nilai-Marshall-Lapangan-Danlaboratorium-Pada-Overlay-Run-Way>.
- Alsafi, S., Farzadnia, N., Asadi, A. dan Huata, B. K. (2017). *Collapsibility potential of gypseous soil stabilized with fly ash geopolymer; characterization and assessment*. *Construction and Building Materials journal*: 390–409.

- Aodah, H. H., Kareem, Y. N. A. dan Chandra, S. (2012). *Performance of Bituminous Mixes with Different Aggregate Gradations and Binders*. International Journal of Engineering and Technology, 2: 1802–1812.
- Araujo, V. M. C., Bessa, I. S. dan Branco, V. T. F. C. (2015). *Measuring skid resistance of hot mix asphalt using the aggregate image measurement system (AIMS)*.
- Aravindan, S., Jagadish, N. dan A, P. G. (2015). *Experimental Investigation of Alkali-Activated Slag and Flyash Based Geopolymer Concrete*. 4701–4705.
- Arianto, A. D. (2018). *Analalisis Perkiraan Penumpukan Rubber Deposit Berdasarkan Variasi dan Frekwensi Pesawat (Studi Kasus Bandar Udara Internasional Juanda)*. Tesis Program Magister, Bidang Keahlian Manajemen dan Rekayasa Transportasi, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Arjunan, P., Silsbee, M. R. dan Roy, D. M. (2001). *Chemical Activation of Low Calcium Fly Ash. Part 1: Identification of Suitable Activators and Their Dosage*. In: International Ash Utilization Symposium, University of Kentucky: Center for Applied Energy Research, Kentucky, USA.
- Asi, I. M. (2007). *Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes*. Building dan Environment: 325–329.
- Bennett, C. R., Chamorro, A., Chen, C., Solminihac, H. de, dan Flintsch, G. W. (2007). *Data Collection Technologies for Road Management*.
- Bijen, J. M. J. M. (1986). *Manufacturing processes of artificial lightweight aggregates from fly ash*. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(86\)90040-0](https://doi.org/10.1016/0262-5075(86)90040-0)
- Bina Marga. (1991). *Metode Pengujian Campuran Aspal dengan Alat Marshall (SNI 06-2489-1991)*.
- Cachim, P. B. (2009). *Mechanical properties of brick aggregate concrete*. Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.023>
- Chang, F. C., Lee, M. Y., Lo, S. L., dan Lin, J. D. (2010). *Artificial aggregate made from waste stone sludge and waste silt*. Journal of Environmental Management. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.06.011>
- Chen, J.S., Huang, C.C., Chen, C.H., Su, K.Y. (2014). *Effect of Rubber Deposits on Runway Pavement Friction Characteristics*.
- Cioffi, R., Colangelo, F., Montagnaro, F., dan Santoro, L. (2011). *Manufacture of artificial aggregate using MSWI bottom ash*. Waste Management, 281–288. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.05.020>
- Dan, H.-C., Li-Hua He, dan Xu, B. (2017). *Experimental investigation on skid resistance of asphalt pavement under various slippery conditions*. International Journal of Pavement Engineering, 18(6), Pages 485-499.

- Davidovits, J. (1991). *Geopolymers - Inorganic polymeric new materials*. Journal of Thermal Analysis, 37,(8), 1633–1656.
- Davidovits, J. (1994). *Global Warming Impact on the cement and aggregate industries*, World resource Review. 6(2), 263–278.
- Davidovits, J. (1994). *Properties of Geopolymer Cements*. First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, 131–149.
- Davidovits, J. (1999). *Geopolymer Chemistry and Applications*( 4th ed.). France: Institut Geopolymere 16 rue Galilee F-02100 Saint-Quentin France.
- Debieb, F., dan Kenai, S. (2008). *The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete*. Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013>
- Deffieux, J.-C., Delorme, J.-L., Depaux, B., Dubo, P., Gauthier, J.-P., Jullemier, F., Vangrevenynghe, P. (2009). *Bituminous Mixtures and Surface Dressings for Airport Pavements, Guide To The Application of Standards*. Civil Aviation Technical Center, 94381 Bonneuil-Sur-Marne Cedex Airport Infrastructure Departement.
- Departemen Pekerjaan Umum (1991). *Metode Pengujian Berat Jenis Aspal Padat*, SNI 06-2441-1991. Standar Nasional Indonesia.
- Departemen Pekerjaan Umum (1999). *Pedoman Perencanaan Campuran Beraspal dengan Pendekatan Kepadatan Mutlak*. Lampiran No . 3 Keputusan Direktur Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum.
- Direktorat Jenderal Perhubungan Udara. (2011). *KP 576 Tahun 2011 tentang Pedoman Penyusunan Rencana Kerja dan Syarat-Syarat (RKS) dan Spesifikasi Teknis Pekerjaan Fasilitas Sisi Udara Bandar Udara* (Peraturan Direktur Jenderal Perhubungan Udara)
- Direktorat Jenderal Perhubungan Udara. (2015). *Pedoman Teknis Operasional Peraturan Keselamatan Penerbangan Sipil Bagian 139-23 {Advisory Circular Casrpart 139-23}, Pedoman Program Pemeliharaan Konstruksi Perkerasan Bandar Udara (Pavement management System) KP 94 Tahun 2015* Direktorat Jenderal Perhubungan Udara.
- Ekaputri, J. J., dan Triwulan. (2013). *Sodium sebagai Aktivator Fly Ash, Trass dan Lumpur Sidoarjo dalam Beton Geopolimer*. Jurnal Teknik Sipil ITB, 20(1).
- Fadhil, T. H., Mohammed, H. A. dan Ahmed, T. Y. (2015). *An Empirical Relationship Between Asphalt and Water Absorption of Coarse Aggregates in HMA*. Journal of Engineering and Development, 19: 1813–7822.
- Fansuri, H., Prasetyoko, D., Zhang, Z., dan Zhang, D. (2012). *The effect of sodium silicate and sodium hydroxide on the strength of aggregates made from coal fly ash using the geopolymerisation method*. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. <https://doi.org/10.1002/apj.493>

- Federal Aviation Administration. (2014). *Guidelines and procedures for maintenance of airport pavements*. In Advisory Circular 150/5380-6C. <https://doi.org/AFS-800 AC 91-97>
- Freitas, E., dan Pereira, P. (2015). *Analysis of Test Methods for Texture Depth Evaluation Applied in Portugal*.
- Fuentes, L., Asce, M., Gunaratne, M., dan Hess, D. (2010). *Evaluation of the Effect of Pavement Roughness on Skid Resistance*. Journal of Transportation Engineering, 136(7)(July), 640–653. <https://doi.org/10.1061/ASCE.1943-5436.0000118>
- Gomathi, P., dan Sivakumar, A. (2012). *Characterization on the strength properties of pelletized fly ash aggregate*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 7(11), 1523–1532.
- Handayani, A. T., Setiaji, B. H., dan R.W, S. P. (2015). *Ketahanan Deformasi Campuran Beraspal Hangat Aspal Modifikasi dengan Bahan Aditif Zeolit Alam*.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J. dan Rangan, B. . (2004). *Factors Influencing the Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Civil Engineering Dimension, 6: 88–93.
- <https://isroi.com/2010/01/12/tip-produksi-pupuk-organik-granul-pog-agar-granul-seragam-sedikit-yg-rejek/>. (2010). *Tip Produksi Pupuk Organik Granul (POG) Agar Granul Seragam dan Sedikit yang Rejek*.
- International Civil Aviation Organization (2005). *Aerodrome Design Manual Part 2-Taxiways, Aprons and Holding Bays*; Doc 9157 AN/901, Fourth Edition-2005.
- Jo, B. W., Park, S. K., dan Park, M. S. (2007). *Strength and Hardening Characteristics of Activated Fly Ash Mortars*. Magazine of Concrete Research, 121–129.
- Joubert, P. B., Gounder, L., dan Wy, S. van. (2004). *Asphalt Trial Sections in The Touch Down Zone on Johannesburg International Airport*. Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04), (September), 31–42.
- Kasan, M. (2009). *Studi karakteristik volumetrik campuran beton aspal daur ulang*. Smartek, 7(a3), 152–165.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga (2018). *Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Jalan dan Jembatan*.
- Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga Direktorat Bina Teknik. (2010). *Spesifikasi Umum 2010 (Revisi 3)*.
- Kementerian Perhubungan; Direktorat Jenderal Perhubungan Udara; Peraturan Dirjen Perhubungan Udara No. : KP 576 Tahun 2011 (2011). *Pedoman Penyusunan Rencana Kerja dan Syarat-Syarat (RKS) dan Spesifikasi Teknis Pekerjaan Fasilitas Sisi Udara*.

- Khan, M. Z. N., Shaikh, F. uddin A., Hao, Y., dan Hao, H. (2016). *Synthesis of high strength ambient cured geopolymer composite by using low calcium fly ash*. Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.097>
- Kristiawan, F. (2017). *Evaluasi Kesesuaian Jadwal Pemeliharaan Runway dengan Pertumbuhan Pergerakan Pesawat di Bandar Udara Juanda*. Tugas Akhir, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Langer, B. W. H. (1993). *Natural Aggregates of the Conterminous United States*.
- Lăzărescu, A. V., Szilagyi, H., Baeră, C. dan Ioani, A. (2017). *The Effect of Alkaline Activator Ratio on the Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Paste*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 209.
- Leu, M. C., dan Henry, J. J. (1978). *Prediction of Skid Resistance as a Function of Speed From Pavement Texture Measurements*. 1(8), 7–13.
- Lu, Q., Steven, B., dan Davis, U. C. (2006). *Friction Testing of Pavement Preservation Treatments: Literature Review*. (December).
- Malik, Y. (2004). *Mengenal Batuan*. Jurnal Pendidikan Geografi, 1–12. Retrieved from [http://file.upi.edu/Direktori/FPIPS/JUR.\\_PEND.\\_GEOGRAFI/195901011989011-YAKUB\\_MALIK/HANDOUT\\_BATUAN.pdf](http://file.upi.edu/Direktori/FPIPS/JUR._PEND._GEOGRAFI/195901011989011-YAKUB_MALIK/HANDOUT_BATUAN.pdf)
- Mataei, B., Zakeri, H., Zahedi, M. & Nejad, F. M. (2016). *Pavement Friction and Skid Resistance Measurement Methods: A Literature Review*. Open J. Civ. Eng. 6, 537–565.
- Megasari, K., Deni, S., Maria, C. P. (2008). *Penakaran Daur Hidup Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Batubara Kapasitas 50 MWatt*. Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir.STTN-Batan Yogyakarta.
- Miller, T. D. (2012). *Characterization of Surface Texture: Technology Update*. 7th Symposium on Pavement Surface Characteristics. Norfolk, Virginia.
- Morrow, T. H. (1988). *FAA Guidance on Use of Friction Measuring Equipment for Maintaining Highly Skid Resistant Runway Pavement Surfaces at Civil Airports*. Transportation Research Record 1348: 56–62.
- Mustafa, M., Bakri, A., Kamarudin, H., Nizar, K. dan Binhussain, M. (2011). *Correlation between Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH Ratio and Fly Ash/Alkaline Activator Ratio to the Strength of Geopolymer*. Advanced Materials Research, 341–342: 189–193.
- Nematollahi, B., dan Sanjayan, J. (2014). *Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer*. Materials and Design. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.064>
- Panagouli, O. K., dan Kokkalis, A. G. (1998). *Skid resistance and fractal structure of pavement surface*. Chaos, Solitons dan Fractals, 9(3), 493–505. [https://doi.org/10.1016/S0960-0779\(97\)00085-4](https://doi.org/10.1016/S0960-0779(97)00085-4)

- Pandia, I. J., Lubis, A. S., dan Rambe, A. P. (2016). *Korelasi Skid Resistance dengan Kedalaman Tekstur pada Permukaan Perkerasan Lentur*. 22(2), 109–118.
- Pavithra, P., Reddy, M. S., Dinakar, P., Rao, B. H., Satpathy, B. K. dan Mohanty, A. N. (2016). *Effect of the Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH Ratio and NaOH Molarity on the Synthesis of Fly Ash-Based Geopolymer Mortar*. In: Geo-Chicago 2016 GSP 272. pp.336–344.
- Perdana, S., Subagio, B. S., Rahman, H., dan Hendarto, S. (2012). *Kinerja Skid Resistance dan Kedalaman Tekstur dari Campuran Split Mastic Asphalt (SMA) dengan Memakai Variasi Agregat dan Polimer Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)*. Tesis (Magister Teknik Sipil) ITB.
- Perumal, G., dan Anandan, S. (2014). *Performance evaluation of alkali activated fly ash lightweight aggregates*. Engineering Journal, 18(1), 77–85. <https://doi.org/10.4186/ej.2014.18.1.77>
- Praticò, F. G., dan Vaiana, R. (2015). *A study on the relationship between mean texture depth and mean profile depth of asphalt*.
- Priyadharshini, P., Ganesh, G. dan Santhi, A. (2011). *Experimental study on Cold Bonded Fly Ash Aggregates*. International Journal of Civil dan Structural Engineering, 2: 507–515.
- Priyadharshini, P., Mohanganeshanda, G. S., dan Santhi. (2012). *A Review on Artificial Aggregates*. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 5(301), 540–546.
- Pu, S., Duan, P., Yan, C., dan Ren, D. (2016). *Influence of sepiolite addition on mechanical strength and microstructure of fly ash-metakaolin geopolymer paste*. Advanced Powder Technology, 27(6), 2470–2477. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.09.002>
- Putri, I. R. B., Hariyadi, H., Karyawan, I. D. M. A. dan Ahyudanari, E. (2019). *Pengaruh Variasi Penambahan Agregat Buatan Terhadap Kadar Aspal Optimum untuk Perkerasan Aspal Lapis Aus*. Jurnal Teknik ITS, 7: 2–6.
- Rafiza, A. R., Bakri, A. M. M. Al, Kamarudin, H., Nizar, I. K., Hardjito, D., dan Zarina, Y. (2013). *Reviews on the Properties of Aggregates made with or without Geopolymerisation Method*. Advanced Materials Research, 626, 892–895. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.892>
- Rezaei, A., dan Masad, E. (2013). *Experimental-based model for predicting the skid resistance of asphalt pavements*. International Journal of Pavement Engineering, 14(1), 24–35. Retrieved from [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41005\(329\)32](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41005(329)32)
- Risdanareni, P. and Ekaputri, J. J. (2015). *The Influence of Alkali Activator Concentration to Mechanical Properties of Geopolymer Concrete with Trass as a Filler*. Materials Science Forum, 803: 125–134.

- Risdanareni, P., Ekaputri, J. J., dan Abdullah, M. M. A. B. (2015). *Effect of Alkaline Activator Ratio to Mechanical Properties of Geopolymer Concrete with Trass as Filler*. Applied Mechanics and Materials, 754–755(April), 406–412. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.754-755.406>
- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., dan Chung, Y. S. (2016). *The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators*. Construction and Building Materials, 47(July), 409–418. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.069>
- Seno, R., dan Ahyudanari, E. (2015). *Evaluasi Kekuatan Perkerasan Sisi Udara (Runway, Taxiway, Apron) Bandara Juanda Dengan Metode Perbandingan ACN-PCN*. Jurnal Teknik ITS, 4(1). Retrieved from <http://www.ejurnal.its.ac.id/index.php/teknik/article/view/8736>
- Setiadi, F., dan Yockie, M. S. W. (2011). *Analisa berbagai tipe gradasi menerus agregat campuran aspal beton*. Tesis. Retrieved from <http://repository.petra.ac.id/9054/>
- Setiawan, A., Suparma, L. B., dan Mulyono, A. T. (2016). *The Effect of Aggregate Gradation on Workability of Asphalt Concrete(CFD)*. International Journal of Engineering and Technology, 8(4), 1750–1757.
- Shah, S. M. R., dan Abdullah, M. E. (2010). *Effect of aggregate shape on skid resistance of compacted Hot Mix Asphalt (HMA)*. 2nd International Conference on Computer and Network Technology, ICCNT 2010, 421–425. <https://doi.org/10.1109/ICCNT.2010.78>
- Shuaibu, R. A. (2014). *Compressive Strength of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete- A Review*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 4(4), 463–470.
- Sicca, S.P. (2018). *Semen Indonesia akan Manfaatkan Limbah Batu Bara PLTU*. <https://tirto.id/semen-indonesia-akan-manfaatkan-limbah-batu-bara-pltu-cGdR>. Diakses tanggal 20 Desember 2019
- Singh, G. B. (2016). *Artificial Aggregate Production from Fly Ash*. The Masterbuilder Bureau.
- SNI 03-1968-1990. (1990). *Metode pengujian analisis saringan Agregat halus dan kasar*.
- SNI 03-1969-1990. (1990). *Metode pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar*.
- SNI 03-2417-1991. (1991). *Metode pengujian keausan agregat dengan mesin abrasi los angeles (Vol. 12)*.
- SNI 1969:2008. (2008). *Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus*. Standar Nasional Indonesia, 20.
- SNI 2417:2008 (2008). *Cara uji keausan agregat dengan mesin abrasi Los Angeles*. Standar Nasional Indonesia: 20.

- SNI 3407 (2008). *Cara uji sifat kekekalan agregat dengan cara perendaman menggunakan larutan natrium sulfat atau magnesium sulfat.*
- SNI 4427:2008. (2008). *Cara uji kekesatan permukaan perkerasan menggunakan alat British Pendulum Tester ( BPT ).*
- Speidel, D. J. (2002). *Airfield rubber removal.* The 2002 Federal Aviation Administration Technology Transfer Conference.
- Srinivasan, K., Mutharasi, M., Vaishnavi, R., Mohan, S., Logeswaran, V., Aggregates, K. A., Ash, F. dan Ash, R. H. (2016). *An Experimental Study on Manufacture of Artificial Aggregates Incorporating Fly Ash , Rice Husk Ash and Iron Ore Dust.* International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR).
- Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete-Designation: C618 – 12a* (2014). ASTM Internatonal.
- Stroup-Gardiner, M., Studdard, B., dan Wagner, C. (2001). *Influence of Hot Mix Asphalt Macrotecture on Skid Resistance.* 36849(334).
- Suaryana, N. (2014). *Evaluasi Kinerja Stone Matrix Asphalt Menggunakan Asbuton Butir sebagai Bahan Penstabil dan Penambah Filler.* Disertasi Program Studi Doktor Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Subaer. (2012). *Pengantar Fisika Geopolimer.* Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi.
- Sudrajat. (2016). *Penilaian Agregat Buatan Berbahan Dasar Fly Ash untuk Bahan Perkerasan Jalan di Berbagai Variasi Suhu Perawatan.* Surabaya: Program Pascasarjana Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sukirman, S. (1992). *Perkerasan Lentur Jalan Raya.* Nova, Bandung.
- Sukirman, S. (2007). *Beton Aspal Campuran Panas.* Yayasan Obor Indonesia.
- Sullivan, B. W. (2005). *Development of a Fundamental Skid Resistance Asphalt Mix Design Procedure 1 Introduction.* Pavement Management Service, Sydney, Australia, 1–15.
- Tajunnisa, Y., Sugimoto, M., Sato, T., Ekaputri, J. J. dan Shigeishi, M. (2016). *Characterization of Low Calcium Fly Ash for Geopolymer Paste.* In: 16th International Conference and Exhibition on Structural Faults and Repair.
- Tarigan, G. (2019). *Pengaruh Penggunaan Agregat Alam pada Campuran Aspal Beton terhadap Marshall Properties : 170-173.*
- Thakur, R. N., dan Ghosh, S. (2009). *Effect of Mix Composition on Compressive Strength and Microstructure of Fly Ash Based Geopolymer Composites.* ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 4(4), 68–74.
- Thomas, J. (2013). *Concrete made using cold bonded artificial aggregate.* American Journal of Engineering Research, (1), 2320–2847. Retrieved from [www.ajer.org](http://www.ajer.org)



- Troeger, J. dan Widyatmoko, I. (2012). *Development in Road Recycling*. In: 11th Annual International Conference on Pavement Engineering and Infrastructure, Liverpool, 15 -16 February 2012.
- U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. (2014). Advisory Circular. *Airport Pavement Design and Evaluation* AC No: 150/5370-10G.
- U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. (2016). Advisory Circular. *Airport Pavement Design and Evaluation* AC No: 150/5320-6F.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 2009 tentang Penerbangan. (2009).
- Utama, D. (2005). *Pengaruh Gradasi Agregat terhadap Kedalaman Alur Roda pada Campuran Beton Aspal Panas*. Jurnal Transportasi, 5(1), 87–98.
- Vaiyapuri, R., Ramasamy, S. dan Janardhanan, T. (2014). *Effect of Molar Ratio of  $SiO_2/Na_2O$ ,  $Na_2SiO_3/NaOH$  Ratio and Curing Mode on The Compressive Strength of Ground Bottom Ash Geopolymer Mortar*. International Journal of Earth Sciences and Engineering (on-line), 7: 1511–1516.
- Vali, K. S., dan Rahim, A. (2017). *Mechanical Properties of Light Weight Engineered Cementitious Composites*. International Journal of Engineering and Technology (IJET), 8(6), 2937–2945.
- Wahjoedi (2009). Karakteristik Marshall Dan Indeks Kekuatan Sisa ( Iks ). *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 11: 121–130.
- Widyatmoko, I. (2008). *Mechanistic-Empirical Mixture Design for Hot Mix Asphalt Pavement Recycling*. Construction and Building Materials, 22: 77–87.
- Widyatmoko, I., Wood, J., dan Fergusson, C. (2015). *Friction characteristics of airfield asphalt concrete in service*. 168.
- Wijaya, A. L. (2017). *Studi Karakterisasi Material Fly Ash Terhadap Kemampuan Pasta Geopolymer*. <http://repository.its.ac.id/42904/>.
- Wilding, J., Hamiel, J., Paul, M. S., Crites, J., Duval, J. K., Mckee, L., dan Jenks, C. W. (2008). *Impact of Airport Rubber Removal Techniques on Runways*.
- Woods, W. R., dan Jr, J. W. A. (2002). *A General Characterization of Pavement System Failures* , with Emphasis on a Method for Selecting a Repair Process. 7(1), 58–62.
- Yager, T. J., Vogler, W. A. dan Baldasare, P. (1990). Evaluation of Two Transport Aircraft and Several Ground Test Vehicle Friction Measurements Obtained for Various Runway Surface Types and Conditions. Virginia.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIODATA PENULIS



### 1. Data Umum

- 1). Nama Lengkap : I Dewa Made Alit Karyawan
- 2). TTL : Lumajang-Tabanan, 18 Juli 1966
- 3). Jenis Kelamin : Laki-Laki
- 4). Kartu Identitas : KTP : 5271021807660001  
SIM : 660716260731  
Passport : A6735998  
NPWP : 49.645.679.9-911.000
- 5). Alamat : Jalan Danau Maninjau II No. 10  
Perumahan Bumi Pagutan Permai  
Kel. Pagutan Barat, Mataram  
Prov. Nusa Tenggara Barat-Indonesia  
Kode Pos : 83127  
Phone/ WA : 08123739695  
E-mail : [dewaalit@unram.ac.id](mailto:dewaalit@unram.ac.id),  
[dewaalit@yahoo.co.id](mailto:dewaalit@yahoo.co.id)  
[dewa19.66@gmail.com](mailto:dewa19.66@gmail.com)
- 6). Pekerjaan : Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik  
Universitas Mataram. Mataram
- 7). Pengutamaan : Rekayasa dan Manajemen Transportasi
- 8). Identitas Lainnya :  
Scopus Author ID : 57210106402; H-Index : 1  
Google Scholar ID : Ku5wwBgAAAAJ; H-Index : 3  
Science and Technology Index (SINTA) ID : 6012672  
Indonesian Publication Index (IPI) ID : 224931

## 2. Pendidikan

- 1). SDN 1 Samsam, Kab. Tabanan, Provinsi Bali, 1973-1979;
- 2). SMP Negeri 1 Tabanan, Kab. Tabanan, Provinsi Bali, 1979-1982;
- 3). SMA Negeri 1 Tabanan, Kab. Tabanan, Provinsi Bali, Jurusan Ilmu Pengetahuan Alam (IPA), 1982-1985;
- 4). Program Sarjana (S1) Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Udayana, Denpasar, 1985-1991;
- 5). Program Magister (S2) Program Pascasarjana Teknik Sipil, Universitas Brawijaya Malang, 1999-2001;
- 6). Program Doktor (S3) Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan (FTSPK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, 2016-sekarang.

## 3. Seminar/Konferensi Ilmiah Nasional dan Internasional

- 1). *The 3<sup>rd</sup> International Conference on Mathematics, Sciences, Technology, Education and Their Applications (ICMSTEA) and 1<sup>st</sup> International Symposium on Green Materials & Technology (ISGMT)*, 29-30 September 2018, Sahid Jaya Hotel, Makassar, Indonesia; *“Effect of Ratio  $Na_2SiO_3$  / NaOH and Granulation Method to Volumetric Properties Artificial Aggregates Geopolymer Fly Ash”*; as presenter and 1<sup>st</sup> author;
- 2). Seminar Hasil Program Pengabdian kepada Masyarakat Mono Tahun Pelaksanaan Tahun 2016; Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat, Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan, Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi; tanggal 3 s.d 4 Desember 2016 di Bali; as presenter and 1<sup>st</sup> author;

## 4. Publikasi dalam Jurnal Nasional dan Internasional

- 1). Karyawan, I D.M.A., Ekaputri, J.J., Widyatmoko, I. dan Ahyudanari, E. (in press); *“The Effect of Various  $Na_2SiO_3/NaOH$  Ratios on The Physical Properties and Microstructure of Artificial Aggregates”* Journal of Engineering Science and Technology (JESTEC); Vol 15 No 2; April 2020.
- 2). Karyawan, I D.M.A., Ekaputri, J.J., Widyatmoko, I. dan Ahyudanari, E. (2019); *“Effect of Ratio  $Na_2SiO_3$  / NaOH and Granulation Method to Volumetric Properties Artificial Aggregates Geopolymer Fly Ash”* Material Science Forum; ISSN: 1662-9752, Vol 967; hal 228-235; DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.967.228
- 3). Hilda, A.H., Karyawan I D.M.A., Ekaputri, J.J., Murtiadi, S., dan Ahyudanari, E. (2019); *“The Effect of Slope Granulator on The Characteristic of Artificial Geopolymer Aggregate”* Journal of Engineering Science and Technology (JESTEC); Vol 14 No 3; hal 1466-1481

- 4). Putri, I.R.B., Hariyadi, Karyawan, I D.M.A., Ahyudanari, E. (2019); “*Pengaruh Variasi Penambahan Agregat Buatan Terhadap Kadar Aspal Optimum untuk Perkerasan Aspal Lapis Aus*” Jurnal Teknik ITS; DOI: 10.12962/j23373539.v7i2.37874; Vol 7 No 2; hal 104-113;
- 5). Widianty, D., dan Karyawan, I D.M.A. (2018); “*Pengaruh Penambahan Serbuk Serat Pelepah Batang Pisang Terhadap Karakteristik Sifat Fisik Aspal*”; Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan (Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Ketekniksipilan dan Lingkungan); ISSN 2548-9518; Vol 2 No 1; hal 67-76.
- 6). Karyawan, I D.M.A., Ekaputri, J.J. dan Ahyudanari, E. (2017) “*Potential Use of Fly Ash Base Geopolymer as Aggregate Substitution in Asphalt Concrete Mixtures*”; International Journal of Engineering and Technology (IJET); Vol 9 No 5; hal 3744-3752; DOI: 10.21817/ijet/2017/v9i5/170905005.
- 7). Merdana, I N., Karyawan, I D.M.A., dan Mahendra, M. (2016); “*Peningkatan Kualitas dan Daya Saing Produk Paving Block dengan Memanfaatkan Serat Sabut Kelapa*” Abdi Insani; Vol 3 No 2; hal 9-14.
- 8). Karyawan, I D.M.A., Widianty, D. dan Sideman, I.A.O.S. (2015); *Analisis Kelandaian Melintang Sebagai Elemen Geometrik Pada Beberapa Tikungan Ruas Jalan Mataram-Lembar*; Jurnal Spektrum Sipil; Vol 2 No1; hal 12-21.
- 9). Karyawan, I D.M.A. (2015); “*Analisis Penanganan Kerusakan Dini Segmen Jalan Bandara Internasional Lombok dengan Perkerasan Kaku Bersambung Tanpa Tulangan*”; Kurva Teknik Vol 4 No. 1 ; hal 62-74.
- 10). Karyawan, I D.M.A. dan Widianty, D. (2014); “*Analisis Jarak Pandangan Henti sebagai Elemen Geometrik pada Beberapa Tikungan Ruas Jalan Mataram - Lembar*” Jurnal Penelitian Vol 18 No 2; hal 40-48.
- 11). Karyawan, I D.M.A. (2011); “*Analisis Kinerja Campuran Perkerasan Jalan dengan Menggunakan Agregat Batu Sungai dan Batu Gunung*”; Elsikom Vol 7 No 2; hal 125-138.

## **5. Publikasi dalam Prosiding Nasional dan Internasional**

- 1). Prosiding SNITT POLTEKBA; Vol 2 No 1 (2017); *Analisis Tingkat Penanganan Kecelakaan Pada Tikungan Berdasarkan Peluang Dan Resiko Akibat Defisiensi Jarak Pandangan Henti - Studi Kasus Ruas Jalan Mataram-Senggigi-Pemenang*; hal 301-311
- 2). *The 5<sup>th</sup> Andalas Civil Engineering (ACE) Conference 2018*, 28– 29 November 2018, Universitas Andalas, Padang, Indonesia; Resiko Kejadian Kecelakaan Akibat Pengaruh Landai Memanjang dan Ketersediaan Fasilitas Pelengkap Jalan; 2<sup>nd</sup> author;
- 3). *Seminar Nasional Inovasi Teknologi Terapan (SNITT) 2017*; 4 November 2017, di Hotel Novotel Balikpapan; Politeknik Negeri Balikpapan; “*Analisis Tingkat Penanganan Kecelakaan pada Tikungan*

Berdasarkan Peluang dan Resiko Akibat Defisiensi Jarak Pandangan Henti (Studi Kasus Ruas Jalan Mataram-Senggigi-Pemenang)”; 2<sup>nd</sup> author.

## **6. Kegiatan Pelatihan (Workshop) Selama Studi S3**

- 1). Sosialisasi dan Pelatihan *Online Database Springer, Emerald, ASCE (American Society of Civil Engineering) & ASME (American Society of Mechanical Engineering)*; Perpustakaan ITS; 21 Nopember 2016.
- 2). *Workshop of: “Scientific Writing for Indexed Publishing Journal” & “How to Get Academic Supervisor and How to Create a Joint Research”* ; Surabaya, 22 Agustus 2017.
- 3). Pelatihan Pengenalan tentang Manajemen Pelaksanaan Pekerjaan Jalan dan Jembatan; Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Provinsi Nusa Tenggara Barat bekerjasama dengan *Implementation Unit Consultant – Provincial Road Improvement and Maintenance Program/ Program Kemitraan Indonesia Australia untuk Infrastruktur (PIUC-PRIM/KIAT)*; 26-30 Maret 2018; Ruang Pertemuan “Projaliwa” Bidang Bina Marga, Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang, Jalan Majapahit no. 8 Mataram; Narasumber/ Instruktur
- 4). Seminar Pelatihan Kepenulisan dan Pendanaan Riset (SPKPR); “Menjadikan Mahasiswa Pascasarjana ITS sebagai Intelektual Muda yang Kreatif dan Terampil dalam Menulis Hasil Riset”, Himpunan Mahasiswa Pascasarjana Institut Teknologi Sepuluh Nopember; 20 September 2018
- 5). *CITIES Workshop; “International Journal Writing”* ; *Department of Urban and Regional Planning* Institut Teknologi Sepuluh Nopember; Surabaya, Indonesia; 25 Oktober 2018.
- 6). Workshop Indeksasi Jurnal pada Lembaga Pengindeks Bereputasi Internasional; *Journal of Indonesian Islam (JIIS)* bekerja sama dengan Pusat Penelitian dan Penerbitan Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LP2M) Universitas Islam Negeri Sunan Ampel Surabaya; GreenSa Inn – Sidoarjo; 21 Juni 2019
- 7). *Researcher & Research Student Enrichment Program (R2SEP)*; “*How to Write a Good Review Paper*”; *Department of Urban and Regional Planning* Institut Teknologi Sepuluh Nopember; Surabaya; 3 Oktober 2019

## **7. Sertifikat Keahlian Profesi**

- 1). Sertifikat Pendidik Dosen Profesional dari Kementerian Pendidikan Nasional Republik Indonesia dengan Nomor Registrasi 101101614210124 Tanggal 5 Juli 2010.
- 2). Sertifikat Keahlian (SKA) Ahli Muda Pengawas Jalan dari Asosiasi Tenaga Ahli Konstruksi Indonesia (ATAKI) Tanggal 6 Desember 2012.