



TESIS - RC 142501

**PENILAIAN AGREGAT BUATAN BERBAHAN
DASAR FLY ASH UNTUK BAHAN PERKERASAN
JALAN DI BERBAGAI VARIASI SUHU PERAWATAN**

SUDRAJAT
3114207804

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. RIA ASIH ARYANI SOEMITRO, M.Eng
Ir. HERRY BUDIANTO, M.Sc
Dr. Eng. JANUARTI JAYA EKAPUTRI, ST., MT

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN MANAJEMEN ASET
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



TESIS - RC 142501

**PENILAIAN AGREGAT BUATAN BERBAHAN
DASAR FLY ASH UNTUK BAHAN PERKERASAN
JALAN DI BERBAGAI VARIASI SUHU PERAWATAN**

SUDRAJAT
3114207804

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. RIA ASIH ARYANI SOEMITRO, M.Eng
Ir. HERRY BUDIANTO, M.Sc
Dr. Eng. JANUARTI JAYA EKAPUTRI, ST., MT

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN MANAJEMEN ASET
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



THESIS - RC 142501

**ASSESSMENT TO ARTIFICIAL AGGREGATE
BASE ON FLY ASH FOR PAVEMENT MATERIALS
ON VARIOUS CURING TEMPERATURE**

SUDRAJAT
3114207804

SUPERVISOR :

Dr. Ir. RIA ASIH ARYANI SOEMITRO, M.Eng

Ir. HERRY BUDIANTO, M.Sc

Dr. Eng. JANUARTI JAYA EKAPUTRI, ST., MT

MAGISTER PROGRAM

INFRASTRUCTURE ASSET MANAGEMENT

CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT

CIVIL ENGINEERING AND PLANNING TECHNOLOGY FACULTY

SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY

SURABAYA

2016

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT.)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

SUDRAJAT
NRP. 3114207804

Tanggal Ujian : 22 Nopember 2016
Periode Wisuda : Maret 2017

Disetujui oleh :



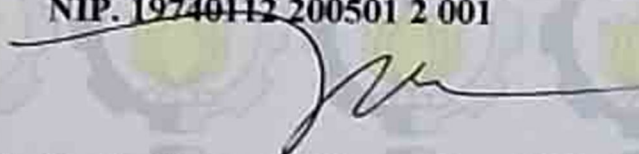
1. Dr. Ir. Ria A.A Soemitro, M.Eng (Pembimbing I)
NIP. 19560119 198601 2 001



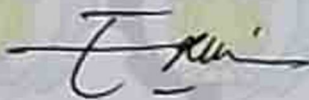
2. Ir. Herry Budianto, M.Sc (Pembimbing II)
NIP. -



3. Dr. Eng Januarti Jaya Ekaputri, ST., MT (Pembimbing III)
NIP. 19740112 200501 2 001



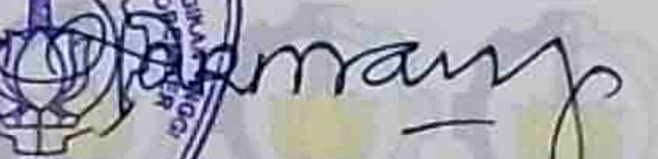
4. Dr. Ir. Hitapriya Supravitno, M.Eng (Penguji)
NIP. 19541103 198601 1 001



5. Ir. Ervina Ahyudanari, M.Eng., Ph.D (Penguji)
NIP. 19690224 199512 2 001



Direktur Program Pascasarjana,


Prof. Ir. Diauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D
NIP. 19601202 198701 1 001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PENILAIAN AGREGAT BUATAN BERBAHAN DASAR FLY ASH UNTUK BAHAN PERKERASAN JALAN DI BERBAGAI VARIASI SUHU PERAWATAN

Nama Mahasiswa : Sudrajat
NRP : 3114 207 804
Pembimbing : Dr. Ir. Ria Asih Aryani Soemitro, M.Eng
Ir. Herry Budianto, M.Sc
Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, ST., MT

ABSTRAK

Keberadaan sumber daya alam agregat batu pecah sebagai material konstruksi perkerasan jalan semakin lama semakin berkurang. Di sisi lain, pembangunan infrastruktur jalan yang cukup pesat di Indonesia membuat semakin menipisnya agregat alami batu pecah ini. Untuk itu diperlukan upaya lain dalam hal penggunaan agregat sebagai material konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk membuat agregat buatan berbahan dasar fly ash sebagai material konstruksi perkerasan jalan.

Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium. Pembuatan agregat buatan dilakukan dengan menggunakan *pan granulator*. *Pan granulator* ini berdiameter 120 cm, kemiringan 40° dengan kecepatan putar 26 rotasi per menit. Bahan yang digunakan sebagai *binder*/ pengikat berupa larutan alkali aktivator berbahan dasar *Sodium Silikat* (Na^2SiO^3) dan Sodium Hidroksida (NaOH). Pembuatan dimulai dengan memasukkan fly ash dalam kondisi kering ke dalam pan granulator yang sedang berputar, kemudian secara perlahan-lahan larutan alkali aktivator disemprotkan sehingga terbentuk *granul*/ butiran. Selanjutnya agregat buatan yang terbentuk dilakukan perawatan pada suhu ruang dan temperatur tinggi menggunakan mesin *steam curing* sebelum dilakukan pengujian berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa agregat buatan ini belum memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 sebagai material perkerasan jalan yaitu untuk nilai kelekatan dan penyerapan air. Nilai kelekatan masih di bawah 95%, sedangkan besarnya penyerapan air masih di atas 3%. Sedangkan persyaratan yang memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 adalah nilai abrasi dan kekekalan agregat (*soundness*). Nilai abrasi masih di bawah 40%, sedangkan nilai kekekalan agregat masih di bawah 12%. Berdasarkan perbandingan harga yang telah dilakukan antara agregat buatan dengan agregat alami batu pecah, menunjukkan disparitas harga sebesar Rp. 149.000,00/ kg. Walaupun demikian, agregat buatan ini merupakan salah satu solusi yang bisa dikembangkan untuk mengurangi dampak lingkungan akibat keberadaan fly ash yang cukup melimpah di Indonesia.

Kata Kunci : Geopolimer, agregat buatan, fly ash, alkali aktivator, sodium hidroksida, sodium silikat, XRF, steam curing, PT. Petrokimia Gresik

Halaman ini sengaja dikosongkan

ASSESSMENT TO ARTIFICIAL AGGREGATE BASE ON FLY ASH FOR PAVEMENT MATERIALS ON VARIOUS CURING TEMPERATURE

Nama Mahasiswa : Sudrajat
NRP : 3114 207 804
Pembimbing : Dr. Ir. Ria Asih Aryani Soemitro, M.Eng
Ir. Herry Budianto, M.Sc
Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, ST., MT

ABSTRACT

The existence of natural resources as crushed stone aggregate as construction material progressively reduced. On the other hand, the construction of road infrastructure rapidly in Indonesia is getting increased concerns about the depletion of natural aggregate. So, it's required another effort in terms of aggregate use as construction material. This study aims to create an artificial aggregate made from fly ash as a material pavement.

The study was conducted in a laboratory scale. Making artificial aggregate using a pan granulator. Diameter of pan granulator is 120 cm, the slope of pan is 40°, with rotational speed 26 rotations per minute. The binder materials as activator using Sodium Silicate (Na_2SiO_3) and Sodium Hydroxide (NaOH). Making artificial aggregates is began with inserting fly ash in dry conditions into the pan granulator that's spinning, then alkaline activator solution is slowly sprayed until granules be formed. Furthermore, the artificial aggregates is cured at room temperature and elevated temperature by using steam curing engines before it tests by Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3.

The results showed that the artificial aggregate is not yet qualify as a pavement material. This happens because the affinity value and the amount of water absorption is not eligible based on Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3. Affinity value is still below 95%, while the amount of water absorption is still above 3%. However, abration and soundness value have shown encouraging results. Abration value is still below 40%, while the value of soundness is still below 12% based on Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3. Based on price comparisons between artificial aggregates and natural aggregate, it's showing that economic value of artificial aggregate have not been replace the role of natural aggregate yet with a price disparity that reached Rp. 149,000.00/ kg. Even though, this artificial aggregate is one solution that can be developed to reduce environmental damage due to the volume of fly ash which is relatively abundant in Indonesia.

Keywords : Geopolymer, artificial aggregate, fly ash, activator, sodium hidrokside, sodium silicate, XRF, steam curing, PT. Petrokimia Gresik

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT., atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “*Penilaian Agregat Buatan Berbahan Dasar Fly Ash Untuk Bahan Perkerasan Jalan Di Berbagai Variasi Suhu Perawatan*”. Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan pada Program Pascasarjana, Bidang Keahlian Manajemen Aset Infrastruktur, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari bahwa tesis ini dapat terselesaikan berkat bantuan, petunjuk, dan bimbingan dari berbagai pihak. Maka dari itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus dan penghargaan kepada :

1. Ibu Dr. Ir. Ria Asih Aryani Soemitro, M.Eng, Bapak Ir. Herry Budianto, M.Sc, dan Ibu Dr. Eng. Januarti Jaya Ekaputri, ST., MT, selaku dosen pembimbing yang dengan penuh kesungguhan bersedia meluangkan waktu, tenaga, dan pikirannya untuk memberikan arahan dan petunjuk selama penyusunan tesis;
2. Bapak Dr.Ir.Hitapriya Suprayitno,M.Eng., dan Ibu Ir. Ervina Ahyudanari, M.Eng., Ph.D, selaku dosen penguji atas saran dan masukannya dalam perbaikan penyusunan tesis ini;
3. Para Dosen Program Studi S2 Manajemen Aset Infrastruktur atas bimbingan, pengalaman, pengetahuan, motivasi dan inspirasi yang telah dibagikan selama penyelesaian masa studi khususnya kepada Bapak Dr. Ir. Hitapriya Suprayitno, M.Eng selaku Dosen Pembimbing Akademik, Ibu Dr. Ir. Ria Asih A. Soemitro, M.Eng selaku Kepala Bidang Koordinator MMAI, dan Bapak Tri Joko Wahyu Adi, ST., MT., Ph.D. selaku Kepala Jurusan Teknik Sipil;
4. Tim Sekretariat Pascasarjana Teknik Sipil ITS yang telah senantiasa membantu dan memberikan kemudahan dalam mengurus berbagai keperluan administrasi selama kuliah;
5. Dinas Pekerjaan Umum Bina Marga Pemerintah Propinsi Jawa Timur khususnya rekan-rekan Laboratorium Jalan dan semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu atas support yang telah diberikan.
6. Teman-teman satu angkatan lainnya tanpa terkecuali : Jeng Antasari, Jeng Niken, Jeng Arin, Jeng Ratna, Jeng Silvi, Cak Puguh “The Komting”, Cak Beni, Cak Amir, Jeng Liyana, Jeng Novi, Cak Nizam, Cak “duo” Febri, Syekh Puji, Duo dewan syuro Catur-Roni, Cak Rangga, Jeng Nirwana, serta Jeng Oni dan teman-teman lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Terima kasih atas kebersamaan, sikap kekeluargaan, berbagi ilmu dan pengalamannya kepada penulis. Semoga silaturahmi kita senantiasa terjaga sampai kelak.

7. Kedua orang tuaku yang senantiasa memberikan doa dan dukungan sepenuhnya terhadap pilihan yang dibuat oleh putrinya untuk dapat melanjutkan studi di Surabaya;
8. Kepada my lovely istriku dan anakku, terimakasih untuk dukungan, doa, dan pengorbanannya agar penulis dapat secepatnya menyelesaikan studi. Semoga dengan ini, perhatian dapat tercurah sepenuhnya kembali kepada kalian;
9. Kepada semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Besar harapan penulis agar tesis ini dapat memberi manfaat bagi pembaca dan berbagai pihak yang membutuhkannya. Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu segala kritikan dan saran sangat diharapkan untuk pengembangan penelitian selanjutnya yang lebih baik.

Akhirnya penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penyusunan tesis ini. Semoga amal baik yang telah diberikan kepada penulis mendapat tempat dan balasan yang lebih baik dan lebih bermakna dari Allah SWT. Amin.

Surabaya, Desember 2016
Sudrajat

DAFTAR ISI

| | Hal |
|--|------|
| LEMBAR PENGESAHAN | i |
| ABSTRAK | ii |
| KATA PENGANTAR | vii |
| DAFTAR ISI | ix |
| DAFTAR TABEL | xi |
| DAFTAR GAMBAR | xiii |
| DAFTAR ISTILAH | xv |
| | |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah | 2 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4 Manfaat Penelitian | 3 |
| 1.5 Ruang Lingkup Penelitian | 4 |
| | |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1 Agregat Secara Umum | 5 |
| 2.1.1 Pengertian | 5 |
| 2.1.2 Sifat Agregat | 7 |
| 2.2 Persyaratan Teknis Agregat Sesuai Spesifikasi Umum BinaMarga 2010 rev 3 | 10 |
| 2.2.1 Agregat Kasar | 10 |
| 2.2.2 Agregat Halus | 12 |
| 2.2.3 Filler (bahan pengisi) | 13 |
| 2.3 Agregat buatan | 13 |
| 2.3.1 Fly Ash (abu terbang) | 14 |
| 2.3.2 Alkali Aktivator | 16 |
| 2.3.3 Curing (Perawatan) | 17 |
| 2.3.4 Granulasi | 19 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 2.4 | Penelitian Terdahulu | 19 |
| BAB 3 METODE PENELITIAN..... | | 23 |
| 3.1 | Rancangan Penelitian | 23 |
| 3.2 | Tahapan Penelitian | 23 |
| 3.2.1 | Tahap Persiapan | 23 |
| 3.2.2 | Tahap Pembuatan Benda Uji | 24 |
| 3.2.3 | Tahap Pengumpulan Data | 27 |
| 3.2.4 | Tahap Analisis Data | 28 |
| 3.2.5 | Kesimpulan | 32 |
| 3.3 | Kerangka Penelitian | 33 |
| BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN | | 35 |
| 4.1 | Analisa Metode Granulasi | 35 |
| 4.2 | Pengujian Material Fly Ash | 36 |
| 4.3 | Pengujian Agregat buatan..... | 38 |
| 4.3.1 | Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Air | 38 |
| 4.3.2 | Pemeriksaan Keausan Agregat | 44 |
| 4.3.3 | Pemeriksaan Kelekatan Agregat | 46 |
| 4.3.4 | Pemeriksaan Kekekalan Agregat | 49 |
| 4.4 | Perhitungan Biaya | 52 |
| 4.4.1 | Perhitungan Biaya Pembuatan Benda Uji | 52 |
| 4.4.2 | Perbandingan Biaya Pengujian Agregat Buatan | 53 |
| 4.4.3 | Perhitungan Biaya Transportasi | 54 |
| 4.4.4 | Perhitungan Biaya Agregat Buatan per Kg | 54 |
| 4.4.5 | Perbandingan Biaya Agregat Buatan dan Alami | 55 |
| BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN | | 57 |
| 5.1 | Kesimpulan | 57 |
| 5.2 | Saran | 58 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | | 61 |

DAFTAR TABEL

| | Hal |
|------------|--|
| Tabel 2.1 | Ketentuan Agregat Kasar 12 |
| Tabel 2.2 | Ketentuan Agregat Halus 12 |
| Tabel 2.3 | Macam-macam Aplikasi Geopolimer 16 |
| Tabel 3.1 | Data Karakteristik Fly Ash dan Agregat Buatan yang akan diuji..... 28 |
| Tabel 3.2 | Rincian Kebutuhan Benda Uji 30 |
| Tabel 4.1 | Komposisi Kimia Fly Ash (% massa) 37 |
| Tabel 4.2 | Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Air 39 |
| Tabel 4.3 | Pemeriksaan Keausan Agregat 45 |
| Tabel 4.4 | Pemeriksaan Kelekatan Agregat 47 |
| Tabel 4.5 | Pemeriksaan Kekekalan Agregat 49 |
| Tabel 4.6 | Perhitungan Biaya Pembuatan Benda Uji 52 |
| Tabel 4.7 | Perhitungan Biaya Pengujian Agregat Buatan 53 |
| Tabel 4.8 | Perhitungan Biaya Transportasi 54 |
| Tabel 4.9 | Harga Agregat Alami Batu Pecah 55 |
| Tabel 4.10 | Perbandingan Harga Agregat Buatan dan Agregat Alami 56 |

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

| | Hal |
|--|-----|
| Gambar 3.1 Diagram Alir Mix Design Pasta Binder Geopolimer | 24 |
| Gambar 3.2 Bagian-bagian Mesin Granulator | 24 |
| Gambar 3.3 Diagram Alir Pembuatan Agregat buatan..... | 27 |
| Gambar 3.4 Bagan Alir Penelitian | 34 |
| Gambar 4.1 Mesin Pan Granulator | 36 |
| Gambar 4.2 Mesin Steam Curing | 36 |
| Gambar 4.3 Pengambilan fly ash di PT. Petrokimia Gresik..... | 37 |
| Gambar 4.4 Penimbangan fly ash sesuai kebutuhan | 37 |
| Gambar 4.5 Persiapan agregat buatan untuk penimbangandalam air | 38 |
| Gambar 4.6 Pengeringan Agregat buatan kondisi SSD..... | 38 |
| Gambar 4.7 Grafik Pengaruh Suhu Curing terhadap Berat Jenis (OD) | 40 |
| Gambar 4.8 Grafik Pengaruh Suhu Curing terhadap Berat Jenis (SSD) | 41 |
| Gambar 4.9 Grafik Pengaruh Suhu Curing terhadap Berat Jenis (APP) | 42 |
| Gambar 4.10 Grafik Pengaruh Suhu Curing terhadap Penyerapan Air | 42 |
| Gambar 4.11 Mesin Abrasi Los Angeles | 43 |
| Gambar 4.12 Penimbangan agregat tertahan 3/8” untuk uji abrasi..... | 43 |
| Gambar 4.13 Penimbangan hasil uji abrasi | 43 |
| Gambar 4.14 Grafik Pengaruh Suhu Curing terhadap Nilai Abrasi | 46 |
| Gambar 4.15 Grafik Pengaruh Suhu Curing terhadap Nilai Kelekatan | 48 |
| Gambar 4.16 Agregat buatan yang telah diselimuti aspal | 49 |
| Gambar 4.17 Aspal pada agregat buatan yang mengelupas | 49 |
| Gambar 4.18 Grafik Pengaruh Suhu Curing terhadap Nilai Kekekalan | 50 |
| Gambar 4.19 Proses pembuatan larutan Na ₂ SO ₄ | 51 |
| Gambar 4.20 Perendaman agregat buatan dengan larutan Na ₂ SO ₄ | 51 |
| Gambar 4.21 Agregat buatan yang telah dikeringkan setelah perendaman ... | 51 |
| Gambar 4.22 Pengayakan agregat buatan setelah proses perendaman | 51 |

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISTILAH

ASTM (American Society for Testing and Material)

Merupakan standardisasi teknik untuk material, produk, sistem dan jasa yang dibentuk pertama kali tahun 1898 oleh sekelompok insinyur dan ilmuwan Amerika.

Curing/ perawatan

Suatu proses untuk menjaga tingkat kelembaban dan temperatur ideal untuk mencegah hidrasi yang berlebihan serta menjaga agar hidrasi terjadi secara berkelanjutan.

Fly Ash (abu terbang)

Limbah hasil pembakaran batu bara pada tungku pembangkit listrik tenaga uap yang berbentuk halus, bundar, dan bersifat pozolanik.

Filler (bahan pengisi)

Merupakan material yang lolos ayakan No. 200 (75 mikron).

Geopolimer

Proses untuk mendapatkan material baru yang dihasilkan dari geosintesis aluminosilikat polimerik dan alkali-silikat yang menghasilkan kerangka polimer SiO_4 dan AlO_4 yang terikat secara tetrahedral.

Granulasi

Pembentukan partikel-partikel besar dengan mekanisme pengikatan tertentu.

Molaritas

Suatu besaran yang menyatakan banyaknya mol zat terlarut terhadap setiap liter larutan.

Pozolanik

Bahan yang mengandung senyawa silika dan alumina.

SNI (Standar Nasional Indonesia)

Merupakan standar yang ditetapkan oleh Badan Standardisasi Nasional dan berlaku secara nasional di wilayah Indonesia yang dilakukan dalam rangka membangun sistem nasional yang mampu menjamin mutu barang dan/atau jasa serta mampu memfasilitasi keberterimaan produk nasional dalam transaksi pasar global.

Stripping

Peristiwa lepasnya ikatan antara aspal dan agregat.

XRF (X-Ray Fluorescence)

Suatu teknik analisis nuklir yang berdasarkan padaterjadinya tumbukan atom-atom padapermukaan cuplikan (bahan) oleh sinar-Xdari sumber pengekstisasi.

XRD (X-Ray Diffractometer)

Salah satu metode karakterisasi material yang paling tua yang digunakan untuk mengidentifikasi reaktivitas suatu material.

SEM (Scanning Electron Microscopy)

Merupakan metode untuk mengamati detil permukaan sel atau struktur mikroskopik lainnya dan mampu menampilkan pengamatan obyek secara tiga dimensi dengan cara memindai seberkas electron dalam pola scan raster.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Agregat merupakan komponen utama dari campuran aspal panas (*hotmix*) yaitu $\pm 90\%$ dari total berat campuran. Selama ini pemenuhan akan kebutuhan agregat berasal dari quarry (tempat pemecah batu) yang tersebar di seluruh pelosok. Namun, keberadaan agregat sebagai sumber utama batu pecah bisa jadi semakin menipis seiring dengan berkembangnya infrastruktur di Indonesia khususnya infrastruktur jalan. Apabila eksploitasi agregat ini terlalu berlebihan, maka ada kemungkinan pada saatnya nanti Indonesia akan mengalami kekurangan agregat. Untuk itulah diperlukan sebuah inovasi alternatif yang mampu menggantikan peran agregat ini, baik sebagian maupun seluruhnya, dengan tetap memperhatikan kualitas konstruksi yang memenuhi standar namun lebih ramah lingkungan.

Banyak sekali penelitian-penelitian yang berusaha untuk meminimalisir akan dampak eksploitasi agregat yang berlebihan. Ada yang menggunakan material daur ulang/*recycle*, ataupun penggunaan material yang tidak terpakai/limbah.

Limbah ternyata tidak selamanya terbuang percuma. Kini untuk membuat beton tak harus mengandalkan bahan-bahan beton konvensional yakni pasir, kerikil, dan semen. Berkat keuletan sejumlah peneliti berbagai limbah bisa dimanfaatkan untuk itu. Memang tidak bisa menggunakan sembarang limbah. Sebab limbah yang digunakan tersebut pada akhirnya harus tetap memenuhi persyaratan teknis yang ditentukan.

Salah satu limbah yang keberadaannya cukup melimpah di Indonesia adalah *fly ash/ abu terbang*. Fly ash merupakan limbah hasil pembakaran batu bara pada tungku pembangkit listrik tenaga uap yang berbentuk halus, bundar, dan bersifat pozzolanik. Pada tahun 2015 yang lalu, PT PLN (Persero) memperkirakan kebutuhan batubara untuk mengoperasikan seluruh pembangkit listrik di Indonesia mencapai 82 juta ton, di mana kebutuhan tersebut meningkat 17,1

persen dibandingkan realisasi penggunaan batubara tahun sebelumnya yang mencapai 70 juta ton. Apabila jumlah abu terbang yang dihasilkan dari tiap satu ton pembakaran adalah sekitar 15% -17 % (Safitri dkk. 2009), maka akan dihasilkan fly ash sekitar 13 juta ton.

Salah satu penelitian yang dapat dilakukan untuk mencari solusi dari pemanfaatan fly ash yang cukup melimpah ini adalah pembuatan agregat buatan dengan proses geopolimerisasi. Sama seperti proses geopolimer lainnya, agar material fly ash ini bisa menjadi agregat buatan, maka perlu ditambahkan dengan alkali aktivator. Fungsi alkali aktivator ini sendiri untuk mengikat unsur-unsur kimiawi yang ada di fly ash menjadi binder yang kuat. Pada penelitian yang dilakukan oleh Oktavina Damayanti pada tahun 2007 dengan menggunakan perbandingan berat fly ash : alkali aktivator adalah 74% : 26%, kuat tekan binder geopolimer yang dihasilkan berkisar 25 Mpa, di mana perbandingan berat alkali aktivator $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ berkisar antara 0,5 – 2,5.

Curing/ perawatan merupakan salah satu faktor yang sangat berpengaruh terhadap karakteristik dari agregat buatan ini. Untuk mengetahui bagaimana pengaruh suhu perawatan terhadap perilaku agregat buatan ini, benda uji akan dirawat pada suhu kamar (27-34°C) dan pada suhu 40°C, 60°C, serta 80°C dengan menggunakan mesin *steam curing* yang kemudian agregat buatan ini diuji berdasarkan persyaratan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3.

Dalam upaya memanfaatkan potensi material fly ash dengan lebih optimal, maka penelitian ini menjadi penting untuk dilakukan, yaitu menggunakan material fly ash sebagai agregat buatan untuk bahan perkerasan jalan khususnya perkerasan lentur/ *flexible pavement*.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka permasalahan dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut :

1. Pembuatan agregat buatan berbahan dasar fly ash merupakan salah satu upaya alternatif untuk mengurangi ketergantungan akan agregat alami batu pecah. Tentunya sebelum diterima sebagai pengganti agregat alam, agregat buatan ini harus melewati serangkaian pengujian. Bagaimanakah membuat agregat

buatan yang diperlukan untuk pengujian berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3?

2. Agregat buatan ini mengalami serangkaian perawatan/ curing berdasarkan suhu ruang, dan *elevated temperature* mulai suhu 40⁰, 60⁰, serta 80⁰C menggunakan mesin steamer. Berdasarkan hal ini, berapakah suhu curing yang paling baik yang digunakan sebagai agregat buatan berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3?
3. Bagaimanakah karakteristik agregat buatan ditinjau dari Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 yang meliputi ketahanan agregat terhadap penghancuran (abrasi), kekuatannya terhadap aspal, kekekalan bentuk agregat terhadap larutan sulfat (*soundness*), maupun berat jenis dan penyerapan airnya?

1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan perumusan masalah, maka tujuan penelitian ini adalah untuk :

1. Membuat agregat buatan dengan diameter kurang lebih 12,5 mm, 9,5 mm, 6 mm, dan 4 mm.
2. Mencari suhu curing/ perawatan yang paling baik digunakan sebagai agregat buatan.
3. Mencari karakteristik agregat buatan ditinjau dari Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 yang meliputi ketahanan agregat terhadap penghancuran (abrasi), kekuatannya terhadap aspal, kekekalan bentuk agregat terhadap larutan sulfat (*soundness*), maupun berat jenis dan penyerapan airnya.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan bisa memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Bahan referensi tambahan bagi pelaksana pemeliharaan jalan mengenai penggunaan agregat buatan sebagai bahan perkerasan jalan.
2. Penghematan sumber material perkerasan jalan sehingga dapat menjaga kelestarian alam.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Sehubungan dengan permasalahan yang akan dibahas maka ruang lingkup penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dengan pembuatan benda uji berbentuk butiran/ granular.
2. Penelitian dilakukan pada material fly ash kelas C dari PT. Petrokimia Gresik.
3. Aktifator yang digunakan adalah Na_2SiO_3 dan NaOH yang berasal dari Toko Bahan Kimia Jasarendra Jayawisesa.
4. Larutan untuk pengujian kekekalan bentuk agregat/ *soundness* menggunakan larutan Na_2SO_4 yang berasal dari CV. Dianum.
5. Penelitian ini membahas tentang total biaya pembuatan agregat buatan yang harus dikeluarkan berikut harga per kg nya yang selanjutnya dibandingkan terhadap harga agregat alami batu pecah.

1.6 Sistematika Pembahasan

Pada Bab 1 akan dijelaskan tentang pendahuluan yang meliputi latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika pembahasan.

Teori-teori dasar yang mendukung penelitian ini akan dibahas pada Bab 2. Teori-teori tersebut membahas tentang pengertian dan perkembangan agregat buatan berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu.

Pada Bab 3 akan dibahas rancangan penelitian, tahapan penelitian, dan kerangka penelitian.

Hasil tes/ pengujian yang dilakukan terhadap agregat buatan akan di analisa pada Bab 4. Agar hasil tersebut mudah dipahami, maka akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik.

Dari hasil analisa data tersebut, akan ditarik kesimpulan dan saran yang dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian-penelitian selanjutnya. Hal ini akan dibahas pada Bab 5.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Agregat Secara Umum

2.1.1 Pengertian

Secara umum agregat/ batuan didefinisikan sebagai formasi kulit bumi yang keras dan penyal/ solid. ASTM (1974) mendefinisikan batuan sebagai suatu bahan yang terdiri dari mineral padat yang berupa massa berukuran besar ataupun berupa fragmen-fragmen.

Agregat/ batuan merupakan komponen utama dari lapisan perkerasan jalan yang mengandung 90-95% agregat berdasarkan prosentase berat. Dengan demikian daya dukung, keawetan, dan mutu perkerasan jalan juga ditentukan dari sifat agregat dan hasil agregat dengan material lain.

Agregat diklasifikasikan menjadi tiga golongan besar, yaitu berdasarkan asal kejadian, proses pengolahan, dan ukuran butir agregat (Silvia Sukirman, 1999)

Berdasarkan asal kejadian, agregat/ batuan dapat dibedakan menjadi tiga golongan, yaitu :

- Batuan Beku (*igneous rock*)

Batuan beku berasal dari magma yang mendingin dan membeku dan dibedakan menjadi dua bagian, yaitu batuan beku luar (*extrusive igneous rock*) dan batuan beku dalam (*intrusive igneous rock*). Contoh batuan beku luar seperti batu apung, andesit, basalt, obsidian, dan sebagainya. Sedangkan batuan beku dalam di antaranya berupa batu granit, gabbro, diorit, dan lain-lain.

- Batuan Sedimen

Batuan sedimen merupakan batuan yang berasal dari campuran partikel mineral, sisa-sisa hewan dan tanaman. Batuan ini dapat dibedakan menjadi 3 golongan besar, yaitu batuan sedimen yang dibentuk secara mekanik seperti breksi, konglomerat, batu pasir, dan batu lempung; batuan sedimen yang

dibentuk secara organis seperti batu gamping, batu bara, dan opal; batuan sedimen yang dibentuk secara kimiawi seperti garam, gips, dan flint.

- Batuan Metamorf (batuan malihan)

Batuan metamorf berasal dari batuan sedimen ataupun batuan beku yang mengalami proses perubahan bentuk akibat adanya perubahan tekanan dan temperatur dari kulit bumi. Batuan ini dapat dibedakan atas batuan metamorf yang masif seperti marmer, kwarsit, dan batuan metamorf yang berlapis seperti batu sabak, filit, dan sekis.

Berdasarkan proses pengolahannya, agregat dibedakan atas :

- Agregat Alam (*Natural Aggregate*)

Agregat alam merupakan agregat yang digunakan dalam bentuk alamiahnya dengan sedikit atau tanpa pemrosesan sama sekali dan agregat ini terbentuk dari proses erosi dan degradasi. Batuan yang berasal dari sungai biasanya berbentuk bulat-bulat dengan permukaan yang licin, sedangkan batuan yang berasal dari perbukitan biasanya mempunyai permukaan yang lebih kasar dan bersudut. Dua jenis agregat alam yang digunakan sebagai bahan konstruksi jalan adalah pasir dan kerikil. Kerikil biasanya didefinisikan sebagai agregat yang berukuran lebih besar dari 4,75 mm. Pasir didefinisikan sebagai partikel yang lebih kecil dari 4,75 mm, tapi lebih besar dari 0,075 mm. Sedangkan partikel yang lebih kecil dari 0,075 mm disebut sebagai mineral pengisi (*filler*).

- Agregat yang diproses

Agregat yang diproses merupakan batuan yang telah dipecah dan disaring sebelum digunakan. Pemecahan batuan/ agregat dilakukan untuk merubah tekstur permukaan partikel dari licin ke kasar, merubah bentuk partikel dari bulat ke angular, dan untuk meningkatkan distribusi serta rentang ukuran partikel. Penyaringan terhadap agregat yang telah dipecahkan akan menghasilkan partikel agregat dengan rentang gradasi tertentu.

- Agregat Buatan

Merupakan agregat yang didapat dari proses kimia atau fisika dari beberapa material sehingga menghasilkan suatu material baru yang sifatnya menyerupai agregat. Jenis agregat ini merupakan hasil sampingan dari proses industri dan dari proses material yang sengaja diproses agar dapat digunakan sebagai

agregat atau sebagai mineral pengisi (*filler*). Pembuatan agregat secara langsung adalah sesuatu yang relatif baru. Agregat ini dibuat dengan membakar tanah liat atau dengan cara lainnya. Produk akhir yang dihasilkan biasanya agak ringan dan tidak memiliki daya tahan terhadap keausan yang lebih tinggi.

Berdasarkan ukuran butir agregat, agregat dapat dibedakan atas :

- Agregat kasar, agregat $>4,75$ mm menurut ASTM atau > 2 mm AASHTO.
- Agregat halus, agregat $<4,75$ mm menurut ASTM atau < 2 mm dan $>0,075$ mm menurut AASHTO.
- Abu batu/ mineral filler, agregat halus yang umumnya lolos saringan No.200.

Sedangkan pengelompokkan agregat berdasarkan jenisnya dibagi menjadi 3 golongan, yaitu :

- Agregat Normal

Agregat ini digunakan untuk tujuan yang lebih umum, yaitu menghasilkan beton dengan berat $1.800 - 2.800$ kg/m³.

- Agregat Berat

Agregat ini digunakan untuk tujuan yang lebih spesifik, misalnya untuk menahan radiasi dari sinar X dan neutron. Agregat ini menghasilkan beton yang mempunyai berat sekitar $4.000 - 5.000$ kg/m³. Contoh dari agregat ini seperti Magnetin, Ilmenit, dan Besi Skrap.

- Agregat Ringan

Agregat ini digunakan untuk struktur di mana berat sangat menentukan.

2.1.2 Sifat Agregat

Untuk dapat menahan beban lalu lintas dengan baik, tentunya sifat dan kualitas agregat memegang peranan yang cukup penting. Pengelompokkan sifat agregat yang baik sebagai bahan konstruksi perkerasan jalan setidaknya dipengaruhi oleh kekuatan dan keawetan serta kemampuan dilapisi aspal dengan baik.

- Kekuatan dan keawetan (*strength and durability*)

Hal ini dipengaruhi oleh gradasi, ukuran maksimum butiran, kadar lempung, daya tahan, bentuk butiran serta tekstur permukaan.

Gradasi atau distribusi partikel merupakan hal yang penting dalam menentukan stabilitas perkerasan. Gradasi agregat mempengaruhi besarnya rongga antar butir yang akan menentukan stabilitas dan kemudahan dalam proses pelaksanaan (*workability*). Gradasi agregat dapat dibedakan menjadi gradasi seragam (*uniform graded*), gradasi rapat (*dense graded*), dan gradasi buruk (*poor graded*). Gradasi seragam merupakan gradasi yang memiliki agregat dengan ukuran yang hampir sama, sehingga antar butir agregat banyak mengandung rongga-rongga. Gradasi seragam akan menghasilkan lapisan perkerasan dengan sifat permeabilitas tinggi yang akan berakibat stabilitasnya menjadi kurang. Gradasi rapat atau gradasi menerus merupakan gradasi dengan agregat kasar dan halus dalam porsi yang berimbang, sehingga dinamakan agregat bergradasi baik (*well graded*). Gradasi baik akan menghasilkan lapisan perkerasan dengan stabilitas tinggi dan permeabilitas yang cukup. Gradasi buruk merupakan gradasi yang berada di antara keduanya. Agregat bergradasi buruk ini sering disebut sebagai gradasi senjang, yaitu campuran agregat dengan 1 fraksi hilang atau 1 fraksi sedikit sekali. Agregat dengan gradasi senjang akan menghasilkan lapisan perkerasan yang mutunya terletak antara kedua jenis gradasi di atas.

Lapis perkerasan lentur membutuhkan agregat yang terdistribusi dari besar sampai kecil. Batasan ukuran maksimum yang digunakan tentunya dibatasi oleh tebal lapisan yang diharapkan.

Adanya lempung dalam suatu agregat akan mengakibatkan luas daerah yang harus diselimuti aspal menjadi bertambah. Dengan kadar aspal yang sama akan menghasilkan tebal lapisan yang lebih tipis yang dapat mengakibatkan terjadinya *stripping* (lepasnya ikatan antar butir agregat dengan aspal). Selain itu, lempung juga cenderung menyerap air yang berakibat hancurnya lapisan aspal.

Daya tahan agregat merupakan ketahanan agregat untuk tidak mudah hancur/pecah baik oleh pengaruh mekanis ataupun kimiawi. Pengaruh mekanis bisa

disebabkan akibat gaya yang diberikan pada waktu penimbunan, pemadatan, ataupun oleh beban lalu lintas yang menyebabkan agregat menjadi partikel-partikel yang lebih kecil. Sedangkan pengaruh kimiawi akan menyebabkan agregat menjadi lapuk yang disebabkan oleh kelembaban, kepanasan, ataupun perbedaan temperatur sehari-hari.

Adapun bentuk dan tektur agregat akan mempengaruhi stabilitas dari lapis perkerasan. Setidaknya ada lima bentuk agregat yang umum dijumpai di lapangan, yaitu bulat (*rounded*), lonjong (*elongated*), kubus (*cubical*), pipih (*flaky*), dan tak beraturan (*irregular*). Agregat dengan bentuk *cubical* merupakan bentuk agregat hasil dari pemecah batu (*stone crusher*), sehingga mempunyai bidang kontak yang lebih luas dan dapat memberikan interlocking/ saling mengunci yang lebih besar. Maka agregat dengan bentuk *cubical* inilah yang paling baik dipakai sebagai bahan konstruksi perkerasan jalan.

- Kemampuan dilapisi aspal dengan baik

Hal ini antara lain dipengaruhi oleh porositas dan jenis agregat. Agregat berpori berguna untuk menyerap aspal sehingga ikatan antara aspal dan agregat berlangsung dengan baik. Namun terlalu banyak pori akan mengakibatkan agregat menyerap aspal lebih banyak, sehingga aspal yang menyelimuti agregat akan lebih tipis dan menyebabkan cepat lepasnya ikatan antara agregat dengan aspal.

Daya lekat aspal juga dipengaruhi oleh sifat agregat terhadap air. Batuan granit dan batuan yang mengandung silica merupakan agregat yang bersifat hydrophilic, yaitu agregat yang senang terhadap air. Agregat demikian tidak baik untuk digunakan sebagai bahan campuran dengan aspal karena mudah terjadinya *stripping* (lepasnya lapis aspal dari butiran agregat akibat pengaruh air). Sebaliknya agregat seperti diorit-andesit merupakan agregat hydrophobic, yaitu agregat yang tidak mudah terikat dengan air sehingga ikatan antara aspal dan agregat cukup baik.

2.2 Persyaratan Teknis Agregat Sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3

2.2.1 Agregat Kasar

Agregat merupakan komponen yang dominan sebagai bahan perkerasan jalan. Untuk bisa berperan maksimal di dalam mengikat aspal, tentunya persyaratan teknis agregat tidak boleh dilanggar. Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 mensyaratkan penyerapan air oleh agregat maksimum 3%. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa penyerapan air oleh agregat merupakan hal yang sangat krusial. Salah satu sebab terjadinya *stripping* (lepasnya ikatan antara aspal dan agregat) dikarenakan banyaknya air yang terserap oleh agregat.

Berat jenis agregat di dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 memang tidak dipersyaratkan. Hanya saja persyaratan untuk berat jenis agregat kasar dan agregat halus dibatasi tidak boleh berbeda lebih dari 0.2.

Terdapat tiga jenis agregat yang dipergunakan sebagai bahan perkerasan jalan, yaitu agregat kasar, agregat halus, dan *filler* (bahan pengisi).

Agregat kasar yang dipergunakan untuk bahan campuran beraspal merupakan agregat yang tertahan saringan No. 4 (4,75 mm) yang dilakukan secara basah serta harus bersih, keras, awet, dan bebas dari lempung atau bahan yang tidak dikehendaki lainnya. Agregat kasar harus mempunyai angularitas/ bidang pecah sebesar 95/90 sesuai yang dipersyaratkan. Angka 95 menunjukkan bahwa 95% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih, sedangkan angka 90 menyatakan bahwa 90% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah dua atau lebih.

Agregat kasar yang dipergunakan juga harus tahan terhadap pengaruh mekanis ataupun kimiawi. Untuk menguji ketahanan agregat secara mekanis, maka dilakukan pengujian abrasi agregat dengan menggunakan mesin Los Angeles. Agregat yang telah disiapkan sesuai gradasi dan berat yang ditetapkan selanjutnya dimasukkan bersama bola-bola baja dan diputar dengan kecepatan dan putaran tertentu. Nilai akhir dinyatakan dalam persen yang merupakan hasil perbandingan antara berat benda uji semula dikurangi berat benda uji tertahan saringan No.12 dengan berat benda uji semula. Sesuai persyaratan spesifikasi, nilai abrasi untuk agregat kasar ini maksimal 40% untuk semua jenis campuran

aspal bergradasi selain aspal modifikasi. Ketahanan agregat terhadap pengaruh kimiawi diperiksa dengan menggunakan pengujian *soundness*. Pengujian ini dilakukan dengan merendam agregat ke dalam larutan Natrium Sulfat atau Magnesium Sulfat. Larutan tersebut akan masuk ke dalam pori-pori agregat dan akibat proses pengeringan menyebabkan agregat yang tidak kuat akan hancur. Besarnya prosentase kekekalan bentuk agregat terhadap larutan Natrium Sulfat dipersyaratkan maksimal sebesar 12%. Hal ini berarti agregat dengan $\text{soundness} \leq 12\%$ menunjukkan bahwa agregat tersebut cukup tahan terhadap pengaruh cuaca dan dapat digunakan untuk bahan perkerasan jalan.

Kelekatan agregat terhadap aspal merupakan salah satu indikator yang cukup penting sehingga agregat bisa dipergunakan sebagai bahan perkerasan jalan. Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 mensyaratkan bahwa kelekatan agregat terhadap aspal minimal 95%. Hal ini dapat terpenuhi apabila agregat mengandung pori dalam jumlah yang cukup, sehingga aspal dapat menyelubungi agregat dengan baik. Sebaliknya apabila pori dalam agregat terlalu berlebihan akan mengakibatkan aspal yang terserap menjadi lebih banyak, sehingga lapisan aspal menjadi tipis.

Persyaratan lainnya mengenai ketentuan agregat kasar menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 adalah partikel pipih dan lonjong. Partikel agregat berbentuk pipih dapat merupakan hasil dari mesin pemecah batu ataupun memang merupakan sifat dari agregat tersebut yang jika dipecahkan cenderung berbentuk pipih. Sedangkan partikel agregat berbentuk lonjong kebanyakan dapat ditemui di sungai-sungai atau bekas endapan sungai. Jika agregat dengan bentuk pipih dan lonjong akan dipergunakan sebagai bahan perkerasan jalan, maka pemakaiannya maksimal 10% sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3.

Agregat juga harus bersih terhadap lumpur/debu atau material yang tidak dikehendaki lainnya. Hal ini dilakukan dengan pengujian material lolos ayakan No. 200 yang tidak boleh melebihi 2%. Apabila material lolos ayakan No. 200 melebihi 2%, maka agregat harus dilakukan pencucian terlebih dahulu sebelum digunakan. Apabila setelah dilakukan pencucian material lolos ayakan No. 200 masih melebihi 2%, maka agregat yang dimaksud tidak boleh lagi digunakan sebagai bahan perkerasan jalan.

Tabel 2.1 Ketentuan Agregat Kasar

| Pengujian | | Standar | Nilai |
|---|---|--------------------------------|----------|
| Penyerapan air agregat kasar | | SNI 1969 : 2008 | Maks 3% |
| Perbedaan berat jenis agregat kasar dan halus | | SNI 1969 : 2008 | Maks 0.2 |
| Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan | Natrium Sulfat | SNI 3407 : 2008 | Maks 12% |
| | Magnesium Sulfat | | Maks 18% |
| Abrasi dengan mesin Los Angeles | Camp AC Modifikasi | 100 putaran | Maks 6% |
| | | 500 putaran | Maks 30% |
| | Semua jenis camp aspal bergradasi lainnya | 100 putaran | Maks 8% |
| | | 500 putaran | Maks 40% |
| Kelekatan agregat terhadap aspal | | SNI 2439 : 2011 | Min 95% |
| Butir pecah pada agregat kasar | | SNI 7619 : 2012 | 95/90 |
| Partikel pipih dan lonjong | | ASTM D4791 Perbandingan 1:5 | Maks 10% |
| Material lolos ayakan No. 200 | | SNI 03-4142-1996 | Maks 2% |

Sumber : Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3

2.2.2 Agregat Halus

Merupakan material yang lolos ayakan No. 4 (4,75 mm), bisa berupa pasir ataupun hasil pengayakan batu pecah. Agregat halus merupakan bahan yang bersih, keras, bebas dari lempung, atau bahan yang tidak dikehendaki lainnya.

Tabel 2.2 Ketentuan Agregat Halus

| Pengujian | | Standar | Nilai |
|--|--|-------------------------|----------|
| Penyerapan air agregat halus | | SNI 1970 : 2008 | Maks 3% |
| Perbedaan berat jenis agregat kasar dan halus | | SNI 1970 : 2008 | Maks 0.2 |
| Nilai setara pasir | | SNI 03-4428-1997 | Min 60% |
| Angularitas dengan uji kadar rongga | | SNI 03-6877-2002 | Min 45 |
| Gumpalan lempung dan butir-butir mudah pecah dlm agregat | | SNI 03-4141-1996 | Maks 1% |
| Agregat lolos ayakan No. 200 | | SNI ASTM C117 : 2012 | Maks 10% |

Sumber : Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3

2.2.3 Bahan Pengisi (*Filler*)

Bahan pengisi/ *filler* merupakan material yang lolos ayakan No. 200 (75 micron) tidak kurang dari 75% terhadap beratnya yang diuji sesuai dengan SNI ASTM C136:2012 dan terdiri atas debu batu kapur (limestone dust, Calcium Carbonate, CaCO_3), debu kapur padam (hydrated lime), semen, atau mineral dari asbuton yang disetujui oleh Direksi Pekerjaan. Semua campuran beraspal harus mengandung bahan pengisi yang ditambahkan (added filler) minimal 1% dan maksimal 2% dari berat total agregat.

2.3 Agregat buatan

Agregat buatan dengan proses geopolimerisasi merupakan salah satu upaya untuk mendapatkan agregat buatan yang lebih ramah lingkungan. Proses geopolimerisasi itu sendiri merupakan proses untuk mendapatkan material baru yang dihasilkan dari geosintesis aluminosilikat polimerik dan alkali-silikat yang menghasilkan kerangka polimer SiO_4 (*Silicate*) dan AlO_4 (*Aluminate*) yang terikat secara tetrahedral (Davidovits, 1994). Saat SiO_2 (*Silicon Dioxide*) dan Al_2O_3 (*Aluminium Oxide*) terikat secara tetrahedral dengan berbagi atom oksigen, harus ada ion positif (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , NH^{++}) dalam lubang kerangka untuk menyeimbangkan muatan negatif dari Al_3^+ . Salah satu material yang banyak mengandung silika dan alumina yang cukup besar adalah fly ash.

Penelitian tentang agregat buatan pernah dilakukan oleh Liao, Huang, dan Chen (2012). Berbahan dasar sedimen air waduk yang ditambah dengan Sodium Hidroksida (NaOH), agregat buatan ini kemudian dikalsinasi pada suhu 1110°C . Hasil penelitian menunjukkan bahwa agregat buatan berbahan dasar dari sedimen air waduk ini mempunyai tingkat absorpsi air yang cukup rendah yaitu di bawah 5% dengan berat jenis $1,43 \text{ gr/cm}^3$.

Penelitian lebih lanjut agregat buatan juga dilakukan oleh Colangelo, Messina, dan Cioffi (2015). Agregat buatan dibuat dari fly ash hasil pembakaran sampah/ limbah perkotaan. Menggunakan metode *double step cold bonding pelletization*, agregat buatan ini mempunyai berat jenis sekitar $1,0 - 1,6 \text{ gr/cm}^3$ dengan tingkat absorpsi air antara 7 – 16%.

2.3.1 Fly Ash (abu terbang)

SNI 03-6414-2002 mendefinisikan fly ash sebagai limbah hasil pembakaran batu bara pada tungku pembangkit listrik tenaga uap yang berbentuk halus, bundar, dan bersifat pozolanik.

Dengan demikian, pengertian fly ash sebagai bahan pozolanik, adalah :

- bahan yang mengandung senyawa silika atau silika + alumina.
- secara independen sangat sedikit atau tidak mempunyai kemampuan mengikat (*non-cementitious*).
- dalam bentuk yang sangat halus dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida membentuk suatu bahan yang bersifat mengikat (*cementitious*).

Pemakaian fly ash sebagai bahan tambah dalam adukan beton dan campuran pembuatan semen sudah mulai sejak tahun 1930-an. Fly ash merupakan satu bahan tambah (*additive*) yang cukup populer saat ini yang digunakan sebagai pengganti sebagian semen dalam campuran beton dan bahan untuk stabilisasi tanah ekspansif. Namun dalam kadar yang terlalu besar, fly ash justru akan menurunkan kuat tekan beton yang dihasilkan.

Fly ash yang dapat digunakan untuk campuran pengganti sebagian semen dalam beton diatur dalam ACI 232.2R-96 dan ASTM C 618 (Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete). Fly ash ini dibagi menjadi dua kelas, yaitu :

- Fly ash kelas F

Fly ash kelas F dihasilkan dari pembakaran anthracite atau bitumen batubara (*bituminous*). Fly ash kelas F disebut juga low-calcium fly ash, yang tidak mempunyai sifat *cementitious* dan hanya bersifat pozolanik. Fly ash tipe ini mempunyai kadar : $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) > 70 \%$.

- Fly ash kelas C

Fly ash kelas C dihasilkan dari pembakaran lignite atau sub-bitumen batubara (batubara muda / *sub-bituminous*). Fly ash kelas C disebut juga high-calcium fly ash. Karena kandungan CaO yang lebih tinggi daripada kelas F, fly ash tipe C mempunyai sifat *cementitious* selain juga sifat pozolan.

Fly ash tipe ini mempunyai kadar : $50\% < (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) < 70 \%$.

Beberapa sifat atau karakter dari fly ash yang diharapkan dapat dimanfaatkan dan memberikan kelebihan bagi campuran beton adalah :

- Spherical Shape (bentuk partikel yang hampir bulat sempurna), yang menghasilkan ball bearing effect untuk "melumasi" adukan pasta dan mortar semen sehingga mempunyai kemampuan alir (flowability) dan workability yang lebih baik.
- Ukuran partikel yang sangat halus, yang membuat fly ash mampu mengisi celah kecil dalam komposisi adukan beton, sehingga meningkatkan kepadatan beton sehingga lebih impermeable (kedap air), lebih tahan terhadap abrasi, dan memperkecil susut beton.
- Membuat biaya produksi beton menjadi lebih murah karena secara ekonomis fly ash lebih murah dari semen.

Fly ash yang paling baik untuk dijadikan bahan dasar pembuatan beton geopolimer adalah fly ash kelas F (Gourley,2003). Fly ash (ASTM kelas F) dengan kadar CaO yang rendah lebih banyak digunakan sebagai sumber material jika dibandingkan dengan fly ash (ASTM kelas C) dengan kadar CaO yang tinggi. Karena dengan adanya zat kapur (CaO) dalam jumlah yang tinggi bertolak belakang dengan proses polimerisasi dan dapat mengubah mikrostrukturnya (Gourley, 2003).

Dari sifat-sifat yang dimiliki fly ash dan harapan untuk pemanfaatannya, dalam prakteknya masih ditemui kondisi yang menunjukkan kegagalan dalam mencapai beberapa manfaat yang diinginkan. Tingkat variasi fly ash yang dihasilkan karena merupakan bahan limbah dan belum optimalnya quality control atas produk fly ash, memungkinkan pula variasi dalam sifat dan pengaruh penambahan fly ash dalam campuran beton. Hal ini membuat manfaat yang diharapkan tidak tercapai dan efek yang merugikan justru timbul.

Tabel 2.3 Macam-macam aplikasi geopolimer

| | | |
|---------------------|--|---|
| 20:1 < Si:Al < 35:1 | Fire Resistant & Heat Resistant FIBER COMPOSITES | |
| Si:Al > 3:1 | Sealants FOR INDUSTRY 200°C < USE < 600°C | Tooling for AERONAUTICS SPF Aluminium |
| Si:Al 3:1 | FIRE PROTECTION Fiber Glass Composites | Heat Resistant COMPOSITES 200°C < USE < 1000°C |
| | FOUNDRY EQUIPMENT | Tooling for AERONAUTICS Titanium Proc |
| Si:Al 2:1 | Low CO ₂ CEMENTS & CONCRETES | Radioactive & Toxic Waste ENCAPSULATION |
| Si:Al 1:1 | BRICKS CERAMICS FIRE PROTECTION | |
| GEOPOLYMERE | LOW TECHNOLOGY → | HIGH TECHNOLOGY |

Sumber : geopolimer.org

Berdasarkan tabel 2.3 di atas, perbandingan unsur Si/Al memegang peranan penting untuk menentukan arah dalam hal penggunaan geopolimernya. Dari tabel di atas terlihat bahwa semakin ke kanan penggunaan geopolimer menunjukkan pemanfaatan geopolimer untuk teknologi tinggi.

Unsur Si di dalam geopolimer didapatkan dari unsur Si yang terletak pada kandungan SiO₂ dalam fly ash dan Na₂SiO₃ dalam silikat. Adapun unsur Al didapatkan dari kandungan Al₂O₃ yang terdapat pada fly ash murni.



2.3.2 Alkali Aktivator

Keberadaan alkali aktivator dalam proses geopolimerisasi mutlak adanya. Alkali aktivator ini yang nantinya akan bereaksi dengan kandungan Si dan Al dalam fly ash menjadi sebuah binder geopolimer. Alkali aktivator yang digunakan untuk membuat geopolimer diantaranya adalah kombinasi antara sodium hidroksida (NaOH) dengan sodium silikat (Na_2SiO_3) atau potassium hidroksida (KOH) dengan potassium silikat (K_2SiO_3) (Davidovits, 1999).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Hardjito (2005) yang menggunakan konsentrasi sodium hidroksida (NaOH) berkisar antara 8M-16M, dengan perbandingan massa antara sodium hidroksida dan sodium silikat berkisar antara 0.4 sampai 2.5, menyimpulkan bahwa semakin tinggi konsentrasi molaritas sodium hidroksida menyebabkan semakin tinggi pula kuat tekan beton geopolimer. Dan semakin tinggi perbandingan massa antara sodium hidroksida dan sodium silikat menyebabkan semakin tinggi pula kuat tekan yang dihasilkan. Sodium hidroksida yang digunakan sebagai alkali activator berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam fly ash dan kapur sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat. Sedangkan sodium silikat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi.

Penelitian lebih lanjut yang dilakukan oleh Xu dan van Deventer (2000) menetapkan bahwa penambahan sodium silikat (Na_2SiO_3) ke dalam sodium hidroksida (NaOH) dapat meningkatkan reaksi antara material dengan alkali yang digunakan. Selanjutnya setelah melakukan penelitian terhadap enambelas mineral aluminium alami – silicon, ditemukan bahwa pada umumnya sodium hidroksida (NaOH) lebih baik jika dibandingkan dengan potassium hidroksida (KOH).

2.3.3 Curing (Perawatan)

Adalah suatu proses untuk menjaga tingkat kelembaban dan temperatur ideal untuk mencegah hidrasi yang berlebihan serta menjaga agar hidrasi terjadi secara berkelanjutan. Curing secara umum dipahami sebagai perawatan beton, yang bertujuan untuk menjaga supaya beton tidak terlalu cepat kehilangan air, atau sebagai tindakan menjaga kelembaban dan suhu beton, segera setelah proses finishing beton selesai dan waktu total setting tercapai.

Tujuan pelaksanaan curing/perawatan beton adalah memastikan reaksi hidrasi senyawa semen termasuk bahantambahan atau pengganti supaya dapat berlangsung secara optimal sehingga mutu beton yang diharapkan dapattercapai, dan menjaga supaya tidak terjadi susut yang berlebihan pada beton akibat kehilangan kelembaban yang terlalucepat atau tidak seragam, sehingga dapat menyebabkan retak.

Pelaksanaan curing/perawatan beton dilakukan segera setelah beton mengalami atau memasuki fase hardening (untukpermukaan beton yang terbuka) atau setelah pembukaan cetakan/acuan/bekisting, selama durasi tertentu yangdimaksudkan untuk memastikan terjaganya kondisi yang diperlukan untuk proses reaksi senyawa kimia yang terkandungdalam campuran beton.

Curing dapat dilakukan dengan menggunakan 4 material, diantaranya air, mats/selimut, dan kertas anti air atau bungkus plastik.

Adapun metode curing dapat dibagi menjadi 3 bagian, yaitu :

- Metode yang menjaga tingkat komposisi air, yaitu membiarkan adonan hasil campuran di dalam satu lapisan air. Sepertiponding, fog spraying atau sprinkling.
- Metode yang mencegah hilangnya air dalam campuran beton, melibatkan teknik dan material tambahan untukmencegah penguapan dari air yang telah tercampur.
- Metode yang mempercepat hidrasi dengan memberikan tambahan panas dan pelembab, melibatkan tambahan panasdan air untuk mempercepat hidrasi.

Tidak jauh berbeda dengan beton konvensional yang memerlukan perawatan setelah pencetakan, beton geopolimer juga membutuhkan hal yang sama. Penelitian tentang perawatan beton geopolimer pernah dilakukan pada tahun 1999 oleh Palomo, Grutzeck, and Blanco yang menyelidiki tentang pengaruh dari suhu curing temperature, curing time, dan rasio perbandingan fly ash dengan alkali activator. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa karakteristik dari beton geopolimer yang paling berpengaruh ditentukan dari metode perawatannya terutama pada proses curing temperature dan curing time. Dari hasil penelitian tersebut kuat tekan maksimum mencapai 60 MPa diperoleh pada suhu 85°C selama 5 jam.

Penelitian yang dilakukan oleh Achmad dan Hidjan (2011) menggunakan larutan NaOH 11M dengan perbandingan sodium hidroksida : sodium silikat adalah 1:2 terhadap berat larutan dan perbandingan air : fly ash sebesar 0.2. Metode perawatan yang dilakukan adalah direndam dalam air, steam curing pada suhu 60 derajat selama 24 jam, tanpa perawatan dan di oven pada suhu 250 derajat selama 24 jam. Dari hasil penelitian tersebut, kuat tekan pada beton yang dirawat dalam uap (steam curing) relative stabil pada beberapa umur pengujian yaitu berkisar 29 Mpa.

Penelitian yang dilakukan oleh Manesh (2012) berkenaan tentang pengaruh dari suhu perawatan pada beton geopolimer . Pada penelitian tersebut beton dirawat dalam oven pada suhu 60°C, 90°C, dan 120°C selama 6, 12, 16, 20 dan 24 jam. Hasil dari penelitian ini menyebutkan bahwa kuat tekan beton meningkat seiring meningkatnya suhu perawatan dan lamanya proses perawatan. Kuat tekan maksimum mencapai 60,29 MPa setelah dirawat selama 24 jam pada suhu 120°C dan pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 3 hari.

2.3.4 Granulasi

Granulasi merupakan pembentukan partikel-partikel besar dengan mekanisme pengikatan tertentu. Bisajugadiartikan granulasi adalah proses pembuatan partikel-partikel kecil membentuk padatan yang lebih besar atau agregat permanen melalui penggumpalan massa, sehingga dapat dibuat granul yang lebih homogen dan seragam, massajenis, ukuransertabentuk partikel. Adapun fungsi granulasi adalah untuk memadatkan bahan-bahan penyusun/ serbuk, menyediakan campuran seragam yang tidak memisah, mengurangi debu, dan memperbaiki penampakan butiran/tablet.

Terdapat dua tipe granulasi, yaitu granulasi basah dan granulasi kering. Granulasi basah merupakan metode yang dilakukan dengan cara membasahi massa bahan penyusun/ serbuk menggunakan larutan pengikat sampai terdapat tingkat kebasahan tertentu, lalu di granulasi. Oleh karena itu, pada metode ini diperlukan zat pengikat maupun pelubrikan lainnya. Salah satu keuntungan menggunakan granulasi basah adalah dapat meningkatkan kohesifitas dan kempresibilitas serbuk dengan penambahan

bahan pengikat menjadi material baru yang lebih padat. Sedangkan kerugian menggunakan tipe granulasi basah adalah membutuhkan tempat yang luas, biaya yang tinggi, alat dan waktu yang banyak. Adapun granulasi kering merupakan metode yang dilakukan dengan cara membuat granul secara mekanis tanpa bantuan pengikat basah atau pelarut pengikat. Keuntungan menggunakan granulasi kering adalah tahap proses yang lebih sedikit sehingga tidak terlalu lama pengerjaannya. Sedangkan kekurangan tipe granulasi kering adalah memerlukan mesin khusus yang mampu menekan massa bahan penyusun/serbuk pada tekanan tinggi sehingga menjadi tablet besar yang tidak berbentuk.

2.4 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu yang terkait dengan agregat buatan dan geopolimer berbahan dasar fly ash adalah sebagai berikut :

1. Damayanti, Ekaputri, dan Triwulan (2007) dalam penelitiannya yang berjudul “Analisa Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Dengan Aktivator Sodium Hidroksida Molaritas 8M dan 10M” membuat beton geopolimer dengan komposisi 75% agregat dan 25% binder (fly ash + pencampur). Sedangkan bindernya itu sendiri menggunakan komposisi 74% fly ash dan 26% pencampur. Pencampur yang digunakan merupakan larutan alkali aktivator, di mana di dalam penelitiannya menggunakan larutan NaOH 8M dan 10M serta Na_2SiO_3 (Sodium Silikat). Perbandingan massa antara Sodium Silikat (Na_2SiO_3) dan Sodium Hidroksida (NaOH) dimulai dari 0.5 – 2.5. Hasil penelitiannya menyimpulkan bahwa terdapat perbedaan antara kuat tekan binder dengan kuat tekan betonnya. Ada yang lebih besar dan ada pula yang lebih kecil kuat tekannya. Untuk beton yang menggunakan molaritas 8M dengan perbandingan massa alkali aktivator 0.5, 1, dan 2.5 memiliki kuat tekan umur 28 hari yang lebih kecil dari kuat tekan binder. Sementara di sisi lain beton 8M dengan perbandingan massa 1.5 dan 2 memiliki kuat tekan yang lebih besar dari kuat tekan bindernya. Kuat tekan tertinggi sebesar 48.59 Mpa dicapai oleh beton molaritas 10M pada umur 28 hari dengan perbandingan massa alkali aktivator 1.5. Sedangkan kuat tekan binder pada umumnya sebesar 25 Mpa.

Perbedaan dengan penelitian ini adalah :

- Benda uji yang akan dibuat dalam penelitian ini berbentuk Spherical Shape (bentuk agregat buatan yang hampir bulat sempurna).
- Pembuatan agregat buatan dengan menggunakan alat granulasi sehingga didapat butiran dengan ukuran yang lebih beragam.
- Tipe curing yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah steam curing, yaitu perawatan agregat dengan mesin kukus dengan suhu tertentu selama 24 jam.
- Persyaratan teknis yang dipakai menggunakan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3.

2. Arbianto, Tavio, Raka (2015) dalam penelitiannya yang berjudul “Artificial Lightweight Aggregate Berbahan Dasar Fly Ash dengan Metode Cold Bonded”, melakukan penelitian dengan membuat butiran agregat buatan dengan menggunakan alat granulasi. Bahan-bahan untuk membuat agregat ringan buatanya dengan mencampurkan semen, fly ash, dan kapur. Metode cold bonded dengan media air dilakukan agar semua bahan ini dapat tergranulasi dengan baik. Adapun rasio water/ powder yang digunakan agar terbentuk granular dengan baik adalah sekitar 0.15-0.31. Curing/ perawatan pada ALWA dengan tipe moist curing, di mana hal ini dilakukan dengan cara menaruh ALWA di dalam pan, kemudian dibungkus dengan karung goni yang basah. Fungsi pan pada tipe curing ini bertujuan agar ALWA tidak berkontak langsung dengan karung goni yang basah karena ALWA yang baru dibuat masih akan larut jika terkena air. Hasil penelitian didapatkan bahwa berat jenis ALWA ini berkisar antara 1.48 – 1.79 atau sekitar 35% lebih ringan dari agregat kasar alami (batu pecah). Nilai absorbtion dari ALWA ini cukup besar antara 11.8% - 28.8%. Nilai ini cukup besar jika dibandingkan dengan nilai absorpsi batu pecah, yaitu sekitar 1% - 5%. Mix design optimum untuk pembuatan ALWA ini didapat 70% fly ash dan 30% kapur.

Perbedaan dengan penelitian ini adalah :

- Metode bonding yang dipakai dengan menggunakan alkali aktivator, di mana terdiri dari NaOH (Sodium Hidroksida) dan Na₂SiO₃ (Sodium Silikat) dengan perbandingan massa tertentu.
- Perbandingan fly ash : alkali aktivator yang digunakan adalah 74% : 26%.
- Tipe curing yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah steam curing, yaitu perawatan agregat dengan mesin kukus dengan suhu tertentu selama 24 jam.
- Persyaratan teknis yang dipakai menggunakan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan potensi material fly ash yang cukup melimpah dengan cara membuat agregat buatan sebagai pengganti agregat alami batu pecah. Agregat buatan berbahan dasar fly ash ini selanjutnya akan diuji berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3.

Secara garis besar rancangan penelitian ini terdiri dari studi literatur,, identifikasi awal mengenai kondisi fly ash (sumber dan jenis/ klas), pengumpulan data, uji laboratorium untuk mengetahui karakteristik material fly ash, pembuatan pasta geopolimer dan benda uji serta pengujiannya.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi masukan penyelenggara jalan di Provinsi Jawa Timur dalam hal penggunaan agregat buatan sebagai bahan perkerasan jalan khususnya perkerasan lentur/ flexible pavement.

3.2 Tahapan Penelitian

Penelitian ini terdiri dari 4 (empat) tahap penelitian : tahap persiapan, tahap pengumpulan data, tahap analisa data, dan tahap akhir.

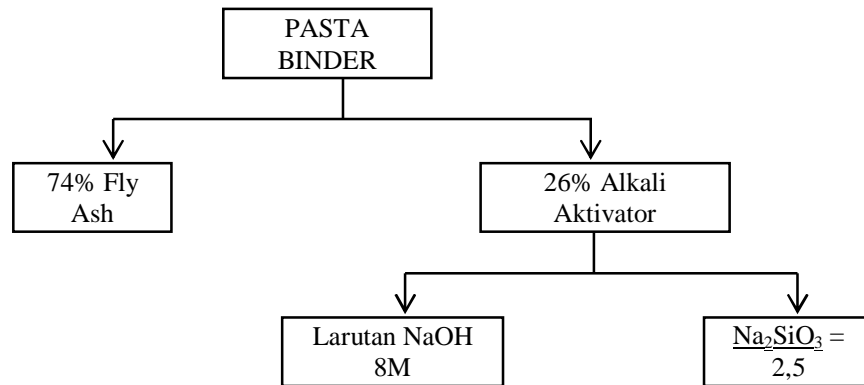
3.2.1 Tahap Persiapan

Tahap ini merupakan tahap penentuan arah penelitian, pengujian tahap ini dilakukan melalui seminar proposal tesis. Tahap persiapan meliputi : latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, studi pustaka, identifikasi awal, dan penyusunan metode penelitian.

3.2.2 Tahap Pembuatan Benda Uji

A. Mix Design Binder Geopolimer

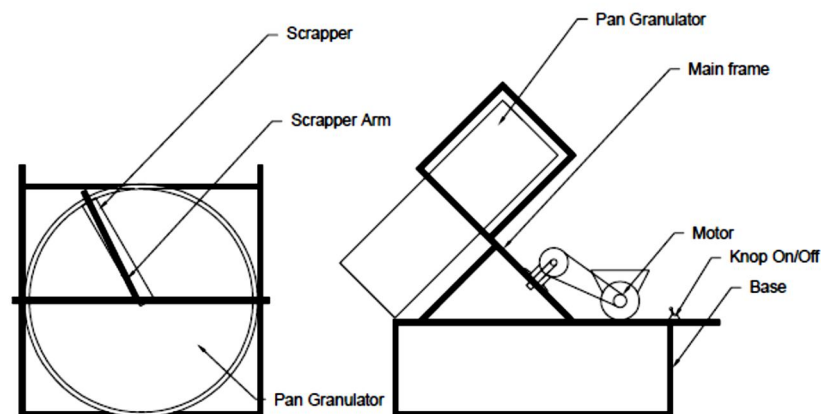
Dalam penelitian ini, komposisi fly ash : alkali aktivator yang digunakan adalah 74% : 26%, di mana perbandingan massa alkali aktivatornya adalah 2,5.



Gambar 3.1. Diagram Alir Mix Design Pasta Binder Geopolimer

B. Pembuatan Agregat Buatan Geopolimer

Setelah mix design pasta binder geopolimer dibuat, langkah selanjutnya adalah membuat agregat buatan dengan menggunakan mesin granulator. Mesin granulator ini terdiri dari bagian utama yang berupa pan granulator dengan kemiringan 40° yang bisa berputar karena digerakkan dengan mesin listrik. Kecepatan putar pan granulator ini berkisar 26 putaran per menit dengan diameter pan 120 cm dan berbobot sekitar 200-250 kg.

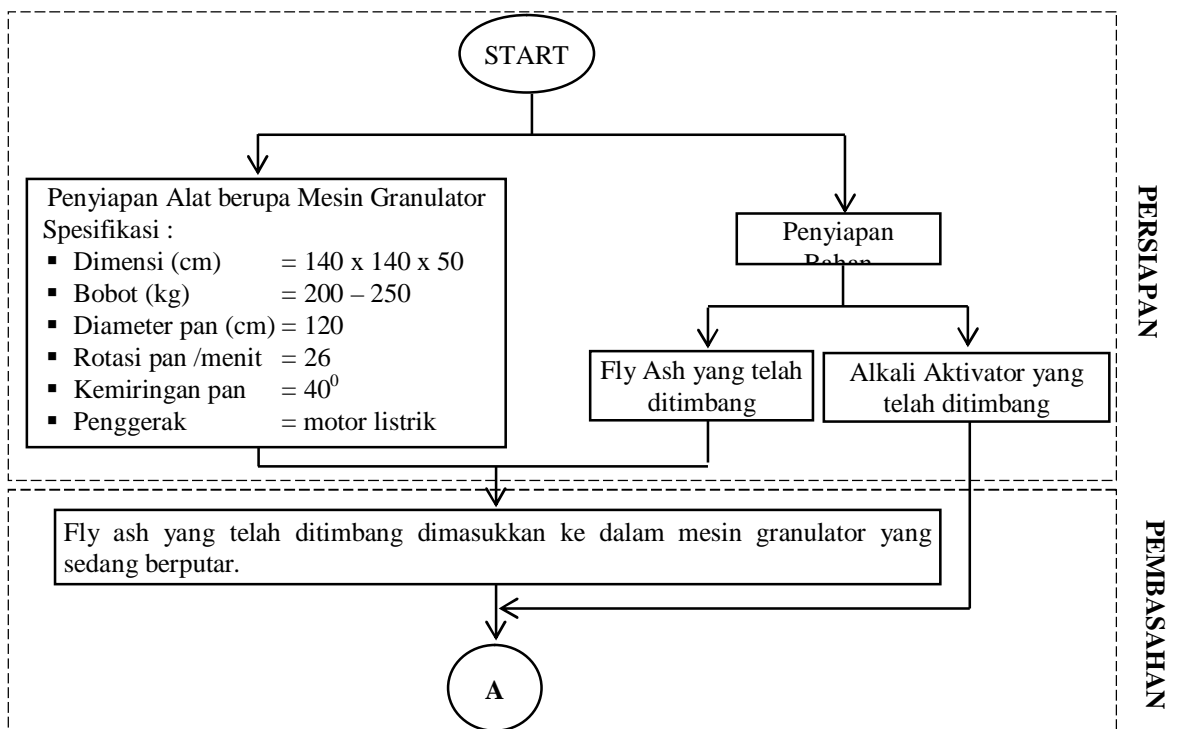


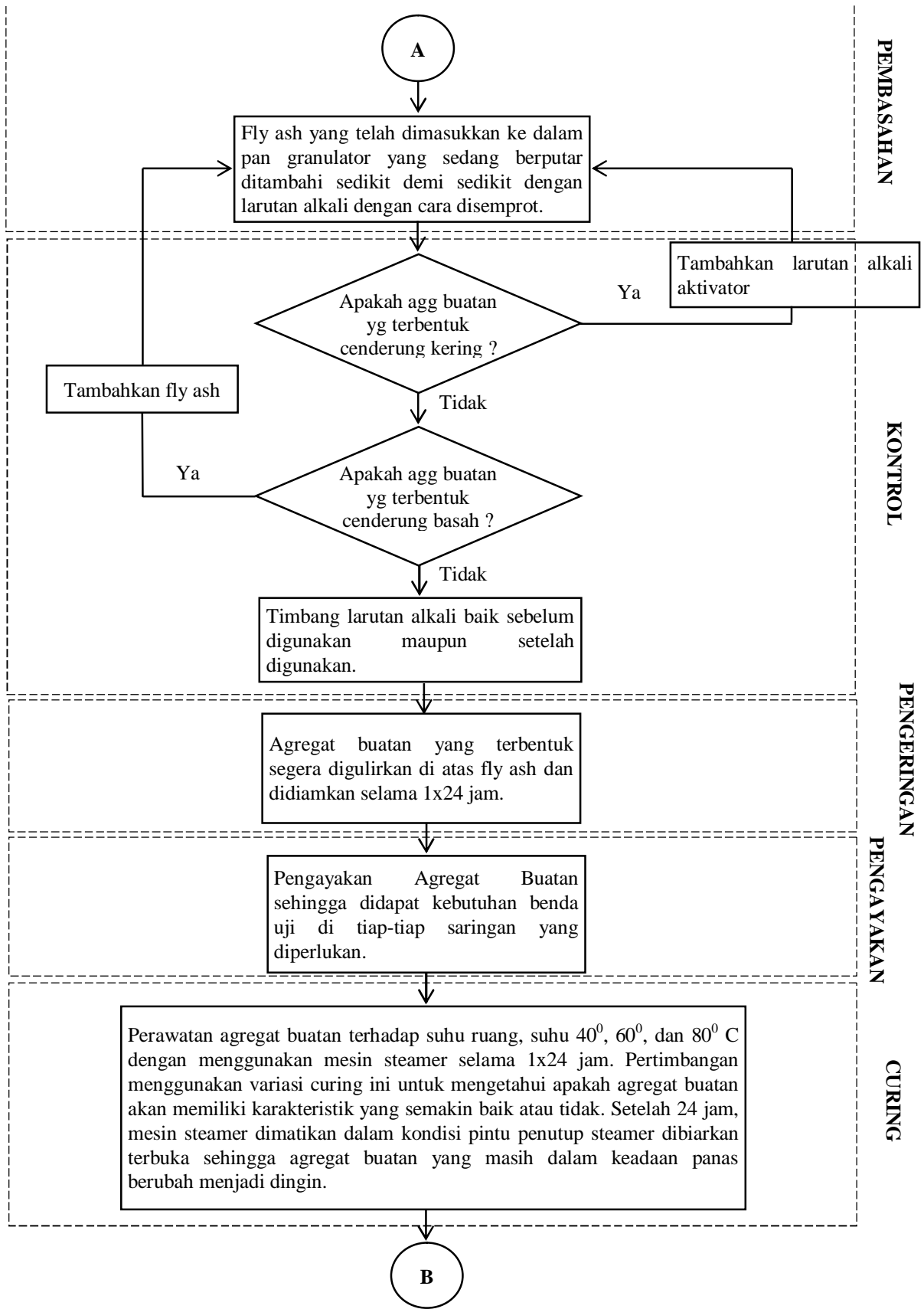
Gambar 3.2. Bagian-bagian Mesin Granulator

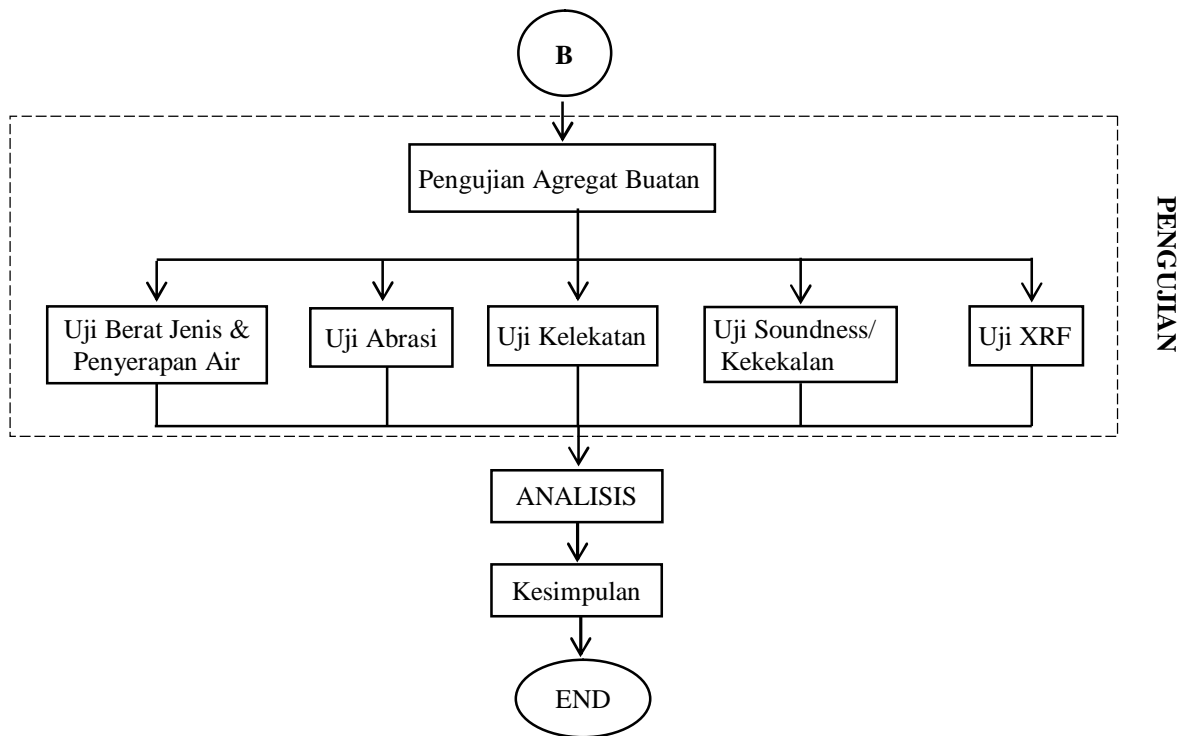
Pembuatan agregat buatan diawali dengan penimbangan fly ash maupun alkali aktivatornya. Setelah semua bahan siap, pertama kali yang dimasukkan ke dalam pan granulator yang sedang berputar adalah fly ashnya. Harus diperhatikan bahwa fly ash yang dimasukkan ke dalam pan granulator masih dalam keadaan kering sama sekali. Setelah beberapa saat, alkali aktivator dimasukkan secara perlahan-lahan dengan cara disemprot. Penyemprotan ini harus benar-benar mengenai fly ashnya, sehingga agregat buatan segera terbentuk.

Agregat buatan yang baru terbentuk segera diletakkan di dalam nampan besar yang kemudian digulirkan bersama fly ash dalam jumlah yang cukup untuk mengurangi tingkat kelekatan agregat buatan sebagai akibat dari reaksi larutan alkali aktivatornya. Selanjutnya agregat buatan dikeringkan dengan cara didiamkan selama 1x24 jam pada suhu ruang, di mana tahap berikutnya adalah pengayaan agregat buatan sesuai kebutuhan berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3. Kemudian agregat buatan siap untuk dilakukan perawatan, baik pada suhu ruang maupun dengan menggunakan mesin steam curing pada suhu 40⁰, 60⁰, dan 80⁰C.

Secara umum garis besar pembuatan agregat buatan terdiri dari tujuh tahapan, yaitu persiapan, pembasahan, kontrol, pengeringan, pengayaan, perawatan, dan pengujian.







Gambar 3.3. Diagram Alir Pembuatan Agregat Buatan

3.2.3 Tahap Pengumpulan Data

A. Data Sekunder

Data sekunder diperoleh berdasarkan data dari penelitian terdahulu dan beberapa data dari instansi terkait seperti Dinas Pekerjaan Umum Bina Marga Provinsi Jawa Timur.

B. Data Primer

Data primer yang digunakan dalam penelitian ini adalah data laboratorium dari material fly ash yang akan dijadikan sebagai agregat buatan. Data ini berupa karakteristik material fly ash dan karakteristik agregat buatan sesuai pengujian Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3.

Adapun data primer penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data Karakteristik Fly Ash dan Agregat Buatan yang akan diuji

| No. | Karakteristik | Metode Pengujian |
|------------|--|------------------|
| I. | Fly Ash | |
| 1. | X-Ray Fluorescence (XRF) | |
| II. | Agregat buatan | |
| 1. | Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan Natrium dan Magnesium Sulfat | SNI 3407 : 2008 |
| 2. | Abrasi dengan mesin Los Angeles | SNI 2417 : 2008 |
| 3. | Kelekatan agregat terhadap aspal | SNI 2439 : 2011 |
| 4. | Berat Jenis | SNI 1969 : 2008 |
| 5. | Penyerapan Air | SNI 1969 : 2008 |

Sumber : Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3.

Adapun pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) dilakukan di Laboratorium Sucofindo, sedangkan pengujian agregat buatan dilakukan di Laboratorium Dinas Pekerjaan Umum Bina Marga Provinsi Jawa Timur.

3.2.4 Tahap Analisis Data

A. Analisis Material Agregat buatan

1. Fly Ash

Fly Ash yang digunakan dalam penelitian ini adalah fly ash dari PT. Petrokimia Gresik. Namun sebelum fly ash ini digunakan, terlebih dahulu dilakukan uji X-Ray Fluorescence (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia dan menentukan tipe dari fly ash tersebut.

2. Alkalin Aktivator

Adapun jenis aktivator yang akan digunakan yaitu Sodium Silikat (Na_2SiO_3) dan Sodium Hidroksida (NaOH). Kedua jenis aktivator yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari toko bahan kimia Jasarendra Jayawisesa. NaOH ini berupa serbuk dan akan dilarutkan dengan menggunakan

aquades sehingga menjadi larutan NaOH. Larutan Sodium Hidroksida (NaOH) yang digunakan adalah Larutan NaOH 8 M.

Rumus yang digunakan dalam pembuatan larutan NaOH 8M sebagai berikut :

$$n = V \times M \quad (3.1)$$

Keterangan :

n = jumlah mol zat terlarut (mol)

M = kemolaran larutan (mol/liter)

V = volume larutan (liter)

$$\text{Massa NaOH} = n \text{ mol} \times M_r \quad (3.2)$$

Keterangan :

n mol = jumlah mol zat terlarut (mol)

M_r = massa relative atom (gram/mol)

Langkah-langkah pembuatan larutan NaOH 8M :

1. Menghitung kebutuhan NaOH yang akan digunakan

$$\begin{aligned} n &= V \times M \\ &= 1 \text{ liter} \times 8 \text{ (mol/liter)} \\ &= 8 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa NaOH} &= n \text{ mol} \times M_r \\ &= 8 \text{ mol} \times 40 \text{ (gram/mol)} \\ &= 320 \text{ gram} \end{aligned}$$

2. Menimbang NaOH sebanyak 320 gram.
3. Memasukkan NaOH ke dalam labu ukur.
4. Menambahkan aquades ke dalam labu ukur sampai volumenya 1 liter.
5. Mengaduk larutan tersebut, dalam proses pengadukan harus menggunakan sarung tangan karena larutan NaOH akan menimbulkan rasa gatal jika terkena kulit.
6. Mendinginkan larutan tersebut hingga suhu larutan tersebut sesuai dengan suhu ruangan.

7. Menutup rapat larutan tersebut dengan menggunakan plastik agar tidak terganggu oleh gas atau zat dari luar yang tidak diinginkan.

B. Analisis Agregat buatan

1. Kebutuhan benda uji

Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 terdapat tujuh jenis uji untuk agregat kasar. Ketujuh uji tersebut adalah uji kekekalan, abrasi, kelekatan, butir pecah/ angularitas, partikel pipih lonjong, material lolos ayakan No. 200, berat jenis dan penyerapan air. Namun demikian, terdapat tiga jenis uji yang tidak dilakukan karena hal-hal sebagai berikut :

- Agregat buatan ini berbentuk Spherical Shape (bentuk agregat buatan yang hampir bulat sempurna), sehingga usaha-usaha untuk membentuk butir pecah/ angularitas dan pipih lonjong ini relatif lebih mudah dilakukan.
- Agregat buatan ini relatif bersih, sehingga bisa dipastikan material lolos ayakan No. 200 kurang dari 2%.

Berdasarkan penjelasan di atas, maka pengujian untuk butir pecah/ angularitas, pengujian untuk partikel pipih dan lonjong, serta pengujian untuk material lolos ayakan No. 200 tidak dilakukan.

Selanjutnya sebelum agregat buatan ini diuji berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3, maka harus diketahui dengan pasti kebutuhan agregat buatan yang akan dibuat.

Tabel 3.2 Rincian Kebutuhan Benda Uji

| No. | Ukuran Saringan | JENIS UJI (gram) | | | |
|-----|-----------------|------------------|--------|-----------|------------------------------|
| | | Kekekalan | Abrasi | Kelekatan | Berat Jenis & Penyerapan Air |
| 1. | 3" (76,2 mm) | - | - | - | - |
| 2. | 2.5" (63,5 mm) | - | - | - | - |
| 3. | 2" (50,8 mm) | - | - | - | - |
| 4. | 1.5" (37,5mm) | - | - | - | - |
| 5. | 1" (25 mm) | - | - | - | - |
| 6. | ¾" (19,1 mm) | - | - | - | - |

Sambungan Tabel 3.2 Rincian Kebutuhan Benda Uji

| No. | Ukuran Saringan | JENIS UJI (gram) | | | |
|------------------|-----------------|------------------|--------|-----------|------------------------------|
| | | Kekekalan | Abrasi | Kelekatan | Berat Jenis & Penyerapan Air |
| 7. | ½" (12,5 mm) | 670 | 2.500 | - | 3.000 |
| 8. | 3/8" (9,5 mm) | 330 | 2.500 | - | - |
| 9. | ¼" (6,3 mm) | - | - | 100 | - |
| 10. | No. 4 (4,75 mm) | 300 | - | - | - |
| Jumlah Kebutuhan | | 1.300 | 5.000 | 100 | 3.000 |
| TOTAL KEBUTUHAN | | 9.400 | | | |

Besarnya kebutuhan 9.400 gram agregat buatan hanya untuk satu variasi suhu perawatan. Apabila dibuat empat variasi suhu perawatan dengan dua benda uji di setiap variasinya, maka diperkirakan kebutuhan benda uji adalah sebagai berikut :

$$= 9.400 \times 4 \times 2$$

$$= 75.200 \text{ gram}$$

$$\approx 76 \text{ kg}$$

Jadi besarnya kebutuhan agregat buatan adalah 76 kg.

2. Setelah benda uji dibuat sesuai dengan kebutuhan di tiap-tiap nomer saringan, maka benda uji didiamkan dalam suhu ruangan selama ± 24 jam sebelum dilakukan perawatan. Variasi suhu curing/ perawatan dilakukan dalam empat varian suhu, yaitu suhu ruang ($\pm 27 - 34^{\circ}\text{C}$), dan 40°C , 60°C , serta 80°C dengan menggunakan mesin steam curing.

3. Melakukan uji terhadap agregat buatan. Uji ini dibatasi pada 4 kriteria, yaitu kekekalan, abrasi, kelekatan, berat jenis, dan penyerapan air agregat buatan. Karena belum adanya standar yang berlaku baik untuk pembuatan maupun pengujian agregat buatan, maka standar yang digunakan dalam penelitian ini disesuaikan dengan persyaratan teknis yang tercantum dalam Spesifikasi Umum

Bina Marga 2010 rev 3 tentang persyaratan agregat sebagai bahan perkerasan jalan khususnya perkerasan lentur.

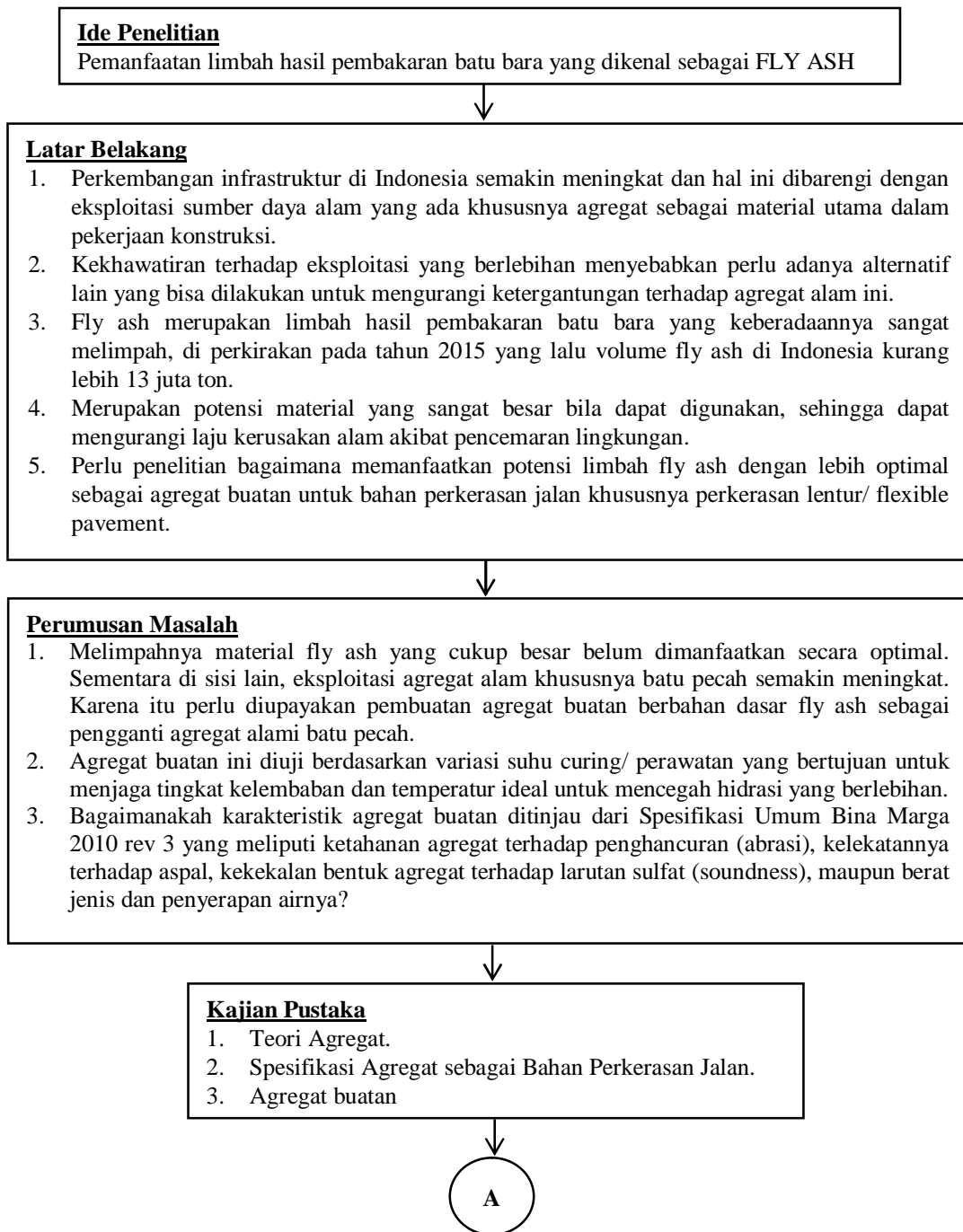
4. Menganalisa mutu agregat buatan berbahan dasar fly ash ini.

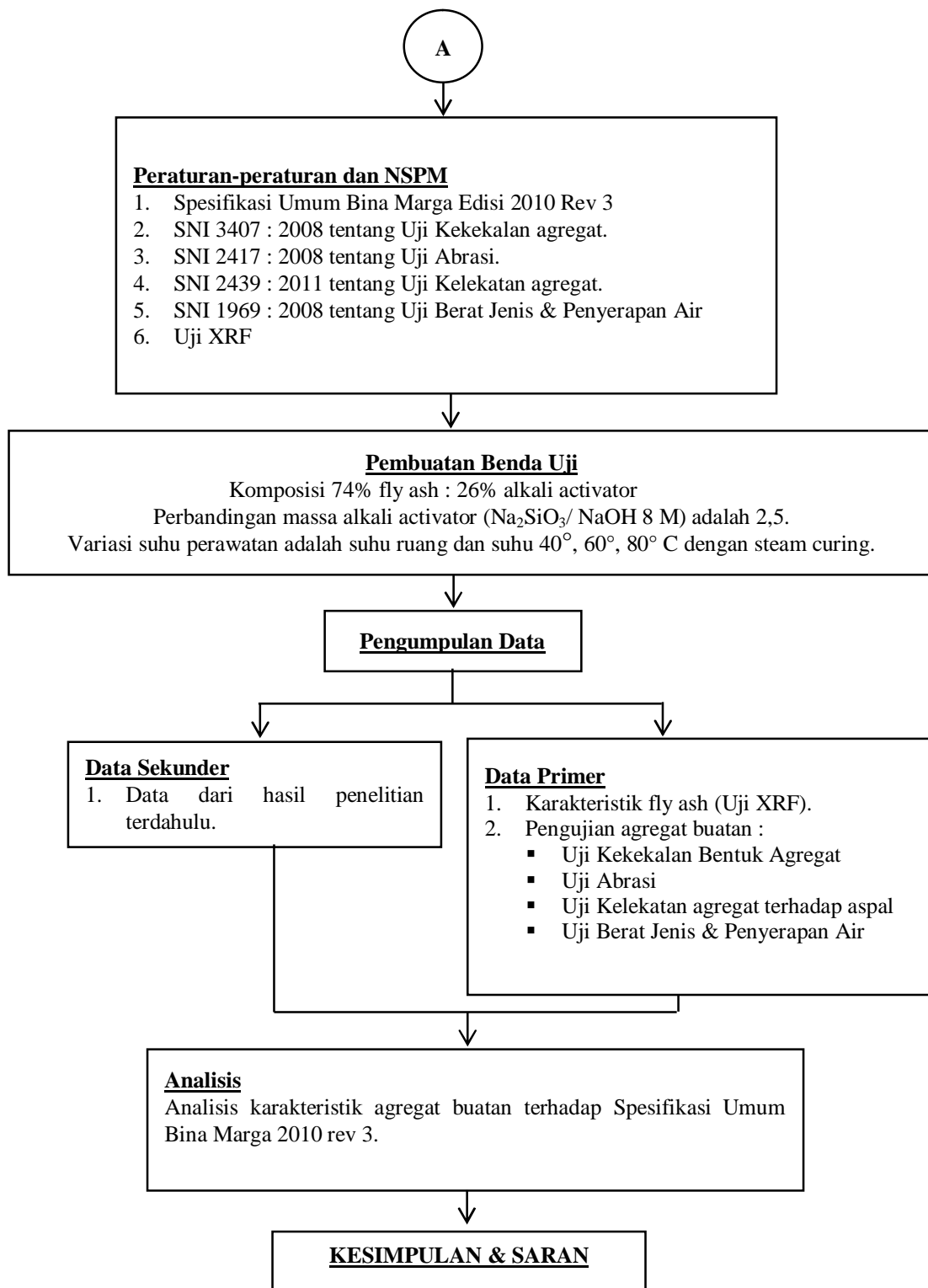
3.2.5 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa mutu didapatkan campuran yang optimal, yaitu campuran dengan kinerja yang memenuhi spesifikasi.

3.3 Kerangka Penelitian

Alur pemikiran dan gambaran dari tahapan penelitian secara keseluruhan dapat dilihat pada kerangka penelitian dalam bentuk bagan alir seperti terlihat pada gambar 3.4 di bawah ini.





Gambar 3.4 Bagan Alir Penelitian

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini membahas hasil yang diperoleh dari setiap tes yang dilakukan pada material fly ash maupun agregat buatan. Masing-masing data akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik.

4.1 Analisa Metode Granulasi

Pembuatan agregat buatan ini menggunakan mesin pan granulator. Mesin pan granulasi yang digunakan pada penelitian ini berdiameter ± 120 cm, kecepatan putar 26 rpm dengan sudut kemiringan pan adalah 40° . Secara umum, mesin ini merupakan mesin untuk membuat butiran-butiran seperti pupuk, pakan ikan, bahkan beras imitasi sekalipun. Berhubung tidak ada prosedur teknis untuk pembuatan agregat buatan dengan mesin pan granulator ini, maka perlu dilakukan trial dan error sehingga didapat metode granulasi yang tepat yang akan menghasilkan agregat buatan yang baik.

Melalui trial dan error didapatkan metode granulasi sebagai berikut :

- Unsur-unsur kimia yang terkandung dalam fly ash sangat mudah bereaksi dengan larutan alkali aktivator. Karena itu, pada saat memasukkan material fly ash ke dalam mesin pan granulator tidak boleh berlebihan supaya tidak banyak material yang terbang karena melekat di dalam alat granulator. Dari hasil trial, didapatkan fly ash murni yang dimasukkan ke dalam mesin pan granulator berkisar 1,5 – 1,7 kg agar tidak banyak material yang terbang.
- Dalam 1 x trial akan dihasilkan sekitar 1,8 – 2,0 kg agregat buatan yang terdiri dari :
 - agregat berdiameter $\pm 3/4''$ (19,1 mm) seberat 0 - 0,073 kg;
 - agregat berdiameter $\pm 1/2''$ (12,5 mm) seberat 0,50 - 0,54 kg;
 - agregat berdiameter $\pm 3/8''$ (9,5 mm) seberat 0,50 - 0,51 kg;
 - agregat berdiameter $\pm 4,75$ mm seberat 0,5 - 0,62 kg;
 - agregat berdiameter lebih kecil dari 4,75 mm seberat 0,20 - 0,24 kg.

- Dalam 1x trial dengan 1,5 – 1,7 kg fly ash, larutan alkali ditambahkan sedikit demi sedikit ke dalam mesin pan granulator sehingga terbentuk agregat buatan. Dari hasil trial, perbandingan antara alkali dengan fly ash agar terbentuk agregat buatan yang baik berkisar antara 0,20 – 0,30. Apabila kurang dari 0,20 agregat buatan cenderung kering dan retak. Sedangkan apabila lebih dari 0,30 agregat buatan cenderung basah sehingga lebih susah terbentuk karena lengket satu dengan yang lainnya. Harus diperhatikan pula mengenai setting time dari agregat buatan yang berkisar 8 – 13 menit hingga agregat buatan mengeras.
- Apabila 1 kali trial sudah dilakukan dan agregat buatan sudah didapat, maka sesegera mungkin pan granulator harus dibersihkan. Hal ini dimaksudkan untuk membersihkan material-material yang masih menempel di pan granulator sebagai akibat reaksi kimiawi antara fly ash dengan larutan aktivatornya. Sehingga hal ini tidak mempengaruhi takaran larutan alkali aktivator selanjutnya apabila fly ash yang masih baru ditambahkan.



Gambar 4.1 Mesin Pan Granulator



Gambar 4.2 Mesin Steam Curing

4.2 Pengujian Material Fly Ash

Penelitian ini menggunakan fly ash dari PT. Petrokimia Gresik. Sebelum digunakan, material ini diuji terlebih dahulu untuk mengetahui komposisi kimia yang terkandung di dalamnya. Pengujian XRF (X-Ray Fluorescence) yang dilakukan oleh Sucofindo mendapatkan komposisi kimia sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Fly Ash (% massa)

| Senyawa | % massa |
|--------------------------------|---------|
| SiO ₂ | 39,15 |
| Al ₂ O ₃ | 18,19 |
| Fe ₂ O ₃ | 12,26 |
| TiO ₂ | 0,79 |
| CaO | 15,99 |
| MgO | 6,70 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,01 |
| K ₂ O | 1,33 |
| Na ₂ O | 1,61 |
| SO ₃ | 1,12 |
| Mn ₂ O ₃ | 0,17 |

Dari hasil analisa pengujian XRF, Fly Ash yang digunakan diklasifikasikan sebagai fly ash kelas C. Berdasarkan ASTM C 618, Fly Ash kelas C mengandung :

$$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 69,6\%$$

50% < 69,6% < 70%, termasuk fly ash kelas C



Gambar 4.3 Pengambilan fly ash di PT. Petrokimia Gresik



Gambar 4.4 Penimbangan fly ash sesuai kebutuhan

4.3 Pengujian Agregat buatan

4.3.1 Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Air (SNI 1969 - 2008)

Pemeriksaan berat jenis ini diperlukan untuk perencanaan campuran agregat dengan aspal. Perencanaan campuran ini dilakukan dalam perbandingan berat karena lebih teliti. Di samping itu, faktor penyerapan air oleh agregat juga mengindikasikan apakah agregat itu layak atau tidak sebagai bahan perkerasan jalan.



Gambar 4.5 Persiapan agregat buatan untuk penimbangan dalam air



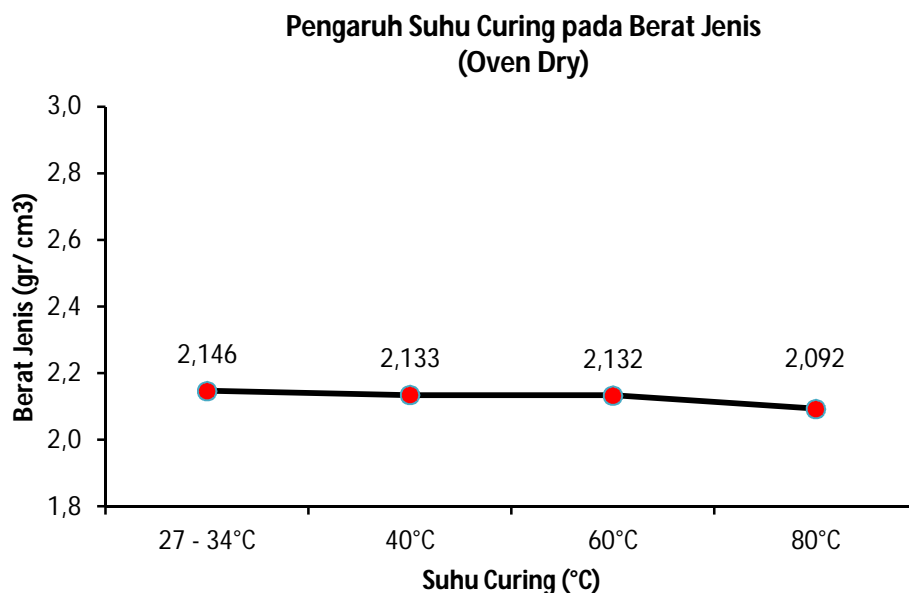
Gambar 4.6 Pengeringan agregat buatan kondisi SSD

Tabel 4.2 Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat buatan di Berbagai Variasi Suhu Curing

| SUHU CURING | | SUHU RUANG | | | 40 ⁰ C | | 60 ⁰ C | | 80 ⁰ C | |
|---|--------------------------------|------------|-------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|--|
| Nomer Contoh | | I | II | I | II | I | II | I | II | |
| Berat Contoh Kering (Gram) | A | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | |
| Berat Contoh Kering Permukaan (Gram) | B | 3.303 | 3.315 | 3.335 | 3.348 | 3.340 | 3.352 | 3.350 | 3.371 | |
| Berat Contoh Dalam Air (Gram) | C | 1.879 | 1.942 | 1.934 | 1.936 | 1.940 | 1.938 | 1.915 | 1.938 | |
| Berat Jenis Bulk (OD) | A | 2,107 | 2,185 | 2,141 | 2,125 | 2,143 | 2,122 | 2,091 | 2,094 | |
| | B - C | 2,146 | | 2,133 | | 2,132 | | 2,092 | | |
| Berat Jenis Bulk (Atas Dasar Kering Permukaan/ SSD) | B | 2,320 | 2,414 | 2,380 | 2,371 | 2,386 | 2,371 | 2,334 | 2,352 | |
| | B - C | 2,367 | | 2,376 | | 2,378 | | 2,343 | | |
| Berat Jenis Semu/ APP | A | 2,676 | 2,836 | 2,814 | 2,820 | 2,830 | 2,825 | 2,765 | 2,825 | |
| | A - C | 2,756 | | 2,817 | | 2,828 | | 2,795 | | |
| Penyerapan Air | $\frac{B - A}{A} \times 100\%$ | 10,10 | 10,50 | 11,17 | 11,60 | 11,33 | 11,73 | 11,67 | 12,37 | |
| | A | 10,30 | | 11,38 | | 11,53 | | 12,02 | | |

Dari Tabel 4.2 di atas terlihat bahwa berat jenis agregat buatan(atas dasar kering oven) berkisar 2,092 - 2,146. Sedangkan besarnya angka penyerapan air cenderung besar sehingga tidak memenuhi syarat Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 yaitu maksimal 3%. Besarnya angka penyerapan air agregat buatan ini mengindikasikan bahwa rongga-rongga dalam agregat buatan ini cenderung besar. Hal ini memang merupakan salah satu kekurangan dari pembentukan agregat buatan dengan sistem granulasi, di mana agregat/ butiran yang terjadi mempunyai rongga yang besar.

Berdasarkan Tabel 4.2 dapat dibuat grafik hubungan antara pengaruh suhu curing dengan berat jenis.

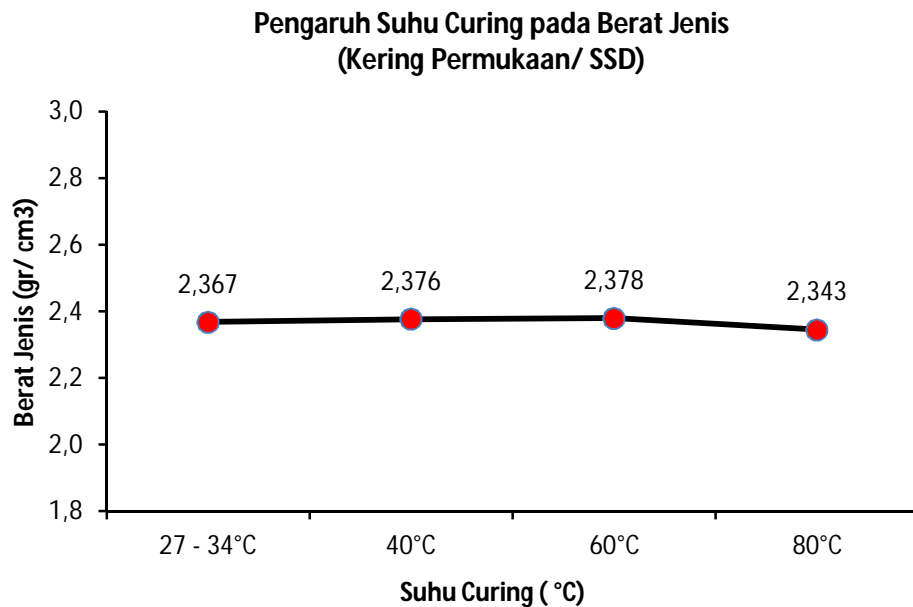


Gambar 4.7 Grafik Pengaruh Suhu Curing terhadap Berat Jenis (Oven Dry)

Berat jenis kering oven merupakan perbandingan berat dalam keadaan agregat sudah kering oven dengan unit volume dari agregat (volume pori yang dapat diresapi air dan volume pori yang tidak dapat diresapi air).

Dari gambar 4.7 di atas ternyata peningkatan suhu curing membuat berat jenis agregat buatan semakin menurun. Dalam beberapa kasus, dengan berat jenis yang kecil akan lebih menguntungkan apabila agregat buatan ini difungsikan sebagai struktur atas sehingga dapat mengurangi beban mati struktur. Namun karena agregat buatan ini mau dipakai sebagai bahan campuran aspal, di mana

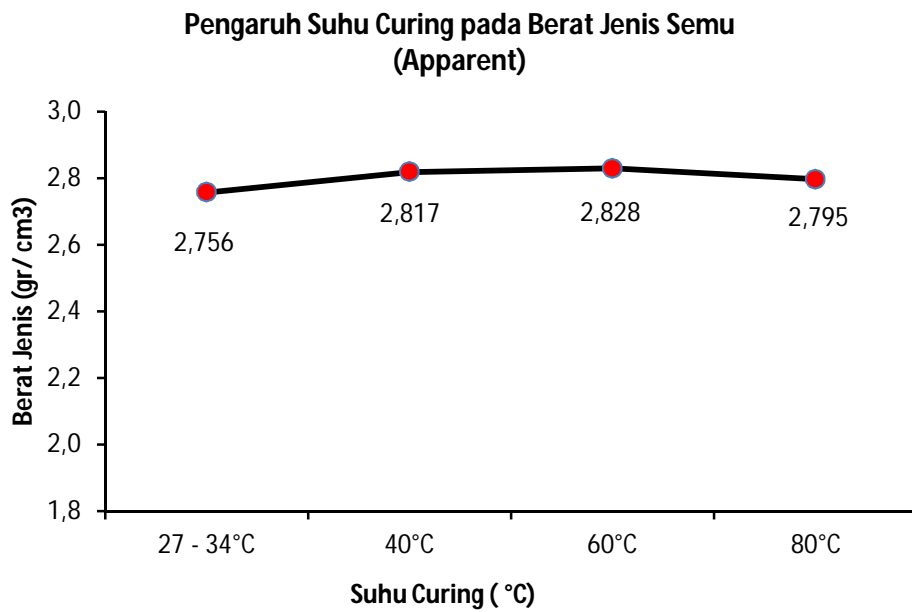
agregat dengan berat jenis yang kecil akan mempunyai volume yang besar, sehingga dengan berat yang sama akan membutuhkan jumlah aspal yang lebih banyak pula.



Gambar 4.8 Grafik Pengaruh Suhu Curing terhadap Berat Jenis (SSD)

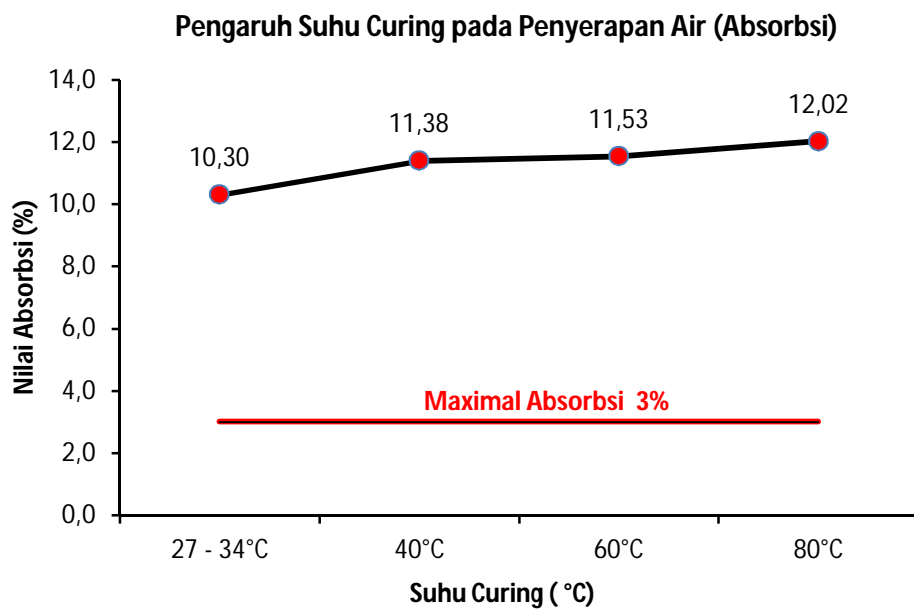
Berat jenis kering permukaan (*Surface Saturated Dry/ SSD*) diperlukan karena pada kenyataannya aspal yang digunakan secara normal hanya akan meresapi sebagian dari pori yang dapat diresapi oleh air.

Dari gambar 4.8 di atas terlihat bahwa peningkatan suhu curing tidak berpengaruh banyak terhadap besarnya nilai berat jenis SSD ini. Besarnya nilai berat jenis SSD ini masih di kisaran 2,3.



Gambar 4.9 Grafik Pengaruh Suhu Curing terhadap Berat Jenis (Apparent)

Dari gambar 4.9 terlihat bahwa pada agregat dengan suhu curing 60°C mempunyai nilai berat jenis (apparent) yang paling tinggi yaitu sebesar 2,828.



Gambar 4.10 Grafik Pengaruh Suhu Curing terhadap Penyerapan Air

Dari gambar 4.10 terlihat bahwa peningkatan suhu curing akan membuat nilai absorpsi agregat buatan semakin besar. Semua nilai absorpsi agregat buatan tidak memenuhi syarat Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3, yaitu maksimal 3%. Hal ini dikarenakan pembuatan agregat buatan dengan cara granulasi merupakan pembuatan agregat dengan mengikat partikel kecil dari fly ash menjadi padatan yang lebih besar, sehingga banyak sekali rongga yang terbentuk. Rongga-rongga inilah yang nantinya akan terisi oleh air ataupun udara.

Apabila agregat buatan ini tetap digunakan sebagai bahan perkerasan jalan khususnya perkerasan lentur, tentunya harus diperhatikan tentang kadar aspalnya. Dengan penyerapan air oleh agregat buatan yang tinggi menyebabkan film aspal menjadi lebih tipis. Dengan kadar aspal yang sama, maka film aspal yang tipis ini membutuhkan aspal yang lebih banyak agar aspal dapat menyelimuti permukaan agregat. Penggunaan aspal dalam jumlah yang banyak tentu membawa implikasi mengenai besarnya biaya yang harus dikeluarkan. Padahal aspal merupakan komponen utama dalam perkerasan lentur. Dengan demikian biaya yang digunakanpun akan semakin bertambah besar.

4.3.2 Pemeriksaan Keausan Agregat (SNI 2417 : 2008)

Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengetahui ketahanan agregat terhadap pengaruh beban mekanis sebagai akibat dari pengaruh pemadatan ataupun beban lalu lintas. Ketahanan terhadap agregat dapat diketahui dari nilai keausan yang merupakan perbandingan antara berat bahan aus dengan bahan semula dalam persen. SNI 2417 : 2008 ini merupakan revisi dari SNI 03-2417-1991 tentang Metode Pengujian Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles. Adapun perubahannya adalah dengan ditambahkan metode pengujian untuk material yang mempunyai kekerasan homogen. Pengujian dilakukan dengan 100 putaran dan hasil pengujian antara 100 putaran dengan 500 putaran tidak boleh lebih besar dari 0,20 yang tertahan di atas saringan No.12 (1,70 mm) tanpa pencucian. Namun dalam penelitian ini langsung dilakukan pengujian dengan 500 putaran saja.



Gambar 4.11 Mesin Abrasi Los Angeles



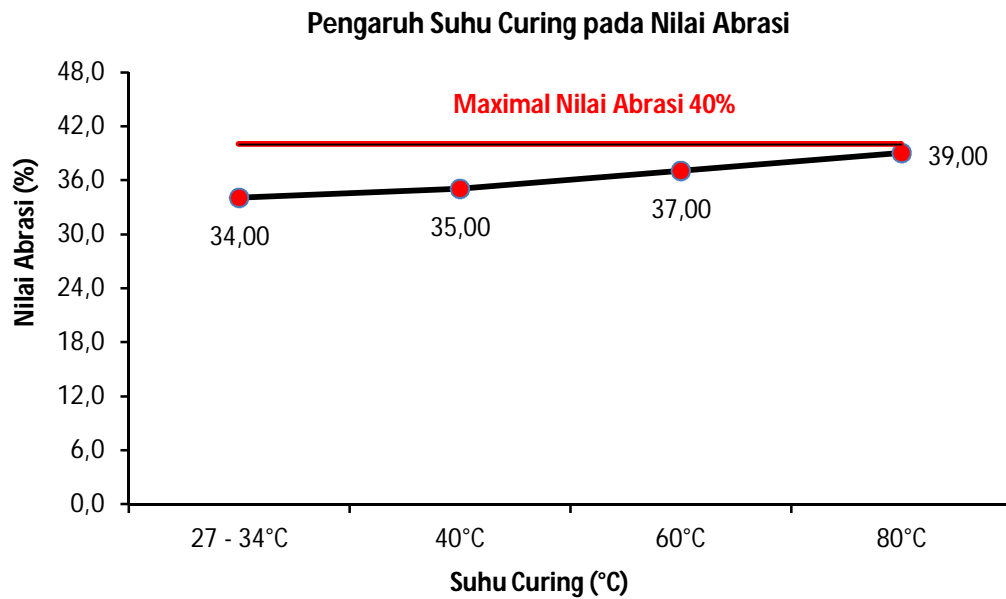
Gambar 4.12 Penimbangan agregat tertahan 3/8'' untuk uji abrasi



Gambar 4.13 Hasil Uji Abrasi

Tabel 4.3 Pemeriksaan Keausan Agregat dengan mesin Abrasi Los Angeles

| SUHU CURING | | SUHU RUANG | | 40°C | | 60°C | | 80°C | |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|
| Gradasi Pemeriksaan | | Jml Putaran 500 put | | Jml Putaran 500 put | | Jml Putaran 500 put | | Jml Putaran 500 put | |
| Saringan | | I II | | I II | | I II | | I II | |
| Lolos | Tertahan | Berat | Berat | Berat | Berat | Berat | Berat | Berat | Berat |
| 76,20 mm (3") | 63,50 mm (2,5") | | | | | | | | |
| 63,5 mm (2,5") | 50,8 mm (2") | | | | | | | | |
| 50,8 mm (2") | 36,1 mm (1,5") | | | | | | | | |
| 36,1 mm (1,5") | 25,4 mm (1") | | | | | | | | |
| 25,4 mm (1") | 19,1 mm (3/4") | | | | | | | | |
| 19,1 mm (3/4") | 12,7 mm (1/2") | 2.500,00 | 2.500,00 | 2.500,00 | 2.500,00 | 2.500,00 | 2.500,00 | 2.500,00 | 2.500,00 |
| 12,7 mm (1/2") | 9,52 mm (3/8") | 2.500,00 | 2.500,00 | 2.500,00 | 2.500,00 | 2.500,00 | 2.500,00 | 2.500,00 | 2.500,00 |
| 9,52 mm (3/8") | 6,35 mm (1/4") | | | | | | | | |
| 6,35 mm (1/4") | 4,75 mm (No. 4) | | | | | | | | |
| 4,75 mm (No. 4) | 2,36 mm (No. 8) | | | | | | | | |
| Jumlah Berat | (A) gram | 5.000,00 | 5.000,00 | 5.000,00 | 5.000,00 | 5.000,00 | 5.000,00 | 5.000,00 | 5.000,00 |
| Berat Tertahan Saringan No. 12 | (B) gram | 3.358,80 | 3.280,80 | 3.245,20 | 3.293,60 | 3.201,00 | 3.058,00 | 3.045,00 | 3.098,00 |
| Keausan | $\frac{A - B}{A} \times 100\%$ | 32,82 | 34,38 | 35,10 | 34,13 | 35,98 | 38,84 | 39,10 | 38,04 |
| Keausan rata-rata | | 34,00 % | | 35,00 % | | 37,00 % | | 39,00 % | |



Gambar 4.14 Grafik Pengaruh Suhu Curing terhadap Nilai Abrasi

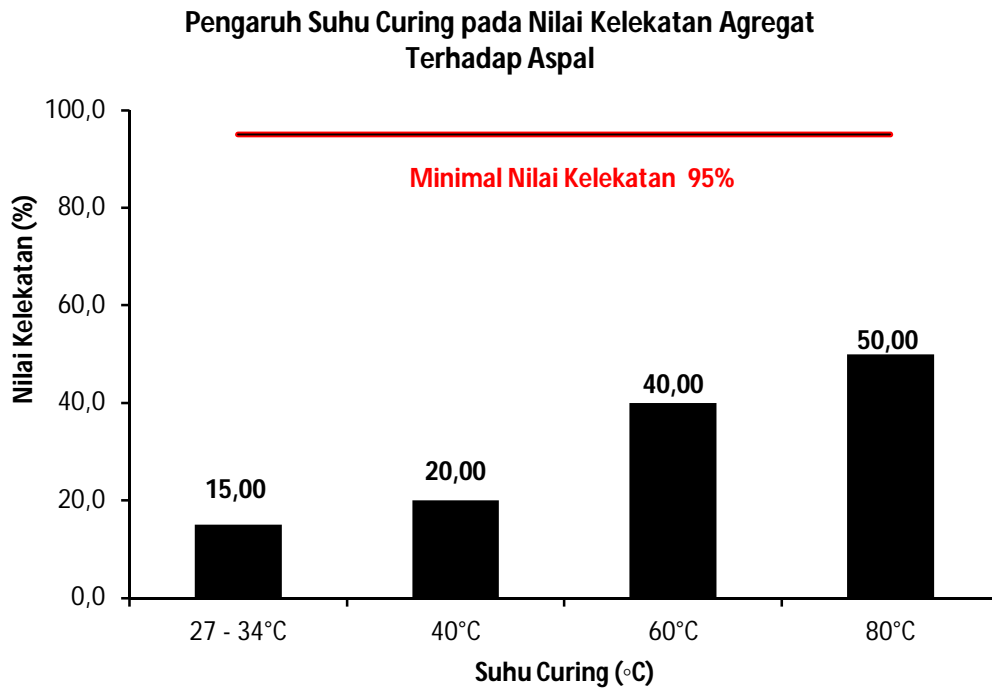
Berdasarkan gambar 4.14 terlihat bahwa peningkatan suhu curing akan membuat nilai abrasi agregat buatan menjadi lebih tinggi. Agregat buatan dengan suhu curing 80⁰C mempunyai nilai abrasi yang paling tinggi jika dibandingkan agregat buatan lainnya. Dengan nilai yang paling tinggi ini, menjadikan agregat buatan dengan suhu curing 80⁰C mempunyai tingkat kekerasan yang paling rendah jika dibandingkan dengan yang lainnya.

4.3.3 Pemeriksaan Kelekatan Agregat (SNI 2439 : 2011)

Pemeriksaan ini bertujuan untuk menentukan kelekatan agregat buatan terhadap aspal. Nilai kelekatan agregat terhadap aspal dinyatakan dalam prosentase luas permukaan batuan yang tertutup aspal terhadap keseluruhan luas permukaan.

Tabel 4.4 Pemeriksaan Kelekatan Agregat Buatan Terhadap Aspal

| SUHU CURING | SUHU RUANG | | 40°C | | 60°C | | 80°C | |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| PEMBACAAN | Pembacaan Waktu | Pembacaan Suhu | Pembacaan Waktu | Pembacaan Suhu | Pembacaan Waktu | Pembacaan Suhu | Pembacaan Waktu | Pembacaan Suhu |
| Persiapan Bahan | | | | | | | | |
| 1. Pemanasan pada suhu $140 \pm 5^\circ \text{C}$ | Mulai Jam : 12.00 | | 11.30 | | 11.45 | | 11.10 | |
| | Selesai Jam : 13.00 | 143°C | 12.30 | 142°C | 12.45 | 143°C | 12.10 | 141°C |
| 2. Pemanasan Aspal | | 140°C | | 141°C | | 140°C | | 140°C |
| 3. Penambahan Air Suling pada suhu ruang | Mulai Jam : 15.00 | | 14.30 | | 14.45 | | 14.10 | |
| | Selesai Jam : 09.00 | | 08.30 | | 08.45 | | 08.10 | |
| Pelekatan pada suhu ruang 16 - 18 jam | Hasil Pengamatan | Hasil Pengamatan | Hasil Pengamatan | Hasil Pengamatan | Hasil Pengamatan | Hasil Pengamatan | Hasil Pengamatan | Hasil Pengamatan |
| | % Dari Permukaan Contoh | % Dari Permukaan Contoh | % Dari Permukaan Contoh | % Dari Permukaan Contoh | % Dari Permukaan Contoh | % Dari Permukaan Contoh | % Dari Permukaan Contoh | % Dari Permukaan Contoh |
| Pengamatan I | 13 | 19 | 38 | 47 | | | | |
| Pengamatan II | 17 | 21 | 42 | 53 | | | | |
| Rata - Rata | 15,00 | 20,00 | 40,00 | 50,00 | | | | |



Gambar 4.15 Grafik Pengaruh Suhu Curing terhadap Nilai Kelekatan

Berdasarkan hasil uji kelekatan agregat buatan terhadap aspal, peningkatan suhu curing membuat nilai kelekatan agregat buatan terhadap aspal semakin membaik. Secara visual kelekatan agregat buatan terhadap aspal yang paling baik terdapat pada suhu curing 80⁰C. Namun demikian, nilai kelekatan ini masih dibawah persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 yaitu minimal 95%. Hal ini tentunya sedikit kontradiktif terhadap nilai penyerapan air pada curing 80⁰C yang cenderung cukup besar, di mana dengan penyerapan air yang besar membuat agregat lebih mudah menyerap aspal. Penyebab nilai kelekatan yang masih rendah ini dikarenakan oleh sifat agregat buatan itu sendiri yang cenderung licin karena unsur alkali silika di dalamnya dan dengan rongga yang semakin banyak mengakibatkan lepasnya ikatan antara agregat buatan dengan aspal menjadi mudah.



Gambar 4.16 Agregat buatan yang telah diselimuti dengan aspal



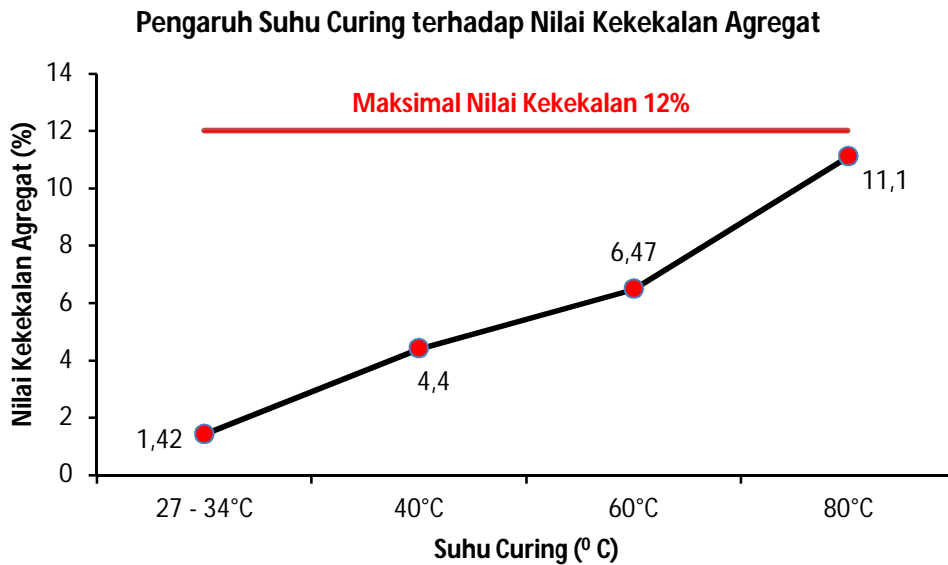
Gambar 4.17 Aspal pada agregat buatan yang mengelupas

4.3.4 Pemeriksaan Kekakuan Agregat (SNI 3407 : 2008)

Pemeriksaan ini bertujuan untuk menentukan daya tahan agregat terhadap pengaruh kimiawi akibat perendaman dengan larutan Natrium Sulfat atau Magnesium Sulfat. Dalam pengujian ini menggunakan larutan Na_2SO_4 / Natrium Sulfat sebagai larutan perendamannya. Agregat yang tidak kuat akan hancur sebagai akibat proses perendaman dengan larutan dan pengeringan.

Tabel 4.5 Pemeriksaan Kekakuan Bentuk Agregat dengan Larutan Natrium Sulfat (Na_2SO_4)

| Ukuran Saringan Agg. Kasar | Berat Benda Uji Awal All Curing (gr) | Berat Benda Uji Tertahan Ayakan (gr) | | | | Index Kekakuan Bentuk Agregat (%) | | | | |
|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|------|
| | | Suhu Ruang | Suhu 40°C | Suhu 60°C | Suhu 80°C | Suhu Ruang | Suhu 40°C | Suhu 60°C | Suhu 80°C | |
| # 4 - 3/8" | 300 | 300 | 296,8 | 291,2 | 286,9 | 281,4 | 1,42 | 4,4 | 6,47 | 11,1 |
| 3/8" - 1/2" | 330 | 1000 | 996,5 | 985,3 | 979 | 951 | | | | |
| 1/2" - 3/4" | 670 | | | | | | | | | |
| 3/4" - 1" | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | |
| 1" - 1,5" | 0 | | | | | | | | | |
| JUMLAH | 1300 | 1300 | 1293,3 | 1276,5 | 1265,9 | 1232,4 | | | | |



Gambar 4.18 Pengaruh Suhu Curing terhadap Nilai Kekekalan Agregat

Berdasarkan gambar 4.18 terlihat bahwa peningkatan suhu curing akan membuat nilai kekekalan agregat buatan menjadi lebih tinggi. Peningkatan ini karena rongga-rongga dalam agregat buatan dengan curing suhu 80°C banyak terisi oleh kristalisasi garam yang ada di dalam larutan Natrium Sulfat (Na_2SO_4). Semakin besar rongga-rongga dalam agregat buatan, maka kristalisasi garam ini menjadi bertambah banyak yang mengakibatkan proses pelapukan menjadi lebih mudah. Namun demikian, secara umum agregat buatan ini masih tetap memenuhi syarat kekekalan agregat sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 yaitu maksimal 12%. Berdasarkan hasil uji yang telah dilakukan, maka agregat buatan ini menunjukkan agregat yang tahan lama/ awet, tidak menurun kualitasnya akibat pengaruh cuaca terutama pada penggunaan agregat di permukaan yang tidak terlindung.



Gambar 4.19 Proses pembuatan larutan Na_2SO_4



Gambar 4.20 Perendaman agregat buatan dengan larutan



Gambar 4.21 Agregat buatan yang telah dikeringkan setelah perendaman



Gambar 4.22 Pengayakan agregat buatan setelah proses perendaman

4.4 Perhitungan Biaya

Perhitungan biaya ini merupakan biaya per kg agregat buatan jika dibandingkan dengan agregat alami batu pecah. Perhitungan biaya agregat buatan terdiri dari biaya pembuatan agregat, pengujian, dan transportasi.

4.4.1 Perhitungan Biaya Pembuatan Benda Uji

Perhitungan biaya pembuatan benda uji agregat buatan ini terdiri dari biaya upah, alat, dan bahan.

Tabel 4.6 Perhitungan Biaya Pembuatan Benda Uji Agregat Buatan

| No. | Uraian | Satuan | Kuantitas | Biaya Satuan (Rp.) | Harga (Rp.) | Total (Rp.) |
|-----------------|----------------------------------|--------|-----------|--------------------|-------------|-------------------|
| A. Upah | | | | | | |
| 1. | Operator | Jam | 0,2530 | 8.500,00 | 2.150,50 | 2.150,50 |
| | | | | | | |
| B. Alat | | | | | | |
| 1. | Pan Granulator | Jam | 0,1250 | 15.000,00 | 1.875,00 | 2.004,03 |
| 2. | Alat bantu | Ls | 1,0000 | 129,03 | 129,03 | |
| C. Bahan | | | | | | |
| 1 | Fly Ash | Kg | 1,0770 | 1.000,00 | 1.077,00 | 4.196,04 |
| 2. | Na ₂ SiO ₃ | Kg | 0,2700 | 10.000,00 | 2.700,00 | |
| 3. | NaOH | Kg | 0,0346 | 10.000,00 | 345,60 | |
| 4. | Aquades | Kg | 0,0734 | 1.000,00 | 73,44 | |
| D | SUB TOTAL | | | | | 8.350,57 |
| E | KEBUTUHAN BENDA UJI 76 KG | | | | | |
| F | TOTAL = (8.350,57 X 76) | | | | | 634.643,32 |

Jadi untuk membuat kebutuhan benda uji agregat buatan diperlukan biaya sekitar Rp. 634.643,32 untuk 76 kg.

4.4.2 Perhitungan Biaya Pengujian Agregat Buatan

Pengujian agregat buatan ini berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 di mana tiap sampel agregat buatan yang diuji berjumlah dua buah. Pengujian dilakukan di Laboratorium DPU Bina Marga Propinsi Jawa Timur. Selain itu, dilakukan pengujian XRF (*X-Ray Fluorescence*) di Sucofindo, XRD (*X-Ray Diffractometer*) dan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) yang dilakukan di Laboratorium Fisika Universitas Negeri Makassar.

Tabel 4.7 Perhitungan Biaya Pengujian Agregat Buatan

| No. | Uraian | Satuan | Biaya Satuan (Rp.) | Kuantitas | Harga (Rp.) | Total (Rp.) |
|--------------------------|--------------------|---------|--------------------|-----------|--------------|----------------------|
| A. Fly Ash | | | | | | |
| 1. | XRF | Per Uji | 1.500.000,00 | 1,0000 | 1.500.000,00 | |
| 2. | XRD | Per Uji | 300.000,00 | 1,0000 | 300.000,00 | |
| | | | | | | 1.800.000,00 |
| B. Agregat Buatan | | | | | | |
| 1. | BJ & Peny. Air | Per Uji | 106.000,00 | 8,0000 | 848.000,00 | |
| 2. | Soundness | Per Uji | 267.000,00 | 8,0000 | 2.136.000,00 | |
| 3. | Abrasi Los Angeles | Per Uji | 149.000,00 | 8,0000 | 1.192.000,00 | |
| 4. | Kelekatan agregat | Per Uji | 36.500,00 | 8,0000 | 292.000,00 | |
| 5. | XRD | Per Uji | 300.000,00 | 4,0000 | 1.200.000,00 | |
| 6. | SEM | Per Uji | 800.000,00 | 4,0000 | 3.200.000,00 | |
| | | | | | | 8.868.000,00 |
| C | TOTAL | | | | | 10.668.000,00 |

Jadi pengujian yang dilakukan baik untuk fly ash maupun agregat buatan diperlukan biaya sekitar Rp. 10.668.000,00 untuk 76 kg.

4.4.3 Perhitungan Biaya Transportasi

Biaya transportasi ini merupakan biaya untuk mengangkut 1 ton fly ash dari PT. Petrokimia Gresik ke ITS Surabaya. Pengangkutan dengan menggunakan kendaraan pick up.

Tabel 4.8 Perhitungan Biaya Transportasi

| No. | Uraian | Satuan | Biaya Satuan (Rp.) | Kuantitas | Harga (Rp.) | Total (Rp.) |
|-----------|------------------------------------|--------|--------------------|-----------|-------------|-------------------|
| A. | Transportasi | | | | | |
| 1 | Fly ash dari PT. Petrokimia Gresik | Ls | 350.000,00 | 1,0000 | 350.000,00 | 350.000,00 |
| B | TOTAL | | | | | 350.000,00 |

Biaya transportasi untuk mengangkut 1 ton fly ash sebesar Rp. 350.000,00. Sedangkan untuk pembuatan benda uji dibutuhkan 100 kg fly ash, sehingga besar biaya pengangkutan adalah

$$= \text{Rp. } 350.000,00 \times 100 / 1000$$

$$= \text{Rp. } 35.000,00$$

4.4.4 Perhitungan Biaya Agregat Buatan per Kg

Berdasarkan tabel 4.6, tabel 4.7, dan tabel 4.8 di atas, maka besarnya total biaya agregat buatan yang diperlukan adalah

$$= \text{Rp. } 634.643,32 + \text{Rp. } 10.668.000,00 + \text{Rp. } 35.000,00$$

$$= \text{Rp. } 11.337.643,32 \approx \text{Rp. } 11.340.000,00$$

Kebutuhan total benda uji agregat buatan adalah 76 kg. Dengan demikian, besarnya biaya agregat buatan per kg nya adalah

$$= \text{Rp. } 11.340.000,00 / 76 \text{ kg}$$

$$= \text{Rp. } 149.210,53 / \text{kg}$$

$$\approx \text{Rp. } 150.000 / \text{kg}$$

Untuk mendapatkan data harga agregat alami batu pecah, di dalam tesis ini mengacu kepada Harga Satuan Pekerjaan Propinsi Jawa Timur tahun 2016. Dan agregat alami ini mempunyai berat jenis 2,7 ton/m³.

Tabel 4.9 Harga Agregat Alami Batu Pecah

| NO. | JENIS BAHAN | SATUAN | HARGA SATUAN (Rp.) | KETERANGAN |
|-----|------------------|--------|--------------------|---|
| 1. | Batu pecah 0,5-1 | M3 | 220.000,00 | Berat jenis agregat alami adalah 2,7 t/m ³ |
| 2. | Batu pecah 1-2 | M3 | 225.000,00 | |
| 3. | Batu pecah 2-3 | M3 | 185.000,00 | |

Sumber : Harga Satuan Pekerjaan Propinsi Jawa Timur Tahun 2016

Untuk mendapatkan harga per kg agregat alami batu pecah, maka

- Batu pecah 0,5-1
 $= \text{Rp. } 220.000,00 / 2700 \text{ kg} = \text{Rp. } 81,48 / \text{kg}$
 $\approx \text{Rp. } 82,00 / \text{kg}$
- Batu pecah 1-2
 $= \text{Rp. } 225.000 / 2700 \text{ kg} = \text{Rp. } 83,33 / \text{kg}$
 $\approx \text{Rp. } 84,00 / \text{kg}$
- Batu pecah 2-3
 $= \text{Rp. } 185.000 / 2700 \text{ kg} = \text{Rp. } 68,51 / \text{kg}$
 $\approx \text{Rp. } 69,00 / \text{kg}$

4.4.5 Perbandingan Biaya Agregat Buatan dan Agregat Alami Batu Pecah

Perbandingan biaya antara agregat buatan dan agregat alami batu pecah ini dilakukan untuk mengetahui disparitas harga antar keduanya. Hal ini penting dilakukan mengingat banyak sekali usaha-usaha yang harus dilakukan agar agregat buatan ini bisa diterima oleh semua pihak.

Tabel 4.10 Perbandingan Harga Agregat Buatan dan Agregat Alami

| NO. | UKURAN AGREGAT (CM) | HARGA PER KG | | SELISIH |
|-----|---------------------------|-------------------|------------------|------------|
| | | AGREGAT BUATAN | AGREGAT ALAMI | |
| 1. | 0,5 - 1 | 150.000,00 | 82,00 | 149.918,00 |
| 2. | 1 - 2 | 150.000,00 | 84,00 | 149.916,00 |
| 3. | 2 - 3 | 150.000,00 | 69,00 | 149.931,00 |

Berdasarkan tabel 4.10 di atas, harga agregat buatan kurang bernilai ekonomis untuk dapat menggantikan peran agregat alami. Dengan disparitas harga yang terlampau jauh berkisar Rp. 149.000,00 menjadikan agregat alami masih menjadi satu-satunya pilihan sebagai material penyusun bahan perkerasan jalan. Namun demikian, agregat buatan ini merupakan salah satu solusi yang bisa dikembangkan lebih jauh untuk mengurangi dampak lingkungan akibat volume fly ash yang cukup melimpah di Indonesia.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisa data yang telah dilakukan terhadap agregat buatan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan trial dan error yang dilakukan selama proses granulasi, didapatkan perbandingan alkali aktivator dengan fly ash yang digunakan untuk mendapatkan agregat buatan yang baik berkisar antara 0,20 – 0,30. Hal yang dapat terjadi apabila kurang dari 0,20 menjadikan agregat buatan cenderung kering dan mudah rapuh. Sebaliknya apabila lebih dari 0,30 membuat agregat sulit tergranulasi dengan baik karena lengket satu dengan yang lainnya.
2. Peningkatan suhu curing membuat nilai berat jenis (kering oven) semakin menurun. Besarnya penurunan berat jenis akibat steam curing berkisar $\pm 2,5\%$. Nilai berat jenis terendah didapat pada agregat buatan dengan suhu curing 80°C yaitu sebesar 2,092.
3. Semua nilai penyerapan air oleh agregat buatan ini tidak ada yang memenuhi syarat Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 yaitu maksimum 3%. Nilai penyerapan air terendah terdapat pada agregat buatan dengan suhu curing pada suhu ruang ($\pm 27 - 34^{\circ}\text{C}$).
4. Melalui tes abrasi, peningkatan suhu curing ternyata membuat nilai abrasi agregat buatan semakin besar. Walaupun demikian, semua nilai abrasi agregat buatan masih memenuhi syarat Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 yaitu masih di bawah 40%.
5. Nilai kelekatan agregat buatan terhadap aspal di setiap variasi suhu curing tidak memenuhi syarat Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3. Semua nilai kelekatan masih dibawah 95%. Walaupun demikian, peningkatan suhu curing membuat kelekatan agregat buatan terhadap aspal semakin membaik (secara visual).

6. Melalui uji kekekalan agregat buatan dengan menggunakan larutan Natrium Sulfat (Na_2SO_4), didapatkan bahwa peningkatan suhu curing akan membuat nilai kekekalan agregat buatan semakin tinggi. Namun demikian, semua nilai kekekalan agregat buatan disetiap variasi suhu curing masih tetap memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 yaitu maksimal 12%. Nilai kekekalan agregat buatan paling kecil didapat pada agregat buatan dengan curing pada suhu ruang, yaitu sebesar 1,42%.
7. Secara umum, berdasarkan hasil uji yang telah dilakukan, agregat buatan dengan curing suhu ruang ($\pm 27 - 34^\circ\text{C}$) memiliki karakteristik yang lebih baik digunakan sebagai agregat buatan jika dibandingkan dengan curing suhu lainnya berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3.
8. Berdasarkan perhitungan biaya yang telah dilakukan, diperkirakan total biaya agregat buatan sebesar Rp. 11.340.000,00 dengan biaya per kg nya sebesar Rp. 150.000,00. Perbandingan harga per kg agregat buatan yang dilakukan terhadap agregat alami batu pecah menunjukkan disparitas harga yang cukup besar yaitu Rp. 149.000,00.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian yang diperoleh, dapat diambil beberapa saran untuk penelitian selanjutnya, antara lain :

1. Berdasarkan nilai penyerapan air oleh agregat buatan yang masih cenderung besar, maka perlu upaya-upaya untuk mengurangi tingginya nilai penyerapan air ini. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan menggulirkan agregat buatan yang sudah jadi ke dalam binder geopolimer (*coating*). Hal ini dimaksudkan untuk meningkatkan kerapatan rongga antar partikel agregat sehingga diharapkan air tidak mudah masuk. Walaupun cara ini bisa jadi masih belum memenuhi syarat Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3 yaitu maksimal 3%, namun setidaknya tingginya penyerapan air oleh agregat dapat dikurangi.

2. Pengujian nilai kelekatan agregat buatan terhadap aspal yang masih dilakukan secara visual masih belum memberikan gambaran yang pasti mengenai seberapa besar penyerapan aspal oleh agregat. Cara lain yang lebih akurat untuk mengukur nilai kelekatan agregat buatan terhadap aspal dengan uji Stabilitas Marshall Sisa. Nilai Stabilitas Marshall Sisa merupakan perbandingan nilai stabilitas campuran yang direndam pada suhu 60⁰C selama 24 jam dengan campuran yang direndam pada suhu 60⁰C selama 1 jam. Melalui nilai Stabilitas Marshall Sisa ini, maka besarnya prosentase kelekatan agregat buatan terhadap aspal dapat diketahui dengan lebih baik.
3. Berdasarkan nilai kelekatan agregat terhadap aspal yang masih rendah, perlu dilakukan upaya lain untuk meningkatkan nilai kelekatan ini. Hal yang bisa dilakukan adalah dengan penambahan *anti stripping agent* (zat aditif anti pengelupasan aspal). Zat aditif ini berfungsi untuk menjaga ikatan atau adhesi antara aspal dengan agregat sehingga menghasilkan ikatan yang kuat di permukaan agregat. Namun penggunaan bahan anti pengelupasan ini dilakukan jika nilai Stabilitas Marshall Sisa campuran beraspal sebelum ditambah bahan anti pengelupasan lebih besar dari yang dipersyaratkan. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 rev 3, besarnya nilai Stabilitas Marshall Sisa ini minimal 90%.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulkadir Kan, Ramazan Demirboga, *A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates*, Journal of materials processing technology 2009 (2009) 2994–3000.
- Agi Arbianto, Tavio, dan I GP Raka (2015), *Artificial Lightweight Aggregate Berbahan Dasar Fly Ash dengan Metode Cold-Bonded*, JURNAL POMITS ITS.
- C.R. Cheeseman, A. Makinde, S. Bethanis, *Properties of lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash*, Resources, Conservation and Recycling 43 (2005) 147–162.
- Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum (2010), *Spesifikasi Umum edisi 2010*, Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Djedjen Achmad dan Hidjan A. G, *Efek Perawatan Terhadap Karakteristik Beton Geopolimer*, POLI-TEKNOLOGI VOL.11 NO.1, JANUARI 2012.
- Djwanto Hardjito (2005), *Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*, Faculty of Engineering and Computing Curtin University Department of Civil Engineering.
- D. Fragoulisa, M.G. Stamatakis, E. Chaniotakisa, G. Columbus, *Characterization of lightweight aggregates produced with clayey diatomite rocks originating from Greece*, Materials Characterization 53 (2004) 307–316.
- Herry Budianto (2009), *Menuju Jalan yang Andal*, Penerbit Cakra Daya Sakti, Surabaya.
- Hua Xu, J.S.J. Van Deventer, *The geopolymerisation of alumino-silicate minerals*, Int. J. Miner. Process. 59 (2000). 247–266.
- Oktavina Damayanti N, Januarti J. Ekaputri, Triwulan, *Analisa Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Dengan Aktivator Sodium Hidroksida Molaritas 8M dan 10M*, Jurnal PONDASI, volume 13 no 2 Desember 2007 ISSN 0853-814X.

- Palomo, M.W. Grutzeckb, M.T. Blancoa, *Alkali-activated fly ashes A cement for the future*, Cement and Concrete Research 29 (1999) 1323–1329.
- Satpute Manesh B., Wakchaure Madhukar R., Patankar Subhash V., *Effect of Duration and Temperature of Curing on Compressive Strength of Geopolymer Concrete*, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), Volume 1, Issue 5, May 2012.
- Silvia Sukirman (1999), *Perkerasan Lentur Jalan Raya*, Penerbit NOVA, Bandung.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan di Kota Purworejo pada tanggal 19 April 1977, merupakan anak kelima dari lima bersaudara. Nama lengkap penulis Sudrajat, dan penulis telah menempuh jenjang pendidikan dasar di SDN Pangengudang Purworejo, pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Purworejo, pendidikan menengah atas di SMAN 1 Purworejo, dan pendidikan Perguruan Tinggi Sarjana Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta.

Kemudian pada tahun 2014, penulis melanjutkan pendidikan jenjang Magister dengan keahlian bidang Manajemen Aset Infrastruktur Jurusan Teknik Sipil FTSP ITS melalui program kerjasama vokasi dengan Kementerian Pekerjaan Umum. Penulis bekerja di Dinas Pekerjaan Umum Bina Marga Propinsi Jawa Timur sejak tahun 2010 dan selama masa studi Magister penulis menjalani cuti belajar.

Untuk melakukan korespondensi dengan penulis, dapat dilakukan melalui email penulis sudrajat0477@gmail.com

Penulis