

TUGAS AKHIR

**STUDI LABORATORIUM PENGARUH PENGGUNAAN
SEMEN PORTLAND TIPE I DAN ABU TERBANG
TERHADAP KUAT TEKAN BETON BUSA**

***LABORATORY STUDY THE EFFECT OF PORTLAND
CEMENT TYPE I AND FLY ASH ON THE COMPRESSIVE
STRENGTH OF FOAMED CONCRETE***

**SITI HUSRIANTI HUSAIN
D111 16 303**



**PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2020**



**KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS HASANUDDIN
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL**

Jl. Poros Malino km. 6 Bontomarannu, 92172, Kab. Gowa, Sulawesi Selatan
☒ <http://civil.unhas.ac.id> ☒ civil@cng.unhas.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar.

Judul Tugas Akhir

**STUDI LABORATORIUM PENGARUH PENGGUNAAN SEMEN PORTLAND
TIPE I DAN ABU TERBANG TERHADAP KUAT TEKAN BETON BUSA**

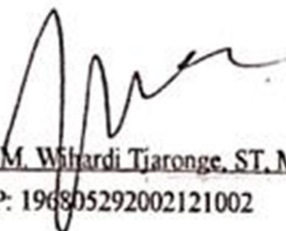
Disusun oleh


**SITI HUSRIANTI HUSAIN
D111 16 303**

Telah diperiksa dan disetujui oleh dosen pembimbing

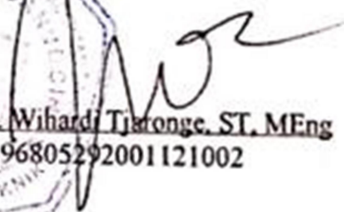
Pembimbing I

Pembimbing II


Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP: 196805292002121002


Dr. Eng. Muhammad Akbar Caronge, ST, M.Eng
NIP: 198604092019043001

Mengetahui,
Ketua Departemen Teknik Sipil


Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP: 196805292001121002



PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Siti Husrianti Husain, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "**Pengaruh Penggunaan Semen Portland Tipe I dan Abu Terbang terhadap Kuat Tekan Beton Busa**", adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun.

Karya ilmiah ini sepenuhnya milik penulis dan semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Gowa, 30 Januari 2020

Yang membuat
pernyataan,

Siti Husrianti Husain
NIM: D111 16 303

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“STUDI LABORATORIUM PENGARUH PENGGUNAAN SEMEN PORTLAND TIPE I DAN ABU TERBANG TERHADAP KUAT TEKAN BETON BUSA”** yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa banyak kendala yang dihadapi dalam penyusunan tugas akhir ini, namun berkat bantuan dari berbagai pihak, maka tugas akhir ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Bapak Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
2. **Bapak Prof. Dr. H. M Wihardi Tjaronge ST., M.Eng.**, selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin sekaligus dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
3. **Bapak Dr. Eng. Muhammad Akbar Caronge ST., M.Eng.**, selaku dosen pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan kepada kami.

4. **Bapak Dr. Eng. A. Arwin Amiruddin, ST., MT.**, selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
5. Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **Husain D., S.I.P.**, dan ibunda **Nanting, S.Pd.**, atas doa, kasih sayang, dan segala dukungan selama ini, baik spritiual maupun material, serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan.
2. Kakak-kakak tercinta **Siti Huspianty Husain, ST.**, **Muh. Husnandar Husain, S.Kom.**, dan **Muh. Hushardi Husain, ST.**, serta adik tercinta **Siti Husnianti Husain** yang selalu memberikan semangat dalam penyelesaiannya tugas akhir ini.
3. **Kak Miswar ST. MT.**, **Kak Hanif ST. MT.**, **Kak Cimo ST. MT.**, **Kak Friez**, dan **Kak Gilbert** selaku rekan-rekan di **Laboratorium Riset Eco Material**, yang senantiasa memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

4. Saudara-saudari **PATRON 2017** yang senantiasa memberikan warna yang sangat begitu indah, dukungan yang tiada henti, semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
5. Sahabat-sahabat tercinta **Halima, Fadly, Mizi, `Erli, Rany, Anse, Mega, Faje, Tatan, Aslam, Fauding, Iyas,** dan **Bowo** yang selalu memberikan bantuan dan semangat dalam penyelesaian tugas akhir ini.
6. **Kama, Rere, Jum, Jordy, Allu, Mia,** dan **Amel** selaku rekan-rekan **KKN Gel. 102 Posko Desa Wollangi, Kecamatan Barebbo , Kabupaten Bone** yang telah menjadi saudara bagi penulis.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu mengharapkan kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

Akhirnya semoga Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan berkat dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, 30 Januari 2020

Penulis

ABSTRAK

Dengan berkembangnya ilmu pengetahuan khususnya di bidang konstruksi, maka material penyusun beton juga mengalami perkembangan. Salah satunya ialah munculnya inovasi beton busa. Beton busa adalah campuran mortar yang ditambahkan dengan cairan busa. Beton busa memiliki berat volume yang lebih ringan dibanding dengan beton normal sehingga beton busa diklasifikasikan sebagai beton ringan. Akan tetapi, beton busa memiliki kuat tekan yang relatif rendah. Untuk itu diperlukan material penyusun beton busa yang bisa meningkatkan kuat tekannya, serta diharapkan memiliki keunggulan lain, seperti lebih ekonomis serta ramah lingkungan. Oleh karena itu, dilakukan penelitian menggunakan semen portland tipe I dan abu terbang.

Tujuan dari penelitian ini ialah untuk mengetahui pengaruh penggunaan semen portland tipe I dan abu terbang terhadap kuat tekan beton busa serta untuk mengetahui hubungan tegangan dan regangan pada uji kuat tekan beton busa dengan menggunakan semen Portland tipe I dan abu terbang.

Penelitian ini menggunakan semen portland tipe I, pasir silika, air, *admixture* tipe F, *foam agent*, dan abu terbang kelas F. Penelitian dilakukan dengan menggunakan dua variasi *mix design*, yaitu dengan dan tanpa abu terbang. Adapun perbandingan antara semen dan abu terbang ialah 70 : 30. Terdapat dua jenis cetakan yang digunakan, yaitu cetakan silinder diameter 10 cm dengan tinggi 20 cm dan kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm. Adapun proses perawatan dilakukan dengan *curing* udara. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 3 hari, 7 hari, dan 28 hari.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh benda uji mengalami peningkatan kuat tekan dari umur 3 hari hingga 28 hari, dimana benda uji yang hanya menggunakan semen portland tipe I mempunyai kuat tekan lebih tinggi dibandingkan dengan kuat tekan benda uji yang menggunakan semen portland tipe I dan abu terbang. Seluruh benda uji juga memperlihatkan hubungan tegangan-regangan material yang getas dan membentuk elastisitas dipengaruhi oleh kuat tekan.

Kata Kunci : *Beton Busa, Semen Portland tipe I, Abu Terbang, Kuat Tekan*

DAFTAR ISI

| | |
|--|----------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| LEMBAR PENGESAHAN | ii |
| PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH | iii |
| KATA PENGANTAR | iv |
| ABSTRAK | vii |
| DAFTAR ISI | viii |
| DAFTAR TABEL | xii |
| DAFTAR GAMBAR | xiv |
| BAB 1. PENDAHULUAN | 1 |
| A. Latar Belakang Masalah | 1 |
| B. Rumusan Masalah | 2 |
| C. Tujuan Penelitian | 3 |
| D. Manfaat penelitian | 3 |
| E. Batasan Masalah | 4 |
| F. Sistematika Penulisan | 5 |
| BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA | 7 |
| A. Penelitian Terdahulu tentang Beton Busa | 7 |
| B. Teori Beton | 9 |
| C. Material Penyusun Beton Busa | 11 |
| C.1. Semen Portland | 11 |
| C.2. Agregat Halus | 31 |
| C.3. Abu Terbang | 32 |

| | |
|---|----|
| C.4. Air | 35 |
| C.5. <i>Foam Agent</i> | 36 |
| C.6. <i>Admixture</i> | 36 |
| D. Sifat Mekanik Beton..... | 37 |
| D.1. <i>Slump</i> | 38 |
| D.2. Berat Volume Beton | 38 |
| D.3. Kekuatan Tekan..... | 39 |
| D.4. Kurva Tegangan Regangan | 41 |
| D.5. Pola Retak dan Kehancuran | 43 |
| BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN | 44 |
| A. Tempat dan Waktu Penelitian | 44 |
| B. Jenis dan Sumber Penelitian | 44 |
| C. Bagan Alir Penelitian | 45 |
| D. Metode/Standar Pemeriksaan Karakteristik Material . | 47 |
| D.1. Semen | 47 |
| D.2. Abu Terbang | 48 |
| D.3. Agregat Halus | 49 |
| D.4. <i>Admixture</i> | 49 |
| E. Analisa Rancangan Campuran (<i>Mix Design</i>) | 50 |
| F. Alat dan Bahan Penelitian | 50 |
| G. Pembuatan Benda Uji | 53 |
| H. Perawatan Benda Uji..... | 55 |
| I. Metode Pengujian <i>Slump</i> | 55 |

| | | |
|-----------------------------------|---|----|
| J. | Pemeriksaan Berat Volume Beton..... | 57 |
| K. | Pengujian Benda Uji | 58 |
| | K.1. Kuat Tekan..... | 59 |
| BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN | | 62 |
| A. | Karakteristik Material | 62 |
| | A.1. Karakteristik Abu Terbang..... | 62 |
| | A.2. Karakteristik Agregat Halus..... | 63 |
| B. | Rancangan Campuran (<i>Mix Design</i>) | 64 |
| C. | Pengujian <i>Slump</i> | 65 |
| D. | Berat Volume Beton | 66 |
| | D.1. Berat Volume Beton Segar | 66 |
| | D.2. Berat Volume Beton Keras..... | 73 |
| E. | Hubungan Tegangan-Regangan Beton Busa..... | 69 |
| | E.1. Umur Pengujian Benda Uji Umur 3 Hari untuk <i>Mix Design I</i> | 69 |
| | E.2. Umur Pengujian Benda Uji Umur 3 Hari untuk <i>Mix Design II</i> | 71 |
| | E.3. Umur Pengujian Benda Uji Umur 7 Hari untuk <i>Mix Design I</i> | 73 |
| | E.4. Umur Pengujian Benda Uji Umur 7 Hari untuk <i>Mix Design II</i> | 76 |
| | E.5. Umur Pengujian Benda Uji Umur 28 Hari untuk <i>Mix Design I</i> | 78 |

| | |
|---|----|
| F.6. Umur Penguian Benda Uji Umur 28 Hari untuk <i>Mix Design II</i> | 80 |
| F. Kuat Tekan Beton Busa..... | 83 |
| G. Rekapitulasi Kuat Tekan Beton Busa | 85 |
| H. Perbandingan kuat tekan beton busa | 87 |
| I. Pola Retak dan Kehancuran..... | 88 |
| BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN..... | 90 |
| A. Kesimpulan..... | 90 |
| B. Saran..... | 90 |
| DAFTAR PUSTAKA | |

DAFTAR TABEL

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabel 1. | Syarat kimia utama | 20 |
| Tabel 2. | Syarat kimia tambahan | 23 |
| Tabel 3. | Syarat fisika utama..... | 23 |
| Tabel 4. | Syarat fisika tambahan..... | 24 |
| Tabel 5. | Standar persyaratan komposisi..... | 26 |
| Tabel 6. | Persyaratan komposisi opsional | 28 |
| Tabel 7. | Persyaratan fisika standar | 28 |
| Tabel 8. | Kebutuhan kandungan kimia abu terbang (ASTM C 618-05, 2005 | 34 |
| Tabel 9. | Hasil pemeriksaan karakteristik fisik semen..... | 47 |
| Tabel 10. | Hasil pemeriksaan karakteristik kimia semen | 48 |
| Tabel 11. | Metode pemeriksaan karakteristik abu terbang | 48 |
| Tabel 12. | Metode pemeriksaan karakteristik agregat halus..... | 49 |
| Tabel 13. | Karakteristik <i>admixture</i> | 50 |
| Tabel 14. | Jumlah benda uji | 52 |
| Tabel 15. | Hasil pemeriksaan karakteristik fisik abu terbang | 62 |
| Tabel 16. | Hasil pemeriksaan karakteristik kimia abu terbang | 63 |
| Tabel 17. | Hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus..... | 64 |
| Tabel 18. | Rancangan campuran beton busa untuk <i>mix design</i> I | 65 |
| Tabel 19. | Rancangan campuran beton busa untuk <i>mix design</i> II ... | 65 |
| Tabel 20. | Berat volume beton segar | 66 |
| Tabel 21. | Berat volume beton keras benda uji kubus ukuran 15 cm x | |

| | |
|---|----|
| 15 cm x 15 cm..... | 67 |
| Tabel 22. Berat volume beton keras benda uji silinder ukuran 10 cm x 20 cm..... | 67 |
| Tabel 23. Hasil pengujian kuat tekan benda uji kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm | 82 |
| Tabel 24. Hasil pengujian kuat tekan benda uji benda uji silinder ukuran 10 cm x 20 cm..... | 83 |
| Tabel 25. Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan benda uji kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm | 85 |
| Tabel 26. Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan benda uji uji silinder ukuran 10 cm x 20 cm..... | 86 |
| Tabel 27. Perbandingan kuat tekan beton busa kubus dan silinder | 87 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|------------|--|----|
| Gambar 1. | Abu terbang kelas F..... | 34 |
| Gambar 2. | Abu terbang kelas C | 34 |
| Gambar 3. | Kurva tegangan-regangan tipikal beton (Nawy, E.G. 1998)..... | 42 |
| Gambar 4. | Kurva tegangan-regangan untuk berbagai kekuatan beton (Nawy, E. G. 1998)..... | 42 |
| Gambar 5. | Pola kehancuran berdasarkan SNI 1974-2011 | 43 |
| Gambar 6. | Bagan alir penelitian | 45 |
| Gambar 7. | Material beton busa | 51 |
| Gambar 8. | Proses pembuatan benda uji | 54 |
| Gambar 9. | Proses <i>curing</i> udara benda uji | 55 |
| Gambar 10. | Pengujian kuat tekan silinder 10 cm x 20 cm..... | 62 |
| Gambar 11. | Pengujian kuat tekan kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm .. | 61 |
| Gambar 12. | Pengujian <i>slump</i> | 66 |
| Gambar 13. | Diagram berat volume beton busa..... | 68 |
| Gambar 14. | Diagram berat per luasan beton busa..... | 69 |
| Gambar 15. | Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dengan umur pengujian 3 hari untuk <i>mix design</i> I | 70 |
| Gambar 16. | Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm cm dengan umur pengujian 3 hari untuk <i>mix design</i> I | 71 |

- Gambar 17. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dengan umur pengujian 3 hari untuk *mix design* II 72
- Gambar 18. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm cm dengan umur pengujian 3 hari untuk *mix design* II 73
- Gambar 19. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dengan umur pengujian 7 hari untuk *mix design* n I 74
- Gambar 20. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm cm dengan umur pengujian 7 hari untuk *mix design* I 75
- Gambar 21. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dengan umur pengujian 7 hari untuk *mix design* II 76
- Gambar 22. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm cm dengan umur pengujian 7 hari untuk *mix design* II 77
- Gambar 23. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dengan umur pengujian 28 hari untuk *mix design* I 78

| | |
|---|----|
| Gambar 24. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm cm dengan umur pengujian 28 hari untuk <i>mix design</i> I | 79 |
| Gambar 25. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dengan umur pengujian 28 hari untuk <i>mix design</i> II | 80 |
| Gambar 26. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm cm dengan umur pengujian 28 hari untuk <i>mix design</i> II | 81 |
| Gambar 27. Diagram kuat tekan beton busa | 84 |
| Gambar 28. Pola retak <i>mix design</i> I dengan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 xm x 15 cm | 88 |
| Gambar 29. Pola retak <i>mix design</i> I dengan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm | 88 |
| Gambar 30. Pola retak <i>mix design</i> II dengan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 xm x 15 cm | 88 |
| Gambar 31. Pola retak <i>mix design</i> II dengan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm | 89 |

BAB 1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Beton merupakan salah satu bahan konstruksi yang terbuat dari beberapa material dengan bahan utamanya adalah campuran antara agregat, bahan perekat, dan air pada proporsi tertentu.

Dengan berkembangnya ilmu pengetahuan khususnya di bidang konstruksi, maka material penyusun beton juga mengalami perkembangan. Salah satunya ialah munculnya inovasi beton busa.

Beton busa merupakan campuran mortar yang ditambahkan dengan cairan busa (*foam agent*). Beton busa memiliki berat volume yang lebih ringan dibanding dengan beton normal sehingga beton busa diklasifikasikan sebagai beton ringan. Kelebihan lain dari beton busa ialah gelembung-gelembung busa menciptakan ruang berongga dalam struktur beton busa sehingga mengurangi kebutuhan pasir dan semen.

Abu terbang adalah salah satu produk pembakaran batu bara. Abu terbang telah digunakan sebagai bahan campuran semen sejak lama. Penggunaan abu terbang dapat mengurangi pencemaran lingkungan sebab abu terbang mengandung beberapa elemen beracun.

Semen portland tipe I adalah semen portland yang penggunaannya tidak memerlukan syarat-syarat khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis semen portland lainnya. Sekarang ini, penggunaan semen portland tipe I sudah jarang dijumpai sebab digantikan oleh semen

portland komposit. Semen portland tipe I mengandung kadar terak semen portland yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan semen portland komposit. Oleh karena itu, penggunaan semen portland tipe I akan menghasilkan beton dengan kuat tekan yang relatif lebih tinggi.

Beton busa memiliki kuat tekan yang relatif rendah jika dibandingkan dengan beton normal. Untuk itu diperlukan material penyusun beton busa yang bisa meningkatkan kuat tekannya, serta diharapkan memiliki keunggulan lain, seperti ramah lingkungan dan lebih ekonomis. Oleh karena itu semen portland tipe I dan abu terbang cocok digunakan sebagai material penyusun beton busa. Namun, sejauh mana pengaruh material penyusun beton busa terhadap kuat tekan masih perlu dipelajari lebih lanjut.

Dari uraian diatas, penulis mencoba untuk mengangkat sebuah tugas akhir berjudul :

“STUDI LABORATORIUM PENGARUH PENGGUNAAN SEMEN PORTLAND TIPE I DAN ABU TERBANG TERHADAP KUAT TEKAN BETON BUSA”

B. Rumusan Masalah Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang dikemukakan di atas, maka dapat diambil rumusan masalah:

1. Bagaimana pengaruh penggunaan semen portland tipe I dan abu terbang terhadap kuat tekan beton busa.

2. Bagaimana hubungan tegangan dan regangan pada uji kuat tekan beton busa dengan menggunakan semen Portland tipe I dan abu terbang.

C. Tujuan Penelitian

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

1. Menganalisa pengaruh penggunaan semen portland tipe I dan abu terbang terhadap kuat tekan beton busa.
2. Menganalisa hubungan tegangan dan regangan pada uji kuat tekan beton busa dengan menggunakan semen Portland tipe I dan abu terbang.

D. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini secara umum diharapkan dapat memberikan informasi masukan sebagai berikut :

1. Memberikan informasi mengenai rancangan campuran beton busa dengan menggunakan semen portland tipe I dan abu terbang.
2. Sebagai referensi mengenai pengaruh penggunaan semen portland tipe I dan abu terbang terhadap kuat tekan beton busa.

3. Dapat digunakan sebagai referensi untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh penggunaan semen portland tipe I dan abu terbang terhadap kuat tekan beton busa.

E. Batasan Masalah

Demi tercapainya penelitian diperlukan suatu batasan dalam penulisan agar pembahasan tidak meluas ruang lingkungannya sehingga tujuan dari penulisan dapat tercapai dan dipahami.

Adapun ruang lingkup penulisan yang dijadikan batasan dalam penulisan adalah :

1. Penelitian ini dilakukan pada skala laboratorium.
2. Semen yang digunakan adalah semen portland tipe I
3. Pasir yang digunakan merupakan pasir silika yang berasal dari Kabupaten Pinrang.
4. Abu terbang yang digunakan merupakan abu terbang rendah kalsium (kelas F) yang berasal dari Kabupaten Jeneponto.
5. Proses *curing* dilakukan dengan cara *curing* udara.
6. *Admixture* yang digunakan merupakan *water reducing and high range admixture* (tipe F)
7. Menggunakan cetakan benda uji berbentuk silinder 10 cm x 20 cm dan kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm
8. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 3, 7, dan 28 hari.

F. Sistematika Penulisan

Secara umum tulisan ini terbagi dalam lima bab, yaitu :
Pendahuluan, Tinjauan Pustaka, Metodologi Penelitian, Hasil Pengujian dan Pembahasan, serta Kesimpulan dan Saran

Berikut merupakan rincian secara umum mengenai kandungan dari kelima bab tersebut :

BAB 1. PENDAHULUAN

Bab ini mengandung uraian tentang informasi secara keseluruhan dari penelitian ini yang berkenaan dengan latar belakang penelitian, rumusan masalah, maksud dan tujuan diadakan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi uraian mengenai dasar-dasar teori yang berkaitan dengan penelitian

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai uraian tentang metode, bahan, peralatan, cara penelitian serta uraian pelaksanaan penelitian.

BAB 4. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil analisis perhitungan data-data yang diperoleh dari hasil pengujian serta pembahasan dari hasil pengujian yang diperoleh

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat uraian tentang kesimpulan yang dapat diambil dari hasil-hasil analisis terhadap hasil penelitian yang telah dilakukan yang disertai dengan saran-saran yang diusulkan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu tentang Beton Busa

Chen Bing, dkk (2012) dalam penelitiannya menjelaskan tentang pengembangan beton busa struktural dengan menggunakan *silica fume*, *fly ash*, dan serat *polypropylene*. Dalam penelitian tersebut penggunaan *fly ash* sepenuhnya menggantikan pasir untuk menghasilkan beton busa. *Fly ash* dan serat *polypropylene* (PP) digunakan untuk meningkatkan sifat beton busa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton berbuisa dengan kepadatan 800-1,500 kg/m³ dan kuat tekan 10-50 MPa dapat dibuat dengan menggunakan *fly ash* dan serat *polypropylene*. Penggunaan *fly ash* dan serat *polypropylene* meningkatkan kuat tekan beton busa dengan baik. Selain itu, menambahkan serat *polypropylene* secara signifikan meningkatkan kekuatan tarik belah dan perlawanan terhadap *drying shrinkage*.

E.P. Kearsley, dkk (2000) dalam penelitiannya menjelaskan tentang efek, pada sifat-sifat beton busa, dengan cara menggantikan volume semen dalam jumlah yang besar (hingga 75% berat) dengan *fly ash*. Pengujian dilakukan pada umur 28 hari dan 1 tahun. Beton di *curing* dengan menggunakan metode *sealed curing* dan menunjukkan bahwa penggunaan semen dapat digantikan dengan *fly ash* sampai dengan 67% tanpa mengalami penurunan kuat tekan yang signifikan.

Daniel Hatungimana, dkk (2018) dalam penelitiannya menjelaskan

pengaruh kandungan busa serta penambahan *fly ash* dan *silica fume* pada beberapa sifat fisik dan mekanis dari beton busa. Secara total, digunakan 45 benda uji beton busa dengan tiga variasi penggantian *fly ash* dan *silica fume* (0, 10 dan 20%, dari berat semen), dan tiga variasi kadar busa (0, 31 dan 47%, berdasarkan volume). Hasil *density* (kering oven), penyerapan air, kuat tekan dan konduktivitas termal dari beton busa didapatkan masing-masing antara 873-1998 kg/m³; 3,5-35,9%; 1,5-18,1 MPa dan, 0,239-0,942 W/mK.

Saeid Gorbani, dkk (2018) menjelaskan bahwa bahwa penggunaan air bermagnetisasi untuk mencampur beton dapat meningkatkan kemampuan kerja beton segar dan *hardened strength* nya. Sementara itu, penggunaan beton busa dalam industri konstruksi semakin populer karena sifat-sifatnya yang sangat baik, seperti bobotnya yang rendah dan sifat isolasi termal yang sangat baik. Tetapi stabilitas busa dan kuat tekan beton yang relatif rendah dan kuat tarik belah dari beton masih menjadi tantangan utama bagi para insinyur untuk menggunakan bahan ini. Penelitian ini bermaksud untuk mengevaluasi pengaruh air magnet pada stabilitas busa, kekuatan tekan, kuat tarik belah, penyerapan air dan struktur mikro beton busa. Sebanyak 9 campuran telah disiapkan sebelumnya dengan air yang melewati medan magnet permanen selama 1, 5 dan 10 kali pada kecepatan aliran masing-masing 0,75 m/s; 1,75 m/s dan 2,75 m/s. Hasil pengujian menunjukkan bahwa stabilitas busa, kuat tekan dan kuat tarik belah dari beton busa meningkat secara signifikan

dengan menggunakan air bermagnet, sedangkan penyerapan air beton busa yang berkurang sedikit.

B. Teori Beton

Beton (*concrete*) merupakan campuran semen *portland* atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*) (SNI 2847:2013)

Beton segar adalah campuran beton setelah selesai diaduk hingga beberapa saat karakteristik belum berubah. Beton keras adalah adukan beton yang terdiri dari campuran semen Portland atau sejenisnya, agregat halus, agregat kasar dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan lainnya yang telah mengeras (SNI 03-4810-1998).

Agregat halus yang digunakan pada pencampuran beton biasanya adalah pasir alam atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu. Dari bahan pembentuk beton tersebut, semen berfungsi mengikat butir-butir agregat hingga membentuk suatu massa padat dan mengisi rongga-rongga udara di antara butir-butir agregat.

Beton ringan adalah beton yang mengandung agregat berat volume setimbang (*equilibrium density*), antara 1140 dan 1840 kg/m³ (SNI 2847:2013).

Adapun kelebihan dan kekurangan beton antara lain sebagai berikut :

Kelebihan Beton :

1. Beton mampu menahan gaya tekan dengan baik, serta mempunyai sifat tahan terhadap korosi dan pembusukan oleh kondisi lingkungan.
2. Beton segar dapat dengan mudah dicetak sesuai dengan keinginan.
Cetakan dapat pula dipakai berulang kali sehingga lebih ekonomis.
3. Beton segar dapat disemprotkan pada permukaan beton lama yang retak maupun dapat diisikan kedalam retakan beton dalam proses perbaikan.
4. Beton segar dapat dipompakan sehingga memungkinkan untuk dituang pada tempat-tempat yang posisinya sulit.
5. Beton tahan aus dan tahan bakar, sehingga perawatannya lebih murah.

Kekurangan Beton :

1. Beton dianggap tidak mampu menahan gaya tarik, sehingga mudah retak. Oleh karena itu perlu di beri baja tulangan sebagai penahan gaya tarik.
2. Beton keras menyusut dan mengembang bila terjadi perubahan suhu, sehingga perlu dibuat dilatasi (expansion joint) untuk mencegah terjadinya retakan akibat terjadinya perubahan suhu.

3. Untuk mendapatkan beton kedap air secara sempurna, harus dilakukan dengan pengerjaan yang teliti.
4. Beton bersifat getas (tidak daktil) sehingga harus dihitung dan diteliti secara seksama agar setelah dikompositkan dengan baja tulangan menjadi bersifat daktil, terutama pada struktur tahan gempa.

C. Material Penyusun Beton Busa

C.1. Semen Portland

Semen merupakan bahan pengikat hidrolis, yaitu bahan anorganik yang ditumbuk halus dan ketika bercampur dengan air, dengan menggunakan reaksi dan proses hidrasi membentuk pasta yang mengikat dan mengeras, setelah mengeras, tetap mempertahankan kekuatan dan stabilitasnya meskipun di dalam air (Standar BS EN 197-1).

Semen Portland adalah bahan konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pekerjaan beton. Menurut SNI 15-2049-2004, semen portland didefinisikan sebagai semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh

ditambah dengan bahan tambahan lain.

Semen Portland dibuat dari serbuk halus mineral kristalin yang komposisi utamanya adalah kalsium dan aluminium silikat. Penambahan air pada mineral ini menghasilkan suatu pasta yang jika mengering akan mempunyai kekuatan seperti batu. Berat jenisnya berkisar antara 3,12 dan 3,16, dan berat volume satu sak semen adalah 94 lb/ft^3 . Bahan baku pembentuk semen adalah:

1. Kapur (CaO) – dari batu kapur,
2. Silika (SiO_2) – dari lempung,
3. Alumina (Al_2O_3) – dari lempung

(dengan sedikit presentasi magnesia, MgO , dan terkadang sedikit alkali). Oksida besi terkadang ditambahkan untuk mengontrol komposisinya (Edward G. Nawy, 1995).

C.1.1. Standar Semen di Eropa (EN 197-1:2011) Termasuk Inggris (BS EN 197-1:2011)

C.1.1.1. Semen Portland Berdasarkan BS EN 197-1:2011

Selain semen Portland yang sepenuhnya diproduksi dengan menggunakan klinker semen Portland, maka dewasa ini telah banyak diproduksi semen campuran (komposit) yang menggabungkan klinker semen Portland dan mineral anorganik sebagai unsur-unsur pembentuk utama.

Beberapa produksi semen Portland di Eropa termasuk Inggris menggunakan standar BS En 197-1:2011. Semen yang diproduksi dengan standar Eropa diizinkan untuk menggunakan material tambahan baik yang merupakan hasil olahan sampingan maupun bahan alami seperti super terak tanur tinggi dan material pozolan lainnya sehingga dapat menurunkan penggunaan klinker semen yang secara langsung memberikan kontribusi terhadap pengurangan karbon emisi yang dihasilkan dari produksi klinker dan mengurangi penggunaan sumber daya alam (M. Wihardi Tjaronge,2012).

Sesuai dengan standar ini semen disebut semen CEM (*CEM cement*), secara pasti ketika dicampur secara tepat dengan agregat dengan air, mampu menghasilkan beton atau mortar yang mempertahankan kemampuan kerja dalam waktu yang cukup dan setelah periode tertentu mencapai tingkat kekuatan spesifik dan juga memiliki stabilitas volume jangka panjang.

Pengerasan hidrolis pada semen CEM adalah terutama disebabkan oleh hidrasi silikat kalsium tetapi senyawa kimia lainnya juga berpartisipasi dalam proses pengerasan, misalnya aluminat. Jumlah proporsi kalsium oksida reaktif (CaO) dan silikon dioksida reaktif (SiO₂) dalam

semen CEM harus paling sedikit 50% dari massa ketika proporsi yang ditentukan sesuai dengan EN 196-2. Semen CEM terdiri dari material-material yang berbeda dan secara statistic homogen dalam komposisi yang dihasilkan dari produksi dan proses penanganan material yang terjamin kualitasnya (M. Wihardi Tjaronge,2012)

C.1.1.2. Unsur Utama (berdasarkan BS EN 197-1:2011)

- **Klinker Semen Portland**

Klinker semen Portland dibuat dengan pembakaran bahan baku (bahan mentah, pasta, adonan) suatu campuran dengan spesifikasi yang mengandung unsur, biasanya dinyatakan sebagai oksida, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 dan sejumlah kecil dari bahan lainnya. Klinker Portland adalah bahan hidrolis yang terdiri dari paling sedikit dua pertiga silika kalsium ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ dan $2 \text{CaO} \text{SiO}_2$) oleh massa, sisanya terdiri dari aluminium dan besi yang mengandung fase klinker dan senyawa lainnya. Rasio massa $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$ harus tidak kurang dari 2,0. Isi dari magnesium oksida (MgO) tidak melebihi 5,0% dari jumlah massa. Klinker semen Portland yang tergabung dalam semen Portland (CEM I) tahan sulfat dan semen pozzolanik tahan sulfat (CEM IV) wajib memenuhi persyaratan

tambahan untuk kandungan trikalsium aluminat (C_3A). Kandungan trikalsium aluminat pada klinker dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$C_3A = 2,65 A - 1,69 F$$

dimana,

A adalah persentase dari aluminium oksida (Al_2O_3) dengan massa klinker yang ditentukan sesuai dengan EN 196-2.

F adalah persentase besi (III) oksida (Fe_2O_3).

Semen Portland tahan sulfat dan semen pozzolanik tahan sulfat dibuat dengan klinker semen Portland dimana kandungan C_3A tidak melebihi :

- a. Untuk CEM I: 0%, 3% dan 5%
- b. Untuk CEM IV / A dan CEM IV / B: 9%.

- **Terak Tanur Tinggi (*Blast furnace slag, S*)**

Granulated blast furnace (slag/terak tanur tinggi) terbuat dari pendinginan cepat dari lelehan terak dengan komposisi yang sesuai, yang diperoleh dari peleburan biji besi (ore) dalam tanur tinggi, dan minimal mengandung dua pertiga bagiannya oleh glassy slag dan memiliki sifat hidrolis yang sesuai ketika diaktifkan.

Terak tanur tinggi, minimal dua per tiga bagiannya

terdiri dari kalsium oksida (CaO), magnesium oksida (MgO) dan silicon dioksida (SiO₂). Sisanya aluminium oksida (Al₂O₃) bersama dengan sejumlah kecil senyawa lain. Rasio massa (CaO + MgO) / (SiO₂) melebihi 1,0 (M. Wihardi Tjaronge,2012).

- **Material Pozzolan**

Material pozzolan adalah material yang komposisi penyusunnya mengandung silika atau alumina silika atau kombinasi keduanya. Material pozzolan tidak akan mengeras dengan sendirinya bila dicampur dengan air tetapi, ketika ditumbuk halus dan dengan adanya air, mereka bereaksi dengan suhu kamar normal dengan kalsium hidroksida terlarut (Ca (OH)₂) untuk membentuk kekuatan dengan mengembangkan senyawa kalsium silikat dan kalsium aluminat.

Pozzolan terumatam terdiri dari silicon diokasida reaktif (SiO₂) dan aluminat oksida (Al₂O₃). Sisanya adalah besi oksida (Fe₂O₃) dan oksida lainnya. Proporsi kalsium oksida yang reaksi untuk pengerasan dapat diabaikan. Jumlah silikon dioksida yang reaktif harus tidak kurang dari 25,0% dari massa (M. Wihardi Tjaronge,2012).

- **Abu Terbang (*Fly Ash*)**

Fly Ash atau abu terbang merupakan residu pembakaran batu bara yang diperoleh dengan mengendapkan secara elektrostatis atau mekanis debu partikel hasil pembakaran batu bara dengan gas buang pada tungku pembakaran. Abu terbang terdiri atas 2 macam yaitu yang pertama mengandung silika (*siliceous*) memiliki karakteristik pozzolan. Jenis abu terbang yang kedua berkapur dalam bentuk alami (*calcareous*), mungkin memiliki karakteristik pozzolan, di samping itu, memiliki sifat hidrolik. Kehilangan massa akibat pembakaran (*lost of ignition, Lol* atau hilang pijar) dengan waktu pembakaran 1 jam harus dalam dari batasan sebagai berikut :

- a) 0% sampai 5,0% massa
- b) 2,0% sampai 7,0% massa
- c) 4,0% sampai 9,0% massa

- **Lempung Bakar (*Burn Shale, T*)**

Lempung bakar, lebih khusus, lempung minyak bakar (*burn oil shale*), terproduksi dalam tungku khusus pada suhu sekitar 800°C. karena komposisi bahan alami dan proses produksi maka lempung bakar mengandung fase klinker, terutama dikalsium aluminat silikat dan monokalsium

aluminat, selain itu mengandung dalam jumlah besar oksida yang sangat reaktif sebagai pozzolan yaitu silikon dioksida dan sejumlah kecil kalsium oksida bebas dan kalsium sulfat (M. Wihardi Tjaronge,2012).

- **Kapur (L, LL)**

Batu kapur (*lime stone*, LL dan L) harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- a) Kandungan kalsium karbonat (CaCO_3) yang dihitung dari jumlah oksida kalsium harus paling sedikit 75% dari massa.
- b) Isi tanah liat, yang ditentukan oleh uji methylene, tidak akan melebihi 1,20 g/100 g. Untuk tes ini batu kapur harus digiling hingga memiliki tingkat kehalusan sekitar $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$.
- c) Total karbon organik (TOC), harus sesuai dengan salah satu kriteria berikut:
 - 1) LL: tidak melebihi 0,20% massa;
 - 2) L: tidak melebihi 0,50% massa.

- **Silica Fume (D)**

Silica fume berasal dari pengurangan kuarsa kemurnian tinggi dengan batu bara dalam tungku busur listrik

pada saat memproduksi silikon dan campuran ferosilikon. *Silica fume* terdiri dari partikel-partikel berbentuk bola yang sangat halus dan mengandung silika oksida amorf setidaknya 85% dari massa. Isi dari unsur silikon (Si) ditentukan, tidak boleh lebih besar dari 0,4% dari massa.

C.1.2. Standar Indonesia

C.1.2.1. Semen Portland

Indonesia telah mampu memproduksi semen Portland yang terdiri atas 5 jenis dan penggunaan (semen Portland jenis I,II,III,IV dan V). Dewasa ini, Indonesia juga telah mengembangkan semen Portland Pozzolan dan semen Portland Komposit yang menggunakan material anorganik dan linker semen (M. Wihardi Tjaronge,2012).

Adapun jenis dan penggunaan semen portland (menurut SNI 15-2049-2004) yakni:

- a. Jenis I yaitu semen yang penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang diisyarakan pada jenis-jenis lain
- b. Jenis II yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau hidrasi sedang.

- c. Jenis III yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
- d. Jenis IV yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah
- e. Jenis V yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat (SNI 15-2049-2004).

Syarat mutu semen Portland (menurut SNI 15-2049-2004) yakni :

Persyaratan kimia semen Portland harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

Tabel 1. Syarat kimia utama

Satuan dalam %

| No | Uraian | Jenis semen Portland | | | | |
|----|---|----------------------|----------------------|-----|-----|-----|
| | | I | II | III | IV | V |
| 1 | SiO ₂ , minimum | - | 20,0 ^{b,c)} | - | - | - |
| 2 | Al ₂ O ₃ , maksimum | - | 6,0 | - | - | - |
| 3 | Fe ₂ O ₃ , maksimum | - | 6,0 ^{b,c)} | - | 6,5 | - |
| 4 | MgO, maksimum | 6,0 | 6,0 | 6,0 | 6,0 | 6,0 |
| | SO ₃ , maksimum | | | | | |
| 5 | Jika C ₃ A 8,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 2,3 | 2,3 |
| | Jika C ₃ A 8,0 | 3,5 | d) | 4,5 | d) | d) |
| 6 | Hilang pijar, maksimum | 5,0 | 3,0 | 3,0 | 2,5 | 3,0 |
| 7 | Bagian tak larut, maksimum | 3,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| 8 | C ₃ S, maksimum ^{a)} | - | - | - | 35 | - |
| | | | | | b) | |

| | | | | | | |
|----|---|---|-----|----|----------|------------------|
| 9 | C ₂ S, minimum ^{a)} | - | - | - | 40 b) | - |
| 10 | C ₃ A, maksimum ^{a)} | - | 8,0 | 15 | 7 b) | 5 b) |
| 11 | C ₄ AF + 2 C ₃ A atau ^{a)} C ₄ AF + C ₂ F, maksimum | - | - | - | - | 25 ^{c)} |

Sumber : SNI 15-2049-2004

CATATAN

a) Persyaratan pembatasan secara kimia berdasarkan perhitungan untuk senyawa potensial tertentu tidak harus diartikan bahwa oksida dari senyawa potensial tersebut dalam keadaan murni.

C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃, F = Fe₂O₃, contoh C₃A = 3CaO.Al₂O₃

Titanium dioksida (TiO₂) dan Fosfor pentaoksida (P₂O₅) termasuk dalam Al₂O₃.

Nilai yang biasa digunakan untuk Al₂O₃ dalam menghitung senyawa potensial (misal: C₃A) untuk tujuan spesifikasi adalah jumlah endapan yang diperoleh dengan penambahan NH₄OH dikurangi jumlah Fe₂O₃ (R₂O₃ – Fe₂O₃) yang diperoleh dalam analisis kimia basah.

Apabila: $\frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3} \geq 0,64$, maka persentase C₃S, C₂S, C₃A dan C₄AF

dihitung sebagai berikut:

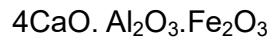
$$\text{C}_3\text{S} = 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = (4,071 \times \% \text{CaO}) - (7,600 \times \% \text{SiO}_2) - (6,718 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (1,430 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3) - (2,852 \times \% \text{SO}_3)$$

$$\text{C}_2\text{S} = 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = (2,867 \times \% \text{SiO}_2) - (0,7544 \times \% \text{C}_3\text{S})$$

$$C_3A = 3CaO \cdot Al_2O_3 = (2,650 \times \% Al_2O_3) - (1,692 \times \% Fe_2O_3)$$

$$C_4AF = 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 = (3,043 \times \% Fe_2O_3)$$

Apabila: $\frac{\% Al_2O_3}{\% Fe_2O_3} < 0,64$, terbentuk larutan padat ($C_4AF + C_2F$) =



maka ($C_4AF + C_2F$) dan C_3S dihitung sebagai berikut:

Semen dengan komposisi ini didalamnya tidak terdapat C_3A . C_2S tetap dihitung dengan menggunakan rumus di atas: Perhitungan untuk semua senyawa potensial adalah berdasarkan hasil penentuan oksidanya yang dihitung sampai sedekat mungkin 0,1%. Semua hasil perhitungan dilaporkan sampai sedekat mungkin dengan 1,0%.

- b) Apabila yang disyaratkan adalah kalor hidrasi seperti yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (Tabel 4.), maka syarat kimia ini tidak berlaku.
- c) Apabila yang disyaratkan adalah pemuaian karena sulfat yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (Tabel 4.), maka syarat kimia ini tidak berlaku.
- d) Tidak dapat dipergunakan

Tabel 2. Syarat kimia tambahan

Satuan dalam %

| No | Uraian | Jenis semen portland | | | | |
|----|---|----------------------|------------|------------|------------|------------|
| | | I | II | III | IV | V |
| 1 | C ₃ A, maksimum | - | - | 8 | - | - |
| 2 | C ₃ A, minimum | - | - | 5 | - | - |
| 3 | (C ₃ S + 2 C ₃ A), maksimum | - | 58 b) | - | - | - |
| 4 | Alkali, sebagai (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O), maksimum | 0,60 c) | 0,60 c) | 0,60 c) | 0,60 c) | 0,60 c) |

Sumber : SNI 15-2049-2004

CATATAN

- a) Syarat kimia tambahan ini berlaku hanya secara khusus disyaratkan.
 - b) Sama dengan keterangan untuk ^{b)} pada syarat kimia utama.
 - c) Hanya berlaku bila semen digunakan dalam beton yang agregatnya bersifat reaktif terhadap alkali.
- Persyaratan fisika semen Portland harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

Tabel 3. Syarat Fisika Utama

| No | Uraian | Jenis semen portland | | | | |
|----|--|----------------------|------|------|------|------|
| | | I | II | III | IV | V |
| 1 | Kehalusan: Uji permeabilitas udara, m ² /kg Dengan alat : Turbidimeter, min Blaine, min | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 |
| | | 280 | 280 | 280 | 280 | 280 |
| 2 | Kekekalan : Pemuain dengan autoclave, | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |

| maks % | | | | | |
|--------|---|-----|-------------------|-----|-----|
| 3 | Kuat tekan: | | | | |
| | Umur 1 hari, kg/cm ² , | - | - | 120 | - |
| | minimum Umur 3 hari, | 125 | 100 | 240 | - |
| | kg/cm ² , minimum | | 70 ^{a)} | | 70 |
| | Umur 7 hari, kg/cm ² , minimum | 200 | | - | 170 |
| | Umur 28 hari, kg/cm ² , | | 175 | | 150 |
| | minimum | 280 | 120 ^{a)} | - | 210 |
| | | | - | | |
| 4 | Waktu pengikatan (metode alternatif) | | | | |
| | dengan alat: Gillmore | | | | |
| | Awal, menit, minimal | | | | |
| | Akhir, menit maksimum | 60 | 60 | 60 | 60 |
| | Vicat | 600 | 600 | 600 | 600 |
| | - Awal, menit, minimal | 45 | 45 | 45 | 45 |
| | - Akhir, menit, maksimum | 375 | 375 | 375 | 375 |

Sumber : SNI 15-2049-2004

CATATAN

- a) Syarat kuat tekan ini berlaku jika syarat kalor hidrasi seperti tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (Tabel 4.) atau jika syarat C₃S + C₃A seperti tercantum pada tabel syarat kimia tambahan disyaratkan (Tabel 2.).

Tabel 4. Syarat fisika tambahan

| No | Uraian | Jenis semen portland | | | | |
|----|--|----------------------|------------------|-----|----|----|
| | | I | II | III | IV | V |
| 1 | Pengikatan semu penetrasi akhir, % minimum | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| 2 | Kalor hidrasi | | | | | |
| | Umur 7 hari, kal/gram, | - | 70 ^{b)} | - | 60 | - |
| | maks Umur 28 hari, | - | - | - | 70 | - |
| | kal/gram, maks | | | | | |
| 3 | Kuat tekan: | | | | | |
| | Umur 28 hari, kg/cm ² , | - | 280 | - | - | - |
| | minimum | | | | | |

| | | | | | | |
|---|--|----|-------------------|----|----|-------|
| 4 | Pemuaiian karena sulfat 14 hari, %, maksimum | - | 220 ^{b)} | - | - | 0,040 |
| 5 | Kandungan udara mortar, % volume, maksimum | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |

Sumber : SNI 15-2049-2004

CATATAN

- a) Persyaratan fisika tambahan ini berlaku hanya jika secara khusus diminta.
- b) Bila syarat kalor hidrasi ini disyaratkan, maka syarat $C_3S + C_3A$ seperti tercantum pada tabel kimia tambahan (Tabel 2.) tidak diperlukan. Syarat kuat tekan ini berlaku bila syarat kalor hidrasi seperti yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (Tabel 4.) atau bila syarat $C_3S + C_3A$ seperti yang tercantum pada tabel syarat kimia tambahan (Tabel 2.) disyaratkan.

C.1.3. Standar Semen berdasarkan ASTM C 150 - 07

Jenis dan penggunaan semen Portland berdasarkan ASTM

C 150 – 07 adalah sebagai berikut :

- I. Jenis I, untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang diisyaratkan pada jenis-jenis lain.
- II. Jenis IA, Semen *Air entraining* digunakan sama seperti jenis I, dimana memerlukan *Air entraining*.
- III. Jenis II, untuk penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang.
- IV. Jenis IIA, Semen *Air entraining* digunakan sama seperti jenis II, dimana memerlukan *Air entraining*.
- V. Jenis III, untuk penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.

- VI. Jenis IIIA, Semen *Air entraining* digunakan sama seperti jenis III, dimana memerlukan *Air entraining*.
- VII. Jenis IV, untuk penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah.
- VIII. Jenis V, untuk penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

Tabel 5. Standar Persyaratan Komposisi

| Jenis Semen | I dan IA | II dan IIA | III dan IIIA | IV | V |
|--|----------|---------------------|--------------|-----------------|-----------------|
| Aluminium oksida (Al_2HAl_3), Max,% | ... | 6.0 | ... | ... | ... |
| Besi oksida (Fe_2HAl_3), Max,% | ... | 6.0 ^{B, C} | ... | 6.5 | ... |
| Magnesium oksida (MgO), max,% | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 |
| Sulfur trioksida (SO_3), ^D max,% | | | | | |
| Ketika (C_3A) ^E adalah 8% atau kurang | 3.0 | 3.0 | 3,5 | 2.3 | 2.3 |
| Ketika (C_3A) ^E lebih dari 8% | 3,5 | F | 4,5 | F | F |
| Hilang pijar, max,% | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 2,5 | 3.0 |
| Bagian tak larut, max,% | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 |
| Trikalsium silikat (C_3S) ^E , Max,% | ... | ... | ... | 35 ^B | ... |
| Dikalsium silikat (C_2S) ^E , Min,% | ... | ... | ... | 40 ^B | ... |
| Trikalsium aluminat (C_3A) ^E , Max,% | ... | 8 | 15 | 7 ^B | 5 ^C |
| Sum dari $C_3S + 4.75C_3A$ ^G , Max,% | ... | 100 ^H | ... | ... | ... |
| Tetrakalsium aluminoferrite ditambah dua kali aluminat trikalsium ($C_4AF + 2(C_3A)$), atau larutan padat ($C_4AF + C_2F$), sebagaimana berlaku, max,% | ... | ... | ... | ... | 25 ^C |

Sumber : ASTM C 150 – 07

^ALihat Catatan 2.

^BTidak berlaku ketika panas dari batas hidrasi di tabel 4 ditentukan.

^CTidak berlaku ketika batas resistance sulfat di tabel 4 ditentukan.

^DAda kasus di mana optimal SO₃(Menggunakan Metode Uji C 563) Untuk semen tertentu dekat atau lebih dari batas dalam spesifikasi ini. Dalam kasus seperti di mana sifat-sifat semen dapat ditingkatkan dengan melebihi SO₃ batas yang tercantum dalam tabel ini, diperbolehkan untuk melebihi nilai dalam tabel, asalkan telah dibuktikan oleh Test Metode C 1038 bahwa semen dengan meningkatnya SO₃tidak akan berkembang ekspansi dalam air melebihi 0,020% pada 14 hari. Ketika produsen memasok semen di bawah ketentuan ini, ia akan, atas permintaan, pasokan data pendukung kepada pembeli.

^ELihat Lampiran A1 untuk perhitungan.

^FTak dapat diterapkan.

^GLihat Catatan 4.

^HSelain itu, 7-hari panas pengujian hidrasi oleh Test Metode C 186 dilakukan setidaknya sekali setiap enam bulan. pengujian tersebut tidak boleh digunakan untuk penerimaan atau penolakan dari semen, tapi hasil harus dilaporkan untuk tujuan informasi.

Tabel 6. Persyaratan Komposisi Opsional^A

| Jenis semen | I dan IA | II dan IIA | III dan IIIA | IV | V | Keterangan |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|
| Trikalsium aluminat (C ₃ A) ^B , Max,% | ... | ... | 8 | ... | ... | untuk ketahanan sulfat moderat |
| Trikalsium aluminat (C ₃ A) ^B , Max,% | ... | ... | 5 | ... | ... | untuk ketahanan sulfat tinggi |
| alkali setara (Na ₂ O + 0.658K ₂ O), max,% | 0.60 ^C | 0.60 ^C | 0.60 ^C | 0.60 ^C | 0.60 ^C | rendah-alkali semen |

Sumber : ASTM C 150 – 07

^APersyaratan opsional hanya berlaku ketika secara khusus meminta.

Memverifikasi ketersediaan sebelum memesan. Lihat Catatan 2.

^BLihat Lampiran A1 untuk perhitungan.

^CTentukan batas ini ketika semen yang akan digunakan dalam beton dengan agregat yang berpotensi reaktif dan tidak ada ketentuan lain telah dilakukan untuk melindungi beton dari agregat deleteriously reaktif. Mengacu pada spesifikasi C 33 untuk informasi potensi reaktivitas agregat.

Tabel 7. Persyaratan Fisika Standar

| Jenis Semen ^A | I | IA | II | IIA | III | IIIA | IV | V |
|---|-----|----|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| konten Air mortar, ^B Volume%: | 12 | 22 | 12 | 22 | 12 | 22 | 12 | 12 |
| max | ... | 16 | ... | 16 | ... | 16 | ... | ... |
| min | ... | 16 | ... | 16 | ... | 16 | ... | ... |

| | | | | | | | | |
|--|----------------|----------------|---------------------|--------------------|----------------|----------------|------|---------------|
| Kehalusan, ^C permukaan spesifik, m ² / Kg (metode alternatif): | | | | | | | | |
| tes Turbidimeter | 160 | 160 | 160 | 160 | ... | ... | 160 | 160 |
| Nilai rata-rata, min ^D | ... | | | | | | | |
| Setiap satu sampel, min ^E | 150 | 150 | 150 | 150 | ... | ... | 150 | 150 |
| Nilai rata-rata, max ^D | ... | ... | 240 ^F | 240 ^F | ... | ... | 240 | ... |
| Setiap satu sampel, max ^E | ... | ... | 245 ^F | 245 ^F | ... | ... | 245 | ... |
| uji permeabilitas udara | | | | | | | | |
| Nilai rata-rata, min ^D | 280 | 280 | 280 | 280 | ... | ... | 280 | 280 |
| Setiap satu sampel, min ^E | 260 | 260 | 260 | 260 | ... | ... | 260 | 260 |
| Nilai rata-rata, max ^D | ... | ... | 420 ^F | 420 ^F | ... | ... | 420 | ... |
| Setiap satu sampel, max ^E | ... | ... | 430 ^F | 430 ^F | ... | ... | 430 | ... |
| ekspansi autoclave, max,% | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 |
| `Kekuatan, tidak kurang dari nilai yang ditunjukkan untuk umur ditunjukkan sebagai berikut: ^G | | | | | | | | |
| kuat tekan, MPa (psi): | | | | | | | | |
| 1 hari | ... | ... | ... | ... | 12,0 (1740) | 10,0 (1450) | ... | ... |
| 3 hari | 12,0 (1740) | 10,0 (1450) | 10,0 (1450) | 8,0 (1160) | 24,0 (3480) | 19,0 (2760) | ... | 8,0 (1160) |
| | | | (1020) ^H | (870) ^H | | | | |

| | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|-----------------------------|----------------------------|-----|-----|----------------|----------------|
| | | | 17,0 | 14,0 | | | | |
| 7 hari | 19,0 (2760) | 16,0 (2320) | (2470) 12,0 ^H | (2030) 9,0 ^H | ... | ... | 7,0 (1020) | 15,0 (2180) |
| | | | (1740) ^H | (1310) _H | | | | |
| 28 hari | ... | ... | ... | ... | ... | ... | 17,0 (2470) | 21,0 (3050) |
| Waktu pengaturan; uji Vicat: ^A | | | | | | | | |
| Waktu pengaturan, min, tidak kurang dari | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Waktu pengaturan, min, tidak lebih dari | 375 | 375 | 375 | 375 | 375 | 375 | 375 | 375 |

Sumber : ASTM C 150 – 07

^ALihat Catatan 2.

^BKepatuhan dengan persyaratan spesifikasi ini tidak menjamin bahwa konten udara yang diinginkan akan diperoleh dalam beton.

^CLaboratorium pengujian harus memilih metode kehalusan yang akan digunakan. Namun, ketika sampel tidak memenuhi persyaratan uji udara permeabilitas, Turbidimeter yang tes akan digunakan, dan persyaratan dalam tabel ini untuk metode turbidimetri akan mengatur.

^D Nilai rata-rata harus ditentukan pada lima sampel terakhir berturut-turut dari sumber.

C.2. Agregat Halus

Menurut SNI 03-2847-2002 agregat halus adalah butiran halus yang memiliki kehalusan 2mm - 5mm. Agregat halus adalah agregat dengan besar butir maksimum 4,75 mm. Agregat halus yang baik harus bebas dari bahan organik, lempung atau bahan-bahan lain yang dapat merusak campuran beton ataupun batako. Pasir merupakan bahan pengisi yang digunakan dengan semen untuk membuat adukan. Selain itu juga pasir berpengaruh terhadap sifat tahan susut, keretakan dan kekerasan pada batako atau produk bahan bangunan campuran semen lainnya. Agregat halus adalah pasir alam sebagai hasil desintegrasi alami dari batu atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 5,0 mm; (SNI 03-2834-2002). Agregat halus merupakan pengisi yang berupa pasir. Ukurannya bervariasi antara ukuran No.4 dan No.100 saringan standar Amerika. Agregat halus yang baik harus bebas dari bahan organik, lempung, partikel yang lebih kecil dari saringan No.100 atau bahan-bahan lain yang dapat merusak campuran beton. Variasi ukuran dalam suatu campuran harus mempunyai gradasi yang baik, yang sesuai dengan standar analisis saringan dari ASTM (*American Society of Testing and Materials*). Untuk beton penahan radiasi, serbuk baja halus dan serbuk besi pecah

digunakan sebagai agregat halus (Nawy, E. G,1998).

Persyaratan agregat halus secara umum menurut SNI 03-6821-2002 adalah sebagai berikut:

- a. Agregat halus terdiri dari butir-butir tajam dan keras.
- b. Butir-butir halus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca. Sifat kekal agregat halus dapat di uji dengan larutan jenuh garam. Jika dipakai natrium sulfat maksimum bagian yang hancur adalah 10% berat. Sedangkan jika dipakai magnesium sulfat
- c. Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% (terhadap berat kering), jika kadar lumpur melampaui 5% maka pasir harus di cuci.

C.3. Abu Terbang

Solid material adalah salah satu komponen sistem anorganik geopolymer. Solid material untuk geopolymer dapat berupa mineral alami seperti kaolin, tanah liat, mika, andalusit, spinel dan lain sebagainya. Alternatif lain yang dapat digunakan adalah material yang berasal dari produk sampingan seperti abu terbang, silica fume, terak, rice-husk ash, lumpur merah, dan lain-lain. Penelitian ini menggunakan abu terbang sebagai solid material. Abu terbang merupakan material hasil sampingan (*by-product*) industri salah

satunya adalah sisa hasil proses pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Material abu terbang dikategorikan dalam material "*pozzolon*" yakni material *siliceous* atau *aluminous* yang didalamnya terdapat sedikit sekali atau tidak sama sekali material *cementious* sebagaimana yang dimiliki semen portland. Material abu terbang dapat saja bereaksi secara kimia dengan cairan alkali pada temperatur tertentu untuk membentuk material-campuran yang memiliki sifat seperti semen. Abu terbang, biasa dikenal sebagai abu berbentuk serbuk, yang merupakan hasil sisa dari pembakaran abu batu bara pada pembangkit tenaga listrik, yang dipisahkan dari gas pembakaran melalui pengumpul mekanik atau elektrostatik. *Abu terbang* terdiri dari sebagian besar partikel yang mempunyai diameter 1-150 mikrometer yang lolos dari ayakan 45 mikrometer. Berdasarkan ASTM C 618-05 (2005), abu terbang didefinisikan sebagai material halus yang berasal dari hasil pembakaran batu bara. Penggunaan abu terbang pada beton ataupun mortar mempunyai banyak keunggulan baik untuk kondisi beton/mortar fresh dan mengeras. Keunggulan pada beton/mortar fresh adalah meningkatkan kelacakan (*workability*) mengurangi kebutuhan air, mengurangi *bleeding*, dan memperlambat waktu pengerasan beton dan mortar pada saat proses pengecoran.

ASTM C 618-05 membagi abu terbang dalam tiga kategori yaitu kelas N, kelas F dan kelas C seperti pada Tabel 8. Minimum

kandungan senyawa SiO_2 , Al_2O_3 dan Fe_2O_3 adalah 70% untuk kelas N dan kelas F, sedangkan kelas C antara 50% - 70 %. Sehingga, kandungan CaO pada abu terbang kelas N dan F relatif kecil dibandingkan dengan kelas C dimana kandungan CaO kelas C lebih besar dari 20% (J. Temuujin dkk, 2009). Gambar 1. dan Gambar 2. masing-masing memperlihatkan jenis abu terbang kelas F dan jenis abu terbang kelas C yang biasa digunakan dalam membuat beton geopolimer maupun mortar geopolimer.

Tabel 8. Kebutuhan Kandungan Kimia Abu Terbang (ASTM C 618-05, 2005)

| Kebutuhan | Kelas | | |
|--|-------|-----|-----|
| | N | F | C |
| <i>Silicon dioxide</i> (SiO_2) plus <i>aluminium oxide</i> (Al_2O_3) plus <i>iron oxide</i> (Fe_2O_3), min, % | 70 | 70 | 50 |
| <i>Sulfur trioxide</i> (SO_3), maks, % | 4.0 | 5.0 | 5.0 |
| Moisuture, maks, % | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| Loss on ignition (LOI), maks, % | 10.0 | 6.0 | 6.0 |

Sumber: ASTM C 618-03, 2003



Gambar 1. Abu terbang kelas F



Gambar 2. Abu terbang kelas C

C.4. Air

Air diperlukan dalam pembuatan beton agar dapat terjadi reaksi kimiawi dengan semen untuk membasahi agregat dan untuk melumas campuran agar mudah pengerjaannya. Pada umumnya air minum dapat dipakai untuk campuran beton. Air yang mengandung senyawa-senyawa yang berbahaya, yang tercemar garam, minyak gula, atau bahan-bahan kimia lain, bila dipakai untuk campuran beton akan sangat menurunkan kekuatannya dan juga dapat mengubah sifat-sifat semen. Selain itu, air yang demikian dapat mengurangi afinitas antara agregat dengan pasta semen dan mungkin pula mempengaruhi kemudahan pengerjaan.

Karena karakter pasta semen merupakan hasil reaksi kimiawi antara semen dengan air, maka bukan perbandingan jumlah air terhadap total (semen + agregat halus + agregat kasar) material yang menentukan, melainkan hanya perbandingan antara air dan semen pada campuran yang menentukan. Air yang berlebihan akan menyebabkan banyaknya gelembung air setelah proses hidrasi selesai, sedangkan air yang terlalu sedikit akan menyebabkan proses hidrasi tidak seluruhnya selesai. Sebagai akibatnya beton yang dihasilkan akan kurang kekuatannya (Nawy, E. G. 1998).

C.5. Foam Agent

Foam agent adalah suatu larutan pekat dari jenis *polyether polyol* yang dibentuk dari proses anionik. *Foam agent* yang digunakan berjenis *rigid foams* yang biasa digunakan dalam industri pelapis permukaan, perekat, atau sealant. Metode pengadukan foam agent bisa dilakukan dengan mesin generator busa dan metode adukan manual.

C.6. Admixture

Menurut SNI 03-2495-1991, bahan tambahan adalah suatu bahan berupa bubuk atau cairan, yang dibubuhkan kedalam campuran beton selama pengadukan dalam jumlah tertentu untuk merubah beberapa sifatnya.

Ketentuan dan syarat mutu bahan tambahan kimia sesuai dengan ASTM C 494-81 "Standard Specification for Chemical Admixture for Concrete". Definisi type dan jenis bahan tambahan kimia tersebut dapat diterangkan sebagai berikut :

- a. Tipe A : *Water Reducing Admixture*, adalah bahan tambahan yang bersifat mengurangi jumlah air pencampuran beton untuk menghasilkan beton yang konsistensinya tertentu.
- b. Tipe B : *Retarding Admixture*, adalah bahan tambahan yang berfungsi menghambat pengikatan beton.
- c. Tipe C : *Accelerating Admixture*, adalah bahan tambahan

berfungsi mempercepat pengikatan dan pengembangan kekuatan awal beton.

- d. Tipe D : *Water Reducing and Retarding Admixture*, adalah bahan tambahan berfungsi ganda untuk mengurangi jumlah air pencampuran yang diperlukan untuk menghasilkan beton dengan konsistensi tertentu dan menghambat pengikatan beton.
- e. Tipe E : *Water Reducing and Accelerating Admixture*, adalah bahan tambahan berfungsi ganda untuk mengurangi jumlah air pencampuran yang diperlukan untuk menghasilkan beton dengan konsistensi tertentu dan mempercepat pengikatan beton.
- f. Tipe F : *Water Reducing and High Range Admixture*, adalah bahan tambahan yang berfungsi mengurangi jumlah air pencampuran yang diperlukan untuk menghasilkan beton dengan konsistensi tertentu sebanyak 12%.
- g. Tipe G : *Water Reducing, High Range and Retarding Admixture*, adalah bahan tambahan yang berfungsi mengurangi jumlah air pencampuran yang diperlukan untuk menghasilkan beton dengan konsistensi tertentu sebanyak 12% atau lebih dan juga menghambat pengikatan beton.

D. Sifat Mekanik Beton

Sifat mekanis beton keras dapat diklasifikasikan sebagai (1) sifat jangka pendek atau sesaat dan (2) sifat jangka panjang. Sifat jangka pendek adalah (1) kekuatan tekan, tarik dan geser, dan (2) kekuatan yang

diukur dengan modulus elastisitasnya. Sifat jangka panjang dapat diklasifikasikan dalam rangkai dan susut. Namun, pada penelitian ini hanya membahas kuat tekan beton saja. Beton baik dalam menahan tegangan tekan dari pada jenis tegangan yang lain dan umumnya pada perencanaan struktur beton memanfaatkan sifat ini. Karenanya kekuatan tekan dari beton dianggap sifat yang paling penting dalam banyak kasus.

D.1. *Slump*

Slump adalah penurunan ketinggian pada pusat permukaan atas beton yang diukur segera setelah cetakan uji *slump* diangkat. Pengujian *slump* merupakan suatu teknik untuk memantau homogenitas dan *workability* adukan beton segar dengan suatu kekentalan tertentu yang dinyatakan dengan satu nilai *slump* . Dalam kondisi laboratorium, dengan material beton yang terkendali secara ketat, nilai *slump* umumnya meningkat sebanding dengan nilai kadar air campuran beton, dengan demikian berbanding terbalik dengan kekuatan beton. Tetapi dalam pelaksanaan di lapangan harus hati-hati, karena banyak faktor yang berpengaruh terhadap perubahan adukan beton pada pencapaian nilai *slump* yang ditentukan, sehingga hasil *slump* yang diperoleh di lapangan tidak sesuai dengan kekuatan beton yang diharapkan. (SNI 1972:2008).

D.2. Berat Volume Beton

Berat volume menurut SNI 1973:2016 adalah berat per

satuan volume. Berdasarkan SNI 1973:2016 untuk menghitung berat volume (*density*) beton dalam kondisi segar dapat digunakan rumus :

$$D = \frac{M_c - M_m}{V_m}$$

Dimana :

D = Densitas beton (kg/m^3)

M_c = Massa wadah ukur yang diisi beton (kg)

M_m = Massa wadah ukur (kg)

V_c = Volume wadah ukur (m^3)

Untuk menghitung berat volume (*density*) beton dalam kondisi bebas udara dapat digunakan rumus :

$$D = \frac{M}{V}$$

Dimana :

D = Densitas beton dalam kondisi bebas udara (kg/m^3)

M = Massa total dari semua material dalam campuran (kg)

V = Volume absolut total dari komponen material dalam campuran (m^3)

D.3. Kekuatan Tekan

Kekuatan tekan dapat dicapai sampai 14000 psi atau lebih, bergantung pada jenis campuran, sifat-sifat agregat, serta lama dan kualitas perawatan. Kekuatan beton yang paling umum digunakan

adalah sekitar 3000 psi (20.684 N/mm²) sampai 6000 psi (41.368 N/mm²), dan beton komersial dengan agregat biasa, kekuatannya sekitar 300 psi (2.068 N/mm²) sampai 10000 psi (68.947 N/mm²). Kekuatan tekan f'_c ditentukan dengan silinder standar (berukuran 6 in x 12 in) yang dirawat dibawah kondisi standar laboratorium pada kecepatan pembebanan tertentu, pada umur 28 hari. Spesifikasi standar yang dipakai di Amerika Serikat biasanya diambil dari ASTM C-39. Perlu dipahami bahwa kekuatan silinder karena perbedaan pemadatan dan kondisi perawatan. (Nawy, E. G. 1998).

Kuat tekan beban beton adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu, yang dihasilkan oleh mesin tekan. Berdasarkan SNI 1974:2011, kuat tekan beton dihitung dengan membagi beban tekan maksimum yang diterima benda uji selama pengujian dengan luar penampang melintang.

$$f'_c = \frac{P}{A}$$

Dimana:

f'_c = Kuat tekan beton (N/mm²)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang yang menerima beban (mm²)

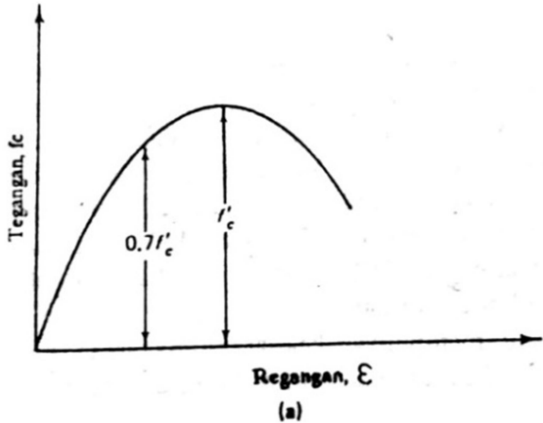
Dalam penelitian ini, kuat tekan beton diwakili oleh tegangan tekan maksimum f'_c dengan satuan N/mm² atau MPa (Mega Pascal).

Besarnya kuat tekan beton dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

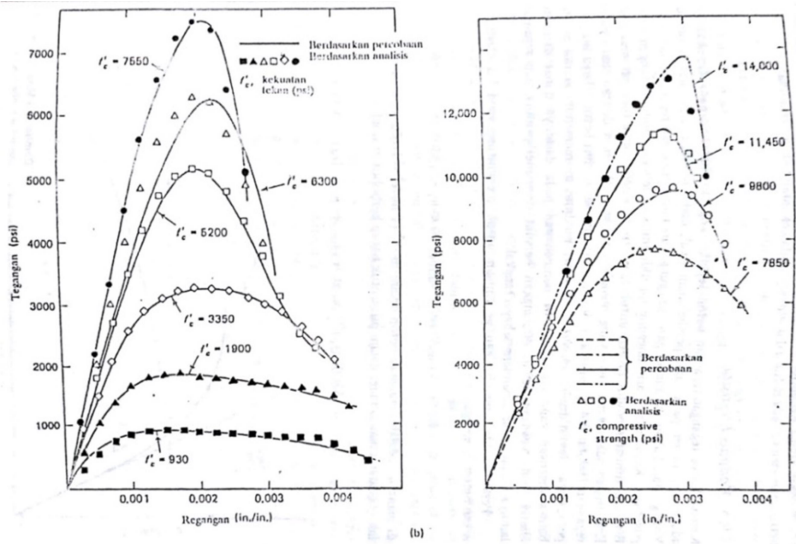
- a) Jenis semen dan kualitasnya, mempengaruhi kuat tekan rata-rata dan kuat batas beton
- b) Jenis dan tekstur bidang permukaan agregat
- c) Perawatan beton harus diperhatikan, sebab kehilangan kekuatan akibat pengeringan sebelum waktunya adalah sekitar 40%
- d) Suhu mempengaruhi kecepatan pengerasan
- e) Umur, pada keadaan normal kekuatan beton bertambah dengan umurnya

D.4. Kurva Tegangan-Regangan

Hubungan tegangan regangan beton perlu diketahui untuk menurunkan persamaan-persamaan analisis dan desain juga prosedur-prosedur pada struktur beton. Gambar 3. memperlihatkan kurva tegangan regangan tipikal yang diperoleh dari percobaan dengan menggunakan benda uji silinder beton dan dibebani tekan uniaksial selama beberapa menit.



Gambar 3. Kurva tegangan-regangan tipikal beton (Nawy, E. G. 1998).



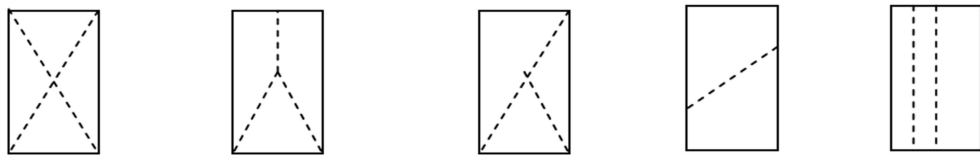
Gambar 4. Kurva tegangan-regangan untuk berbagai kekuatan beton (Nawy, E. G. 1998).

Bagian pertama kurva ini (sampai sekitar 40% dari f_c') pada umumnya untuk tujuan praktis dapat dianggap linear. Sesudah mendekati 70% tegangan hancur, materialnya banyak kehilangan kekakuannya sehingga menambah ketidaklinieran diagram. Pada beban batas, retak yang searah dengan arah beban menjadi sangat

terlihat dan hampir semua silinder beton (kecuali yang kekuatannya sangat rendah) akan segera hancur. Gambar 4. memperlihatkan kurva tegangan regangan beton untuk berbagai kekuatan yang diperoleh dari Portland cement Association. Terlihat jelas bahwa (1) semakin rendah kekuatan beton, semakin tinggi regangan hancurnya, (2) semakin tinggi kekuatan tekan beton, panjang bagian linier pada kurva semakin bertambah; dan (3) ada reduksi daktilitas apabila kekuatan beton bertambah (Nawy, E. G. 1998).

D.5. Pola Retak dan Kehancuran

Berdasarkan SNI 1974-2011 pola kehancuran pada benda uji dibedakan menjadi 5 bentuk :



Gambar 5. Pola kehancuran berdasarkan SNI 1974-2011

Keterangan:

1. Bentuk kehancuran kerucut
2. Bentuk kehancuran kerucut dan belah
3. Bentuk kehancuran kerucut dan geser
4. Bentuk kehancuran geser
5. Bentuk kehancuran sejajar sumbu tegak (kolumnar)

Pada penelitian ini pola retak yang terjadi pada benda uji yakni sejajar sumbu tegak (kolumnar).

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di dua tempat yaitu, pengecoran dilakukan di PT. Bosowa Semen Indonesia dan pengujian dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil, Fakultas teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa dengan waktu penelitian selama 2 bulan dimulai dari September 2019 sampai dengan Oktober 2019.

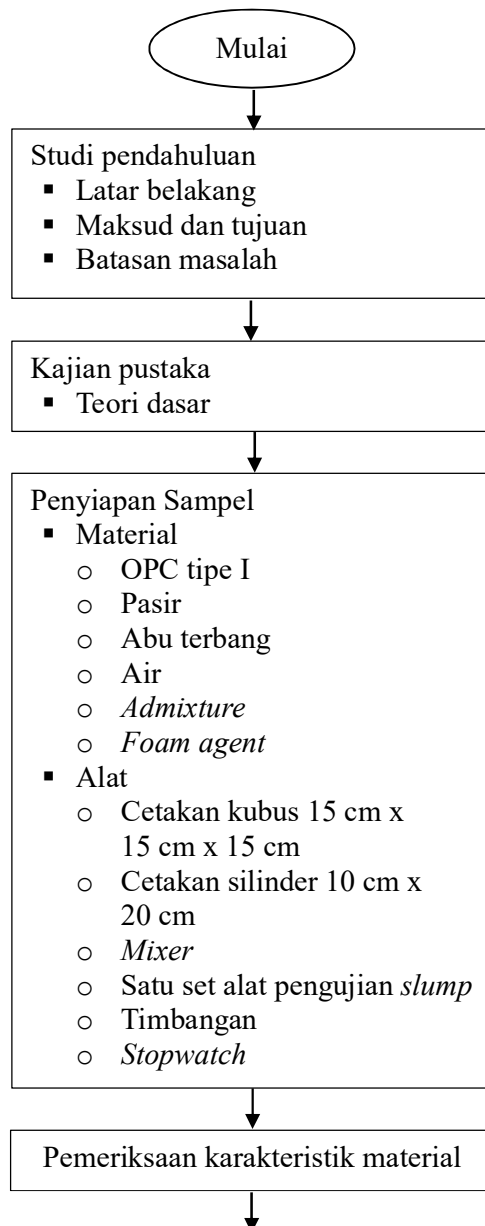
B. Jenis dan Sumber Penelitian

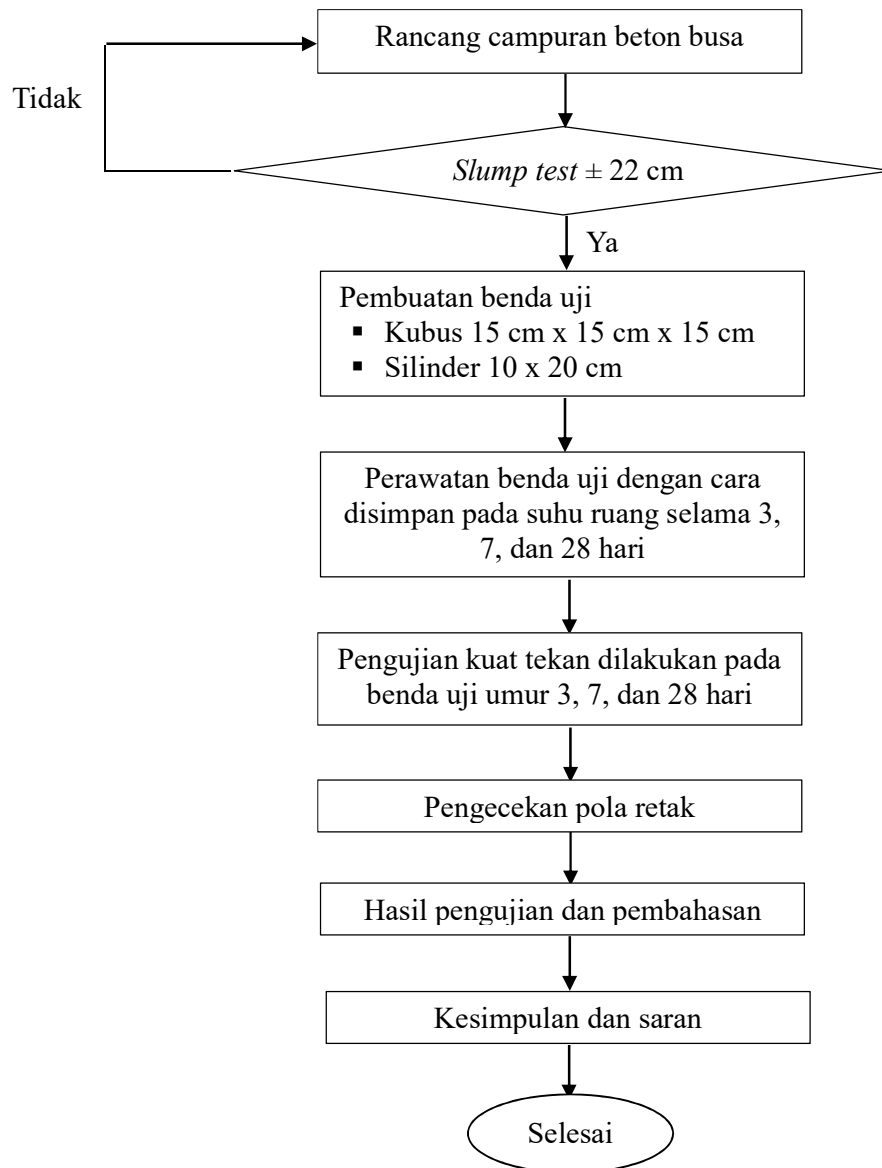
Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen di laboratorium. Untuk memperoleh data sebagai bahan utama dalam penelitian ini, maka digunakan dua metode pengumpulan data sebagai berikut :

- a. Studi pustaka, untuk memperoleh data sekunder dengan membaca sejumlah buku, artikel-artikel ilmiah sebagai landasan teori dalam menuju kesempurnaan penelitian ini.
- b. Pemeriksaan sampel dilakukan di laboratorium untuk mendapatkan data primer yang akan digunakan dalam menganalisa hasil dari penelitian yang dilaksanakan.

C. Bagan Alir Penelitian

Secara garis besar, tahapan penelitian yang dilaksanakan di laboratorium dapat dilihat pada Gambar 6. berikut ini :





Gambar 6. Bagan alir penelitian

D. Metode/Standar Pemeriksaan Karakteristik Material

D.1. Semen

Semen yang digunakan yaitu semen jenis *OPC (Ordinary Portland Cement)* tipe I. Pengujian karakteristik semen dilakukan di Laboratorium Pengujian Bosowa Semen dimana karakteristik dari semen yang digunakan telah memenuhi standar, SNI 2049:2015.

D.1.1. Karakteristik Fisik Semen

Hasil pemeriksaan karakteristik fisik semen yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 9. berikut :

Tabel 9. Hasil pemeriksaan karakteristik fisik semen

| No. | Karakteristik Material | Hasil Pemeriksaan | Persyaratan | Keterangan |
|-----|---|-------------------|----------------------------|----------------------|
| 1. | Kehalusan, <i>Blaine</i> (m^2/kg) | 346 | Minimum 280 | Memenuhi |
| 2. | <i>Autoclave expansion</i> (%) | 0,11 | Maksimum 0,80 | Memenuhi |
| 3. | Waktu Pengikatan, <i>Vicat test</i> (menit) | | | |
| | - <i>Initial set</i> - <i>Final set</i> | 125 260 | Minimum 45 Maksimum 375 | Memenuhi Memenuhi |
| 5. | Kuat tekan (kg/cm^2) | | | |
| | -3 hari | 188 | Minimum 135 | Memenuhi |
| | -7 hari | 266 | Minimum 215 | Memenuhi |
| | -28 hari | 359 | Minimum 300 | Memenuhi |
| 6. | <i>False set, final penetration</i> (%) | 83,66 | Minimum 50 | Memenuhi |
| 7. | Kandungan udara (% volume) | 4,53 | Maksimum 12 | Memenuhi |
| 8. | Berat jenis | 4,53 | | |

(Sumber : Sertifikat Mutu)

D.1.2. Karakteristik Kimia Semen

Hasil pemeriksaan karakteristik kimia semen yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 10. berikut :

Tabel 10. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Fisik Semen

| No. | Komposisi | Hasil Pemeriksaan | Persyaratan | Keterangan |
|-----|----------------------|-------------------|--------------|------------|
| 1. | MgO (%) | 2,68 | Maksimum 6,0 | Memenuhi |
| 2. | SO ₃ (%) | 2,13 | Maksimum 3,5 | Memenuhi |
| 3. | Hilang pijar (%) | 3,38 | Maksimum 5,0 | Memenuhi |
| 4. | Bagian tak larut (%) | 0,76 | Maksimum 3,0 | Memenuhi |
| 5. | Alkali (%) | 0,32 | Maksimum 0,6 | Memenuhi |

(Sumber : Sertifikat Mutu)

D.2. Abu Terbang

Metode pemeriksaan karakteristik abu terbang yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 11. berikut :

Tabel 11. Metode pemeriksaan karakteristik abu terbang

| No. | Jenis Pemeriksaan | Standar/Metode Uji |
|-----|------------------------------|--------------------|
| 1. | Pemeriksaan Berat Jenis | SNI 03-1964-2008 |
| 2. | Pemeriksaan Analisa Saringan | SNI 03-1968-1990 |

D.3. Agregat Halus

Metode pemeriksaan karakteristik agregat halus yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 12. berikut :

Tabel 12. Metode pemeriksaan karakteristik agregat halus

| No. | Jenis Pemeriksaan | Standar/Metode Uji |
|-----|--|--------------------|
| 1. | Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan | SNI 03-1970-2008 |
| 2. | Pemeriksaan Kadar Lumpur | SNI 03-4142-1996 |
| 3. | Pemeriksaan Analisa Saringan | SNI 03-1968-1990 |
| 4. | Pemeriksaan Berat Volume | SNI 1973:2016 |
| 5. | Pemeriksaan Kadar Air | SNI 1971:2011 |
| 6. | Pemeriksaan Kadar Organik | SNI 03-2816-1992 |

D.4. Admixture

Admixture yang digunakan merupakan *admixture* tipe F (*water reducing da high range admixture*), dimana bahan tambah berfungsi mengurangi jumlah air pencampuran yang diperlukan untuk menghasilkan beton dengan konsistensi tertentu sebanyak 12%. Karakteristik *admixture* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 13. berikut :

Tabel 13. Karakteristik *admixture*

| No. | Karakteristik Material | Hasil |
|-----|------------------------|-----------------|
| 1. | Warna | Coklat gelap |
| 2. | Berat jenis | 1,17 \pm 0,02 |

E. Analisa Rancangan Campuran (*Mix Design*)

Campuran yang dibuat terdiri dari 2 jenis variasi *mix design*, dimana *mix design* I terdiri dari semen, pasir, air, *admixture*, dan *foam* sementara *mix design* II terdiri dari semen, abu terbang, pasir, air, *admixture*, dan *foam*, dengan perbandingan semen dan abu terbang sebesar 70% : 30%.

F. Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

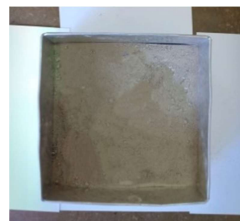
- a. *Universal Testing Machine (Tokyo Testing Machine Inc.)*
kapasitas 1000 kN.
- b. *Data logger* dan satu set komputer
- c. Mesin pencampur bahan (*mixer*)
- d. Cetakan berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dan cetakan berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm
- e. LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) 10 mm dan 25 mm
- f. *Stopwatch*
- g. *Magnetic Stand*

- h. Kabel LVDT 20 m
- i. Satu set alat pengujian *slump*

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Semen yang digunakan adalah semen jenis *OPC (Ordinary Portland Cement)* tipe I
- b. Abu terbang kelas F yang berasal dari Kabupaten Jeneponto
- c. Pasir silika yang berasal dari Kabupaten Pinrang
- d. *Admixture* tipe F
- e. *Foam agent*
- f. Air bersih

Material penyusun beton busa yang digunakan pada penelitian ini dapat terlihat pada Gambar 7 berikut :



a. Semen



b. Abu Terbang



c. Pasir Silika



d. *Admixture*



e. *Foam Agent*



f. Air

Gambar 7. Material beton busa

G. Pembuatan Benda Uji

Penelitian ini dirancang untuk mengetahui pengaruh penggunaan semen portland tipe I dan abu terbang terhadap kuat tekan beton busa. Cetakan yang digunakan adalah kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dan silinder ukuran 10 cm x 20 cm. Adapun jumlah benda uji pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 14. berikut ini:

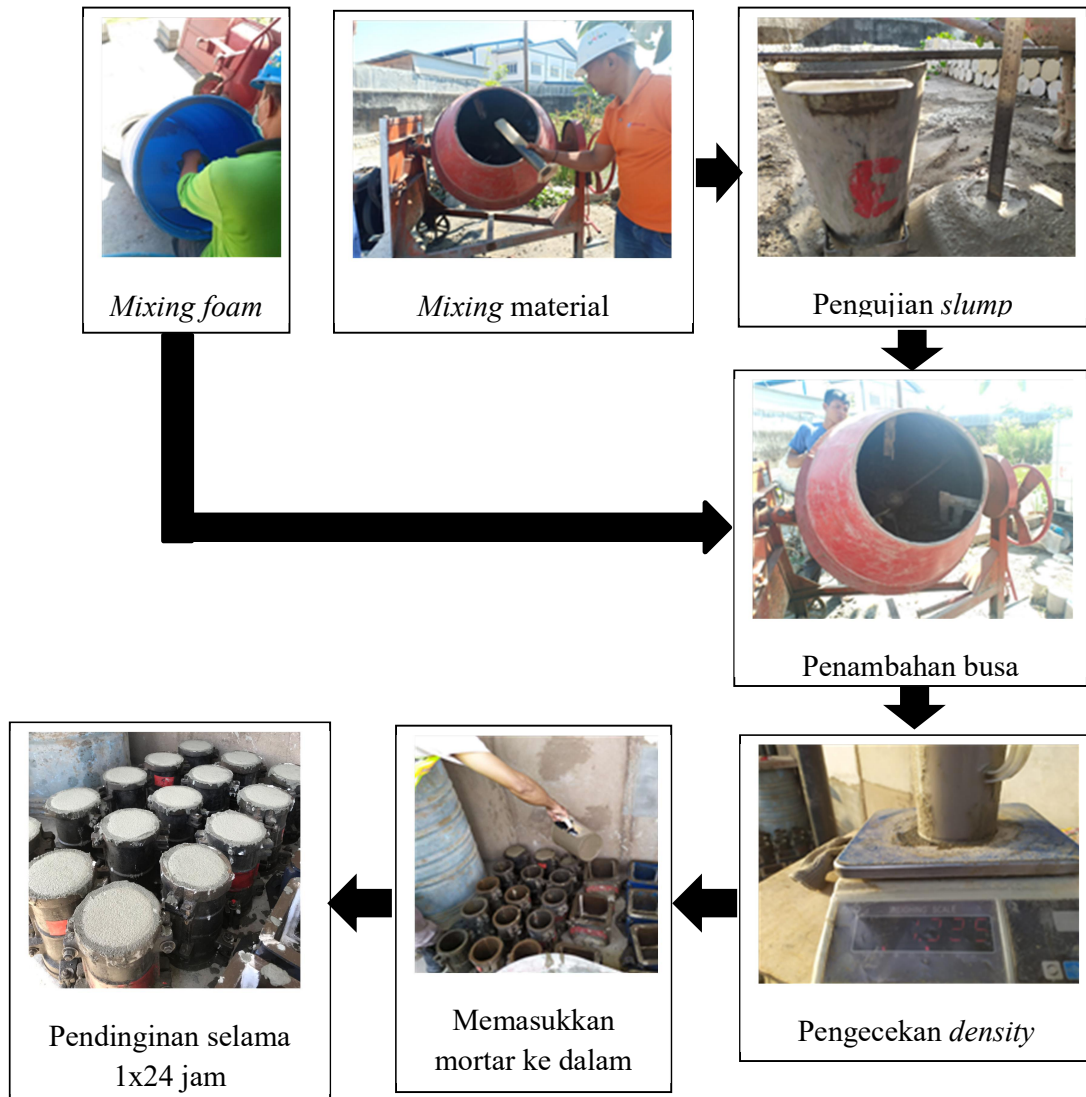
Tabel 14. Jumlah benda uji

| <i>Mix Design</i> | Bentuk Benda Uji | Durasi Curing Udara (Hari) | Jumlah Benda Uji | Jenis Pengujian |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------|-----------------|
| I | Kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm | 3 | 3 | Kuat Tekan |
| | | 7 | 3 | |
| | | 28 | 3 | |
| | Silinder 10 cm x 20 cm | 3 | 3 | |
| | | 7 | 3 | |
| | | 28 | 3 | |
| II | Kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm | 3 | 3 | |
| | | 7 | 3 | |
| | | 28 | 3 | |
| | Silinder 10 cm x 20 cm | 3 | 3 | |
| | | 7 | 3 | |
| | | 28 | 3 | |
| Total | | | 36 | |

Metode pembuatan benda uji yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Mula-mula dilakukan pembuatan campuran larutan berbuisa dengan cara melarutkan *foam agent* ke dalam wadah berisi air dengan perbandingan *foam agent* terhadap air sebesar 3:10. Larutan tersebut diaduk menggunakan propeler selama 2 menit hingga membentuk busa.

- b. Secara simultan dilakukan pembuatan 2 macam mortar yang berbeda. Mortar pertama mengandung pasir, air, *admixture*, dan *Ordinary Portland Cement (OPC)* sedangkan mortar kedua mengandung bahan-bahan yang sama ditambah dengan abu terbang. Semua bahan pada setiap jenis mortar diaduk menggunakan *mixer* dalam kondisi kering selama 2 menit, ditambahkan *admixture*, kemudian dilarutkan dalam air dan diaduk kembali selama 1 menit hingga mendapatkan *slump* yang diinginkan yaitu ± 22 cm.
- c. Campuran larutan berbuisa ditambahkan ke dalam kedua jenis mortar di dalam *mixer* kemudian dilakukan pengadukan kembali selama 3 menit hingga menjadi campuran *foam concrete*.
- d. Setelah dilakukan pengecekan *density foam concrete*, selanjutnya dilakukan pembuatan 2 macam benda uji dengan kedua jenis mortar dengan cara menuangkan *foam concrete* ke dalam cetakan kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dan cetakan silinder dengan ukuran 10 cm x 20 cm. Pemadatan dilakukan dengan menggoyangkan cetakan tersebut.
- e. Setelah 1 x 24 jam, benda uji dilepaskan dari cetakan untuk kemudian dilakukan perawatan dengan *curing* udara.



Gambar 8. Proses pembuatan benda uji

H. Perawatan Benda Uji

Untuk semua benda uji dilakukan perawatan (*curing*) yaitu *curing* udara. *Curing* udara merupakan perawatan dengan cara menyimpan benda uji pada suhu ruang setelah benda uji dikeluarkan dari cetakan hingga umur pengujian seperti yang terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Proses *curing* udara benda uji

I. Metode Pengujian *Slump*

Menurut SNI-1972-2008, *slump* adalah penurunan ketinggian pada pusat permukaan atas beton yang diukur segera setelah cetakan uji *slump* diangkat. Adapun *slump* rencana pada penelitian ini adalah 22 cm. Pengujian *slump* pada penelitian ini menggunakan standar uji SNI-1972-2008, dengan langkah kerja sebagai berikut :

- a. Basahi cetakan dan letakkan di atas permukaan datar, lembab, tidak menyerap air dan kaku. Cetakan harus ditahan secara kokoh

di tempat selama pengisian, oleh operator yang berdiri di atas bagian injakan. Dari contoh beton yang diperoleh, segera isi cetakan dalam tiga lapis, setiap lapis sekira sepertiga dari volume cetakan.

- b. Padatkan setiap lapisan dengan 25 tusukan menggunakan batang pemadat. Sebarkan penusukan secara merata di atas permukaan setiap lapisan. Untuk lapisan bawah akan ini akan membutuhkan penusukan secara miring dan membuat sekira setengah dari jumlah tusukan dekat ke batas pinggir cetakan, dan kemudian lanjutkan penusukan vertikal secara spiral pada seputar pusat permukaan. Padatkan lapisan bawah seluruhnya hingga kedalamannya. Hindari batang penusuk mengenai pelat dasar cetakan. Padatkan lapisan kedua dan lapisan atas seluruhnya hingga kedalamannya, sehingga penusukan menembus batas lapisan di bawahnya.
- c. Dalam pengisian dan pemadatan lapisan atas, lebihkan adukan beton di atas cetakan sebelum pemadatan dimulai. Bila pemadatan menghasilkan beton turun dibawah ujung atas cetakan, tambahkan adukan beton untuk tetap menjaga adanya kelebihan beton pada bagian atas dari cetakan. Setelah lapisan atas selesai dipadatkan, ratakan permukaan beton pada bagian atas cetakan dengan cara menggelindingkan batang penusuk di atasnya. Lepaskan segera cetakan dari beton dengan cara mengangkat dalam arah vertikal secara-hati-hati. Angkat cetakan dengan jarak 300 mm dalam

waktu 5 ± 2 detik tanpa gerakan lateral atau torsional. Selesaikan seluruh pekerjaan pengujian dari awal pengisian hingga pelepasan cetakan tanpa gangguan, dalam waktu tidak lebih dari $2 \frac{1}{2}$ menit.

- d. Setelah beton menunjukkan penurunan pada permukaan, ukur segera slump dengan menentukan perbedaan vertikal antara bagian atas cetakan dan bagian pusat permukaan atas beton. Bila terjadi keruntuhan atau keruntuhan geser beton pada satu sisi atau sebagian massa beton, abaikan pengujian tersebut dan buat pengujian baru dengan porsi lain dari contoh.

J. Pemeriksaan Berat Volume Beton

Berat volume menurut SNI 1973:2008 adalah berat per satuan volume. Beton busa termasuk ke dalam beton ringan. Berdasarkan SNI 2847:2013, beton ringan adalah beton yang mengandung agregat ringan berat volume setimbang (*equilibrium density*), antara 1140 dan 1840 kg/m^3 . Berdasarkan SNI 1973:2016 untuk menghitung berat volume (density) beton dalam kondisi segar dapat digunakan rumus :

$$D = \frac{M_c - M_m}{V_m}$$

Dimana :

D = Densitas beton (kg/m^3)

M_c = Massa wadah ukur yang diisi beton (kg)

M_m = Massa wadah ukur (kg)

V_c = Volume wadah ukur (m^3)

Untuk menghitung berat volume (density) beton dalam kondisi bebas udara dapat digunakan rumus :

$$D = \frac{M}{V}$$

Dimana :

D = Densitas beton dalam kondisi bebas udara (kg/m^3)

M = Massa total dari semua material dalam campuran (kg)

V = Volume absolut total dari komponen material dalam campuran (m^3)

K. Pengujian Benda Uji

Gambar pengujian benda uji dapat dilihat pada Gambar 10. Dan Gambar 11. Pengujian benda uji dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) kapasitas 1000 kN dan LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) yang disambungkan ke data *logger* serta satu set komputer.

Prosedur pelaksanaan pengujian beton terdiri dari beberapa tahapan, yaitu:

- a. Benda uji baik yang berbentuk kubus maupun silinder telah mencapai umur uji.
- b. Timbang benda uji tersebut.

- c. Letakkan benda uji pada *Universal Testing Machine (UTM)* kapasitas 1000 kN secara sentris
- d. Letakkan plat besi di bagian atas dan bawah benda uji untuk yang berbentuk kubus dan untuk benda uji berbentuk silinder plat besi hanya diletakkan di bagian atas benda uji.
- e. Atur alat *Universal Testing Machine (UTM)* dengan kecepatan penurunan yang tetap (*constant strain*) yaitu 0.5 mm/menit.
- f. Pasang LVDT secara vertikal hingga mengenai plat besi yang terdapat di atas benda uji dan pasang LVDT secara horizontal hingga mengenai benda uji.
- g. Jalankan *Universal Testing Machine (UTM)* kapasitas 1000 kN dan hasilnya tersimpan secara otomatis pada komputer.
- h. Dalam pengujian ini dapat diperoleh hasil kuat tekan beton dan modulus elastisitas dari beton.

K.1. Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan bertujuan untuk mengetahui kekuatan beton (*compressive strength*) yang dirawat (*curing*). Pengujian kuat tekan dilakukan pada saat beton berumur 3 hari, 7 hari, dan 28 hari dengan masing-masing menggunakan kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dan silinder ukuran 10 cm x 20 cm masing-masing sebanyak lima buah.

Berdasarkan SNI 1974:2011, kuat tekan beton dihitung dengan membagi beban tekan maksimum yang diterima benda uji selama pengujian dengan luas penampang melintang dan dapat dihitung dengan rumus :

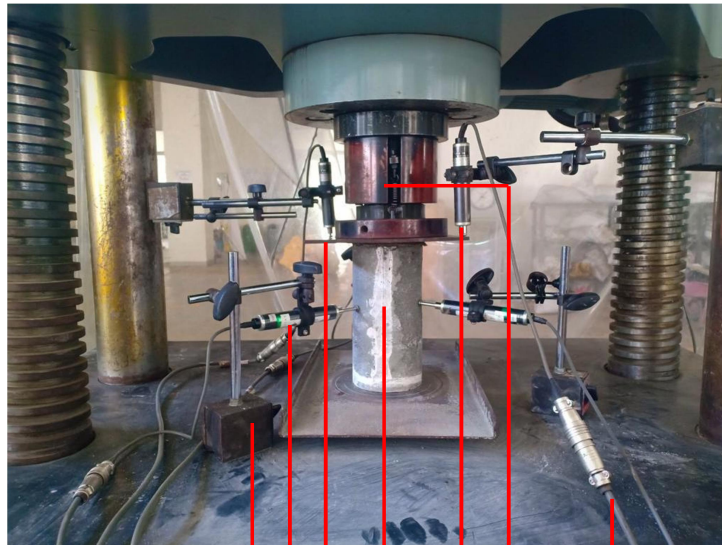
$$f'c = \frac{P}{A}$$

Dimana :

$f'c$ = Kuat tekan (N/mm^2)

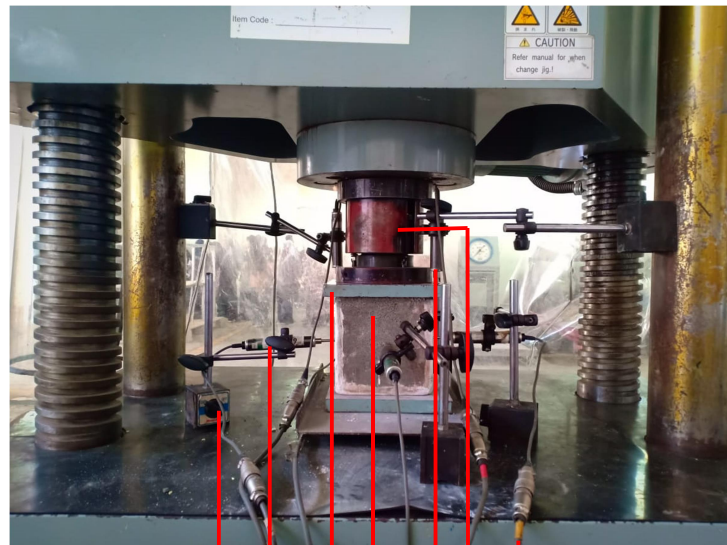
P = Gaya tekan aksial (N)

A = Luas penampang melintang benda uji (mm^2)



- Magnetik stand* ←
LVDT 25 mm ←
Plat besi ←
Benda uji ←
LVDT 10 mm ←
UTM 1000 kN ←
Kabel *LVDT 20 m* ←

Gambar 10. Pengujian kuat tekan silinder 10 cm x 20 cm



- Magnetik stand* ←
- LVDT 25 mm* ←
- Plat besi ←
- Benda uji ←
- LVDT 10 mm* ←
- UTM 1000 kN* ←
- Kabel *LVDT 20 m* ←

Gambar 11. Pengujian kuat tekan kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Material

A.1. Karakteristik Abu Terbang

A.1.1. Karakteristik Fisik Abu Terbang

Tabel 15. menunjukkan hasil pemeriksaan karakteristik fisik dari abu terbang kelas F yang berasal dari Jenepono. Dari hasil pemeriksaan diperoleh nilai berat jenis, yaitu 2,1. Sedangkan untuk hasil pemeriksaan analisa saringan diperoleh nilai persentase abu terbang yang lolos saringan no. 200 sebesar 90%.

Tabel 15. Hasil pemeriksaan karakteristik fisik abu terbang

| No. | Karakteristik Material | Hasil Pemeriksaan |
|-----|------------------------|----------------------------|
| 1. | Berat jenis | 2,1 |
| 2. | Analisa saringan | 90% lolos saringan No. 200 |

A.1.2. Karakteristik Kimia Abu Terbang

Abu terbang merupakan salah satu jenis limbah hasil pembakaran batu bara. ASTM C618-05 membagi abu terbang dalam tiga kategori, yaitu kelas N, kelas F, dan kelas C. Minimum kandungan senyawa SiO_2 , Al_2SO_3 , dan Fe_2O_3 adalah 70% untuk kelas N dan kelas F, sedangkan kelas C

antara 50%-70%. Komposisi kandungan kimia abu terbang diperlihatkan pada Tabel 16. berikut :

Tabel 16. Hasil pemeriksaan karakteristik kimia abu terbang

| No. | Komposisi | Hasil Pemeriksaan | Persyaratan | Keterangan |
|-----|---|-------------------|-------------|------------|
| 1. | SiO ₂ (%) | 44,56 | 40-53 | Memenuhi |
| 2. | Al ₂ SO ₃ (%) | 14,55 | 12-25 | Memenuhi |
| 3. | Fe ₂ O ₃ (%) | 11,83 | 10-16 | Memenuhi |
| 4. | SiO ₂ + Al ₂ SO ₃ + Fe ₂ O ₃ (%) | 70,94 | - | |
| 5. | CaO | 12,74 | - | |
| 6. | Hilang pijar (%) | 0,30 | 0,2-2,1 | Memenuhi |

A.2. Karakteristik Agregat Halus

Pengujian karakteristik fisik agregat halus yang digunakan berupa pasir silika yang berasal dari Kabupaten Pinrang, dilaksanakan di Laboratorium Eco Material Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin berdasarkan SNI. Hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus dapat dilihat pada table 17. berikut :

Tabel 17. Hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus

| No. | Karakteristik Material | Hasil Pemeriksaan | Persyaratan | Keterangan |
|-----|---|-------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| 1. | Berat Jenis -Berat jenis kering -Berat jenis SSD -Berat jenis semu | 2,584 2,608 2,649 | 1,5-3,3 1,5-3,3 1,5-3,3 | Memenuhi Memenuhi Memenuhi |
| 2. | Penyerapan air (%) | 0,911 | Maksimum 2% | Memenuhi |
| 3. | Kadar lumpur (%) | 0,959 | Maksimum 5% | Memenuhi |
| 4. | Modulus kehalusan (%) | 1,256 | 2,3-3,1 | Tidak Memenuhi |
| 5. | Berat volume (kg/lt) -Lepas -Padat | 1,40 1,48 | 1,4-1,9 1,4-1,9 | Memenuhi Memenuhi |
| 6. | Kadar air | 3,59% | 2-5% | Memenuhi |
| 7. | Kadar organic | No. 1 | < No. 3 | Memenuhi |

B. Rancangan Campuran (*Mix Design*)

Benda uji beton busa dibuat 2 jenis variasi campuran, yaitu pada variasi campuran pertama tidak menggunakan abu terbang sedangkan variasi campuran kedua menggunakan abu terbang dimana perbandingan antara semen dan abu terbang ialah 70% : 30%. Adapun rancangan campuran beton benda uji dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 18. dan Tabel 19. berikut ini:

Tabel 18. Rancangan campuran beton busa untuk *mix design* I

| Material | Jenis | Berat Jenis | <i>Mix design</i> (1 m ³) |
|---------------------------------------|--------|-------------|--|
| Semen | OPC | 3,12 | 667,41 kg |
| Pasir | Silika | 2,48 | 1334,82 kg |
| Air | Tanah | 1 | 233,59 kg |
| <i>Admixture</i> | Tipe F | 1,16 | 16,69 kg |
| <i>Density</i> | | | 1325 gr/lt |
| <i>Mortar portion</i> | | | 44,44 % |
| <i>Foam portion</i> | | | 55,6 % |
| Perbandingan <i>foam agent/air</i> | | | 0,30 |

Tabel 19. Rancangan campuran beton busa untuk *mix design* II

| Material | Jenis | Berat Jenis | <i>Mix design</i> (1 m ³) |
|---------------------------------------|---------|-------------|--|
| Semen | OPC | 3,12 | 501,38 kg |
| Abu terbang | Kelas F | 2,1 | 214,88 kg |
| Pasir | Silika | 2,48 | 1432,51 kg |
| Air | Tanah | 1 | 175,48 kg |
| <i>Admixture</i> | Tipe F | 1,16 | 12,53 kg |
| <i>Density</i> | | | 1325 gr/lt |
| <i>Mortar portion</i> | | | 42,8 % |
| <i>Foam portion</i> | | | 57,2 % |
| Perbandingan <i>foam agent/air</i> | | | 0,30 |

C. Pengujian *Slump*

Hasil pengujian *slump* pada kedua variasi campuran adalah sebesar 22 cm, dimana nilai *slump* tersebut sudah sesuai dengan *slump* rencana. Dari observasi visual terlihat bahwa beton segar memiliki sifat adesif antara pasta atau mortar dengan agregat yang baik sehingga tidak terjadi segregasi dan *bleeding* seperti yang terlihat pada Gambar 12. berikut :

Tabel 21. Berat volume beton keras kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm

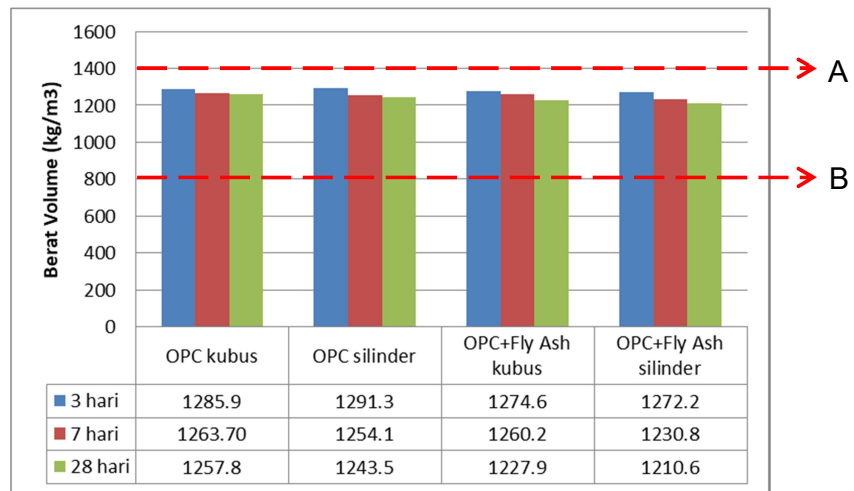
| <i>Mix Design</i> | Durasi Curing Udara (Hari) | Sampel | Berat (kg) | Volume (m³) | Berat Volume (kg/m³) |
|-------------------|-----------------------------------|---------------|-------------------|-------------------------------|--|
| I | 3 | 1 | 4,565 | 0,0034 | 1352,6 |
| | | 2 | 4,180 | 0,0034 | 1238,5 |
| | | 3 | 4,275 | 0,0034 | 1266,7 |
| | | Rata-rata | | | |
| | 7 | 1 | 4,310 | 0,0034 | 1277,0 |
| | | 2 | 4,230 | 0,0034 | 1253,3 |
| | | 3 | 4,255 | 0,0034 | 1260,7 |
| | | Rata-rata | | | |
| | 28 | 1 | 4,230 | 0,0034 | 1253,3 |
| | | 2 | 4,170 | 0,0034 | 1235,6 |
| | | 3 | 4,335 | 0,0034 | 1284,4 |
| | | Rata-rata | | | |
| II | 3 | 1 | 4330 | 0,0034 | 1283,0 |
| | | 2 | 4350 | 0,0034 | 1288,9 |
| | | 3 | 4225 | 0,0034 | 1251,9 |
| | | Rata-rata | | | |
| | 7 | 1 | 4,340 | 0,0034 | 1285,9 |
| | | 2 | 4,235 | 0,0034 | 1254,8 |
| | | 3 | 4,185 | 0,0034 | 1240,0 |
| | | Rata-rata | | | |
| | 28 | 1 | 4,290 | 0,0034 | 1271,1 |
| | | 2 | 4,270 | 0,0034 | 1265,2 |
| | | 3 | 3,872 | 0,0034 | 1147,3 |
| | | Rata-rata | | | |

Tabel 22. Berat volume beton keras silinder ukuran 10 cm x 20 cm

| <i>Mix Design</i> | Durasi Curing Udara (Hari) | Sampel | Berat (kg) | Volume (m³) | Berat Volume (kg/m³) |
|-------------------|-----------------------------------|---------------|-------------------|-------------------------------|--|
| I | 3 | 1 | 2,020 | 0,0016 | 1286,0 |
| | | 2 | 2,025 | 0,0016 | 1289,2 |
| | | 3 | 2,040 | 0,0016 | 1298,7 |
| | | Rata-rata | | | |
| | 7 | 1 | 1,955 | 0,0016 | 1244,6 |
| | | 2 | 1,975 | 0,0016 | 1257,3 |

| | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|--------|--------|--------|
| | | 3 | 1,980 | 0,0016 | 1260,5 |
| | | Rata-rata | | | 1254,1 |
| 28 | | 1 | 1,935 | 0,0016 | 1231,9 |
| | | 2 | 1,920 | 0,0016 | 1222,3 |
| | | 3 | 2,005 | 0,0016 | 1276,4 |
| | Rata-rata | | | 1243,5 | |
| II | 3 | 1 | 2,020 | 0,0016 | 1286,0 |
| | | 2 | 2,020 | 0,0016 | 1286,0 |
| | | 3 | 1,955 | 0,0016 | 1244,6 |
| | Rata-rata | | | 1272,2 | |
| | 7 | 1 | 1,930 | 0,0016 | 1228,7 |
| | | 2 | 1,925 | 0,0016 | 1225,5 |
| | | 3 | 1,945 | 0,0016 | 1238,2 |
| | Rata-rata | | | 1230,8 | |
| | 28 | 1 | 1,910 | 0,0016 | 1215,9 |
| | | 2 | 1,890 | 0,0016 | 1203,2 |
| 3 | | 1,905 | 0,0016 | 1212,8 | |
| Rata-rata | | | 1210,6 | | |

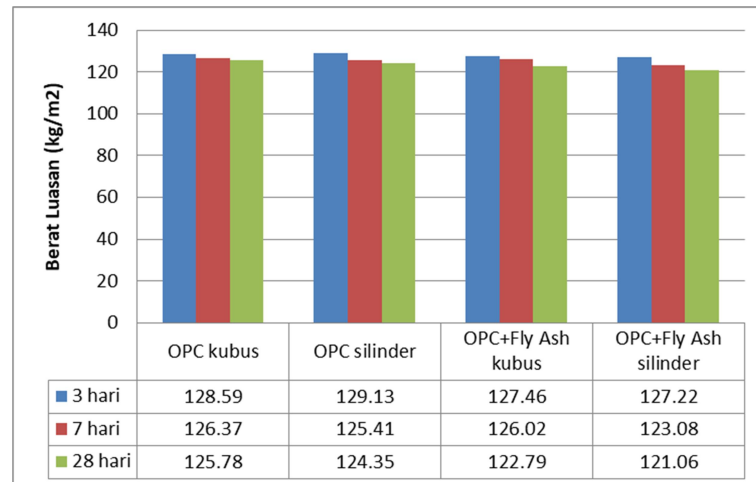
Hasil pemeriksaan berat volume menunjukkan bahwa seluruh benda uji merupakan beton ringan sesuai dengan SNI 2847:2013, yaitu berat volume antara 1140 dan 1840 kg/m³.



— → A Berat volume minimum beton struktural

— → B Berat volume minimum beton struktural ringan

Gambar 13. Diagram berat volume beton busa



Gambar 14. Diagram berat per luasan beton busa

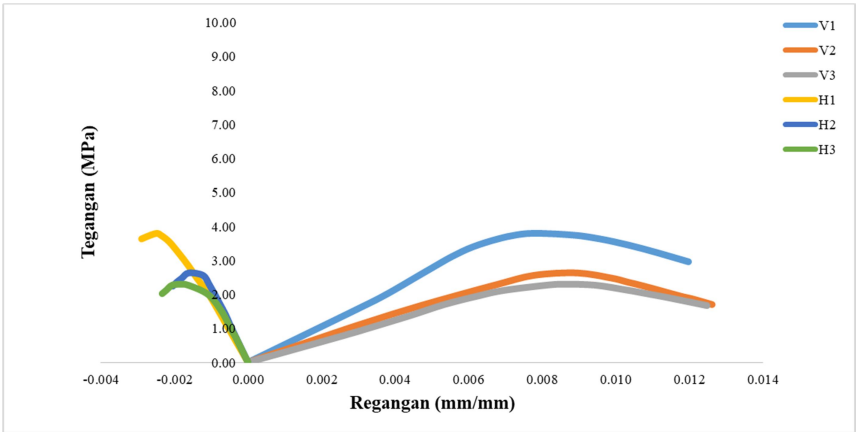
Dari Gambar 13. dapat dilihat bahwa semakin bertambahnya umur maka berat volume beton busa semakin berkurang. Berdasarkan SNI 03-3449-2002, garis A pada Gambar 13 adalah berat volume minimum beton struktural yaitu 1400 MPa dan garis B ialah berat volume minimum beton struktural ringan yaitu 800 MPa . Gambar 14 menunjukkan berat per luasan beton busa, dimana diperoleh nilai 120 – 125 kg/m².

E. Hubungan Tegangan-Regangan Beton Busa

E.1. Pengujian Benda Uji Umur 3 Hari untuk *Mix Design I*

Gambar 15. menunjukkan hubungan tegangan-regangan 3 buah benda uji umur 3 hari untuk *mix design I* dengan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm. Terlihat bahwa benda uji 1 mempunyai tegangan puncak sebesar 3,7941 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0079 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0025 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,5176 MPa. Benda uji 2

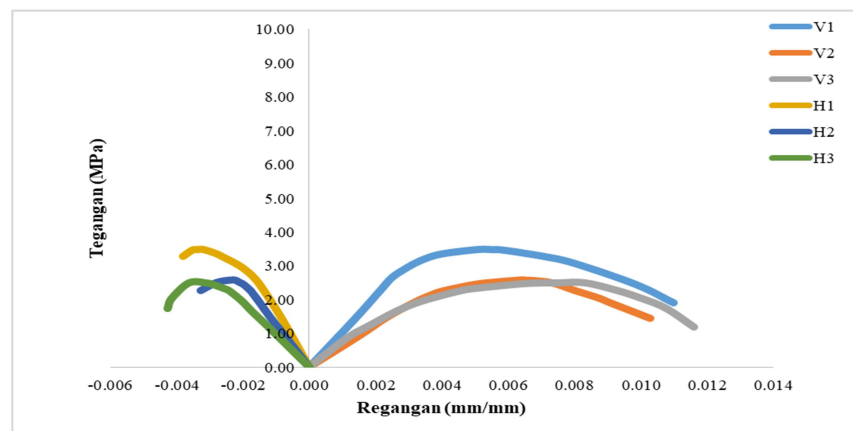
mempunyai tegangan puncak sebesar 2,6293 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0089 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0016 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,0517 MPa . Benda uji 3 mempunyai tegangan puncak sebesar 2,2981 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0086 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0018 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 0,9192 MPa.



Gambar 15. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dengan umur pengujian 3 hari untuk *mix design* I

Gambar 16. menunjukkan hubungan tegangan-regangan 3 buah benda uji umur 3 hari untuk *mix design* I dengan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm. Terlihat bahwa benda uji 1 mempunyai tegangan puncak sebesar 3,4794 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0051 mm/mm

dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0032 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,3917 MPa. Benda uji 2 mempunyai tegangan puncak sebesar 2,5758 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0065 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0024 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,0307 MPa. Benda uji 3 mempunyai tegangan puncak sebesar 2,4955 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0083 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0036 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 0,9082 MPa.

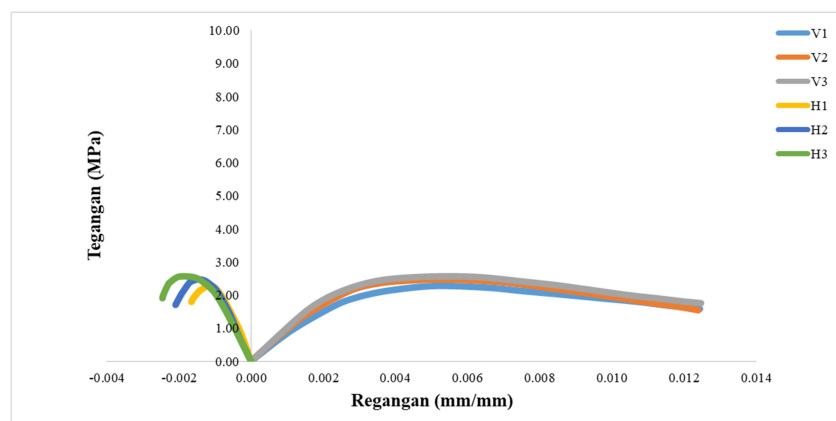


Gambar 16. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm dengan umur pengujian 3 hari untuk *mix design I*

E.2. Pengujian Benda Uji Umur 3 Hari untuk *Mix Design II*

Gambar 17. menunjukkan hubungan tegangan-regangan 3 buah benda uji umur 3 hari untuk *mix design II* dengan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm. Terlihat bahwa

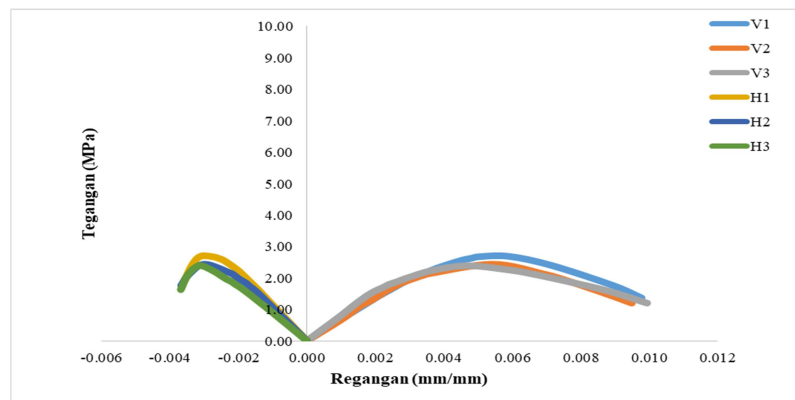
benda uji 1 mempunyai tegangan puncak sebesar 2,2690 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0056 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0012 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 0,9072 MPa. Benda uji 2 mempunyai tegangan puncak sebesar 2,4661 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0056 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0015 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 0,9864 MPa. Benda uji 3 mempunyai tegangan puncak sebesar 2,5583 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0057 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0020 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,0233MPa.



Gambar 17. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dengan umur pengujian 3 hari untuk *mix design II*

Gambar 18. menunjukkan hubungan tegangan-regangan 3 buah benda uji umur 3 hari untuk *mix design II* dengan benda uji

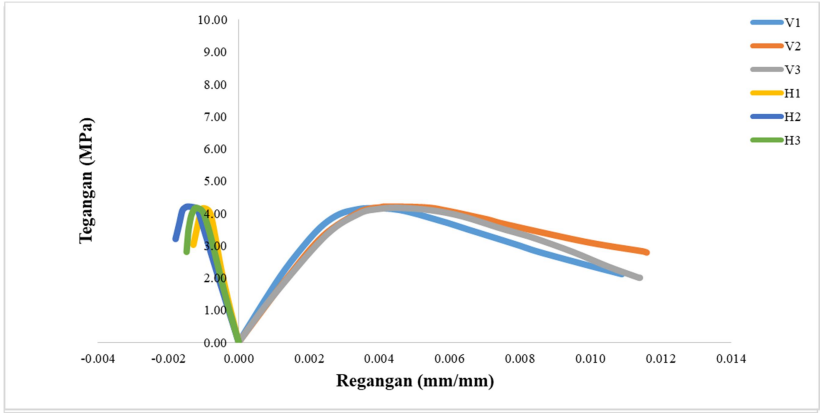
berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm. Terlihat bahwa benda uji 1 mempunyai tegangan puncak sebesar 2,6882 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0059 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0031 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,0753 MPa. Benda uji 2 mempunyai tegangan puncak sebesar 2,4352 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0054 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0030 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 0,9741 MPa. Benda uji 3 mempunyai tegangan puncak sebesar 2,3878 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0047 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0031 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 0,9551 MPa.



Gambar 18. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm dengan umur pengujian 3 hari untuk *mix design II*

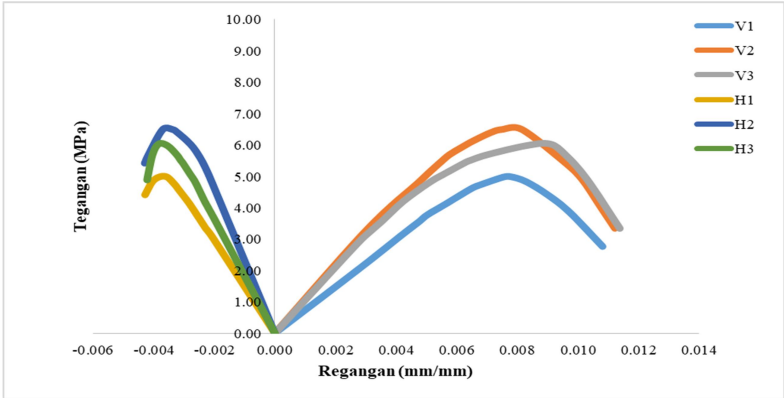
E.3. Pengujian Benda Uji Umur 7 Hari untuk *Mix Design I*

Gambar 19. menunjukkan hubungan tegangan-regangan 3 buah benda uji umur 7 hari untuk *mix design* I dengan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm. Terlihat bahwa benda uji 1 mempunyai tegangan puncak sebesar 4,1521 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0037 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0010 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,6608 MPa. Benda uji 2 mempunyai tegangan puncak sebesar 4,2036 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0041 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0014 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,6814 MPa. Benda uji 3 mempunyai tegangan puncak sebesar 4,1683 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0045 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0012 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,6673 MPa.



Gambar 19. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dengan umur pengujian 7 hari untuk *mix design* I

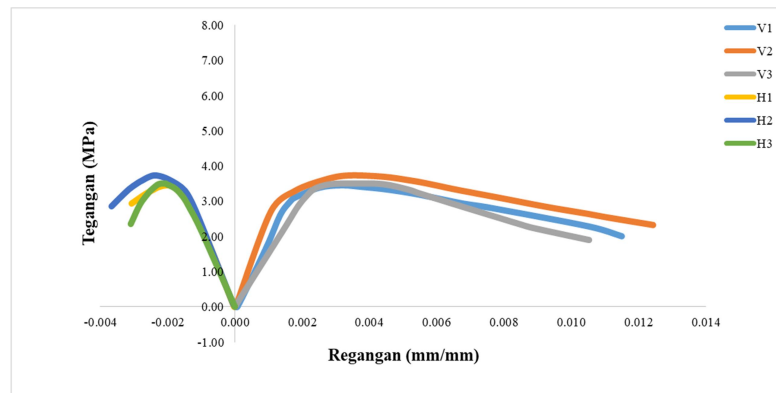
Gambar 20. menunjukkan hubungan tegangan-regangan 3 buah benda uji umur 7 hari untuk *mix design* I dengan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm. Terlihat bahwa benda uji 1 mempunyai tegangan puncak sebesar 4,9866 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0078 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0038 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,9946 MPa. Benda uji 2 mempunyai tegangan puncak sebesar 3,9287 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0082 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0037 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,2991 MPa. Benda uji 3 mempunyai tegangan puncak sebesar 3,8173 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0091 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0038 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1.2068 MPa.



Gambar 20. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm dengan umur pengujian 7 hari untuk *mix design I*

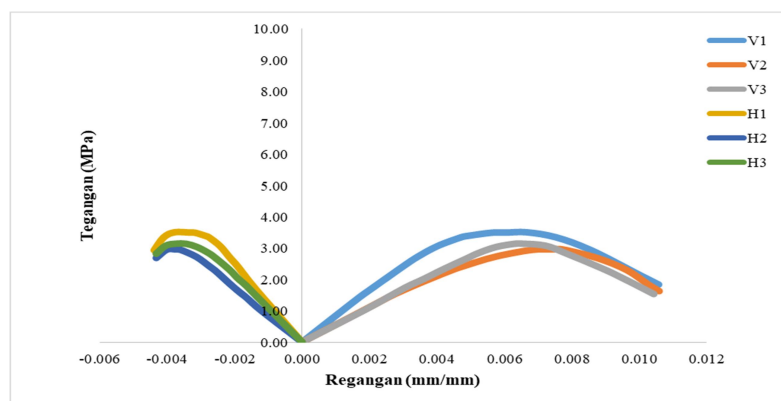
E.4. Pengujian Benda Uji Umur 7 Hari untuk *Mix Design II*

Gambar 21. menunjukkan hubungan tegangan-regangan 3 buah benda uji umur 7 hari untuk *mix design II* dengan benda uji berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm. Benda uji 1 mempunyai tegangan puncak sebesar 3,4470 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0032 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0020 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,3788 MPa. Benda uji 2 mempunyai tegangan puncak sebesar 3,7263 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0034 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0023 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,4905 MPa. Benda uji 3 mempunyai tegangan puncak sebesar 3,4976 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0035 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0021 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,3990 MPa.



Gambar 21. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dengan umur pengujian 7 hari untuk *mix design* II

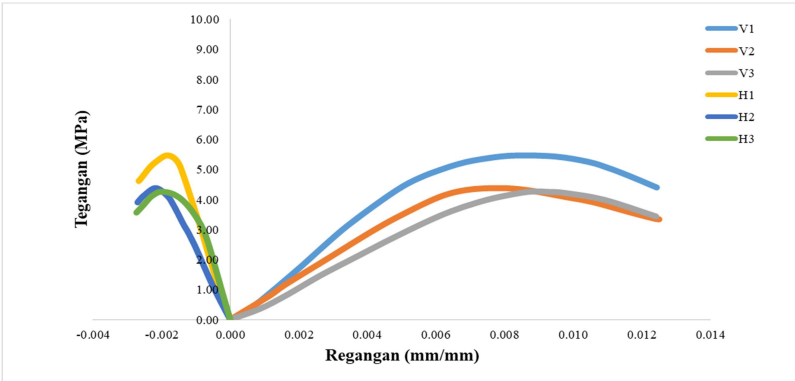
Gambar 22. menunjukkan hubungan tegangan-regangan 3 buah benda uji umur 7 hari untuk *mix design* II dengan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm. Terlihat bahwa benda uji 1 mempunyai tegangan puncak sebesar 3,5071 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0067 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0038 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,4028 MPa. Benda uji 2 mempunyai tegangan puncak sebesar 2,9598 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0074 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0038 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,1839 MPa. Benda uji 3 mempunyai tegangan puncak sebesar 3,1432 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0074 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0037 mm/mm, dimana E_{40} 1,2573 MPa.



Gambar 22. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm dengan umur pengujian 7 hari untuk *mix design* II

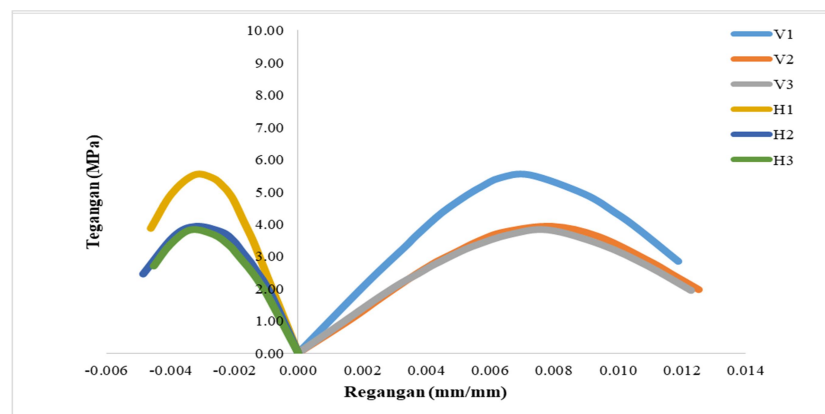
E.5. Pengujian Benda Uji Umur 28 Hari untuk *Mix Design* I

Gambar 23 menunjukkan hubungan tegangan-regangan 3 buah benda uji umur 28 hari untuk *mix design* I dengan benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm. Benda uji 1 mempunyai tegangan puncak sebesar 5,4603 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0083 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0019 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 2,1842 MPa. Benda uji 2 mempunyai tegangan puncak sebesar 4,3768 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0078 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0022 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,7507 MPa. Benda uji 3 mempunyai tegangan puncak sebesar 4,2544 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0087 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0020 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,8789 MPa.



Gambar 23. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dengan umur pengujian 28 hari untuk *mix design* I

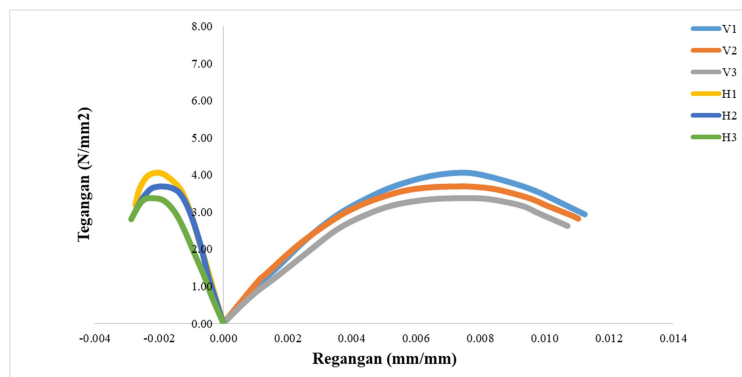
Gambar 24. menunjukkan hubungan tegangan-regangan 3 buah benda uji umur 28 hari untuk *mix design* I dengan benda uji silinder 10 cm x 20 cm. Terlihat bahwa benda uji 1 mempunyai tegangan puncak sebesar 5,5214 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0073 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0027 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 2,2086 MPa. Benda uji 2 mempunyai tegangan puncak sebesar 3,2477 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0079 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0024 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,5715 MPa. Benda uji 3 mempunyai tegangan puncak sebesar 3,0171 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0078 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0026 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,5269 MPa.



Gambar 24. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm dengan umur pengujian 28 hari untuk *mix design* I

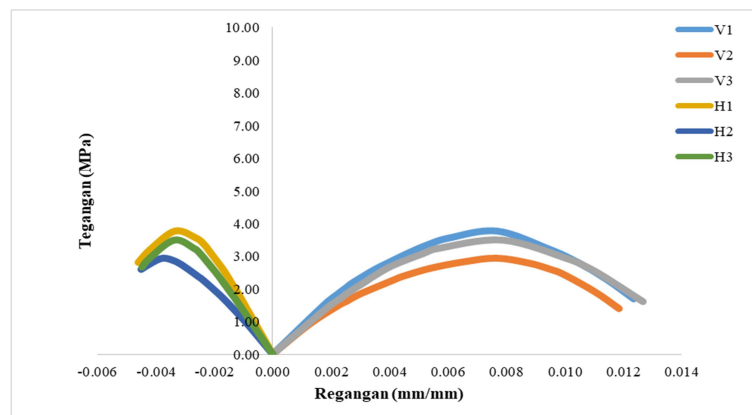
E.6. Pengujian Benda Uji Umur 28 Hari untuk *Mix Design* II

Gambar 25 menunjukkan hubungan tegangan-regangan 3 buah benda uji umur 28 hari untuk *mix design* II dengan benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm. Benda uji 1 mempunyai tegangan puncak sebesar 4,0517 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0075 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0021 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,6207 MPa. Benda uji 2 mempunyai tegangan puncak sebesar 3,6811 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0072 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0019 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,4724 MPa. Benda uji 3 mempunyai tegangan puncak sebesar 3,3656 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0075 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0022 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,3462 MPa.



Gambar 25. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dengan umur pengujian 28 hari untuk *mix design* II

Gambar 26. menunjukkan hubungan tegangan-regangan 3 buah benda uji umur 28 hari untuk *mix design* II dengan benda uji silinder ukuran 10 cm x 20 cm. Benda uji 1 mempunyai tegangan puncak sebesar 3,7707 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0077 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0033 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,5083 MPa. Benda uji 2 mempunyai tegangan puncak sebesar 2,9409 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0077 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0037 mm/mm, dimana E_{40} sebesar 1,1764 MPa. Benda uji 3 mempunyai tegangan puncak sebesar 3,4939 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0079 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0034 mm/mm, dimana E_{40} 1,3975 MPa.



Gambar 26. Hubungan tegangan-regangan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm dengan umur pengujian 28 hari untuk *mix design* II

F. Kuat Tekan Beton Busa

Hasil pengujian kuat tekan beton pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 23. Berdasarkan Tabel 23. didapatkan nilai kuat tekan rata-rata beton busa dengan bentuk benda uji kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm untuk *mix design* I berkisar antara 2,9071- 4,6972 MPa dan untuk *mix design* II cm berkisar antara 2,4312- 3,3656 MPa. Sementara berdasarkan Tabel 24. didapatkan nilai kuat tekan rata-rata beton busa dengan bentuk benda uji silinder ukuran 10 cm x 20 cm untuk *mix design* I berkisar antara 2,8506 - 4,4225 MPa dan untuk *mix design* II cm berkisar antara 2,5037-3,4018 MPa. Tabel 23. dan Tabel 24 menunjukkan peningkatan kuat tekan dengan semakin bertambahnya umur.

Dari Gambar 26. dapat dilihat bahwa kuat tekan menunjukkan peningkatan dengan semakin bertambahnya umur. Dapat dilihat pula bahwa benda uji yang berbentuk kubus memiliki kuat tekan yang lebih besar dibandingkan benda uji yang berbentuk silinder.

Tabel 23. Hasil pengujian kuat tekan benda uji kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm

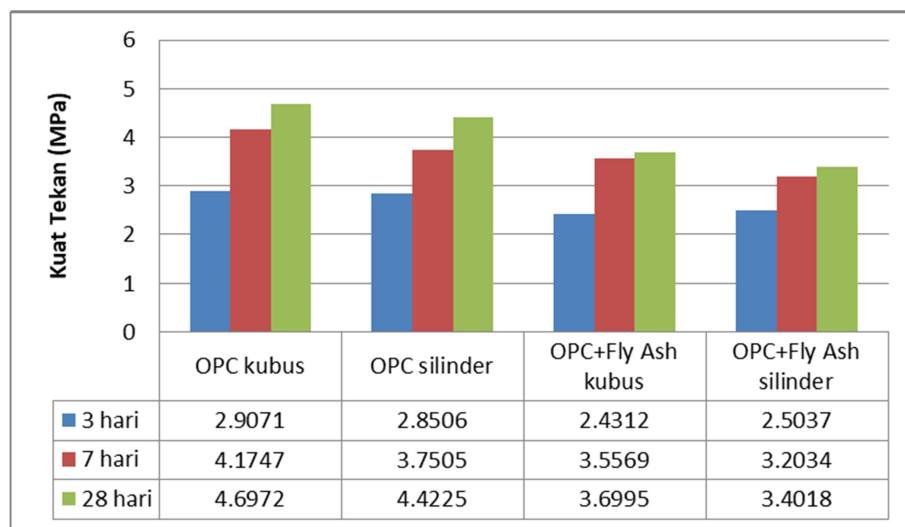
| <i>Mix Design</i> | Durasi Curing Udara (Hari) | Sampel | Kuat Tekan (MPa) |
|-------------------|----------------------------|--------|------------------|
| I | 3 | 1 | 3,7941 |
| | | 2 | 2,6293 |
| | | 3 | 2,2981 |

| | | | |
|--|----|-----------|--------|
| | | Rata-rata | 2,9071 |
| | | 1 | 4,1521 |
| | 7 | 2 | 4,2036 |
| | | 3 | 4,1683 |
| | | Rata-rata | 4,1747 |
| | | 1 | 5,4603 |
| | 28 | 2 | 4,3768 |
| | | 3 | 4,2544 |
| | | Rata-rata | 4,6972 |
| | | 1 | 2,2690 |
| | 3 | 2 | 2,4661 |
| | | 3 | 2,5583 |
| | | Rata-rata | 2,4312 |
| | | 1 | 3,4470 |
| | 7 | 2 | 3,7263 |
| | | 3 | 3,4976 |
| | | Rata-rata | 3,5569 |
| | | 1 | 4,0517 |
| | 28 | 2 | 3,6811 |
| | | 3 | 3,3656 |
| | | Rata-rata | 3,6995 |

Tabel 24. Hasil pengujian kuat tekan benda uji silinder ukuran 10 cm x
20 cm

| <i>Mix Design</i> | <i>Durasi Curing Udara (Hari)</i> | <i>Sampel</i> | <i>Kuat Tekan (MPa)</i> |
|-------------------|-----------------------------------|---------------|-------------------------|
| | | 1 | 3,4794 |
| | 3 | 2 | 2,5768 |
| | | 3 | 2,4955 |
| | | Rata-rata | 2,8506 |
| | | 1 | 4,9866 |
| | 7 | 2 | 3,2477 |
| | | 3 | 3,0171 |
| | | Rata-rata | 3,7505 |
| | | 1 | 5,5214 |
| | 28 | 2 | 3,9287 |
| | | 3 | 3,8173 |
| | | Rata-rata | 4,4225 |
| | | 1 | 2,6882 |
| II | 3 | 2 | 2,4352 |

| | | | |
|----|-----------|---|--------|
| | | 3 | 2,3878 |
| | Rata-rata | | 2,5037 |
| 7 | | 1 | 3,5071 |
| | | 2 | 2,9598 |
| | | 3 | 3,1432 |
| | Rata-rata | | 3,2034 |
| 28 | | 1 | 3,7707 |
| | | 2 | 2,9409 |
| | | 3 | 3,4939 |
| | Rata-rata | | 3,4018 |



Gambar 27. Diagram kuat tekan beton busa

Semakin besar persentase abu terbang maka waktu pengikatan semakin lambat, seperti yang terlihat pada diagram khususnya dari umur 7 hari ke 28 hari. Senyawa-senyawa C3S, C2S, C3a, dan C4F akan bereaksi dengan air, yang diawali dengan senyawa C3A. Hasil reaksi akan bereaksi kembali dengan unsur-unsur utama yang terdapat pada abu terbang yaitu silika dan alumina dengan demikian maka rantai reaksi hidrasi akan semakin panjang dan pada akhirnya akan menambah waktu pengikatan beton.

G. Rekapitulasi Kuat Tekan Beton Busa

Hasil rekapitulasi dalam penelitian ini yang ditunjukkan pada Tabel 25. dan Tabel 26 memperlihatkan bahwa beton busa, baik yang menggunakan abu terbang maupun tidak, mengalami peningkatan kuat tekan dari umur 3 hari sampai 28 hari. Kuat tekan beton busa yang menggunakan abu terbang 30% memiliki kuat tekan yang rendah bila dibandingkan dengan beton busa yang tidak menggunakan abu terbang.

Tabel 25. Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan benda uji kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm

| <i>Mix Design</i> | Durasi Curing Udara (Hari) | Sampel | Hubungan Tegangan-Regangan | | |
|-------------------|----------------------------|-----------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| | | | Tegangan (MPa) | Regangan Vertikal (mm/mm) | Regangan Horizontal (mm/mm) |
| I | 3 | 1 | 3,7941 | 0,0079 | 0,0025 |
| | | 2 | 2,6293 | 0,0089 | 0,0016 |
| | | 3 | 2,2981 | 0,0086 | 0,0018 |
| | | Rata-rata | 2,9071 | 0,0085 | 0,0020 |
| | 7 | 1 | 4,1521 | 0,0037 | 0,0010 |
| | | 2 | 4,2036 | 0,0041 | 0,0014 |
| | | 3 | 4,1683 | 0,0045 | 0,0012 |
| | | Rata-rata | 4,1747 | 0,0041 | 0,0012 |
| | 28 | 1 | 5,4603 | 0,0083 | 0,0019 |
| | | 2 | 4,3768 | 0,0078 | 0,0022 |
| | | 3 | 4,2544 | 0,0087 | 0,0020 |
| | | Rata-rata | 4,6972 | 0,0083 | 0,0020 |
| II | 3 | 1 | 2,2690 | 0,0056 | 0,0012 |
| | | 2 | 2,4661 | 0,0056 | 0,0015 |
| | | 3 | 2,5583 | 0,0057 | 0,0020 |
| | | Rata-rata | 2,4312 | 0,0056 | 0,0015 |
| | 7 | 1 | 3,4470 | 0,0032 | 0,0020 |
| | | 2 | 3,7263 | 0,0034 | 0,0023 |
| | | 3 | 3,4976 | 0,0035 | 0,0021 |
| | | Rata-rata | 3,5569 | 0,0033 | 0,0021 |
| | 28 | 1 | 4,0517 | 0,0075 | 0,0021 |
| | | 2 | 3,6811 | 0,0072 | 0,0019 |

| | | | | |
|--|-----------|--------|--------|--------|
| | 3 | 3,3656 | 0,0075 | 0,0022 |
| | Rata-rata | 3,6995 | 0,0074 | 0,0021 |

Tabel 26. Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan benda uji silinder ukuran
10 cm x 20 cm

| <i>Mix Design</i> | Durasi Curing Udara (Hari) | Sampel | Hubungan Tegangan-Regangan | | |
|-------------------|----------------------------|-----------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| | | | Tegangan (MPa) | Regangan Vertikal (mm/mm) | Regangan Horizontal (mm/mm) |
| I | 3 | 1 | 3,4794 | 0,0051 | 0,0032 |
| | | 2 | 2,5768 | 0,0065 | 0,0024 |
| | | 3 | 2,4955 | 0,0083 | 0,0036 |
| | | Rata-rata | 2,8506 | 0,0066 | 0,0031 |
| | 7 | 1 | 4,9866 | 0,0078 | 0,0038 |
| | | 2 | 3,2477 | 0,0082 | 0,0037 |
| | | 3 | 3,0171 | 0,0091 | 0,0038 |
| | | Rata-rata | 3,7505 | 0,0083 | 0,0038 |
| | 28 | 1 | 5,5214 | 0,0073 | 0,0027 |
| | | 2 | 3,9287 | 0,0079 | 0,0024 |
| | | 3 | 3,8173 | 0,0078 | 0,0026 |
| | | Rata-rata | 4,4225 | 0,0077 | 0,0026 |
| II | 3 | 1 | 2,6882 | 0,0059 | 0,0031 |
| | | 2 | 2,4352 | 0,0054 | 0,0030 |
| | | 3 | 2,3878 | 0,0047 | 0,0031 |
| | | Rata-rata | 2,5037 | 0,0053 | 0,0031 |
| | 7 | 1 | 3,5071 | 0,0067 | 0,0038 |
| | | 2 | 2,9598 | 0,0074 | 0,0037 |
| | | 3 | 3,1432 | 0,0066 | 0,0037 |
| | | Rata-rata | 3,2034 | 0,0069 | 0,0038 |
| | 28 | 1 | 3,7707 | 0,0077 | 0,0033 |
| | | 2 | 2,9409 | 0,0077 | 0,0037 |
| | | 3 | 3,4939 | 0,0079 | 0,0034 |
| | | Rata-rata | 3,4018 | 0,0077 | 0,0035 |

H. Perbandingan Kuat Tekan Beton Busa

Tabel 27 memperlihatkan perbandingan antara beton busa benda uji silinder 10 cm x 20 cm dengan benda uji berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm, dimana diperoleh kisaran nilai antara 0,912 hingga 0,923.

Tabel 27. Perbandingan kuat tekan beton busa kubus dan silinder

| Mix Design | Silinder : Kubus |
|-------------------|-------------------------|
| OPC | 0,923 |
| PCC T | 0,912 |
| PCC B | 0,927 |
| OPC + Abu Terbang | 0,920 |

I. Pola Retak Beton Busa

Gambar 28. menunjukkan pola retak *mix design* I dengan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dan gambar 29. menunjukkan pola retak *mix design* I dengan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm. Sedangkan gambar 30. menunjukkan pola retak *mix design* II dengan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dan gambar 31. menunjukkan pola retak *mix design* II dengan benda uji berbentuk silinder ukuran 10 cm x 20 cm. Terlihat pola retak yang terjadi hampir sama, dimana terdapat dua jenis pola retak yaitu pola retak sejajar dengan arah beban sehingga dikategorikan pola retak kolumnar dan pola retak kerucut sehingga pada beberapa benda uji terjadi *spalling*. Pola retak yang terjadi semakin berkurang seiring dengan

penambahan umur. Sehingga dapat disimpulkan bahwa ketahanan beton meningkat seiring dengan penambahan umur.



Umur 3 hari



Umur 7 hari



Umur 28 hari

Gambar 28. Pola retak *mix design* I dengan benda uji berbentuk kubus

Ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm



Umur 3 hari



Umur 7 hari



Umur 28 hari

Gambar 29. Pola retak *mix design* I dengan benda uji berbentuk

Silinder ukuran 10 cm x 20 cm



Umur 3 hari



Umur 7 hari



Umur 28 hari

Gambar 30. Pola retak *mix design* II dengan benda uji berbentuk kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm



Umur 3 hari



Umur 7 hari



Umur 28 hari

Gambar 31. Pola retak *mix design* II dengan benda uji berbentuk Silinder ukuran 10 cm x 20 cm

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

Dari hasil analisa data yang diperoleh dalam penelitian ini, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Penggunaan semen portland tipe I dan abu terbang berpengaruh terhadap kuat tekan beton busa. Seluruh benda uji mengalami peningkatan kuat tekan dari umur 3 hari hingga 28 hari, dimana benda uji yang hanya menggunakan semen portland tipe I mempunyai kuat tekan lebih tinggi dibandingkan dengan kuat tekan benda uji yang menggunakan semen portland tipe I dan abu terbang.
2. Seluruh benda uji memperlihatkan hubungan tegangan-regangan material yang getas sebab memiliki pertambahan regangan horizontal yang kecil pada daerah plastis

B. SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, diusulkan beberapa saran sebagai berikut :

1. Beton busa pada penelitian ini dapat digunakan sebagai bata beton untuk pasangan dinding berdasarkan SNI 03-0349-1989, yaitu minimal 25 kg/cm^2 .

2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai kuat tekan beton busa dengan menggunakan *mix design* yang berbeda, seperti mengurangi kadar abu terbangnya sehingga dapat menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

ASTM Standard C 494-81. 2005. Standard Specification for Chemical Admixture for Concrete (ASTM C 494-81). USA: ASTM International.

ASTM Standard C 618-05. 2005. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natiral Pozzolan for Use in Concrete (ASTM C 618-05). USA: ASTM International.

Badan Standardisasi Nasional. 1989. Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-0349-1989 Bata Beton untuk Pasangan Dinding. Jakarta:Dewan Standarisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. 1991. Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2495-1991 Spesifikasi Bahan Tambahan untuk Beton. Jakarta : Dewan Standarisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. 1991. Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2495-1991 Spesifikasi Bahan Tambahan untuk Beton. Jakarta : Dewan Standarisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. 1992 Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2816-1992 Metode Pengujian Kotoran Organik dalam Pasir untuk Campuran Mortar atau Beton. Jakarta : Dewan Standarisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. 1996. Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-4142-1996 Metode Pengujian Jumlah Bahan dalam Agregate yang Lolos Saringan Nomor 200 (0,0075 mm). Jakarta : Dewan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. 1996. Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-4142-1996 Metode Pengujian Jumlah Bahan dalam Agregate yang Lolos Saringan Nomor 200 (0,0075 mm). Jakarta : Dewan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. 2004. Standar Nasional Indonesia (SNI) 15-2049-2004 Semen Portland. Jakarta:Dewan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. 2008. Standar Nasional Indonesia (SNI) 1972:2008 Cara Uji Slump Beton. Jakarta : Dewan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. 2008. Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-1970-2008 Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus. Jakarta : Dewan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. 2011 Standar Nasional Indonesia (SNI) 1971:2011 Cara Uji Kadar Air Total Agregat dengan Pengeringan. Jakarta : Dewan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. 2011. Standar Nasional Indonesia (SNI) 1974:2004 Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder. Jakarta : Dewan Standarisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. 2013. Standar Nasional Indonesia (SNI) 2847:2013 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung. Jakarta : Dewan Standarisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. 2016. Standar Nasional Indonesia (SNI) 1973:2016 Metode Uji Densitas, Volume Produksi Campuran dan Kadar Udara (Gravimetrik) Beton. Jakarta : Dewan Standarisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional.2002.Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2847-2002 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung.Jakarta : Dewan Standarisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional.2002.Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2834-2002 Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton.Jakarta:Dewan Standarisasi Nasional.

Bing, Chen, dkk. 2012. *Experimental Research on Properties of High-Strength Foamed Concrete*. Journal Materials of Civil Engineering 24(1) : 113-118.

Kearsleya, E.P. dan Wainwrightb, P.J. 2001. *The Effect Of High Fly Ash Content On The Compressive Strength Of Foamed Concrete*. Cement and Concrete Research 31 : 105 – 112.

Nawy Edward.G. 2010. Beton Bertulang-Suatu Pendekatan Dasar,
Cetakan Keempat. Bandung. Refika Aditama.

Süleyman, Gökçe, dkk. 2019. *Effect Of Fly Ash And Silica Fume On
Hardened Properties Of Foam Concrete*. Construction and Building
Materials 194 : 1–11.

Tjaronge.M.W. 2012. Semen dan Beton Beronnga. Makassar: Telaga
Zam-Zam.