

TUGAS AKHIR

**STUDI LABORATORIUM PENGARUH PENGGUNAAN
SEMEN PORTLAND KOMPOSIT TERHADAP KUAT TEKAN
BETON BUSA**

***LABORATORY STUDY ON THE EFFECT OF USING
PORTLAND COMPOSITE CEMENT TO COMPRESSIVE
STRENGTH OF FOAM CONCRETE***

**HALIMA IRIANTI PUSPITA SARI
D111 16 514**



**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 Bontomatene, 92172, Kab. Gowa, Sulawesi Selatan
 http://civil.unhas.ac.id civil@eng.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
 KOMPOSIT TERHADAP KUAT TEKAN BETON BUSA**

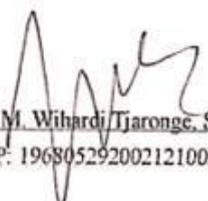
Disusun oleh

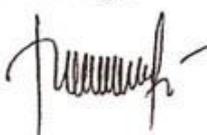
HALIMA IRIANTI PUSPITA SARI
D111 16 514

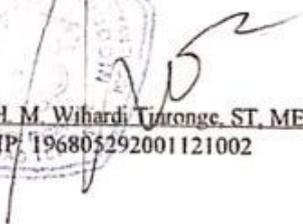
Telah diperiksa dan disetujui oleh dosen pembimbing

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 Halima Irianti Puspita Sari, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "**Studi Laboratorium Pengaruh Penggunaan Semen Portland Komposit 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, 1 November 2019

Yang membuat
pernyataan,

Halima Irianti Puspita Sari
NIM: D111 16 514

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kita panjatkan kehadiran Allah SWT, atas berkat rahmat dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Studi Laboratorium Pengaruh Penggunaan Semen Portland Komposit Terhadap Kuat Tekan Beton Busa**”, sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada fakultas Teknik Departemen Sipil Universitas Hasanuddin. Tugas akhir ini disusun berdasarkan hasil penelitian di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bimbingan, petunjuk dan perhatian dari berbagai pihak sehingga dapat terselesaikan. Oleh karena itu, pada kesempatan kali ini, penulis mengucapkan 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
3. **Bapak Prof. Dr. H. M Wihardi Tjaronge ST., M.Eng.** selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
4. **Bapak Dr. Eng. Muh. Akbar Tjaronge, S.T., M.Eng.**, selaku dosen pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan kepada penulis.
5. **Bapak Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, S.T., M.T.**, selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
6. Seluruh dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **Ruslan** dan ibunda **Rosnawati** atas doa, kasih sayangnya, dan segala dukungan

selama ini, baik spritiual maupun material, serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan.

2. Kakak tercinta **Eva Novitasari, Amd. Cendrawasinto, S.H., dan Sinta Kusumawati, S.T.**, yang selalu memberikan semangat dalam penyelesaiannya tugas akhir ini.
3. **Pak Yohan, S.T., Kak Miswar, S.T. M.T., Kak Hanif, S.ST., M.T., Kak Cimo, S.T., M.T., Kak Friets dan Kak Gilbert** sebagai rekan-rekan di **Laboratorium Riset Eco Material**, yang senantiasa membantu dan memberikan binaan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. **Kak Fahri, Kak Hasbi, Mustagfirin, Zulfadli dan Rifqi** selaku rekan-rekan asisten Laboratorium Struktur dan Bahan yang senantiasa memberikan warna yang begitu indah, dukungan yang tiada henti, semangat serta dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
5. Para sahabat, **Ria, Erli, Fadhly dan Sri** yang selalu membantu dan memberikan semangat serta dorongan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini
6. Saudara-saudari **angkatan 2016 Departemen Teknik Sipil dan Departemen Teknik Lingkungan**, yang senantiasa memberikan warna yang sangat begitu indah, dukungan yang tiada henti, semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

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

Akhirnya semoga Allah SWT melimpahkan rahmat dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, 10 November 2019

Penulis

ABSTRAK

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, kualitas beton sebagai bahan konstruksi harus terus ditingkatkan, salah satunya adalah menggunakan bahan alternatif lain yang mampu menghasilkan beton yang lebih baik dengan tetap menjaga lingkungan dan mengurangi eksploitasi alam. Dengan menggunakan bahan dasar yang berbeda tentunya akan mempengaruhi sifat fisik beton, salah satunya adalah kuat tekannya. Namun, sejauh mana pengaruh dan efektifitas dari penggunaan material tersebut memerlukan penelitian lebih lanjut. Hal tersebut menjadi landasan dilakukannya penelitian ini.

Adapun tujuan penelitian ini yaitu menganalisis pengaruh penggunaan semen portland komposit terhadap kuat tekan beton busa dan membuat model hubungan tegangan-regangan beton busa yang menggunakan semen portland komposit.

Pembuatan benda uji dilakukan di Laboratorium PT. Bosowa Beton Indonesia. Perawatan sampel hingga pengujian kuat tekan dilakukan yaitu di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa. Terdapat tiga jenis sampel yang dibedakan berdasarkan jenis semen yang digunakan yaitu OPC Tipe I, PCC-B dan PCC-T dengan dua bentuk benda uji yaitu silinder 10 cm x 20 cm dan kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm. Perawatan (*curing*) sampel dilakukan dengan metode *curing* udara. Sampel akan diuji pada umur *curing* 3, 7 dan 28 hari untuk memperoleh nilai berat volume, kuat tekan dan tegangan-regangan.

Pada penelitian ini ditemukan bahwa kuat tekan beton busa umur 28 hari dengan PCC-B lebih kecil 12,85% dari beton busa dengan OPC Tipe I untuk kubus sementara untuk silinder 14,99%. Beton busa dengan PCC-T lebih kecil 8,30% dari beton busa OPC Tipe I untuk kubus, untuk silinder 3,15%. Beton busa PCC-B memiliki kuat tekan 4,95% lebih rendah dibandingkan beton busa PCC-T pada kubus dan 12,23% untuk silinder. Hasil kuat tekan sampel beton busa dengan bentuk silinder dan sampel dengan bentuk kubus tidak menunjukkan perbedaan yang besar atau signifikan. Seluruh benda uji memperlihatkan hubungan tegangan regangan material yang getas.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah.....	3
C. Tujuan Penelitian	3
D. Manfaat Penelitian	3
E. Batasan Masalah	3
F. Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	
A. Penelitian Terdahulu tentang Beton Busa.....	6
B. Teori Beton	11
C. Teori Beton Ringan.....	12
D. Material Penyusun Beton	16
D.1. Semen Portland	16
D.1.1 Standar Semen di Eropa	17
D.1.2 Standar Semen di Indonesia	23
D.1.3 Standar Semen Berdasarkan ASTM	31
D.2. Agregat Halus	36
D.3. Air	38
D.4. Busa.....	39
D.5. Bahan Tambah.....	40
E. Sifat Mekanik Beton	40

	E.1. Pengujian <i>Slump</i>	41
	E.2. Berat Volume Beton	42
	E.3. Kuat Tekan	42
	E.4. Kurva Tegangan-Regangan	44
	E.5. Susut.....	46
	E.6. Poisson Ratio	46
	E.7. Pola Retak dan Kehancuran.....	47
BAB 3	METODE PENELITIAN	
	A. Jenis Penelitian dan Teknik Pengumpulan Data	49
	B. Diagram Alir Penelitian	49
	C. Tempat dan Waktu Penelitian	51
	D. Alat dan Bahan Penelitian.....	51
	E. Pemeriksaan Karakteristik Material	53
	E.1. Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus (Pasir)	53
	E.2. Karakteristik Semen Portland Tipe I (OPC)	54
	E.3. Karakteristik Semen Portland Komposit Jenis B (PCC-B).....	55
	E.4. Karakteristik Semen Portland Komposit Jenis T (PCC-T).....	56
	E.5. Karakteristik <i>Admixture (superplastisizer)</i>	57
	F. <i>Mix Design</i> Beton Busa	58
	G. Pembuatan Benda Uji	59
	H. Perawatan (<i>Curing</i>) Benda Uji.....	62
	I. Pengujian Karakteristik Beton Busa	62
	I.1. Pengujian <i>Slump</i>	62
	I.2. Berat Volume Beton.....	64
	I.3. Kuat Tekan dan Hubungan Tegangan Regangan	65
	I.4. Pola Retak dan Kehancuran Beton	70
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	
	A. Karakteristik Material	71
	A.1. Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus (Pasir)	71
	B. <i>Mix Design</i> Beton Busa	71

B.1.	<i>Mix Design</i> I dengan OPC Tipe I	71
B.2.	<i>Mix Design</i> I dengan PCC-B	72
B.3.	<i>Mix Design</i> I dengan PCC-T	72
C.	Pengujian <i>Slump</i>	73
D.	Berat Volume Beton.....	74
D.1.	Berat Volume <i>Mix Design</i> I	74
D.2.	Berat Volume <i>Mix Design</i> II	75
D.3.	Berat Volume <i>Mix Design</i> III	76
E.	Pengujian Kuat Tekan.....	78
E.1.	Kuat Tekan Beton <i>Mix Design</i> I	78
E.2.	Kuat Tekan Beton <i>Mix Design</i> II	78
E.3.	Kuat Tekan Beton <i>Mix Design</i> III	79
F.	Hubungan Tegangan Regangan Beton Busa.....	81
F.1.	Hubungan Tegangan Regangan Beton Busa <i>Mix Design</i> I	81
F.2.	Hubungan Tegangan Regangan Beton Busa <i>Mix Design</i> II	88
F.3.	Hubungan Tegangan Regangan Beton Busa <i>Mix Design</i> III.....	94
G.	Rekapitulasi Tegangan Regangan Beton Busa.....	101
G.1.	Benda Uji Berbentuk Silinder 10 cm x 20 cm.....	101
G.2.	Benda Uji Berbentuk Kubus 15 cm x15 cm x 15 cm	102
H.	Poisson Ratio.....	103
I.	Pola Retak	103
BAB 5	PENUTUP	
A.	Kesimpulan.....	107
B.	Saran.....	107
	DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Kurva tegangan-regangan tipikal beton.....	44
Gambar 2. Kurva Tegangan-Regangan Untuk Berbagai Kekuatan Beton.	45
Gambar 3. Pola Kehancuran Berdasarkan SNI 1974-2011	50
Gambar 4. Diagram Alir Prosedur Penelitian	50
Gambar 5. Lokasi Penelitian	51
Gambar 6. Bahan Penelitian	53
Gambar 7. Proses Pembuatan Benda Uji	61
Gambar 8. <i>Curing</i> Udara Benda Uji	62
Gambar 9. Pengujian Kuat Tekan Benda Uji Silinder 10 cm x 20 cm.....	68
Gambar 10. Pengujian Kuat Tekan Benda Uji Kubus 15 x 15 x 15 (cm) .	69
Gambar 11. Pengujian <i>Slump</i>	74
Gambar 12. Diagram Perbandingan antara umur <i>curing</i> dan berat volume beton.....	77
Gambar 13 Diagram Perbandingan antara umur <i>curing</i> dan kuat tekan beton busa	80
Gambar 14. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> I berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 3 hari	81
Gambar 15. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> I berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 3 hari .	83
Gambar 16. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> I berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 7 hari	84
Gambar 17. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> I berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 7 hari .	85
Gambar 18. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> I berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 28 hari	86
Gambar 19. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> I berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 28 hari	87
Gambar 20. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> II berbentuk kubus 10 cm x 20 cm pada umur 3 hari.....	88

Gambar 21. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> II berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 3 hari .	89
Gambar 22. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> II berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 7 hari	90
Gambar 23. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> II berbentuk silinder 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 7 hari	92
Gambar 24. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> II berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 28 hari	93
Gambar 25. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> II berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 28 hari	94
Gambar 26. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> III berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 3 hari	95
Gambar 27. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> III berbentuk silinder 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 3 hari	96
Gambar 28. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> III berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 7 hari	97
Gambar 29. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> III berbentuk silinder 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 7 hari	98
Gambar 30. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> III berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 28 hari	99
Gambar 31. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji <i>mix design</i> III berbentuk silinder 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 28 hari.....	100
Gambar 32. Pola Retak Benda Uji <i>Mix Design</i> I.....	104
Gambar 33. Pola Retak Benda Uji <i>Mix Design</i> II.....	105
Gambar 34. Pola Retak Benda Uji <i>Mix Design</i> III.....	106

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Syarat kimia utama semen portland	24
Tabel 2. Syarat kimia tambahan	26
Tabel 3. Syarat Fisika Utama.....	27
Tabel 4. Syarat Fisika Tambahan	28
Tabel 5. Syarat Fisika Semen Portland Komposit	30
Tabel 6. Standar Persyaratan Komposisi.....	32
Tabel 7. Persyaratan Komposisi Opsional.	34
Tabel 8. Syarat fisika semen <i>portland</i> komposit.....	35
Tabel 9. Gradasi Pasir	38
Tabel 10. Nilai Toleransi Slump Nominal.	41
Tabel 11. Metode pengujian karakteristik agregat halus.	54
Tabel 12. Karakteristik Fisik Semen Portland (OPC)	54
Tabel 13. Karakteristik Kimia Semen Portland (OPC).....	55
Tabel 14. Karakteristik Kimia PCC-B	55
Tabel 15. Karakteristik Fisik PCC-B.....	56
Tabel 16. Karakteristik Kimia PCC-T	56
Tabel 17. Karakteristik Fisik PCC-T	57
Tabel 18. Karakteristik Umum Chelchem 75RS.....	58
Tabel 19. Jumlah Benda Uji Penelitian	59
Tabel 20. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus	71
Tabel 21. <i>Mix Design</i> I	72
Tabel 22. <i>Mix Design</i> II	72
Tabel 23. <i>Mix Design</i> III	73
Tabel 24. Berat Volume Benda Uji <i>Mix Design</i> I	74
Tabel 25. Berat Volume Benda Uji <i>Mix Design</i> II	75
Tabel 26. Berat Volume Benda Uji <i>Mix Design</i> III	76
Tabel 27. Hasil Pengujian Kuat Tekan <i>Mix Design</i> I.....	78
Tabel 28. Hasil Pengujian Kuat Tekan <i>Mix Design</i> II.....	79
Tabel 29. Hasil Pengujian Kuat Tekan <i>Mix Design</i> III.....	79

Tabel 30. Rekapitulasi Nilai Tegangan-Regangan Rata-Rata Benda Uji Silinder 10 cm x 20 cm	101
Tabel 31. Rekapitulasi Nilai Tegangan-Regangan Rata-Rata Benda Uji Kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm	102
Tabel 32. Nilai Poisson Ratio Beton Busa.....	103

BAB 1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam berbagai bidang, khususnya yang diterapkan dalam bidang konstruksi maka diperlukan suatu inovasi baru untuk bahan bangunan yang memiliki keunggulan yang lebih baik dibandingkan dengan bahan bangunan yang sudah ada selama ini.

Salah satu bahan bangunan yang telah lama digunakan dalam pekerjaan konstruksi adalah beton. Pada umumnya material penyusun utama beton adalah semen, air, agregat kasar dan agregat halus. Kualitas beton sendiri terus ditingkatkan dengan berbagai cara, salah satunya adalah menggunakan bahan alternatif lain yang mampu menghasilkan sifat fisik dan mekanik yang lebih baik maupun untuk mengurangi berat beton untuk memudahkan saat pengerjaan dan akhirnya dapat mengurangi bobot sebuah konstruksi.

Material busa adalah bahan alternatif yang digunakan untuk menghasilkan beton yang memiliki kuat tekan tinggi namun memiliki bobot yang ringan. Selain penggunaan bahan alternatif, pemilihan material utama penyusun beton juga berpengaruh terhadap kuat tekan beton. Semen Portland merupakan komponen utama yang berfungsi bersama dengan air, untuk mengikat dan menyatukan agregat. Semen Portland dihasilkan dengan cara menggiling klinker semen Portland yang terdiri atas kalsium

silikat dan digiling bersama-sama dengan satu atau lebih bahan tambahan bentuk kristal senyawa kalsium sulfat (SNI 15-2049-1994).

Sebagai upaya mengurangi eksploitasi alam akibat penambangan bahan baku semen serta mengatasi permasalahan lingkungan, telah dikembangkan jenis semen Portland khusus, yaitu Semen Portland Komposit. Semen Portland Komposit dihasilkan dari penggilingan bersama-sama terak semen Portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik, atau hasil pencampuran antara bubuk semen semen Portland dengan bubuk bahan anorganik lain. bahan anorganik tersebut antara lain terak tanur tinggi, pozolan, senyawa silikat, batu kapur dengan kadar total bahan anorganik 6% - 35% dari masa semen Portland komposit (SNI 15-7064-2004).

Memperhatikan bahan dasar yang digunakan untuk memproduksi Semen Portland Komposit berbeda tentunya jenis semen tersebut memiliki karakter yang berbeda dengan semen Portland tipe I. Bukan hanya dipengaruhi oleh material penyusunnya, kuat tekan beton juga dapat dipengaruhi oleh dimensi beton itu sendiri. Namun, sejauh mana perbedaan yang ada, dihubungkan dengan perkembangan kekuatan beton yang dihasilkan menggunakan material semen maupun dimensi benda uji yang berbeda tersebut masih perlu dipelajari.

Berdasarkan latar belakang diatas, maka dilakukanlah penelitian dengan judul :

“STUDI LABORATORIUM PENGARUH PENGGUNAAN SEMEN PORTLAND KOMPOSIT TERHADAP KUAT TEKAN BETON BUSA”

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan di atas, maka diambil rumusan masalah :

1. Bagaimana pengaruh penggunaan semen portland komposit terhadap kuat tekan beton busa.
2. Bagaimana hubungan tegangan-regangan beton busa yang menggunakan semen portland komposit.

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini yaitu :

1. Menganalisis pengaruh penggunaan semen portland komposit terhadap kuat tekan beton busa.
2. Membuat model hubungan tegangan-regangan beton busa yang menggunakan semen portland komposit.

D. Manfaat Penelitian

Diharapkan penelitian ini bermanfaat untuk mengetahui karakteristik beton busa yang dipengaruhi oleh penggunaan semen portland komposit.

E. Batasan Masalah

Pada penelitian ini diberikan batasan-batasan masalah agar penelitian dapat berjalan dengan baik, yakni sebagai berikut :

1. Semen Portland Komposit yang digunakan terbagi menjadi 2 merk yaitu bosowa dan tonasa
2. Digunakan Semen Portland tipe I merk bosowa sebagai pembanding
3. Pasir yang digunakan adalah pasir silika yang berasal dari Kabupatepn Pinrang
4. Bahan pembuat busa (*foam agent*) yang digunakan adalah ertha foam
5. Bahan *admixture* yang digunakan adalah bahan tambah tipe F dengan merk Chelcem 75RS
6. Mould yang digunakan adalah silinder ukuran 10x20 cm dan kubus 15x15x15 cm
7. Proses curing yaitu dengan cara curing udara
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 ini merupakan rincian secara umum mengenai kandungan dari kelima bab tersebut :

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini menjabarkan gambaran awal mengenai permasalahan yang akan dibahas melalui empat poin utama yaitu latar

belakang, rumusan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan

BAB 2 TINJAUAN PUSTKA

Bab ini berisi teori-teori penting yang memiliki keterkaitan dengan topik permasalahan dan dijadikan sebagai landasan atau acuan penelitian

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan mengenai tahapan dan detail pelaksanaan penelitian, mulai dari persiapan material hingga proses pengujian

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang data-data hasil dari penelitian yang telah dilakukan yaitu kuat tekan, elastisitas, dan pola retak mortar busa.

BAB 5 PENUTUP

Bab ini membahas mengenai kesimpulan secara ringkas berdasarkan analisa dari hasil yang diperoleh saat penelitian dan disertai dengan saran-saran yang diusulkan

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu tentang Beton Busa

Malau (2014), menjelaskan dalam penelitiannya bahwa ada beberapa metode untuk membuat beton yang dapat digunakan untuk mengurangi berat jenis (densitas) beton menjadi lebih ringan. Salah satu cara untuk membuat beton menjadi lebih ringan adalah dengan membuat gelembung-gelembung gas/udara dalam adukan semen sehingga terjadi banyak pori-pori didalam beton. Bahan yang digunakan untuk membuat gelembung- gelembung udara/gas adalah foaming agent. Bahan tersebut digunakan untuk dapat menghasilkan beton yang lebih ringan.

Lermen, dkk (2019) melakukan penelitian tentang penambahan bahan adiktif, jenis semen dan jumlah *foam agent* yang digunakan dalam komposisi beton berbusa dapat mempengaruhi kuat tekan beton berbusa. Pada penelitiannya digunakan tiga jenis bahan adiktif yaitu *superplastisizer* dengan polycarboxylate, *entrainment* dan *plastisizer*. Jumlah penambahan bahan adiktif disesuaikan dengan jumlah penggunaan yang direkomendasikan oleh pabrik yaitu 0,5% dari berat semen. Semen yang digunakan yaitu CP II-Z (semen dengan penambahan *fly ash*); CP II-F (semen dengan penambahan *limestone filler*); and CP V-ARI (semen mutu tinggi tanpa penambahan pozzolan). Perbandingan busa dan air yang digunakan adalah 1:30, dengan foam agent yaitu Amide 90. Untuk uji sampel dengan waktu curing 28 hari, dapat dinyatakan bahwa jenis semen, jumlah busa, dan interaksi antara faktor-faktor menunjukkan pengaruh yang

signifikan yaitu 95%. Adapun jenis adiktif, pengaruhnya tidak dapat ditentukan. Jumlah busa adalah faktor yang paling memengaruhi kekuatan tekan, kontribusinya adalah 39%. Jenis semen juga memengaruhi kekuatan tekan, kontribusinya adalah 13%. Setelah benda uji dicuring selama 365 hari, diamati bahwa semua faktor memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kuat tekan benda uji, termasuk jenis adiktif, yang memberikan kontribusi sebesar 9%.

Erwin (2018), pada penelitiannya menemukan bahwa dengan penambahan foam agent pada campuran beton sangat berpengaruh pada densitas, kuat tekan dan porositas pada beton busa. Keadaan ini menunjukkan bahwa pemakaian foam agent sebesar 1%, 2%, 3% dan 4% menghasilkan tingkat kerapatan densitas yang semakin rendah. Beton busa dengan pemakaian foam agent dapat meningkatkan kuat tekan beton yang lebih baik dari pada beton biasa, dimana pada prosentase campuran 1% dan 2% nilai kuat tekan beton masuk dalam kategori tingkat mutu I. Sedangkan untuk kemampuan kedap air beton dengan penambahan foam agent lebih baik sifat kedap airnya dibandingkan beton tanpa tambahan foam agent.

Kuzielova E. dkk (2016), dalam penelitiannya menerangkan tentang efek foam agent terhadap sifat beton berbusa. Dengan menggunakan generator, busa beton dibentuk dari campuran protein busa, air dan udara. Benda uji dibuat dengan variasi rasio volume busa terhadap volume beton, sehingga dihasilkan kepadatan dan berat yang berbeda-beda. Setelah semua benda uji tersedia tahap selanjutnya adalah menganalisis sifat beton

berbusa dengan menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD) dan Scanning Electron Microscopy (SEM) serta menganalisis kepadatan benda uji melalui pengujian kuat tekan. Hasil uji XRD menunjukkan Kristal kalsium karbonat membangun struktur pori dari pasta semen yang mengarah pada penurunan porositas dan distribusi ukuran pori bergeser ke pori-pori yang lebih kecil. Sedangkan dari uji SEM memperlihatkan bahwa meningkatnya jumlah volume busa membuat ukuran pori semakin membesar. Dari uji kuat tekan didapatkan kuat tekan tertinggi benda uji adalah 2,6 MPa dengan tingkat kepadatan terendah sedangkan kuat tekan terendah didapatkan sebesar 1,8 MPa dengan jumlah busa yang paling banyak.

Gelim (2011), melakukan penelitian tentang berat jenis dan perilaku campuran beton busa dimana untuk campuran beton busa, ada perbedaan yang signifikan dalam Berat Jenis ($1000-1500 \text{ kg/m}^3$) dan perilaku penyerapan air sebagai peningkatan massa per-satuan volume. Beton busa dengan kepadatan rendah menyerap lebih banyak air dibandingkan dengan kepadatan yang lebih tinggi. Hal ini juga jelas bahwa campuran pasta semen yang tidak mengandung abu terbang ($w/c=0,6$) menyerap lebih banyak air dari pada campuran beton busa Hal ini juga dapat terlihat bahwa ada kecenderungan peningkatan penyerapan dengan penurunan kepadatan untuk semua campuran tetapi penyerapan kenaikan jauh lebih signifikan dalam pasta (tidak ada busa) campuran dari dalam campuran beton busa.

Sandy (2013) melakukan penelitian dimana seiring dengan banyaknya pemakaian beton sebagai bahan konstruksi, secara tidak

langsung memaksa para ahli beton untuk menciptakan ide – ide baru dalam penyusunan bahan pencampur beton. Beton dicampur dengan menggunakan semen yang berbeda, yaitu semen padang PCC dan OPC. Pencampuran semua semen tersebut pada proses pengecoran menggunakan Mix Design beton yang sama, hanya jenis semen dan merk nya saja berbeda. Pengujian yang dilakukan adalah waktu ikat semen untuk semua merk, kuat tekan dan kuat tarik belah pada umur beton 28 hari. Dari hasil pengujian diperoleh perbedaan hasil slump yang tidak begitu signifikan, dimana nilai slum untuk semua merk dan jenis semen 12 ± 2 cm. Dari pengujian tersebut diperoleh kuat tekan dari enam varian semen pada umur 28 hari untuk semen PCC didominasi oleh semen SP dengan nilai 23.139 Mpa sedangkan nilai terendah diperoleh oleh semen TR dengan nilai 20.999 Mpa, Sedangkan untuk semen OPC didominasi oleh semen SAI dengan nilai 25.132 Mpa, sedangkan nilai terendah diperoleh oleh semen SP dengan nilai 24.147 Mpa. Hasil pengujian kuat tarik belah beton dari enam varian semen pada umur 28 hari untuk semen PCC didominasi oleh semen SP dengan nilai 4,243 Mpa sedangkan nilai terendah diperoleh oleh semen HI dengan nilai 3,820 Mpa, sedangkan untuk semen OPC didominasi oleh semen SP dengan nilai 4,149 Mpa sedangkan nilai terendah diperoleh oleh semen SAI dengan nilai 3,979 Mpa.

Alhaz, dkk. (2012) melakukan penelitian yang berkaitan dengan penyelidikan eksperimental kekuatan karakteristik beton yang dibuat dengan Portland Composite Cement (PCC) dan Ordinary Portland Cement (OPC) dan menemukan bahwa kuat tekan pada umur awal curing beton dengan

semen portland komposit lebih rendah dibanding dengan beton yang menggunakan OPC. Namun, pada umur curing selanjutnya, kuat tekan beton dengan semen portland komposit (PCC) dan beton dengan semen portland (OPC) hampir sama. Pada umur selanjutnya, beton PCC membutuhkan waktu curing selama 50-70 hari, 80-100 hari dan 180-200 hari untuk mendapatkan nilai kuat tekan 17,24 MPa, 27,58 MPa, dan 41,37 MPa. Nilai kuat tekan dari lima komposisi campuran beton bertambah seiring dengan meningkatnya umur curing.

Nambiar, dkk (2009) melakukan penelitian yang berfokus pada perilaku susut pada beton berbuisa dimana beton busa dengan volume foam 50%, susut diamati menjadi sekitar 36% lebih rendah dari campuran dasar. Susut pada beton berbuisa adalah fungsi dari volume busa dengan demikian secara tidak langsung berkaitan dengan jumlah penyusutan dan sifat beton berbuisa. Pada kadar air yang rendah susut pada beton berbuisa sangat meningkat dan penyusutan menurun seiring dengan peningkatan volume busa serta dalam rentang kadar air yang lebih tinggi, penyusutan yang terjadi relatif lebih kecil. Meskipun hilangnya air dari pori-pori udara buatan pada beton berbuisa yang relatif lebih besar tidak akan menyebabkan penyusutan, pori-pori udara buatan ini berpengaruh pada stabilitas volume beton berbuisa secara tidak langsung, efek ini lebih besar pada volume busa yang lebih tinggi.

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).

Beton normal adalah beton yang mempunyai berat satuan 2200 - 2500 kg/m³ dan dibuat menggunakan agregat alam yang dipecah atau tanpa dipecah (SNI 03:2834:2002). 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. Teori Beton Ringan

Beton ringan adalah beton yang memiliki agregat ringan atau campuran agregat kasar ringan dan pasir alam sebagai pengganti agregat halus ringan dengan ketentuan tidak boleh melampui berat isi maksimum beton 1850 kg/m^3 (SNI 03-3449-2002). Beton ringan dapat dibagi lagi dalam tiga golongan berdasarkan tingkat kepadatan dan kekuatan beton yang dihasilkan dan berdasarkan jenis agregat ringan yang dipakai (Prawito, 2010). Klasifikasi beton ringan adalah sebagai berikut ini :

- **Beton insulasi (Insulating Concrete)**

Beton ringan dengan berat (density) antara 300 kg/m^3 - 800 kg/m^3 dan berkekuatan tekan berkisar $0,69$ - $6,89 \text{ MPa}$, yang biasanya dipakai sebagai beton penahan panas (insulasi panas) disebut juga Low Density Concrete. Beton ini banyak digunakan untuk keperluan insulasi, karena mempunyai kemampuan konduktivitas panas yang rendah, serta untuk peredam suara. Jenis agregat yang biasa digunakan adalah Perlite dan Vermiculite.

- **Beton ringan dengan kekuatan sedang (Moderate Strength Concrete)**

Beton ringan dengan berat (density) antara 800 kg/m^3 - 1440 kg/m^3 , yang biasanya dipakai sebagai beton struktur ringan atau sebagai pengisi (fill concrete). Beton ini terbuat dari agregat ringan buatan seperti: terak (slag), abu terbang (fly ash), lempung, batu sabak (slate), batu serpih (shale), dan agregat ringan alami, seperti pumice, skoria, dan tufa. Beton ini biasanya memiliki kekuatan tekan berkisar $6,89$ - $17,24 \text{ MPa}$.

- **Beton Struktural (Structural Concrete)**

Beton ringan dengan berat (density) antara 1440 kg/m^3 - 1850 kg/m^3 yang dapat dipakai sebagai beton struktural jika bersifat mekanik (kuat tekan) dapat memenuhi syarat pada umur 28 hari mempunyai kuat tekan berkisar $> 17,24 \text{ MPa}$ Untuk mencapai kekuatan sebesar itu, beton ini dapat memakai agregat kasar seperti expanded shale, clays, slate, dan slag.

Ada beberapa cara untuk memproduksi beton ringan tetapi itu semuanya hanya tergantung pada adanya rongga udara dalam agregat, atau pembuatan rongga udara dalam beton (Prawito,2010), yaitu dilakukan dengan 3 cara berikut ini.

- Beton ringan dengan bahan batuan yang berongga atau agregat ringan buatan yang digunakan juga sebagai pengganti agregat kasar/kerikil. Beton ini memakai agregat ringan yang mempunyai berat jenis yang rendah (berkisar $1400 \text{ kg/m}^3 - 2000 \text{ kg/m}^3$)
- Beton ringan tanpa pasir (No Fines Concrete), dimana beton tidak menggunakan agregat halus (pasir) pada campuran pastinya atau sering disebut beton non pasir, sehingga tidak mempunyai sejumlah besar pori-pori. Berat isi berkisar antara $880 - 1200 \text{ kg/m}^3$ dan mempunyai kekuatan berkisar $7 - 14 \text{ MPa}$.
- Beton ringan yang diperoleh dengan memasukkan udara dalam adukan atau mortar (beton aerasi), sehingga akan terjadi pori-pori udara berukuran $0,1 - 1 \text{ mm}$. Memiliki berat isi $200 - 1440 \text{ kg/m}^3$.

Sementara itu, beton busa adalah campuran antara semen, air, agregat dengan bahan tambah (admixture) tertentu yaitu dengan membuat gelembung-gelembung gas atau udara dalam adukan semen sehingga terjadi banyak pori-pori udara didalam beton. Dengan ditambahkan foaming agent maka akan terbentuk pori-pori yang terjadi akibat reaksi kimia dimana kalsium hidroksida yang terkandung dalam pasir akan bereaksi membentuk gas hidrogen. Gas hidrogen tersebut akan membentuk gelembung-gelembung didalam campuran beton yang mengakibatkan volumenya akan

menjadi lebih besar dari volume semula. Diakhir pengembangan, hidrogen yang terbentuk tadi akan terlepas ke atmosfer dan akan digantikan udara. Akibat terbentuknya rongga di dalam campuran beton tadi, maka berat jenis dari beton tersebut akan lebih kecil dari semula. Penggunaan foaming agent bertujuan untuk memperoleh berat jenis beton yang lebih ringan. *Foam agent* adalah suatu larutan pekat dari bahan surfaktan, dimana apabila hendak digunakan harus dilarutkan dengan air. Surfaktan adalah zat yang cenderung terkonsentrasi pada antarmuka dan mengaktifkan antarmuka tersebut dengan membuat gelembung-gelembung gas/udara dalam adukan semen. Dengan demikian akan terjadi banyak pori-pori udara di dalam betonnya.

Neville and Brooks(1987), ada 2 metode dasar yang dapat ditempuh untuk menghasilkan gelembung gas/udara dalam beton busa atau membuat beton beraerasi yaitu sebagai berikut.

- a) Gas concrete, dibuat dengan memasukkan suatu reaksi kimia dalam bentuk gas/udara ke dalam mortar basah, sehingga ketika bercampur menghasilkan gelembung-gelembung gas/udara dalam jumlah yang banyak. Cara yang sering digunakan adalah dengan menambahkan bubuk aluminium kira-kira 0,2% dari berat semen ke dalam campuran.
- b) Foamed concrete, dibuat dengan menambahkan foaming agent ke dalam campuran. Foaming agent merupakan salah satu bahan pembuat busa yang biasanya berasal dari bahan berbasis protein hydrolyzed atau resin sabun. Fungsi dari foam agent adalah untuk

menstabilkan gelembung udara selama pencampuran dengan cepat. Bahan pembentuk foam agent dapat berupa bahan alami dan buatan.

D. Material Penyusun Beton Busa

D.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/ft³. Bahan baku pembentuk semen adalah:

1. Kapur (CaO) – dari batu kapur,
2. Silika (SiO₂) – dari lempung,
3. Alumina (Al₂O₃) – dari lempung (dengan sedikit presentasi magnesia, MgO, dan terkadang sedikit alkali). Oksida besi terkadang ditambahkan untuk mengontrol komposisinya (Edward G. Nawy, 1995).

D.1.1. Standar Semen di Eropa

- **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 statistik homogen dalam komposisi yang dihasilkan dari produksi dan proses penanganan material yang terjamin kualitasnya (M. Wihardi Tjaronge,2012)

- **Unsur Utama (berdasarkan BS EN 197-1:2011)**

- 1) 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, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ dan sejumlah kecil dari bahan lainnya. Klinker Portland adalah bahan hidrolik yang terdiri dari paling sedikit dua pertiga silika kalsium (3CaO . SiO₂ dan 2 CaO SiO₂) oleh massa, sisanya terdiri dari aluminium dan besi yang mengandung fase klinker dan senyawa lainnya. Rasio massa (CaO)/(SiO₂) 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 (C₃A). 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 (Al₂O₃) dengan massa klinker yang ditentukan sesuai dengan EN 196-2. F adalah persentase besi (III) oksida (Fe₂O₃). Semen Portland tahan sulfat dan semen pozzolanik tahan sulfat dibuat dengan klinker semen Portland dimana kandungan C₃A tidak melebihi :

- a. Untuk CEM I: 0%, 3% dan 5%

b. Untuk CEM IV / A dan CEM IV / B: 9%.

2) 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 hidrolik 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).

3) 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 dioksida reaktif (SiO_2) dan aluminat oksida (Al_2O_3). Sisanya adalah besi oksida (Fe_2O_3) 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 elektrostatik atau mekanis debu partikel hasil pembak

aran 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 hidrolis.

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

4) 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).

5) 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 cm^2/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.

6) **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

D.1.2. Standar Semen di Indonesia

- **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).

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

Persyaratan kimia semen Portland harus memenuhi persyaratan sebagai berikut

Tabel 1. Syarat kimia utama semen portland

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
5	SO ₃ , maksimum	3,0	3,0	3,5	2,3	2,3
	Jika C ₃ A ≤ 8,0 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)}

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 (TiO_2) dan Fosfor pentaoksida (P_2O_5) termasuk dalam Al_2O_3 .

Nilai yang biasa digunakan untuk Al_2O_3 dalam menghitung senyawa potensial (misal: C_3A) untuk tujuan spesifikasi adalah jumlah endapan yang diperoleh dengan penambahan NH_4OH dikurangi jumlah Fe_2O_3 ($\text{R}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$) 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 C_3S , C_2S , C_3A dan C_4AF

dihitung sebagai berikut:

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

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

$$\text{C}_3\text{A} = 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = (2,650 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (1,692 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\text{C}_4\text{AF} = 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = (3,043 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Apabila: $\frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3} < 0,64$, terbentuk larutan padat ($\text{C}_4\text{AF} + \text{C}_2\text{F}$) =

$$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

maka ($\text{C}_4\text{AF} + \text{C}_2\text{F}$) 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 2.5), maka syarat kimia ini tidak berlaku.
- c) Apabila yang disyaratkan adalah pemuaiannya karena sulfat yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (Tabel 2.5), maka syarat kimia ini tidak berlaku.
- d) Tidak dapat dipergunakan

Tabel 2. Syarat kimia tambahan ^{a)}

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)}

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 pada Tabel 3 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 : Pemuaian dengan autoclave, maks %	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
3	Kuat tekan: Umur 1 hari, kg/cm ² , minimum Umur 3 hari, kg/cm ² , minimum Umur 7 hari, kg/cm ² , minimum Umur 28 hari, kg/cm ² , minimum	-	-	120	-	-
		125	100	240	-	80
		200	70 a)	-	7	150
		280	175	-	170	210
			120 a)	-		
4	Waktu pengikatan (metode alternatif) dengan alat: Gillmore Awal, menit, minimal Akhir, menit maksimum Vicat - Awal, menit, minimal - Akhir, menit, maksimum					
		60	60	60	60	60
		600	600	600	600	600
		45	45	45	45	45
		375	375	375	375	375

CATATAN

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

Tabel 4. Syarat Fisika Tambahan^{a)}

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, maks Umur 28 hari, kal/gram, maks	-	70 b)	-	60 70	-
3	Kuat tekan: Umur 28 hari, kg/cm ² , minimum	-	280	-	-	-
4	Pemuaian karena sulfat 14 hari, %, maksimum	-	220 b)	-	-	0,04 0
5	Kandungan udara mortar, % volume, maksimum	12	12	12	12	12

CATATAN

- a) Persyaratan fisika tambahan ini berlaku hanya jika secara khusus diminta.
- b) Bila syarat kalor hidrasi ini disyaratkan, maka syarat C₃S + C₃A seperti tercantum pada tabel kimia tambahan tidak diperlukan.
- c) Syarat kuat tekan ini berlaku bila syarat kalor hidrasi seperti yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan atau bila syarat C₃S + C₃A seperti yang tercantum pada tabel syarat kimia tambahan disyaratkan.

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

- Jenis I yaitu semen yang penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang diisyarakan pada jenis-jenis lain
- Jenis II yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau hidrasi sedang.
- Jenis III yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
- Jenis IV yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah
- Jenis V yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat (SNI 15-2049-2004).

- **Semen Portland Komposit**

Semen *portland* komposit merupakan bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama-sama terak semen *portland* dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik, atau hasil pencampuran antara bubuk semen *portland* dengan bubuk bahan anorganik lain.

Bahan anorganik tersebut antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozolan, senyawa silikat, batu

kapur, dengan kadar total bahan anorganik 6 - 35% dari massa semen *portland* komposit (SNI 15-7064-2004).

Tabel 5. Syarat fisika semen *portland* komposit.

No.	Uraian	Satuan	Persyaratan
1	Kehalusan dengan alat <i>blayne</i>	m ² /kg	min. 280
2	Kekekalan bentuk dengan autoclave :		
	- Pemuai	%	maks. 0,80
	- Penyusutan	%	maks. 0,20
3	Waktu pengikatan dengan alat vicat :		
	- Pengikatan awal	menit	min. 45
	- Pengikatan akhir	menit	maks. 375
4	Kuat tekan :		
	- umur 3 hari	kg/cm ²	min. 125
	- umur 7 hari	kg/cm ²	min. 200
	- umur 28 hari	kg/cm ²	min. 250
5	Pengikatan semu :		
	- Penetrasi akhir	%	min. 50
6	Kandungan udara dalam mortar	% volume	maks. 12

(sumber: SNI 15-7064-2004)

Semen PCC atau *Portland Composite Cement* atau Semen Portland Composite, adalah semen Portland yang masuk kedalam kategori *Belended Cement* atau semen campur.

Semen campur ini dibuat atau didesign karena dibutuhkannya sifat-sifat tertentu yang mana sifat tersebut tidak dimiliki oleh semen portland tipe I. Untuk mendapatkan sifat-sifat tertentu pada semen campur maka pada proses pembuatannya ditambahkan bahan aditif seperti Pozzolan, Fly ash, silica fume dll.

D.1.3. Standar Semen berdasarkan ASTM C 150 – 07

Jenis dan penggunaan semen Portland berdasarkan ASTM C 150 – 07 adalah sebagai berikut :

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

Tabel 6. 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, %	3.0	3.0	3,5	2.3	2.3
Ketika (C_3A) ^E adalah 8% atau kurang					
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

CATATAN

^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 SO₃ tidak 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 7. 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

Catatan

^APersyaratan opsional hanya berlaku ketika secara khusus meminta.

^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.

Untuk mendapatkan sifat-sifat tertentu pada semen campur maka selain persyaratan kimia, semen portland komposit juga memiliki standar persyaratan fisika seperti pada dimana setiap semen portland komposit harus memenuhi standar persyaratan fisika yang telah ditetapkan sesuai dengan persyaratan uji laboratorium.

Tabel 8. Persyaratan Fisika Standar

Jenis Semen ^A	I	IA	II	IIA	III	IIIA	IV	V
konten Air mortar, ^B Volume%:								
max	12	22	12	22	12	22	12	12
min	...	16	...	16	...	16	...	...
Kehalusan, ^C permukaan spesifik, m ² / Kg (metode alternatif):								
tes Turbidimeter								
Nilai rata-rata, min ^D	160	160	160	160	...	...	160	160
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,%								
1 hari	...	...	...	...	12,0	10,0	...	...
					(1740)	(1450)		

Catatan

Waktu pengaturan; uji Vicat:^A

^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.

D.2. Agregat Halus

Dalam SK SNI T-15-1991-03, agregat didefinisikan sebagai material granular misalnya pasir, kerikil, batu pecah dan kerak tungku besi yang dipakai bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk beton semen hidrolis atau adukan. Agregat merupakan komponen beton yang paling berperan dalam menentukan besarnya kekuatan beton. Pada beton biasanya terdapat sekitar 60-80% volume agregat (Edward G. Nawy, 1998:14). Agregat tidak saja berpengaruh pada kekuatan beton, tetapi juga berpengaruh pada daya tahan dan kekompakan strukturnya. Berdasarkan ukuran besar butirannya, agregat yang dipakai dalam adukan beton terbagi menjadi dua, yaitu agregat halus dan agregat kasar. Pada penelitian ini, jenis agregat yang digunakan berupa agregat halus (pasir silika dari Kabupaten Pinrang) sebagai bahan campuran beton busa.

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 03-2834-1993).

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). Menurut peraturan SK-SNI-T-15-1990-03, gradasi pasir dibagi menjadi empat kelompok pasir kasar, pasir agak kasar, pasir agak halus, dan pasir halus diperlihatkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Gradasi Pasir

Lubang Ayakan (mm)	Persen Bahan Butiran Yang Lewat Ayakan			
	Pasir Kasar	Pasir Agak Kasar	Pasir Agak Halus	Pasir Halus
10	100	100	100	100
4,8	90-100	90-100	90-100	95-100
2,4	60-95	75-90	85-100	95-100
1,2	30-70	55-90	75-100	90-100
0,6	15-34	33-59	60-79	80-100
0,3	5-20	8-30	12-40	15-50
0,15	0-10	0-10	0-10	0-15

Adapun 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.

D.3. 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).

D.4. Busa

Busa didapatkan dari hasil pencampuran antara *foam agent* dan air. *Foam agent* adalah suatu larutan pekat dari jenis polyether polyol yang dibentuk dari proses anionic. *Foam agent* yang digunakan berjenis rigid foams yang biasa digunakan dalam industry pelapis permukaan, perekat atau sealant. Metode pengadukan *foam agent*

bisa dilakukan dengan mesin generator busa atau metode adukan manual.

D.5. Bahan Tambah

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. Pada penelitian ini digunakan bahan tambah tipe F yaitu bahan tambahan yang digunakan untuk mengurangi jumlah air campuran sebesar 12% atau lebih, untuk menghasilkan beton sesuai dengan konsistensi yang diterapkan. Bahan tambah yang digunakan yaitu Chelchem 75RS.

E. Sifat Mekanis 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.

E.1. Pengujian *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).

Menurut SNI 4433:2016, jika slump diterapkan sebagai target atau slump nominal, toleransi target atau slump nominal dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel 10. Nilai Toleransi Slump Nominal

Nilai Slump	Toleransi
50 mm atau kurang	± 15 mm
Lebih dari 50 mm – 100 mm	± 25 mm
Lebih dari 100 mm	± 40 mm

E.2. Berat Volume Beton

Pada pengujian ini akan dihitung berat volume beton dalam kondisi segar dan kondisi kering atau bebas udara. Berdasarkan SNI 1973:2016 untuk menghitung berat volume (density) beton dalam kondisi segar dapat digunakan rumus :

$$D = \frac{M_c - M_m}{V_m} \dots\dots\dots(\text{Pers.1})$$

Dimana :

D = Densitas beton (kg/m³)

M_c = Massa wadah ukur yang diisi beton (kg)

M_m = Massa wadah ukur (kg)

V_c = Volume wadah ukur (m³)

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

$$D = \frac{M}{V} \dots\dots\dots(\text{Pers.2})$$

Dimana :

D = Densitas beton dalam kondisi bebas udara (kg/m³)

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

V = Volume absolut total dari komponen material dalam campuran (m³)

E.3. Kuat 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 MPa) sampai 6000 psi (41.368 MPa), dan beton komersial dengan agregat biasa, kekuatannya sekitar 300 psi (2.068 MPa) sampai 10000 psi (68.947 MPa). 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 pepadatan 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.

$$f'_c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots \text{(Pers. 3)}$$

Dimana:

f'_c = Kuat tekan beton (MPa)

P = Beban maksimum (N)

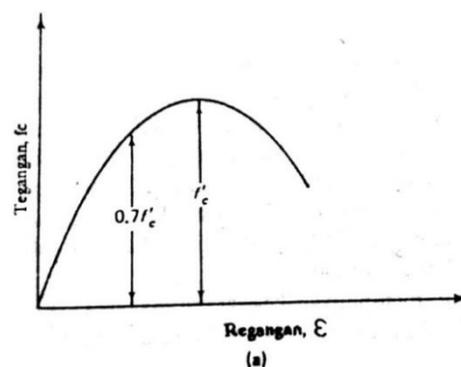
A = Luas penampang yang menerima beban (mm²)

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

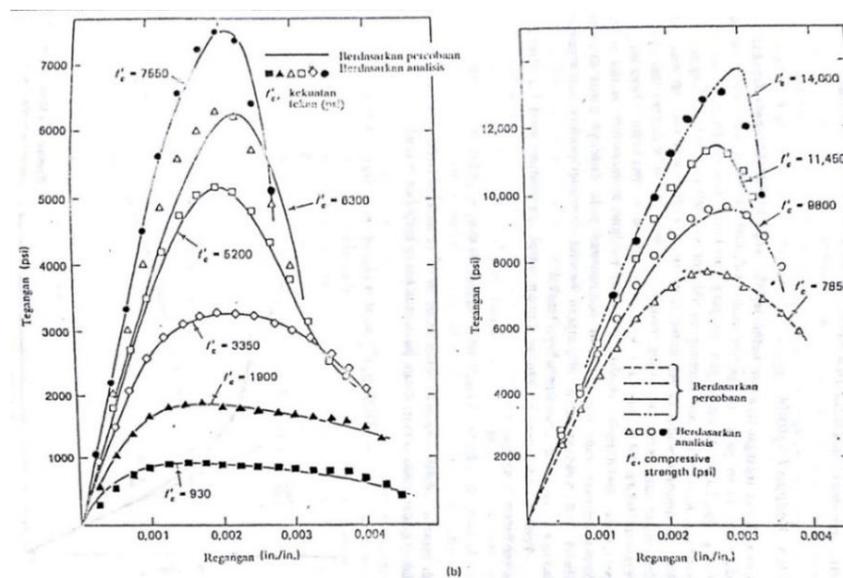
E.4. Kurva Tegangan-Regangan

Hubungan tegangan regangan beton perlu diketahui untuk menurunkan persamaan-persamaan analisis dan desain juga prosedur-prosedur pada struktur beton. Gambar 1 memperlihatkan kurva tegangan regangan tipikal yang diperoleh dari percobaan dengan menggunakan benda uji silinder beton dan dibebani tekan uniaksial selama beberapa menit.



Gambar 1. Kurva tegangan-regangan tipikal beton

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 2 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 daktalitas apabila kekuatan beton bertambah (Nawy, E. G. 1998).



Gambar 2. Kurva Tegangan-Regangan Untuk Berbagai Kekuatan Beton

E.5. Susut

Pada dasarnya ada dua jenis susut: susut plastis dan susut pengeringan. Susut plastis terjadi beberapa jam setelah beton segar dicor ke dalam acuan. Permukaan yang diekspos seperti pelat lantai akan lebih mudah dipengaruhi oleh udara kering karena adanya bidang kontak yang luas. Dalam hal demikian terjadi penguapan yang lebih cepat melalui permukaan beton dibandingkan dengan pergantian oleh air dari lapisan beton yang lebih bawah. Sebaliknya susut pengeringan setelah terjadi beton mencapai bentuk akhirnya dan proses hidrasi pasta semen telah selesai (Edward G. Nawi, 1998).

E.6. *Poisson Ratio*

Ketika sebuah silinder beton menerima beban tekan atau beban tarik, silinder tersebut tidak hanya berkurang atau bertambah tingginya tetapi juga mengalami ekspansi (pemuaian) dalam arah horizontal yaitu kontraksi tegak lurus arah beban. Regangan horizontal disetiap titik pada setiap titik pada suatu batang sebanding dengan regangan vertikal di titik tersebut jika bahannya elastis linear. Bahan yang mempunyai besaran sama dalam semua arah disebut isotropik. Jika besarannya berbeda, maka disebut anisotropik.

Setiap benda uji yang ditarik (atau ditekan) selain mengalami perpanjangan (atau pemendekan), juga mengalami penyusutan (atau perluasan) pada permukaan penampangnya. Keduanya dapat disebut sebagai regangan. Oleh karenanya, dibuatlah kesepakatan bahwa :

a. Regangan yang arahnya segaris dengan arah gerak gaya disebut regangan horizontal (ϵ_H). Dengan rumus perbandingan perubahan panjang dengan panjang mula-mula :

$$(\epsilon_1 = \frac{\Delta L}{L}) \dots\dots\dots(Pers. 4)$$

b. Regangan yang arahnya tegak lurus terhadap arah gerak gaya disebut regangan vertical (ϵ_V). Dengan rumus perbandingan perubahan diameter dengan diameter mula-mula.

$$(\epsilon_2 = \frac{\Delta d}{d_0}) \dots\dots\dots(Pers. 5)$$

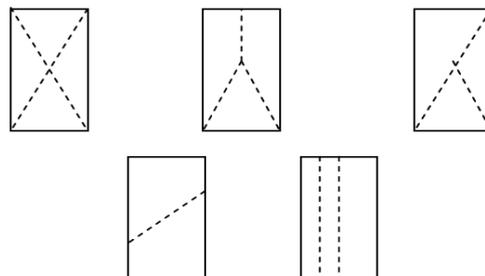
Besarnya nilai Rasio Poisson dapat dihitung menggunakan perbandingan antara regangan vertical dan horizontal, dimana diperhitungkan regangan pada tegangan 40% dari tegangan puncak

$$\sigma = \frac{\epsilon_V \text{ 40\%}}{\epsilon_H \text{ 40\%}} \dots\dots\dots(Pers. 6)$$

Nilai rasio poisson untuk beton berkisar antara 0,15 - 0,25. Apabila regangan di suatu bahan menjadi besar, rasio poissonnya berubah (Gere, Timoshenko, 1997).

E.7. Pola Retak dan Kehancuran

Berdasarkan SNI 1974-2011 pola kehancuran pada benda uji dibedakan menjadi 5 bentuk seperti pada Gambar 3 berikut :



Gambar 3. 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)

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

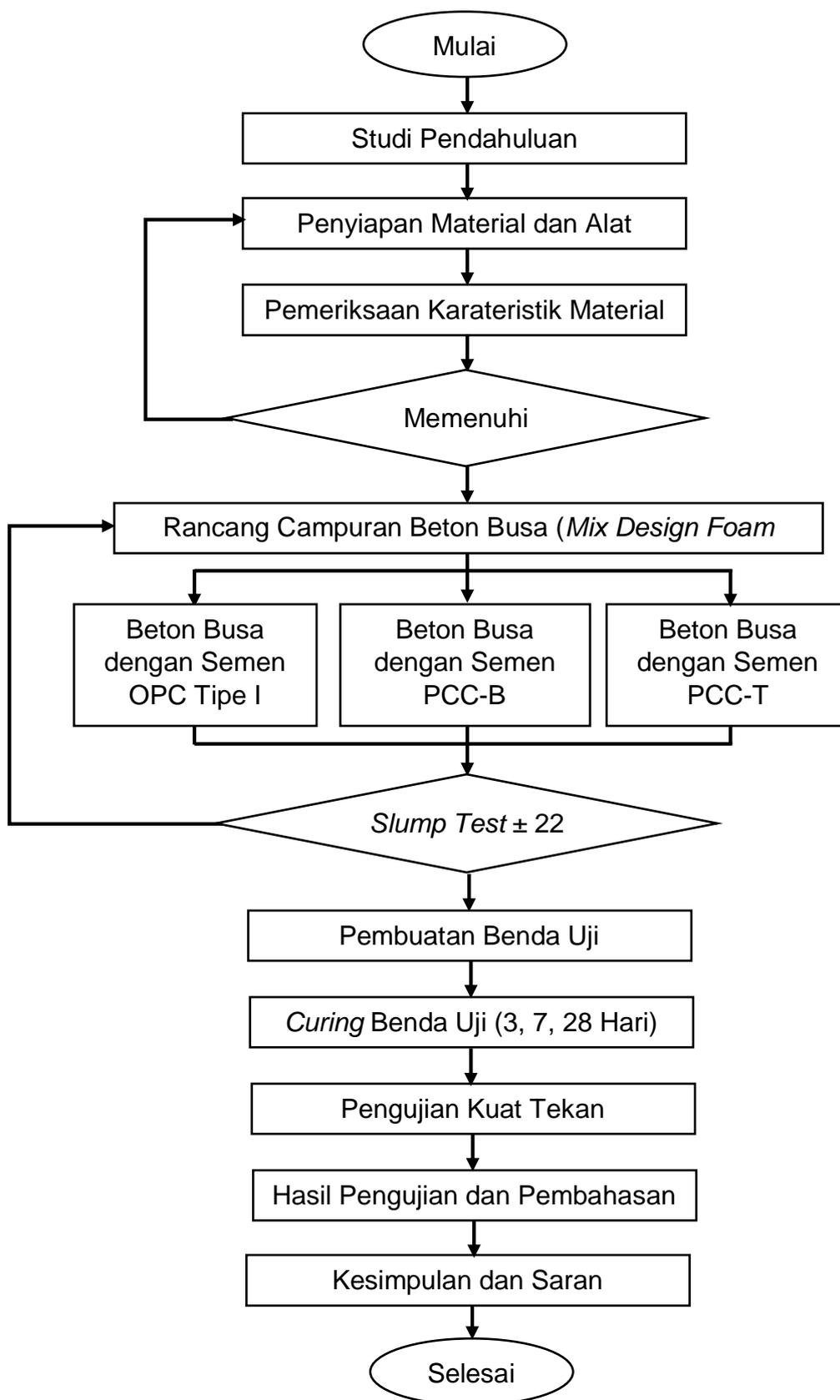
A. Jenis Penelitian dan Teknik Pengumpulan Data

Jenis penelitian ini adalah berupa penelitian eksperimental, dimana segala sesuatu yang berkaitan dengan kondisi, keadaan, faktor, perlakuan atau tindakan yang dapat memengaruhi hasil penelitian diatur oleh peneliti. Untuk memperoleh data sebagai bahan utama dalam penelitian ini, maka digunakan metode pengumpulan data sebagai berikut :

1. Studi Pustaka, penelitian ini mengacu pada peraturan Standar Nasional Indonesia (SNI) dan *American Standard Testing and Material (ASTM)*, serta berbagai literature yang berkaitan.
2. Pemeriksaan dan pengujian sampel di laboratorium yang bertujuan mendapatkan data primer yang akan digunakan dalam menganalisa hasil dari penelitian yang dilaksanakan

B. Bagan Alir Penelitian

Pada penelitian ini direncanakan tahapan-tahapan yang akan menjadi pedoman dan arahan bagi penelitian ini sehingga dapat mempermudah proses penelitian serta dapat menjawab tujuan yang telah direncanakan. Secara garis besar, tahapan-tahapan dalam penelitian di Laboratorium dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Alir Prosedur Penelitian

C. Tempat dan Waktu Penelitian

Pembuatan benda uji dilakukan di Laboratorium PT. Bosowa Beton Indonesia, Tamalanrea, Makassar. Setelah pembuatan benda uji, Gambar 5 menunjukkan lokasi pengujian *curing* hingga kuat tekan dilakukan yaitu di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa. Waktu penelitian berlangsung sejak bulan September 2019 hingga November 2019.



Gambar 5. Lokasi Penelitian

D. Alat dan Bahan Penelitian

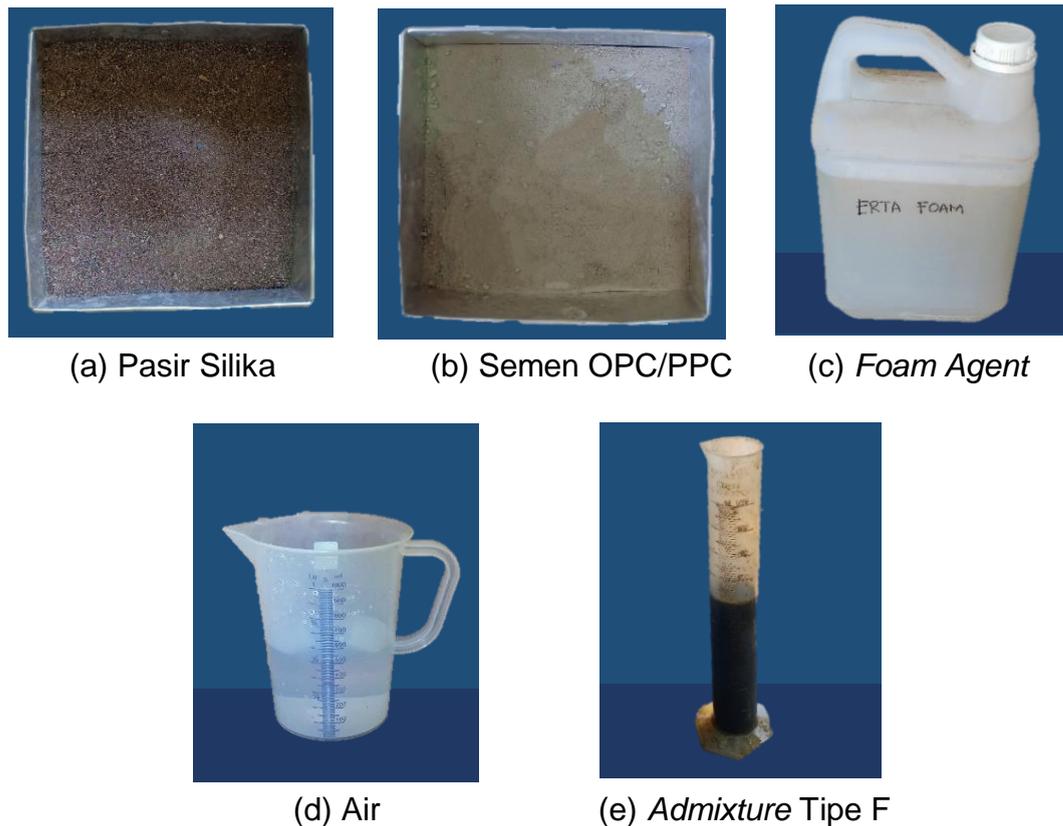
Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. *Stopwatch*
2. *Propeller*
3. Mesin pencampur bahan (*Mixer*)
4. Satu set alat *slump test*

5. Cetakan Silinder ukuran 10 cm x 20 cm
6. Cetakan Kubus ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm
7. *Universal Testing Machine (Tokyo Testing Machine Inc)*
berkapasitas 100 Kn
8. *Magnetic Stand*
9. Satu set komputer dan *Data Logger*
10. *Linear Variable Displacement Transducer (LVDT) 10 mm*
11. *Linear Variable Displacement Transducer (LVDT) 25 mm*

Gambar 6 menunjukkan bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu sebagai berikut :

1. Pada penelitian ini benda uji terbagi menjadi 3 jenis yang dibedakan berdasarkan jenis semen, maka diperlukan :
 - Semen Portland (OPC) Tipe I
 - Semen Portland Komposit Jenis T (PCC-T)
 - Semen Portland Komposit Jenis B (PCC-B)
2. Agregat halus berupa pasir silika yang berasal dari Kabupaten Pinrang
3. Air yang digunakan adalah air tanah hasil pengeboran
4. Bahan tambah *admixture* tipe F (*superplastisizer*)
5. Material pembuat busa (*foam agent*)



Gambar 6. Bahan Penelitian

E. Pemeriksaan Karakteristik Material

Pemeriksaan karakteristik material yang dilakukan berupa karakteristik agregat halus (pasir). Semen yang digunakan dalam penelitian ini disesuaikan dengan standar persyaratan semen Indonesia baik semen Portland tipe I maupun semen komposit. Sementara bahan lain yang digunakan yaitu *superplasztisizer* yang telah memenuhi standar persyaratan bahan admixture tipe F.

E.1. Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus (Pasir)

Adapun pengujian dan metode pengujian agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada tabel Tabel 11.

Tabel 11. Metode pengujian karakteristik agregat halus

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

E.2. Karakteristik Semen Portland Tipe I (OPC)

Karakteristik semen yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi standar persyaratan semen Indonesia yaitu SNI 2049:2015 untuk semen Portland (OPC). Berdasarkan sertifikat mutu pemasaran, sifat fisika semen Portland dapat dilihat pada tabel 12 berikut :

Tabel 12. Karakteristik Fisik Semen Portland (OPC)

Sifat Fisik	Hasil	Persyaratan
Kehalusan, Blaine m ² /kg	346	Minimum 280
Autoclave expansion %	0,11	Maksimum 0,80
Waktu Pengikatan, Vicat test menit		
- Initial set	125	Minimum 45
- Final set	260	Maksimum 375
Kuat Tekan kg/cm ²		
- 3 hari	188	Minimum 135
- 7 hari	266	Minimum 215
- 28 hari	359	Minimum 300
False set, final penetration, %	83,66	Minimum 50*
Kandungan udara, % volume	4,53	Maksimum 12*
Berat Jenis Semen	3,15	-

Sementara karakteristik kimia dari semen Portland dapat dilihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Karakteristik Kimia Semen Portland (OPC)

Sifat Kimia	Hasil (%)	Persyaratan (%)
MgO	2,68	Maksimum 6,0
SO ₃	2,13	Maksimum 3,5
Hilang pijar	3,38	Maksimum 5,0
Bagian tak larut	0,76	Maksimum 3,0
Alkali	0,32	Maksimum 0,60*

E.3. Karakteristik Semen Portland Komposit Jenis B (PCC-B)

Karakteristik semen yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi standar persyaratan semen Indonesia yaitu SNI 7064:2014 untuk semen Portland komposit (PCC). Berdasarkan sertifikat mutu pemasaran, sifat fisik PCC B dapat dilihat pada tabel 14 berikut :

Tabel 14. Karakteristik Fisik PCC-B

Sifat Fisik	Hasil	Persyaratan
Kehalusan, Blaine m ² /kg	433	Minimum 280
Autoclave expansion %	0,08	Maksimum 0,80
Waktu Pengikatan, Vicat test menit		
- Initial set	146	Minimum 45
- Final set	273	Maksimum 375
Kuat Tekan kg/cm ²		
- 3 hari	168	Minimum 135
- 7 hari	230	Minimum 215
- 28 hari	317	Minimum 300
False set, final penetration, %	85,08	Minimum 50*
Kandungan udara, % volume	4,49	Maksimum 12*
Berat Jenis Semen	3,04	-

Sementara karakteristik kimia dari semen Portland Komposit jenis B dapat dilihat pada Tabel 15

Tabel 15. Karakteristik Kimia PCC-B

Sifat Kimia	Hasil (%)	Persyaratan (%)
SO ₃	1,79	Maksimum 4,0

E.4. Karakteristik Semen Portland Komposit Jenis T (PCC-T)

Karakteristik semen yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi standar persyaratan semen Indonesia yaitu SNI 7064:2014 untuk semen Portland komposit (PCC). Berdasarkan sertifikat mutu pemasaran, sifat kimia semen Portland komposit jenis T dapat dilihat pada tabel 16 berikut :

Tabel 16. Karakteristik Kimia PCC-T

Sifat Kimia	Referensi Standar SNI 7064 : 2014	Hasil Tes	Metode Analisis SNI 2049 : 2015
Magnesium Oxida (MgO %)	-	0,99	Part 7.1.3.10
Sulfur trioxide (SO ₃)	Max. 4,00	1,81	Part 7.1.3.11
Loss Ignition (%)	-	4,61	Part 7.1.3.12
Insoluble residue (%)	-	2,78	Part 7.1.3.1
Silikon Dioxide (SiO ₂ %)	-	18,39	Part 7.1.3.2
Alumunium Oxide (Al ₂ O ₃ , %)	-	5,15	Part 7.1.3.8
Ferric Oxide (Fe ₂ O ₃ , %)	-	3,41	Part 7.1.3.4
Calcium Oxide (CaO, %)	-	61,79	Part 7.1.3.9
Total, %	-	98,93	-
Free Lim, %	-	1,56	Part 7.1.3.6

Sementara karakteristik fisik dari semen Portland Komposit jenis T dapat dilihat pada Tabel 17

Tabel 17. Karakteristik Fisik PCC-T

Sifat Fisik	Referensi Standar SNI 7064 : 2014	Hasil Tes	Metode Analisis SNI 2049 : 2015
Fineness, specific surface :			
- Air Permeability Test (m ² /kg)	Min. 280	341	Part 7.2.2
- Residu on 45 mic,	-	13.58	-
Soundness :			
- Autoclave expansion (%)	Max. 0,80	0,06	Part 7.2.5
- Shortening (%)	Max. 0,20	-	Part 7.2.5
Compressive Strength :			
- 3 days (kg/cm ²)	Min.130	162	Part 7.2.6
- 7 days (kg/cm ²)	Min. 200	231	Part 7.2.6
- 28 days (kg/cm ²)	Min. 280	333	Part 7.2.6
Time of setting, vicat test :			
- initial set (minutes)	Min. 45	132	Part 7.2.4
- final set (minutes)	Max. 375	224	Part 7.2.4
Air of mortar, %	Max. 12,00	10,17	Part 7.2.10
False set, final penetration, (%)	Min. 50,00	76,98	Part 7.2.7
Bulk Density (kg/liter)	-	1,10	-
Specific Gravity (gr/cm ³)	-	3,08	-

E.5. Karakteristik Admixture (superplastisizer)

Admixture yang digunakan telah memenuhi standar persyaratan bahan admixture tipe F sesuai dengan ASTM C494 yang berfungsi untuk mengurangi pemakaian air dalam campuran beton dan meningkatkan *workability* campuran beton sehingga campuran dapat mencapai *slump* rencana dan mampu meningkatkan kuat tekan beton.

Karakteristik umum berdasarkan sertifikat mutu pemasaran dari *admixture* ini dapat dilihat pada Tabel 18.

Tabel 18. Karakteristik Umum Superplasztisizer Tipe F

Karakteristik	Hasil
Warna	Coklat Tua
Berat Jenis	$1,17 \pm 0,02$
Batas Jumlah Pemakaian Normal	0,4-1,5 kg / 100 kg

F. *Mix Design* Beton Busa

Metode yang digunakan dalam pembuatan rancangan campuran beton busa dalam penelitian ini mengacu pada persyaratan SNI 03-2834-2000 dimana *mix design* dibuat dengan memperhatikan berat volume dan kuat tekan rencana.

Campuran yang dibuat adalah campuran antara semen, agregat halus, air, *superplastisizer*, dan *foam agent*. Pada penelitian ini digunakan beberapa jenis semen yaitu semen Portland tipe I, semen Portland komposit Jenis B dan semen Portland komposit Jenis T.

Perbandingan antara *mortar portion* dan *foam portion* pada *mix design* I adalah 42,8%:52,7%, sementara itu, untuk *mix design* II dan *mix design* III perbandingannya ialah 44,4%:55,6%. Dengan menambahkan campuran agregat halus, air, bahan admixture berupa *superplatisizer* dan *foam agent* sebesar variasi yang telah ditentukan dari berat total campuran.

G. Pembuatan Benda Uji

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini berupa beton berbentuk silinder dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm dan mortar berbentuk kubus dengan ukuran masing-masing sisinya 15 cm x 15 cm x 15 cm. Dalam penelitian ini dilakukan 3 kali proses pengecoran dengan penggunaan jenis semen yang berbeda. Setiap pengecoran akan menghasilkan 18 benda uji dimana terdapat 9 benda uji silinder dan 9 benda uji kubus. Sehingga total benda uji yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah 54 benda uji yang akan diuji kuat tekan dan elastisitas pada umur 3 hari, 7 hari dan 28 hari. Masing-masing umur pengujian akan menggunakan 3 benda uji. Adapun untuk detail jumlah benda uji dapat dilihat pada Tabel 19 berikut ini :

Tabel 19. Jumlah Benda Uji Penelitian

Bentuk Benda Uji	Durasi Curing Udara (Hari)	Jumlah Benda Uji			Jenis Pengujian
		OPC Tipe I	PCC-B	PCC-T	
Silinder 10 cm x 20 cm	3	3	3	3	Kuat Tekan
	7	3	3	3	
	28	3	3	3	
Kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm	3	3	3	3	Kuat Tekan
	7	3	3	3	
	28	3	3	3	
Total		54			

Langkah-langkah pada pembuatan benda uji untuk *mix design* I, II maupun III sama, namun pada setiap pengecoran digunakan jenis semen yang berbeda.

Adapun langkah-langkah pencampuran pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 7 dengan prosedur sebagai berikut :

1. Mula-mula dilakukan pembuatan campuran larutan busa dengan cara melarutkan *foam agent* ke dalam wadah berisi air dengan perbandingan *foam agent* terhadap air sebesar 3 : 10.
2. Larutan tersebut diaduk menggunakan *propeller*, selama 2 menit hingga membentuk busa. Pembuatan busa dilakukan secara terpisah pada wadah yang berbeda diluar mesin mixer
3. Lalu dilakukan pembuatan mortar berdasarkan dengan tipe pengecoran, pasir dan semen diaduk menggunakan mixer dalam kondisi kering selama 2 menit,
4. Tambahkan *superplatisizer* yang telah dilarutkan didalam air dan diaduk kembali selama 1 menit
5. Lakukan pengujian slump untuk memastikan bahwa campuran telah mencapai slump yang diinginkan
6. Jika telah mencapai slump rencana, campuran larutan berbusa ditambahkan ke dalam mortar di dalam mixer
7. kemudian dilakukan pengadukan kembali selama 3 menit hingga menjadi campuran *foam concrete*
8. Setelah itu dilakukan pengecekan *density foam concrete* dalam keadaan segar, dengan cara mengambil sejumlah campuran pada gelas ukur (1000 ml) kemudian di timbang
9. selanjutnya menuangkan foam concrete kedalam cetakan silinder dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm, dan juga pada cetakan kubus 150 mm x 150 mm x 150 mm

10. Setelah 1 x 24 jam, spesimen dilepaskan dari cetakan untuk kemudian dilakukan perawatan (*curing* udara).



Gambar 7. Proses Pembuatan Benda Uji

H. Perawatan (*Curing*) Benda Uji

Dalam penelitian ini, pada semua benda uji dilakukan perawatan (*curing*) yaitu *curing* udara. *Curing* udara yaitu benda uji disimpan dalam

ruang penyimpanan benda uji dengan suhu ruang setelah benda uji dikeluarkan dari cetakan silinder 10 cm x 20 cm dan kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm hingga umur pengujian kuat tekan yaitu 3, 7 dan 28 hari seperti yang terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. *Curing Udara Benda Uji*

I. Pengujian Karakteristik Beton Busa

I.1. Pengujian *Slump*

Standar metode pengujian slump yang digunakan pada penelitian ini adalah SNI 1972-2008. Dilakukan pengujian slump pada campuran segar mortar yang terdiri atas agregat halus, semen, air dan bahan admixture untuk mengetahui *workability* beton segar dan memastikan bahwa nilai slump campuran telah memenuhi nilai slump rencana (± 22 cm) dan tidak terjadi segregasi maupun *bleeding* pada campuran. Adapun langkah-langkah pengujian slump yaitu :

1. 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 menurut Butir 6, segera isi cetakan dalam tiga lapis, setiap lapis sekira sepertiga dari volume cetakan.
2. Sepertiga dari volume cetakan slump diisi hingga ketebalan 67 mm , dua pertiga dari volume diisi hingga ketebalan 155 mm.
3. 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.
4. 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.

5. Setelah lapisan atas selesai dipadatkan, ratakan permukaan beton pada bagian atas cetakan dengan cara menggelindingkan batang penusuk di atasnya.
6. 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.
7. 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.

I.2. Berat Volume Beton

Pada pengujian ini akan dihitung berat volume beton dalam kondisi segar dan kondisi kering atau bebas udara. Berdasarkan SNI 1973:2016 untuk menghitung berat volume beton dalam kondisi segar dapat digunakan rumus :

$$D = \frac{M_c - M_m}{V_m} \dots\dots\dots(Pers.4)$$

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 beton dalam kondisi bebas udara dapat digunakan rumus :

$$D = \frac{M}{V} \dots\dots\dots \text{(Pers.5)}$$

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)

I.3. Kuat Tekan dan Hubungan Tegangan-Regangan

Pengujian kuat tekan yaitu memberi beban monoton secara terus menerus dengan laju yang konstan pada benda uji antara dua batang pembebanan yang akan menciptakan tegangan tekan (SNI-03-6825-2002). Pada penelitian ini, benda uji silinder 10 cm x 20 cm digunakan sebanyak 3 sampel untuk dilakukan pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine (Tokyo Testing Machine Inc.)* kapasitas 1000 kN, LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) 10 mm sebanyak 2 buah, LVDT 25 mm sebanyak 3 buah untuk benda uji silinder 10 cm x 20 cm,

LVDT 25 mm sebanyak 4 buah untuk benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm, dan *magnetic stand* yang disambungkan dengan satu set alat *Data Logger* seperti pada Gambar 8 untuk benda uji silinder 10 cm x 20 cm dan Gambar 9 untuk benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm.

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 :

$$f_c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (Pers.6)$$

Dimana :

f_c = Kuat Tekan (N/mm²)

P = Gaya tekan aksial (N)

A = Luas penampang melintang benda uji (mm²)

Untuk regangan yang didapatkan dari penggunaan LVDT pada benda uji silinder 150 mm x 300 mm dan kubus 150 mm x 150 mm yakni dengan menggunakan rumus :

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \dots\dots\dots (Pers. 7)$$

Dimana:

ϵ = Regangan (mm/mm)

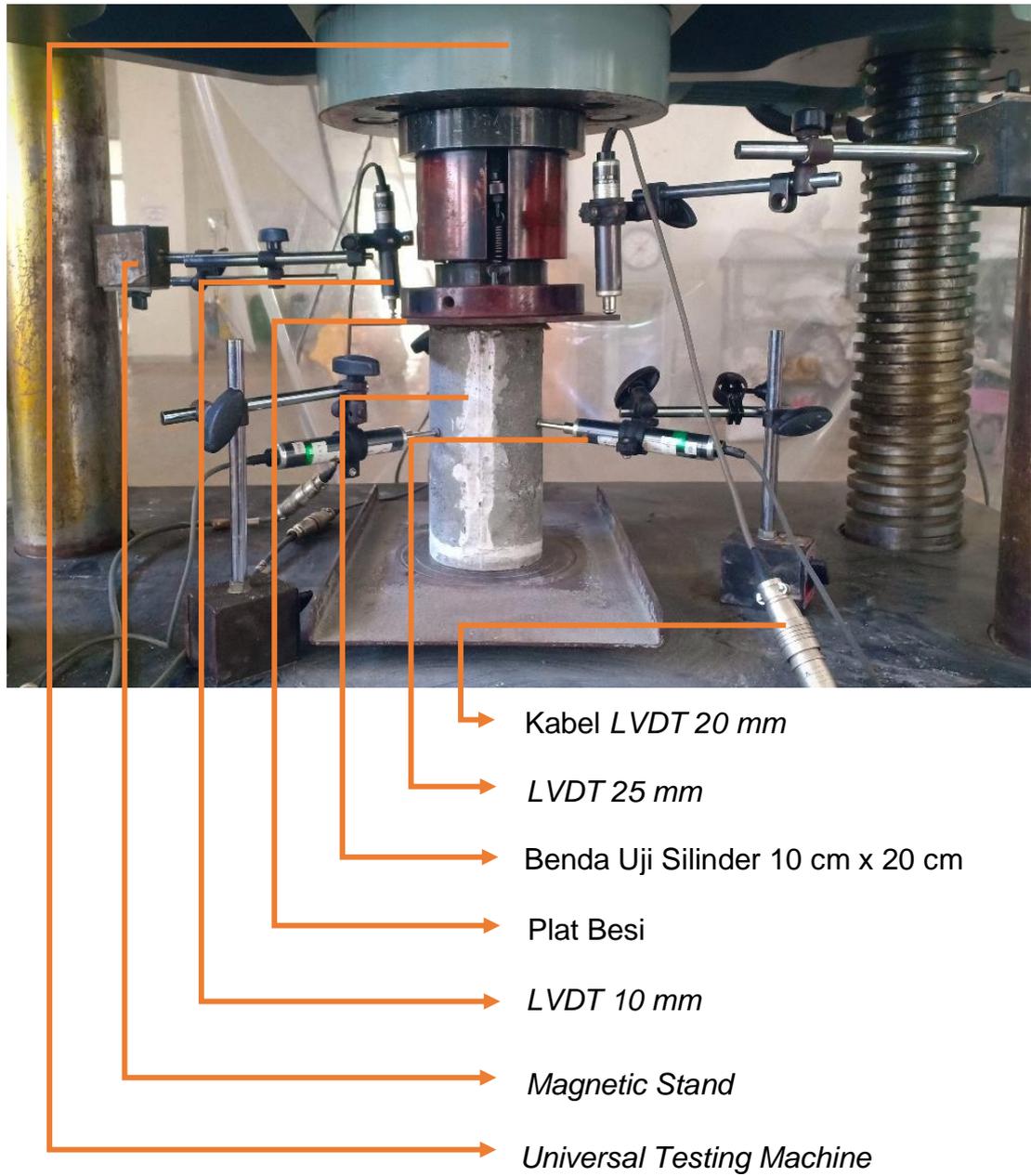
Δl = Perubahan Tinggi Benda Uji (mm)

l = Tinggi Awal Benda Uji (mm)

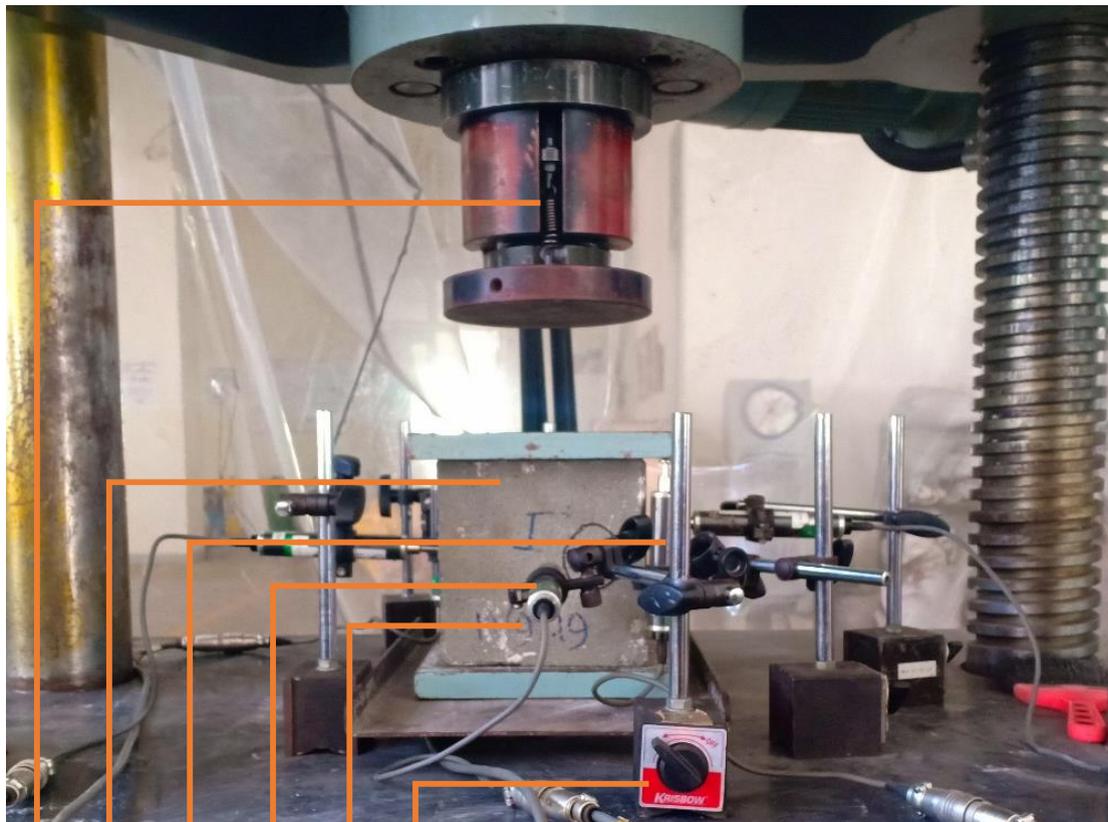
Untuk benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm dilakukan pengujian yang sama dengan benda uji silinder 10 cm x 20 cm.

Adapun Prosedur pengujian kuat tekan terdiri dari beberapa tahapan, yaitu :

1. Benda uji Silinder 10 cm x 20 cm dan benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm yang telah dicuring udara dan telah mencapai umur uji
2. Timbang masing-masing benda uji
3. Letakkan benda uji pada *Universal Testing Machine (Tokyo Testing Machine Inc.)* kapasitas 1000 kN secara sentris
4. Untuk benda uji silinder 10 cm x 20 cm letakkan plat besi pada bagian atas benda uji, sementara untuk benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm letakkan plat besi pada bagian atas dan bawah benda uji
5. Atur alat *Universal Testing Machine (UTM)* dengan kecepatan penurunan yang tetap (*constant strain*) yaitu 0,5 mm/min.
6. Pasang LVDT 10 mm secara vertikal hingga mengenai plat besi yang terdapat diatas benda uji. Untuk benda uji silinder 10 cm x 20 cm, LVDT 25 mm dipasang secara horizontal pada 3 titik, pada benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm LVDT 25 mm dipasang pada 4 sisi kubus
7. Jalankan *Universal Testing Machine (Tokyo Testing Machine Inc.)* kapasitas 1000 kN dan hasilnya akan tersimpan secara otomatis pada komputer
8. Dalam pengujian ini dapat diperoleh hasil tegangan dan regangan



Gambar 9. Pengujian Kuat Tekan Benda Uji Silinder 10 cm x 20 cm



- Kabel LVDT 20 mm
- Magnetic Stand
- LVDT 25 mm
- Benda Uji Kubus 15 cm x 15 cm x 15
- LVDT 10 mm
- Plat Besi
- Universal Testing Machine

Gambar 10. Pengujian Kuat Tekan Benda Uji Kubus 15 x 15 x 15 (cm)

I.4. Pola Retak dan Kehancuran Beton

Setelah melakukan pengujian terhadap benda uji, maka dilakukan peninjauan terhadap pola retak dan kehancuran beton. Peninjauan terhadap pola retak dan kehancuran beton mengacu pada SNI 1974-2011.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Material

A.1. Karakteristik Agregat Halus (Pasir)

Tabel 20 menunjukkan hasil pengujian karakteristik fisik agregat halus dilaksanakan di Laboratorium Eco Material Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Agregat halus yang digunakan adalah pasir silika yang berasal dari Kabupaten Pinrang.

Tabel 20. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus

No.	Karakteristik Material	Hasil Pemeriksaan	Persyaratan	Keterangan
1	Berat Jenis			
	-Berat Jenis Kering	2,584	1,5-3,3	Memenuhi
	-Berat Jenis SSD	2,608	1,5-3,3	Memenuhi
	-Berat Jenis Semu	2,649	1,5-3,3	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	1,4	1,4-1,9	Memenuhi
	-Padat	1,48	1,4-1,9	Memenuhi
6	Kadar Air (%)	3,59	2-5	Memenuhi
7	Kadar Organik	No.1	<No.3	Memenuhi

B. *Mix Design* Beton Busa

B.1. *Mix Design* I dengan OPC Tipe I

Adapun rancangan campuran beton busa dengan campuran semen Portland tipe I dapat dilihat pada Tabel 21 berikut

Tabel 21. Mix Design I

Material	Jenis	Berat Jenis	Mix Design (m³)
Semen	OPC	3,12	501,38 kg
Pasir	Silika	2,48	1432,51 kg
Air	Tanah	1	175,48 kg
Admixture 1	Tipe F	1,16	12,53 kg
Total			2336,78 kg
LWC Density			1325 gr/ltr
Mortar Portion			42,8 %
Foam Portion			57,2 %
Perbandingan Foam Agent / Air			3 : 10

B.2. Mix Design II dengan PCC-B

Adapun rancangan campuran beton busa dengan menggunakan Semen Portland Komposit Jenis B dapat dilihat pada tabel 22 berikut

Tabel 22. Mix Design II

Material	Jenis	Berat Jenis	Mix Design (m³)
Semen	PCC-B	3,02	662,71 kg
Pasir	Silika	2,48	1325,43 kg
Air	Tanah	1	232 kg
Admixture 1	Tipe F	1,16	16,57 kg
Total			2236,71 kg
LWC Density			1325 gr/ltr
Mortar Portion			44,4 %
Foam Portion			55,6 %
Perbandingan Foam Agent / Air			3 : 10

B.3. Mix Design III dengan PCC-T

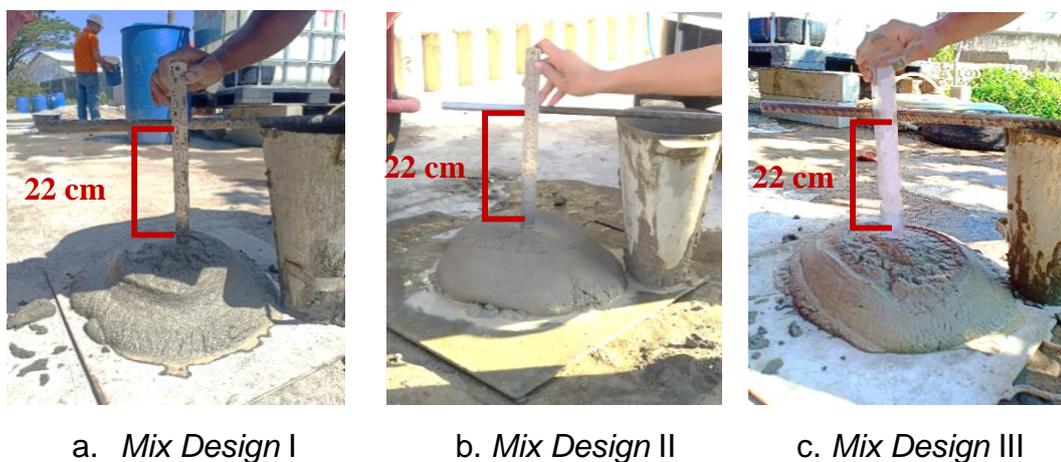
Adapun rancangan campuran beton busa dengan menggunakan Semen Portland Komposit Jenis T dapat dilihat pada tabel 23 berikut :

Tabel 23. *Mix Design* III

Material	Jenis	Berat Jenis	<i>Mix Design</i> (m ³)
Semen	PCC-T	3,02	662,71 kg
Pasir	Silika	2,48	1325,43 kg
Air	Tanah	1	232 kg
Admixture 1	Tipe F	1,16	16,57 kg
Total			2236,71 kg
LWC Density			1325 gr/ltr
Mortar Portion			44,4 %
Foam Portion			55,6 %
Perbandingan Foam Agent / Air			3 : 10

C. Pengujian *Slump*

Pada Gambar 11 dapat diamati nilai hasil pengujian *slump* beton busa dengan kondisi segar dari masing-masing pengecoran. Pada *mix design* I, II dan III diperoleh rata-rata nilai *slump* 22 cm dan sesuai dengan nilai *slump* rencana. Dari observasi visual terlihat bahwa campuran beton segar dari masing-masing *mix design* bersifat adhesif sehingga tidak terjadi segregasi maupun *bleeding*.

Gambar 11. Pengujian *Slump*

D. Berat Volume Beton

D.1. Berat Volume *Mix Design I*

Berat volume beton segar yang diperoleh pada *Mix Design I* adalah 1325 kg/m^2 dan berat volume beton keras masing-masing benda uji dengan menggunakan semen portland tipe I berkisar antara 1240 kg/m^2 hingga 1280 kg/m^2 . Berat volume beton keras masing-masing sampel dapat dilihat pada Tabel 24 berikut

Tabel 24. Berat Volume Benda Uji *Mix Design I*

Bentuk Benda Uji	Durasi <i>Curing</i> Udara (Hari)	Sampel	Berat (kg)	Volume (m^3)	Berat Volume (kg/m^3)	Rata-rata Berat Volume (kg/m^3)
Kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm	3	1	4,565	0,0034	1352,6	1285,9
		2	4,180	0,0034	1238,5	
		3	4,275	0,0034	1266,7	
	7	1	4,310	0,0034	1277,04	1263,7
		2	4,230	0,0034	1253,3	
		3	4,255	0,0034	1260,7	
	28	1	4,230	0,0034	1253,3	1257,8
		2	4,170	0,0034	1235,6	
		3	4,335	0,0034	1284,4	
Silinder 10 cm x 20 cm	3	1	2,020	0,0016	1286,0	1291,3
		2	2,025	0,0016	1289,2	
		3	2,040	0,0016	1298,7	
	7	1	1,955	0,0016	1244,6	1254,1
		2	1,975	0,0016	1257,3	
		3	1,980	0,0016	1260,5	
	28	1	1,935	0,0016	1231,9	1243,5
		2	1,920	0,0016	1222,3	
		3	2,005	0,0016	1276,4	

D.2. Berat Volume *Mix Design* II

Berat volume beton segar pada pengecoran II adalah 1325 kg/m^2 dan berat volume beton keras benda uji dengan menggunakan semen portland komposit B berkisar antara 1220 kg/m^3 hingga 1250 kg/m^3 . Adapun berat volume masing-masing sampel dapat dilihat pada Tabel 25 berikut ini

Tabel 25. Berat Volume Benda Uji *Mix Design* II

Bentuk Benda Uji	Durasi <i>Curing</i> Udara (Hari)	Sampel	Berat (kg)	Volume (m^3)	Berat Volume (kg/m^3)	Rata-rata Berat Volume (kg/m^3)
Kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm	3	1	4,255	0,0034	1260,7	1254,3
		2	4,250	0,0034	1259,3	
		3	4,195	0,0034	1243,0	
	7	1	4,225	0,0034	1251,9	1247,9
		2	4,250	0,0034	1259,3	
		3	4,160	0,0034	1232,6	
	28	1	4,185	0,0034	1240,0	1238,5
		2	4,150	0,0034	1229,6	
		3	4,205	0,0034	1245,9	
Silinder 10 cm x 20 cm	3	1	1,930	0,0016	1228,7	1239,3
		2	1,950	0,0016	1241,4	
		3	1,960	0,0016	1247,8	
	7	1	1,930	0,0016	1228,7	1232,9
		2	1,935	0,0016	1231,9	
		3	1,945	0,0016	1238,2	
	28	1	1,915	0,0016	1219,1	1228,7
		2	1,940	0,0016	1235,0	
		3	1,935	0,0016	1231,9	

D.3. Berat Volume *Mix Design* III

Berat volume beton segar *mix design* III adalah 1325 kg/m² dan berat volume beton keras benda uji dengan menggunakan semen komposit T berkisar antara 1270 kg/m³ hingga 1290 kg/m³.

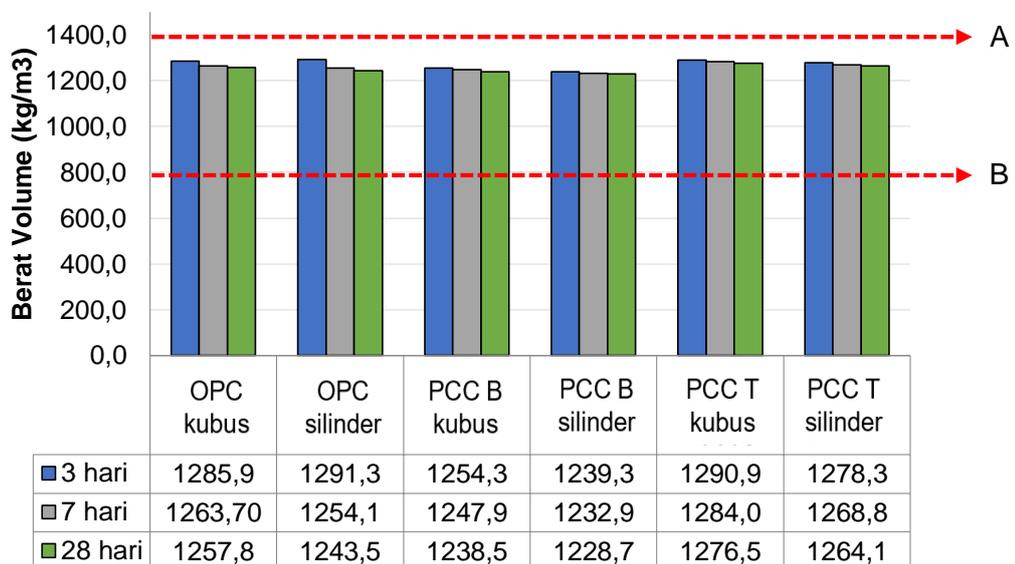
Adapun berat volume masing-masing sampel dapat dilihat pada Tabel 26.

Tabel 26. Berat Volume *Mix Design* III

Bentuk Benda Uji	Durasi <i>Curing</i> Udara (Hari)	Sampel	Berat (kg)	Volume (m ³)	Berat Volume (kg/m ³)	Rata-rata Berat Volume (kg/m ³)
Kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm	3	1	4,235	0,0034	1254,8	1290,9
		2	4,375	0,0034	1296,3	
		3	4,460	0,0034	1321,5	
	7	1	4,360	0,0034	1291,9	1288,9
		2	4,350	0,0034	1288,9	
		3	4,340	0,0034	1285,9	
	28	1	4,415	0,0034	1308,1	1286,4
		2	4,305	0,0034	1275,6	
		3	4,305	0,0034	1275,6	
Silinder 10 cm x 20 cm	3	1	2,007	0,0016	1277,7	1278,3
		2	2,015	0,0016	1282,8	
		3	2,002	0,0016	1274,5	
	7	1	2,000	0,0016	1273,2	1275,4
		2	2,012	0,0016	1280,9	
		3	1,998	0,0016	1272,0	
	28	1	2,025	0,0016	1289,2	1273,7
		2	1,995	0,0016	1270,1	
		3	1,982	0,0016	1261,8	

Hasil menunjukkan bahwa Seluruh benda uji merupakan beton ringan sesuai dengan SNI 03:2847:2013 yaitu berat volume untuk beton ringan 1140 – 1840 kg/m³. Benda uji dengan menggunakan semen portland komposit T cenderung memiliki nilai berat volume yang lebih tinggi dibandingkan menggunakan semen portland tipe I maupun semen portland komposit B.

Gambar 12 menunjukkan perbandingan antara bertambahnya umur *curing* dengan berat volume beton dari masing-masing mix design dan dapat disimpulkan bahwa semakin lama durasi *curing* maka berat volume beton tersebut akan semakin rendah. Berdasarkan SNI 03-3449-2002, garis A pada Gambar 12 adalah berat volume minimum beton struktural yaitu 1400 kg/m³. dan garis B ialah berat volume minimum beton struktural ringan yaitu 800 kg/m³.



Gambar 12. Diagram perbandingan antara umur *curing* dan berat volume beton

E. Pengujian Kuat Tekan

Dari pengujian yang dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, diperoleh hasil sebagai berikut :

E.1. Kuat Tekan Beton *Mix Design I*

Kuat tekan benda uji dengan menggunakan semen portland tipe I untuk silinder 10 cm x 20 cm diperoleh 4,39 MPa pada 28 hari dan untuk benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm diperoleh 4,70 MPa pada umur 28 hari. Kuat tekan masing-masing sampel dari umur *curing* 3 hingga 28 haari dapat dilihat pada Tabel 27 berikut ini :

Tabel 27. Hasil Pengujian Kuat Tekan *Mix Design I*

Bentuk Benda Uji	Durasi <i>Curing</i> (Hari)	Kuat Tekan Benda Uji (MPa)			Rata-rata Kuat Tekan Benda Uji (MPa)
		1	2	3	
Silinder 10 cm x 20 cm	3	3,48	2,58	2,50	2,85
	7	4,99	3,25	3,02	3,75
	28	5,43	3,93	3,82	4,39
Kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm	3	3,79	2,63	2,30	2,91
	7	4,15	4,20	4,17	4,17
	28	5,4	4,38	4,25	4,70

E.2. Kuat Tekan Beton *Mix Design II*

Kuat tekan benda uji dengan menggunakan semen portland komposit Buntut silinder 10 cm x 20 cm diperoleh 3,73 MPa pada 28 hari dan untuk benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm diperoleh 4,09

MPa pada umur 28 hari. Adapun Kuat tekan masing-masing sampel dari umur *curing* 3 hingga 28 haari dapat dilihat pada Tabel 28 berikut.

Tabel 28. Hasil Pengujian Kuat Tekan *Mix Design* II

Bentuk Benda Uji	Durasi <i>Curing</i> (Hari)	Kuat Tekan Benda Uji (MPa)			Rata-rata Kuat Tekan Benda Uji (MPa)
		1	2	3	
Silinder 10 x 20 (cm)	3	2,87	2,13	2,42	2,47
	7	3,43	3,41	3,20	3,35
	28	3,67	4,07	3,46	3,73
Kubus 15 x 15 x 15 (cm)	3	2,63	2,38	2,67	2,56
	7	4,12	3,96	3,53	3,87
	28	3,75	4,45	4,08	4,09

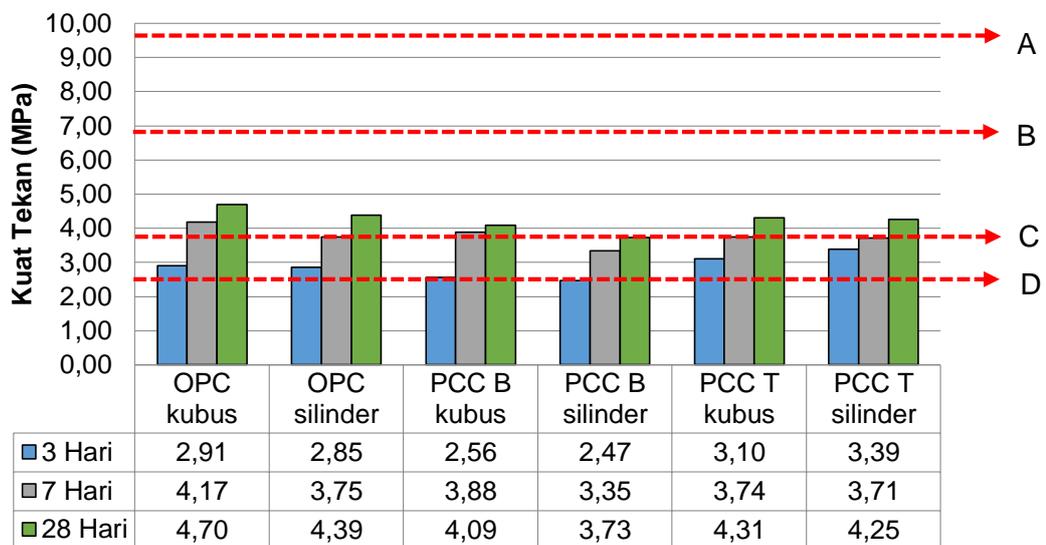
E.3. Kuat Tekan Beton Hasil Pengecoran III

Adapun Kuat tekan masing-masing sampel dari umur *curing* 3 hingga 28 hari dapat dilihat pada Tabel 29.

Tabel 29. Hasil Pengujian Kuat Tekan *Mix Design* III

Bentuk Benda Uji	Durasi <i>Curing</i> (Hari)	Kuat Tekan Benda Uji (MPa)			Rata-rata Kuat Tekan Benda Uji (MPa)
		1	2	3	
Silinder 10 x 20 (cm)	3	3,22	3,48	3,48	3,39
	7	3,57	3,84	3,73	3,71
	28	4,59	4,08	4,09	4,25
Kubus 15 x 15 x 15 (cm)	3	2,99	2,85	3,47	3,10
	7	3,79	3,80	3,63	3,74
	28	4,13	4,75	4,04	4,31

Kuat tekan benda uji dengan menggunakan semen portland komposit berbentuk silinder 10 cm x 20 cm diperoleh 4,25 MPa pada 28 hari dan untuk benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm diperoleh 4,17 MPa pada umur 28 hari. Berdasarkan SNI 03-0349-1989, ditemukan bahwa hasil kuat beton busa yang diperoleh dapat digunakan sebagai bata beton untuk pasangan dinding. Pada Gambar 13, garis A adalah persyaratan kuat tekan rata-rata untuk bata beton mutu I yaitu 9,8 MPa, garis B adalah persyaratan kuat tekan rata-rata untuk bata beton mutu II dan juga batas minimum kuat tekan beton struktural ringan yaitu 6,9 MPa, garis C adalah persyaratan kuat tekan rata-rata untuk bata beton mutu III yaitu 3,9 MPa dan garis D adalah persyaratan kuat tekan rata-rata untuk bata beton mutu IV yaitu MPa.



Gambar 13. Diagram perbandingan antara umur *curing* dan kuat tekan beton busa

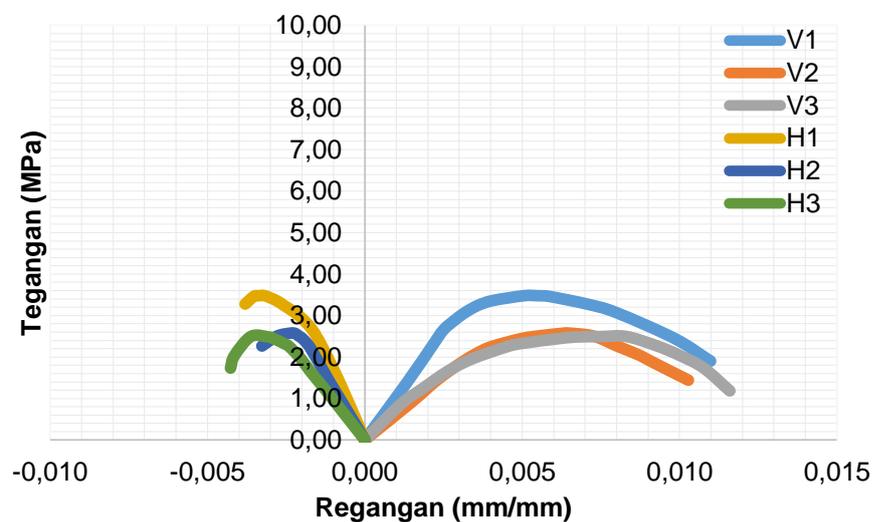
Dari Gambar 13, beton busa dengan OPC dapat dikategorikan sebagai bata beton mutu III yaitu 3,9 MPa.

F. Hubungan Tegangan-Regangan Beton Busa

F.1. Hubungan Tegangan-Regangan Beton Busa *Mix Design I*

- **Umur Pengujian Benda Uji 3 Hari**

Grafik hubungan tegangan dan regangan 3 buah benda uji beton busa dengan semen Portland tipe I berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 3 hari, ditunjukkan pada Gambar 14. Terlihat bahwa benda uji 1 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 3,48 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0051 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0032 mm/mm, benda uji 2 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 2,58 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0065 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0024 mm/mm, benda uji 3 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 2,50 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0083 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0036 mm/mm.

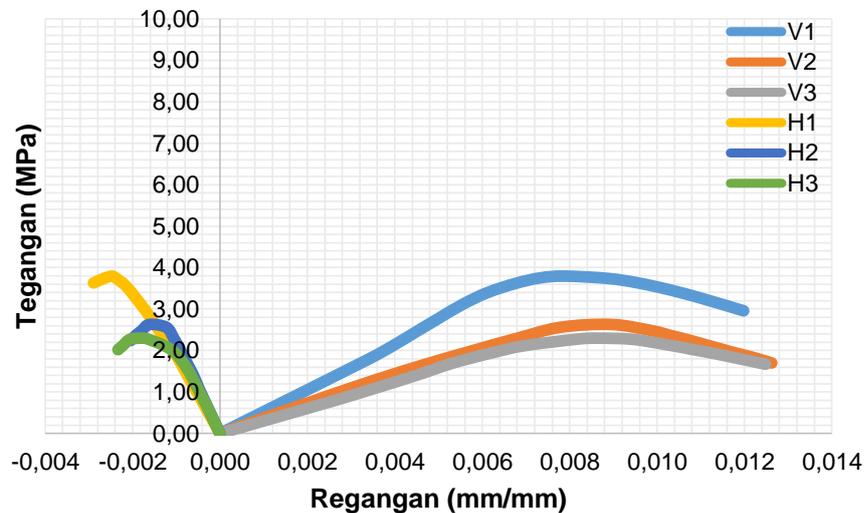


Gambar 14. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design I* berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 3 hari

Pada Gambar 14 nilai tegangan rata-rata yang diperoleh adalah 2,85 MPa dengan regangan vertikal rata-rata sebesar 0,0066 mm/mm dan regangan horizontal rata-rata sebesar 0,0031 mm/mm. Hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) dari tegangan puncak benda uji 1, 2 dan 3 yaitu berturut-turut sebesar 1,39 MPa, 1,03 MPa dan 1,00 MPa.

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 3,79 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 1,52 MPa. Benda uji 2 mempunyai tegangan puncak sebesar 2,63 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 2,30 MPa dengan regangan vertikal pada tegangan puncak sebesar 0,0086 mm/mm dan regangan horizontal pada tegangan puncak sebesar 0,0018 mm/mm, dimana nilai tegangan rata-rata yang diperoleh adalah 2,91 MPa dengan regangan vertikal rata-rata sebesar 0,0085 mm/mm dan regangan horizontal rata-rata sebesar 0,0020 mm/mm. Hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) dari tegangan puncak

benda uji 1, 2 dan 3 yaitu berturut-turut sebesar 1,52 MPa, 1,05 MPa dan 0,92 MPa.

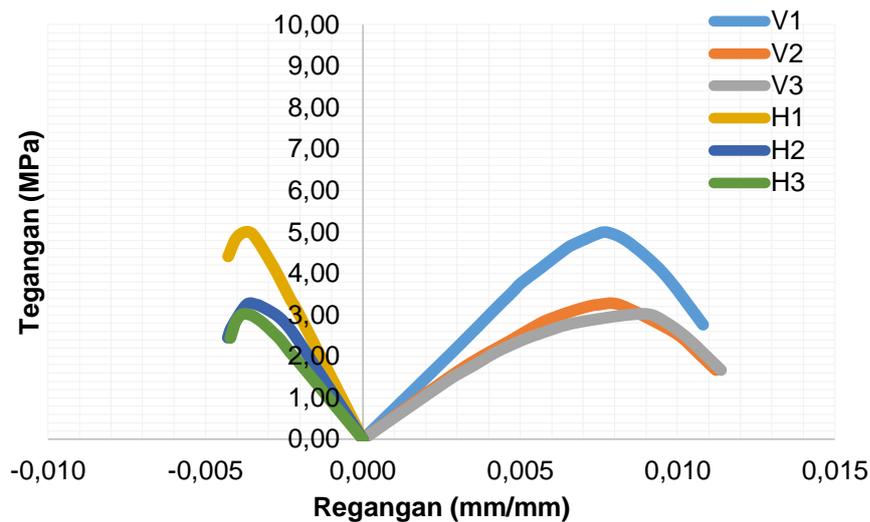


Gambar 15. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design I* berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 3 hari

- **Umur Pengujian Benda Uji 7 Hari**

Dari hasil pengujian 3 benda uji beton busa *mix design I* dengan menggunakan Semen Portland Tipe I berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 7 hari diperoleh grafik hubungan tegangan-regangan seperti pada Gambar 16. Tegangan puncak masing-masing benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut adalah 4,99 MPa, 3,25 MPa dan 3,02 MPa, dimana berkorelasi dengan regangan vertikal untuk benda uji 1, 2 dan 3 masing-masing sebesar 0,0078 mm/mm, 0,0082 mm/mm dan 0,0091 mm/mm serta regangan horizontal berturut-turut sebesar 0,0036 mm/mm, 0,0034 mm/mm dan 0,0035 mm/mm. Hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut ialah 1,99 MPa, 1,30 MPa, dan 1,21 MPa. Gambar 16

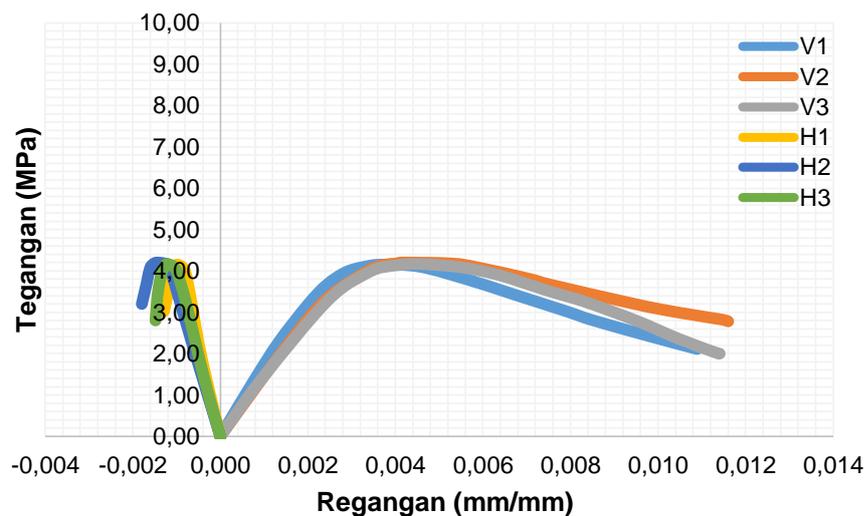
menunjukkan bahwa benda uji 1, 2 dan 3 memiliki nilai hubungan tegangan-regangan yang tidak jauh berbeda, dimana tegangan rata-rata sebesar 3,75 MPa dengan regangan vertikal rata-rata sebesar 0,0083 mm/mm dan regangan horizontal rata-rata 0,0035 mm/mm.



Gambar 16. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design I* berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 7 hari

Grafik hubungan tegangan dan regangan 3 buah benda uji beton busa dengan semen Portland tipe I berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 pada umur 7 hari, ditunjukkan pada Gambar 17 Terlihat bahwa benda uji 1 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 4,15 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0037 mm/mm dan regangan horizontal 0,00099 mm/mm, benda uji 2 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 4,20 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0041 mm/mm dan regangan horizontal 0,0014 mm/mm , benda uji 3 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 4,17 MPa dengan regangan vertikal pada

0,0045 mm/mm dan regangan horizontal 0,0012 mm/mm. Dari 3 benda uji, nilai tegangan rata-rata yang diperoleh adalah 4,17 MPa dengan regangan vertikal dan horizontal rata-rata sebesar 0,0041 mm/mm dan 0,0012 mm/mm. Hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) dari tegangan puncak benda uji 1, 2 dan 3 yaitu berturut-turut sebesar 1,66 MPa, 1,68 MPa dan 1,67 MPa. Gambar hubungan tegangan dan regangan benda uji 1, 2 dan 3 menunjukkan nilai yang hampir sama, hal ini menunjukkan bahwa 3 buah benda uji dengan semen Portland tipe I pada umur 7 hari memiliki kekuatan yang hampir sama.

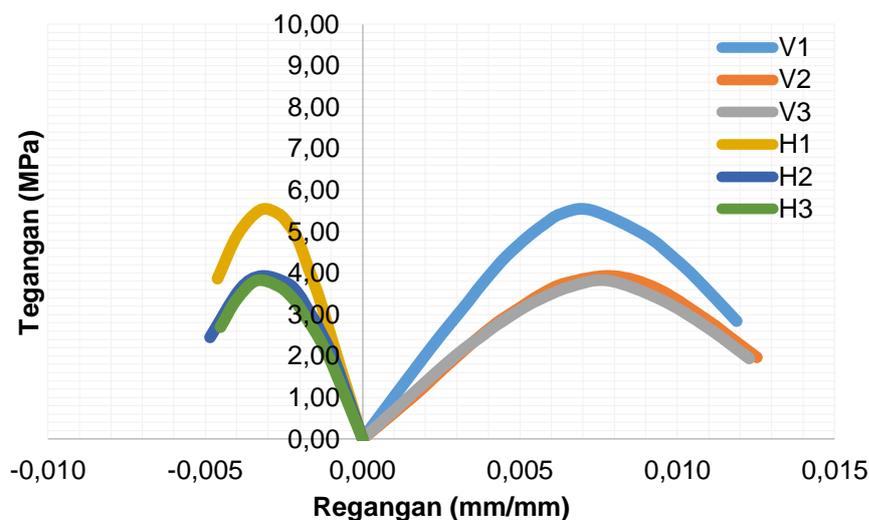


Gambar 17. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design I* berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 7 hari

- **Umur Pengujian Benda Uji 28 Hari**

Benda uji beton busa umur 28 hari berbentuk silinder 10 cm x 20 cm dari *mix design I* dengan menggunakan semen portland tipe I dapat dilihat pada Gambar 18 yang menunjukkan grafik hubungan

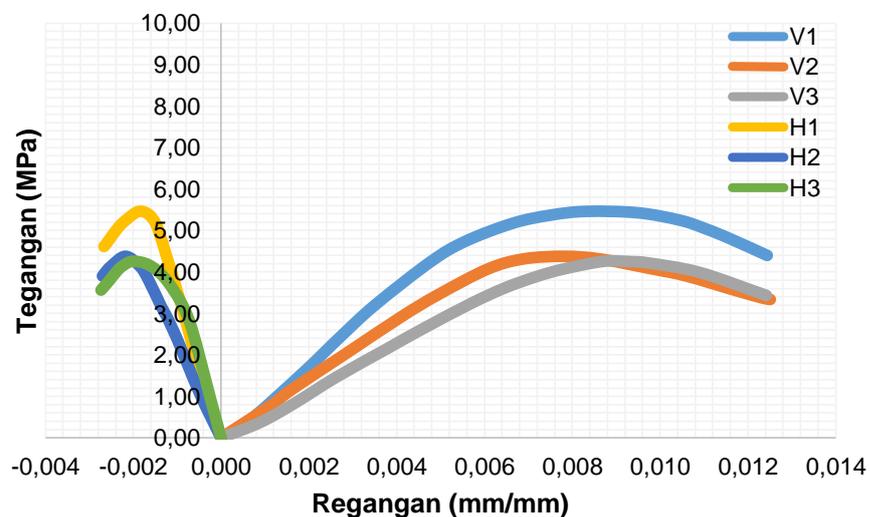
tegangan-regangan 3 benda uji tersebut. Tegangan puncak masing-masing benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut adalah 5,43 MPa, 3,93 MPa dan 3,82 MPa, dimana berkorelasi dengan regangan vertikal untuk benda uji 1, 2 dan 3 masing-masing sebesar 0,0073 mm/mm, 0,0079 mm/mm dan 0,0078 mm/mm dan regangan horizontal sebesar 0,0027 mm/mm, 0,0024 mm/mm dan 0,0026 mm/mm. Hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut ialah 2,17 MPa, 1,57 MPa, dan 1,53 MPa. Benda uji 1, 2 dan 3 memiliki nilai tegangan rata-rata sebesar 4,39 MPa sementara regangan vertikal dan horizontal rata-rata sebesar 0,0077 mm/mm dan 0,0026 mm/mm.



Gambar 18. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design I* berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 28 hari

Grafik hubungan tegangan dan regangan 3 buah benda uji beton busa dengan semen Portland tipe I berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 28 hari, ditunjukkan pada Gambar 19. Terlihat

bahwa benda uji 1 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 5,46 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0083 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0019 mm/mm, benda uji 2 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 3,75 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0078 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0022, benda uji 3 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 3,82 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0087 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0016. Dari 3 benda uji, nilai tegangan rata-rata yang diperoleh adalah 4,70 MPa dengan regangan vertikal rata-rata sebesar 0,0083 mm/mm dan regangan horizontal rata-rata sebesar 0,0019 mm/mm. Hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) dari tegangan puncak benda uji 1, 2 dan 3 yaitu berturut-turut sebesar 2,18 MPa, 1,75 MPa dan 1,70 MPa.

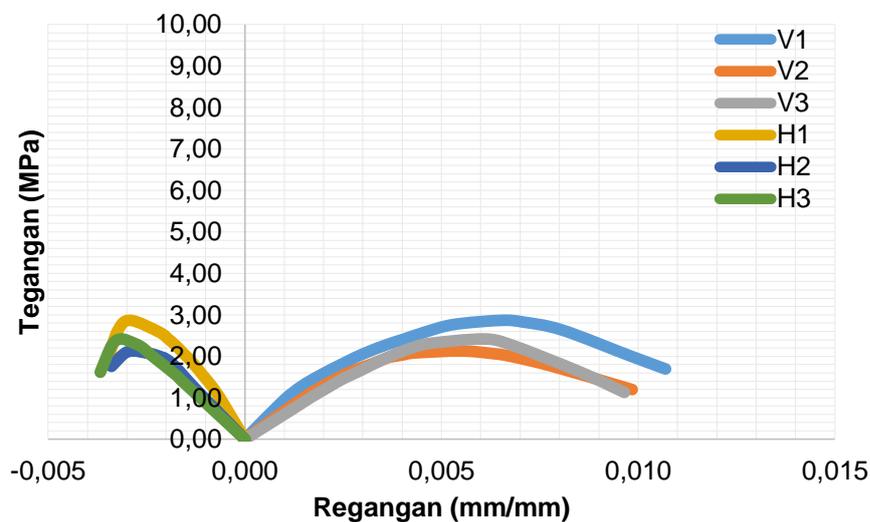


Gambar 19. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design I* berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 28 hari

F.2. Hubungan Tegangan-Regangan Beton Busa *Mix Design II*

- **Umur Pengujian Benda Uji 3 Hari**

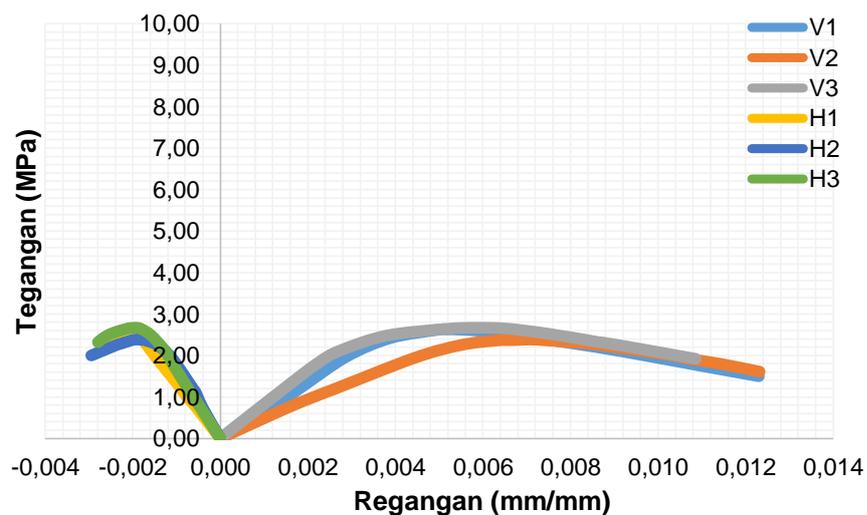
Gambar 20 memperlihatkan grafik hubungan tegangan dan regangan hasil pengujian 3 benda uji beton busa *mix design II* dengan menggunakan PCC-B berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 3 hari. Benda uji 1 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 2,87 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0065 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0029 mm/mm, sementara benda uji 2 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 2,13 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0055 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0028 mm/mm, benda uji 3 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 2,42 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0061 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0031 mm/mm.



Gambar 20. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design II* berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 3 hari

Pada Gambar 20, nilai tegangan rata-rata yang diperoleh adalah 2,47 MPa dengan regangan rata-rata sebesar 0,0060 mm/mm dan regangan horizontal rata-rata ialah 0,0030 mm/mm. Hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut ialah 1,15 MPa, 0,85 MPa, dan 0,97 MPa.

Untuk benda uji beton busa umur 3 hari berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm dari *mix design* II dengan menggunakan PCC-B dapat dilihat pada Gambar 21 yang menunjukkan grafik hubungan tegangan-regangan 3 benda uji tersebut. Tegangan puncak masing-masing benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut adalah 2,63 MPa, 2,38 MPa dan 2,67 MPa, dimana regangan vertikal untuk benda uji 1, 2 dan 3 masing-masing sebesar 0,0051 mm/mm, 0,0072 mm/mm dan 0,0058 mm/mm dengan regangan horizontal masing-masing sebesar 0,0021 mm/mm, 0,0020 mm/mm dan 0,0019 mm/mm.

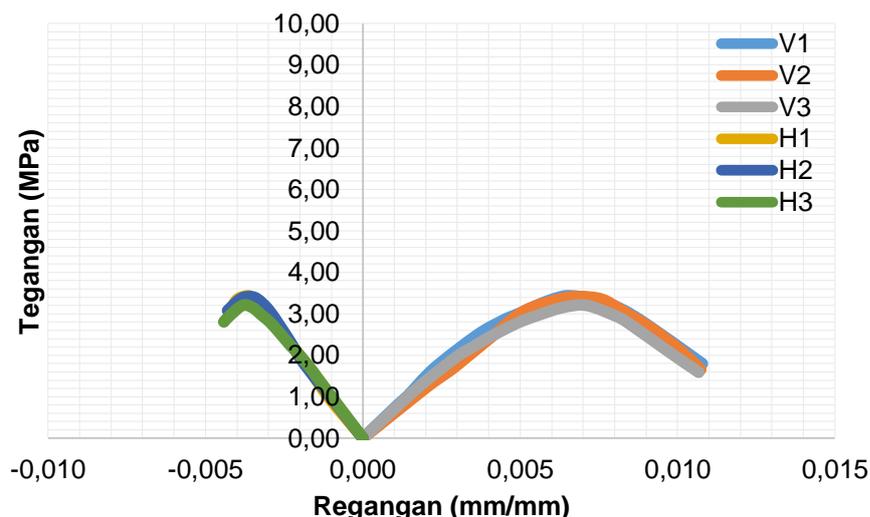


Gambar 21. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design* II berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 3 hari

Pada Gambar 21 hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut ialah 1,05 MPa, 0,95 MPa, dan 1,07 MPa dengan tegangan rata-rata sebesar 2,56 MPa sementara regangan vertikal dan horizontal rata-rata sebesar 0,006 mm/mm dan 0,0020 mm/mm.

- **Umur Pengujian Benda Uji 7 Hari**

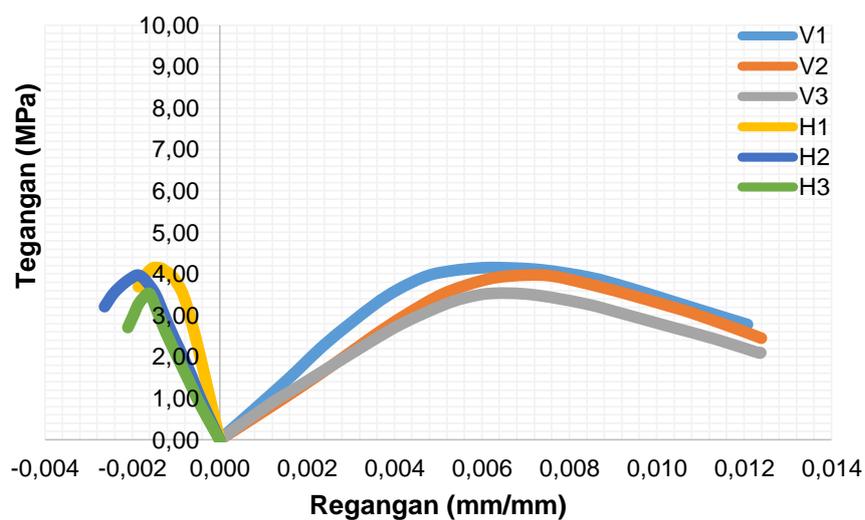
Dari hasil pengujian 3 benda uji beton busa *mix design* II dengan menggunakan PCC-B berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 7 hari diperoleh grafik hubungan tegangan-regangan seperti pada Gambar 22 Tegangan puncak masing-masing benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut adalah 3,43 MPa, 3,41 MPa dan 3,20 MPa, dimana regangan vertikal masing-masing sebesar 0,0066 mm/mm, 0,0069 mm/mm dan 0,0071 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0037 mm/mm, 0,0036 mm/mm dan 0,0038 mm/mm.



Gambar 22. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design* II berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 7 hari

Pada Gambar 22 Hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut ialah 1,37 MPa, 1,36 MPa, dan 1,28 MPa. Tegangan rata-rata yang diperoleh sebesar 3,35 MPa dengan regangan vertikal rata-rata sebesar 0,0069 mm/mm dan regangan horizontal rata-rata sebesar 0,0037 mm/mm.

Hubungan tegangan regangan benda uji beton busa umur 7 hari dengan PCC-B yang berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm dapat dilihat pada Gambar 23 yang menunjukkan nilai tegangan puncak untuk benda uji 1 ialah 4,15 MPa dengan regangan vertikal sebesar 0,0064 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0015 mm/mm, benda uji 2 ialah 3,96 MPa dengan regangan vertikal sebesar 0,0075 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0019 mm/mm, benda uji 3 ialah 3,53 MPa dengan regangan vertikal sebesar 0,0062 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0016 mm/mm.



Gambar 23. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design II* berbentuk kubus 15 x 15 cm x 15 cm pada umur 7 hari

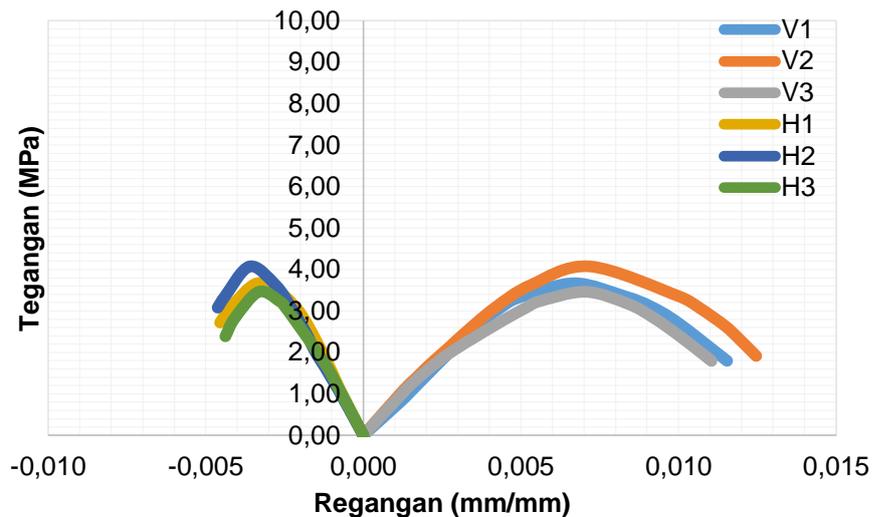
Gambar 23 menunjukkan hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut ialah 1,66 MPa, 1,58 MPa, dan 1,41 MPa. Dari 3 benda uji, nilai tegangan rata-rata yang diperoleh adalah 3,88 MPa dengan regangan vertikal rata-rata sebesar 0,0067 mm/mm dan tegangan horizontal rata-rata 0,0017 mm/mm.

- **Umur Pengujian Benda Uji 28 Hari**

Benda uji beton busa umur 28 hari berbentuk silinder 10 cm x 20 cm dari *mix design* II dengan menggunakan PCC-B dapat dilihat pada Gambar 24 yang menunjukkan grafik hubungan tegangan-regangan 3 benda uji tersebut.

Tegangan puncak masing-masing benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut adalah 3,67 MPa, 4,07 MPa dan 3,46 MPa, dimana berkorelasi dengan regangan vertikal untuk benda uji 1, 2 dan 3 masing-masing sebesar 0,0067 mm/mm, 0,0072 mm/mm, 0,0070 mm/mm dan regangan horizontal masing-masing sebesar 0,0034 mm/mm, 0,0036 mm/mm, 0,0033 mm/mm.

Hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut ialah 1,47 MPa, 1,63 MPa, dan 1,38 MPa. Tegangan rata-rata yang diperoleh yaitu sebesar 3,73 MPa sementara regangan vertikal dan horizontal rata-rata sebesar 0,0070 mm/mm dan 0,0034 mm/mm.

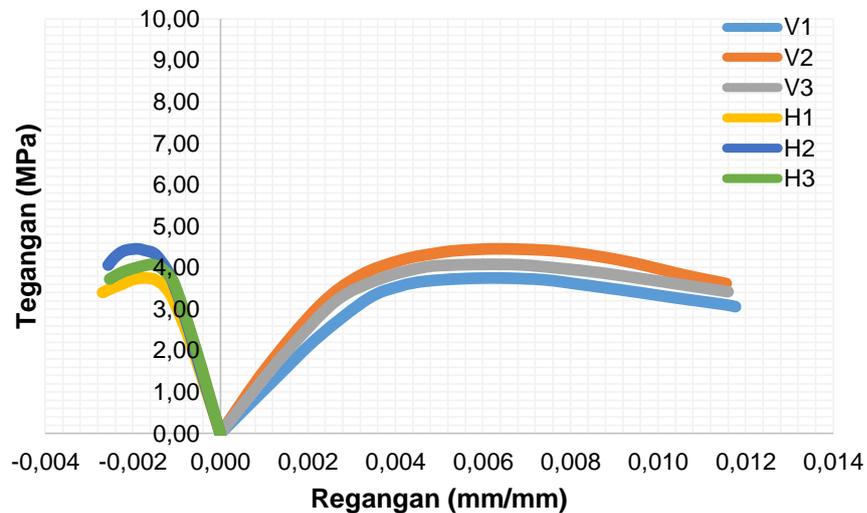


Gambar 24. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design II*

berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 28 hari

Grafik hubungan tegangan dan regangan 3 buah benda uji beton busa dengan PCC-B berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 28 hari, ditunjukkan pada Gambar 25. Terlihat bahwa benda uji 1 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 3,75 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0064 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,005 mm/mm, benda uji 2 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 4,45 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0063 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0019 mm/mm, benda uji 3 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 4,08 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0060 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0016 mm/mm. Dari 3 benda uji, nilai tegangan rata-rata yang diperoleh adalah 4,09 MPa dengan regangan rata-rata sebesar 0,0062 mm/mm dan regangan horizontal rata-rata yaitu 0,0018 mm/mm. Hubungan tegangan-regangan pada

elastis 40% (E_{40}) dari tegangan puncak benda uji 1, 2 dan 3 yaitu berturut-turut sebesar 1,50 MPa, 1,78 MPa dan 1,63 MPa.



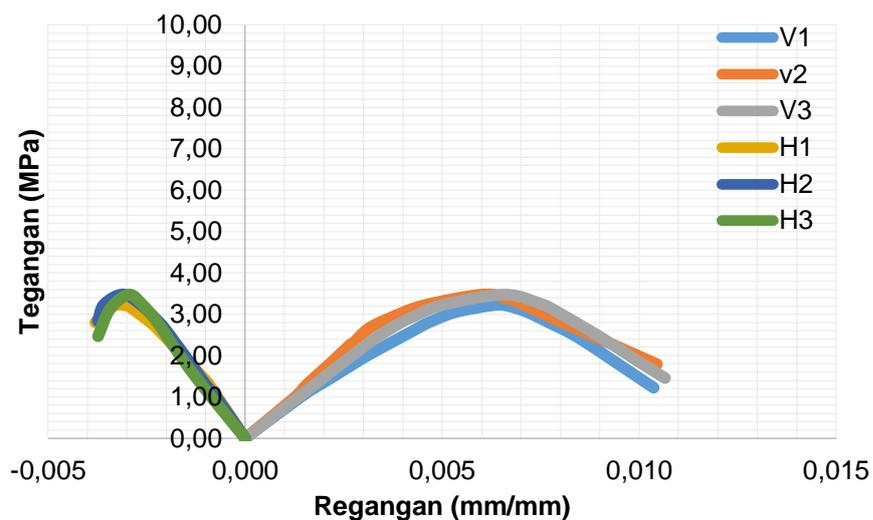
Gambar 25. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design II* berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 28 hari

F.3. Hubungan Tegangan-Regangan Beton Busa *Mix Design III*

- **Umur Pengujian Benda Uji 3 Hari**

Grafik hubungan tegangan dan regangan 3 buah benda uji beton busa dengan PCC-T berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 3 hari, ditunjukkan pada Gambar 26. Terlihat bahwa benda uji 1 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 3,22 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0066 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0033 mm/mm, benda uji 2 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 3,48 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0061 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0031 mm/mm, benda uji 3 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 3,48 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0066 mm/mm dan

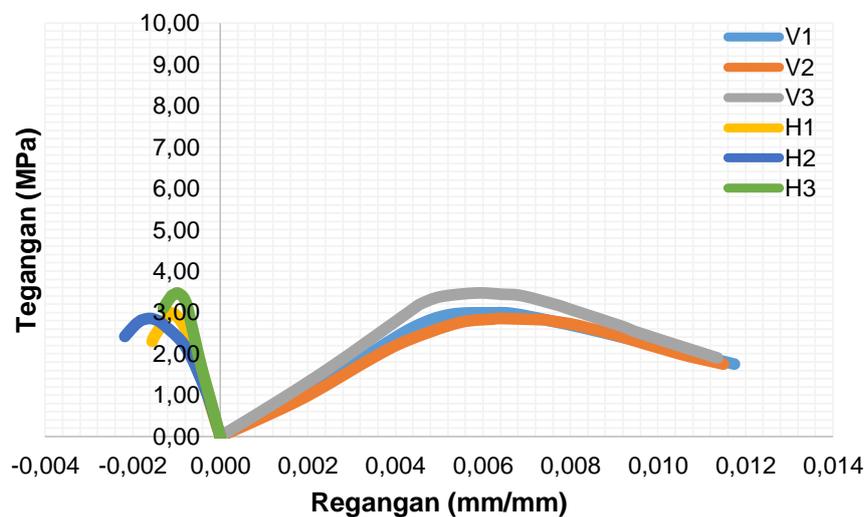
regangan horizontal pada 0,0030 mm/mm. Dari 3 benda uji, nilai tegangan rata-rata yang diperoleh adalah 3,39 MPa dengan regangan vertikal dan horizontal rata-rata sebesar 0,0064 mm/mm dan 0,0031 mm/mm. Hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) dari tegangan puncak benda uji 1, 2 dan 3 yaitu berturut-turut sebesar 1,29 MPa, 1,39 MPa dan 1,39 MPa. Hubungan tegangan dan regangan benda uji 1, 2 dan 3 menunjukkan nilai yang hampir sama, hal ini menunjukkan bahwa 3 buah benda uji pada umur 3 hari dengan semen portland komposit merk tonasa memiliki kekuatan yang hampir sama.



Gambar 26. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design* III berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 3 hari

Untuk benda uji beton busa umur 3 hari berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm dari *mix design* III dengan menggunakan PCC- T dapat dilihat pada Gambar 27 yang menunjukkan grafik hubungan tegangan-regangan 3 benda uji tersebut. Tegangan puncak masing-masing benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut adalah 2,99 MPa, 2,85 MPa

dan 3,47 MPa, dimana regangan vertikal untuk benda uji 1, 2 dan 3 adalah sebesar 0,0062 mm/mm, 0,0064 mm/mm, 0,0058 mm/mm dan regangan horizontal sebesar 0,0011 mm/mm, 0,0017 mm/mm, 0,00097 mm/mm. Hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut ialah 1,20 MPa, 1, MPa, dan 1,39 MPa. Benda uji 1, 2 dan 3 memiliki nilai tegangan rata-rata sebesar 3,10 MPa sementara regangan vertikal dan horizontal rata-rata sebesar 0,0062 mm/mm dan 0,0013 mm/mm.



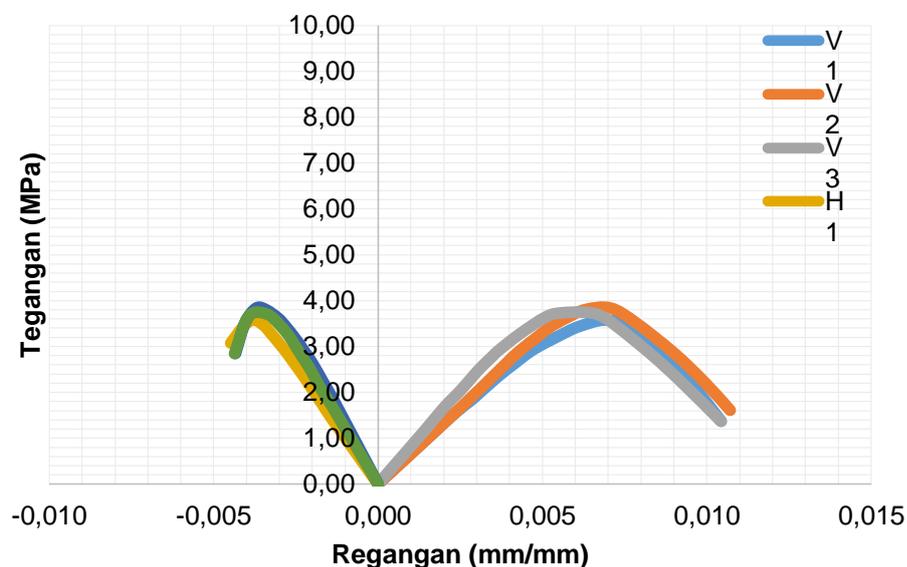
Gambar 27. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design* III berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 3 hari

- **Umur Pengujian Benda Uji 7 Hari**

Gambar 28 memperlihatkan grafik hubungan tegangan dan regangan hasil pengujian 3 benda uji beton busa *mix design* III dengan menggunakan PCC-T berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 3 hari.

Benda uji 1 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 3,57 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0069 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0038 mm/mm, sementara benda uji 2 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 3,84 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0071 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0037 mm/mm, benda uji 3 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 3,73 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0065 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0038 mm/mm.

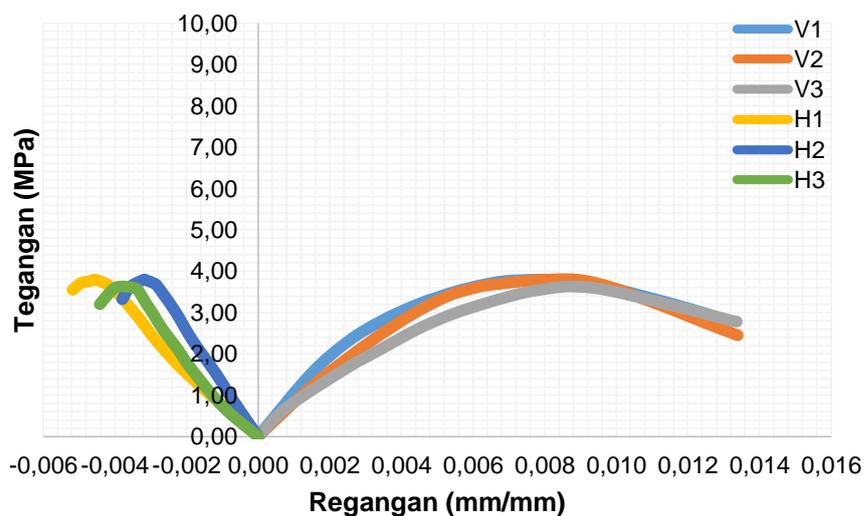
Dari 3 benda uji, nilai tegangan rata-rata yang diperoleh adalah 3,72 MPa dengan regangan rata-rata sebesar 0,0068 mm/mm dan regangan horizontal rata-rata sebesar 0,0037 mm/mm. Hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut ialah 1,43 MPa, 1,54 MPa, dan 1,49 MPa.



Gambar 28. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design* III berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 7 hari

Hubungan tegangan regangan benda uji beton busa umur 7 hari dengan PCC-T yang berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm dapat dilihat pada Gambar 29 yang menunjukkan nilai tegangan puncak untuk benda uji 1 ialah 3,79 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0079 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0046 mm/mm, benda uji 2 ialah 3,80 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0089 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0032 mm/mm, benda uji 3 ialah 3,63 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0088 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0039 mm/mm.

Hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut ialah 1,52 MPa, 1,52 MPa, dan 1,45 MPa. Dari 3 benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm, nilai tegangan rata-rata yang diperoleh adalah 3,74 MPa dengan regangan vertikal dan horizontal rata-rata sebesar 0,0085 mm/mm dan 0,0039 mm/mm.



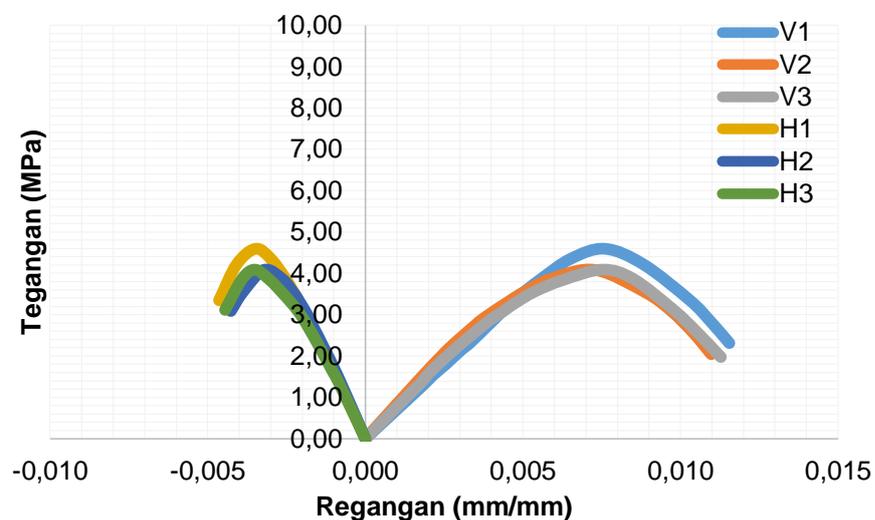
Gambar 29. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design* III

berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 7 hari

- **Umur Pengujian Benda Uji 28 Hari**

Benda uji beton busa umur 28 hari berbentuk silinder 10 cm x 20 cm dari *mix design* III dengan menggunakan PCC-T dapat dilihat pada Gambar 30 yang menunjukkan grafik hubungan tegangan-regangan 3 benda uji tersebut.

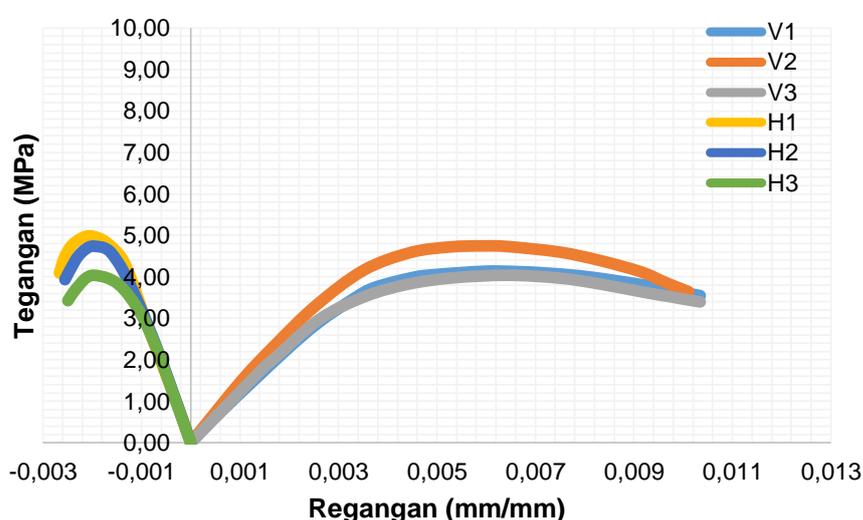
Tegangan puncak masing-masing benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut adalah 4,59 MPa, 4,08 MPa dan 4,09 MPa, dimana berkorelasi dengan regangan vertikal untuk benda uji 1, 2 dan 3 masing-masing sebesar 0,0076 mm/mm, 0,0073 mm/mm, 0,0075 mm/mm dan regangan horizontal masing-masing sebesar 0,0035 mm/mm, 0,0032 mm/mm dan 0,0035 mm/mm. Hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) benda uji 1, 2 dan 3 berturut-turut ialah 1,84 MPa, 1,63 MPa, dan 1,64 MPa.



Gambar 30. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design* III berbentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 28 hari

Gambar 30 menunjukkan bahwa benda uji 1, 2 dan 3 memiliki nilai hubungan tegangan-regangan yang tidak jauh berbeda, dengan tegangan rata-rata sebesar 4,25 MPa sementara regangan vertikal rata-rata sebesar 0,0075 mm/mm dan regangan horizontal rata-rata sebesar 0,0034 mm/mm.

Grafik hubungan tegangan dan regangan 3 buah benda uji beton busa dengan PCC-T berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 28 hari, ditunjukkan pada Gambar 31.



Gambar 31. Grafik hubungan tegangan-regangan benda uji *mix design* III berbentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 28 hari

Pada Gambar 31 terlihat bahwa benda uji 1 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 4,13 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0060 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0021 mm/mm, benda uji 2 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 4,75 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0060 mm/mm dan regangan horizontal pada

0,0020 mm/mm, benda uji 3 memiliki nilai tegangan maksimum yaitu 4,04 MPa dengan regangan vertikal pada 0,0064 mm/mm dan regangan horizontal pada 0,0017 mm/mm.

Dari 3 benda uji, nilai tegangan rata-rata yang diperoleh adalah 4,59 MPa dengan regangan rata-rata sebesar 0,0061 mm/mm dan regangan horizontal rata-rata yaitu 0,0020 mm/mm. Hubungan tegangan-regangan pada elastis 40% (E_{40}) dari tegangan puncak benda uji 1, 2 dan 3 yaitu berturut-turut sebesar 1,65 MPa, 1,90 MPa dan 1,62 MPa.

G. Rekapitulasi Tegangan-Regangan Beton Busa

G.1. Benda Uji Berbentuk Silinder 10 cm x 20 cm

Tabel 30 menunjukkan rekapitulasi tegangan dan regangan rata-rata *mix design* I, II dan III untuk benda uji silinder 10 cm x 20 cm

Tabel 30. Rekapitulasi Nilai Tegangan-Regangan Rata-Rata Benda Uji Silinder 10 cm x 20 cm

Jenis Semen	Durasi <i>Curing</i> (Hari)	Tegangan (MPa)	Regangan (mm/mm)	
			Vertikal	Horizontal
OPC Tipe I	3	2,85	0,0066	0,0031
	7	3,75	0,0083	0,0035
	28	3,02	0,0077	0,0026
PCC-B	3	2,47	0,006	0,0030
	7	3,35	0,0069	0,0037
	28	3,73	0,0070	0,0034
PCC-T	3	3,39	0,0064	0,0031
	7	3,72	0,0068	0,0037
	28	4,25	0,0075	0,0034

G.2. Benda Uji Berbentuk Kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm

Tabel 31 menunjukkan rekapitulasi tegangan dan regangan rata-rata *mix design* I, II dan III untuk benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm. Regangan vertikal yang diperoleh berkisar antara 0,0041 mm/mm hingga 0,0085 mm/mm dan regangan horizontal berkisar antar 0,0012 mm/mm hingga 0,0039 mm/mm.

Tabel 31. Rekapitulasi Nilai Tegangan-Regangan Rata-Rata Benda Uji Kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm

Jenis Semen	Durasi <i>Curing</i> (Hari)	Tegangan (MPa)	Regangan (mm/mm)	
			Vertikal	Horizontal
OPC Tipe I	3	2,91	0,0085	0,0020
	7	4,17	0,0041	0,0012
	28	4,70	0,0083	0,0016
PCC Bosowa	3	2,56	0,0061	0,0020
	7	3,88	0,0067	0,0017
	28	4,09	0,0062	0,0018
PCC Tonasa	3	3,10	0,0062	0,0013
	7	3,74	0,0085	0,0039
	28	4,31	0,0061	0,0020

H. Nilai Poisson Ratio Beton Busa

Tabel 32 menunjukkan nilai modulus elastisitas dan Poisson Ratio dari masing-masing variasi campuran beton busa bentuk silinder 10 cm x 20 cm pada umur 28 hari. Dari tabel 32 disimpulkan bahwa poisson ratio yang diperoleh sampel dengan berbagai variasi berkisar antara 0,306 – 0,367.

Tabel 32. Nilai Poisson Ratio Beton Busa

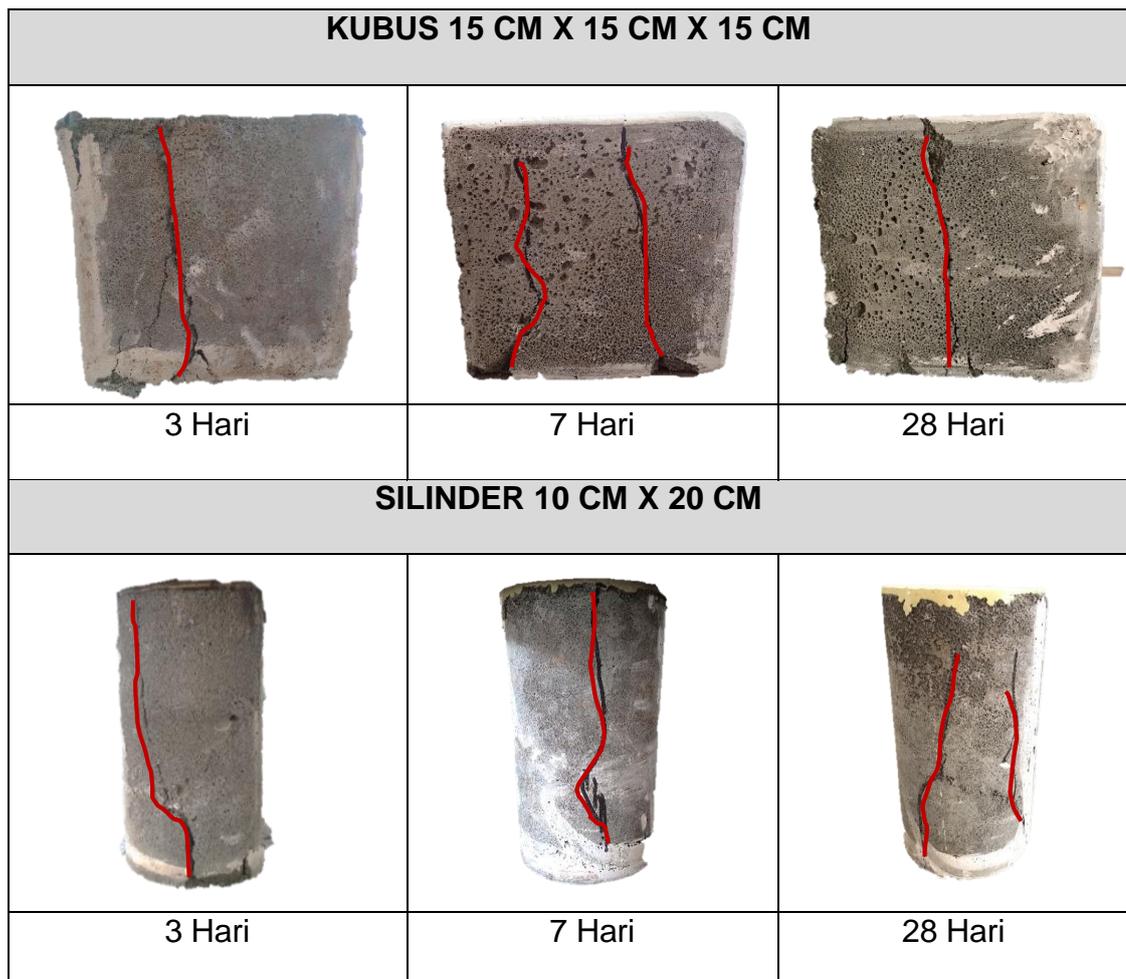
Jenis Beton Busa	Sampel	σ (Poisson ratio)
OPC Tipe I	1	0,322
	2	0,306
	3	0,367
	Rata-rata	0,332
PCC-B	1	0,334
	2	0,320
	3	0,336
	Rata-rata	0,330
PCC-T	1	0,316
	2	0,328
	3	0,353
	Rata-rata	0,332

I. Pola Retak

Gambar 32 menunjukkan pola kehancuran benda uji hasil dari *mix design* I dengan menggunakan semen portland tipe I pada umur 3 hari, 7 hari, dan 28 hari.

Pada benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm mengalami pola retak dengan bentuk kehancuran yang sejajar dengan arah beban atau disebut juga sebagai pola retak kolumnar.

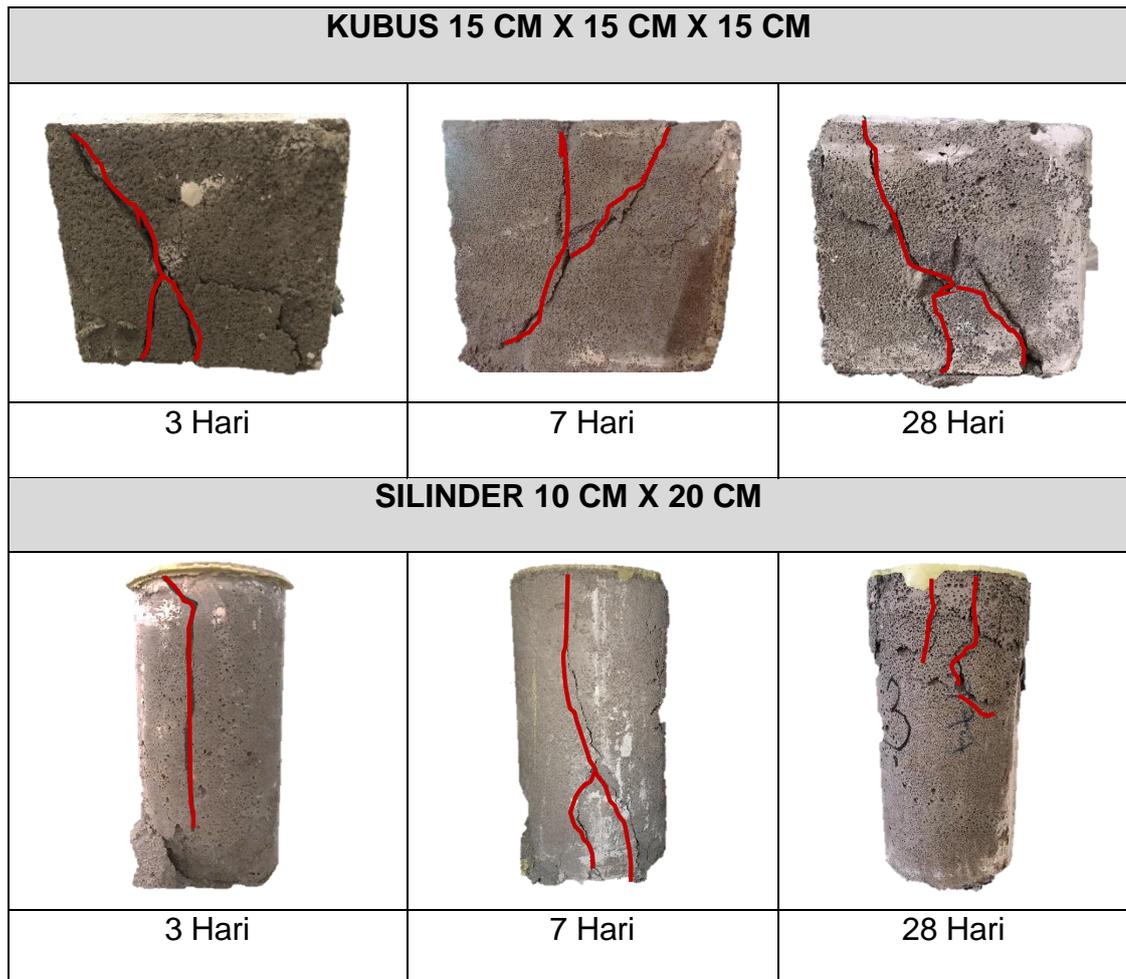
Pada benda uji silinder 10 cm x 20 cm juga terjadi pola kehancuran yang searah dengan arah beban (kolumnar).



Gambar 32. Pola Retak Benda Uji *Mix Design I*

Gambar 33 menunjukkan pola kehancuran benda uji hasil dari *mix design II* dengan menggunakan PCC-B pada umur 3 hari, 7 hari, dan 28 hari. Pada benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm terjadi pola retak dengan bentuk kehancuran kerucut.

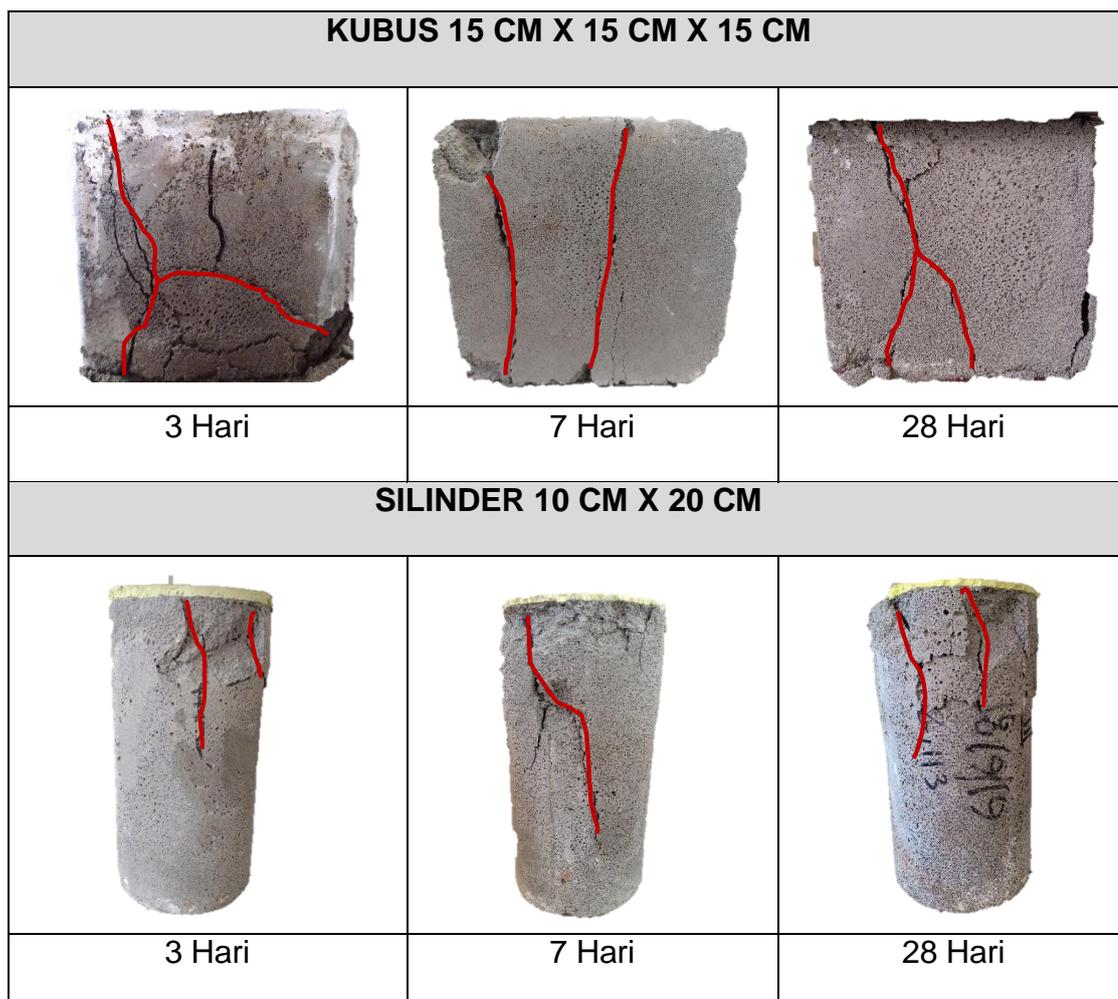
Pada benda uji silinder 10 cm x 20 cm pada umur 3 hari dan 28 hari ditemui pola retak dengan bentuk kehancuran yang sejajar dengan arah beban atau pola retak kolumnar.



Gambar 33. Pola Retak Benda Uji *Mix Design II*

Gambar 34 menunjukkan pola kehancuran benda uji hasil dari *mix design III* dengan menggunakan PCC-T pada umur 3 hari, 7 hari, dan 28 hari. Pada benda uji kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm pada umur 3 hari dan 28 hari terjadi pola retak dengan bentuk kehancuran kerucut.

Pada benda uji silinder 10 cm x 20 cm pada umur 3 hari dan 28 hari ditemui pola retak dengan bentuk kehancuran yang sejajar dengan arah beban atau pola retak kolumnar.



Gambar 34. Pola Retak Benda Uji *Mix Design III*

Benda uji dengan semen portland tipe I memiliki variasi pola retak yang hampir sama yaitu pola retak kolumnar atau searah dengan beban. Benda uji dengan menggunakan semen portland komposit memiliki 2 jenis variasi pola retak yaitu pola retak searah dengan beban dan pola retak dengan kehancuran kerucut sehingga pada beberapa benda uji terjadi *spalling*. Pada penelitian ini diamati bahwa seiring dengan penambahan umur *curing* perubahan lebar dan panjang pola retak yang terjadi tidak signifikan dan relatif sama antara masing-masing benda uji.

BAB 4. PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, maka diperoleh beberapa kesimpulan yaitu :

1. Penggunaan semen portland komposit berpengaruh terhadap kuat tekan beton busa, dimana hasil pengujian kuat tekan memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan beton busa yang menggunakan semen portland tipe I.
2. Pemilihan jenis semen portland komposit juga berpengaruh terhadap kuat tekan yang dihasilkan, dimana beton busa dengan PCC-B memiliki kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan beton busa dengan PCC-T.
3. Seluruh benda uji memperlihatkan hubungan tegangan regangan material yang getas dan tegangan regangan yang membentuk elastisitas dipengaruhi oleh kuat tekan

B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka diajukan beberapa saran sebagai bahan pertimbangan, yaitu :

1. Dalam pembuatan busa disarankan menggunakan jenis semen portland tipe I (OPC) dibanding menggunakan semen portland komposit agar didapatkan kuat tekan yang lebih tinggi.

2. Beton busa dengan semen portland komposit dapat digunakan sebagai bata beton untuk pasangan dinding kelas III untuk tingkat mutu bata beton pejal sebesar 40 kg/cm^2 dan kelas III untuk tingkat mutu bata beton berlubang sebesar 35 kg/cm^2 berdasarkan SNI 03-0349-1989.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai kuat tekan beton busa dengan umur *curing* yang lebih panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Alhaz, Md. Uddin, dkk. 2012. *Experimental Study on Strength Gaining Characteristics of Concrete using Portland Composite Cement*. KSCE Journal Materials of Civil Engineering (2013) 17(4):789-796.
- 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 Agregat 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 Agregat 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 Standardisasi Nasional.

- Badan Standardisasi Nasional. 2013. Standar Nasional Indonesia (SNI) 2847:2013 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung. Jakarta : Dewan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. 2016. Standar Nasional Indonesia (SNI) 1973:2016 Metode Uji Densitas, Volume Produksi Campuran dan Kadar Udara (Gravimetrik) Beton. Jakarta : Dewan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional.2002.Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2847-2002 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung.Jakarta : Dewan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional.2002.Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2834-2002 Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton.Jakarta:Dewan Standardisasi Nasional.
- Erwin, Rommel, dkk. 2018. *The Use Of Grinded Andesite-Sand And Foamingagent To Improve The Porosity Of Foam-Concrete*. MATEC Web of Conferences 195, 01018 (2018).
- Gelim, K.A. 2011. *Mechanical And Physical Properties Of Fly Ash Foamed Concrete*. Malaysia. Faculty of Civil and Environmental Engineering University Tun Hussein Onn Malaysia (UTHM).
- Kuzielova E. dkk. 2016. *Effect of Activated Foaming Agent on the foam concrete properties*. Construction and Building Materials 125 (2016) 998-1004.

- Lermen, Richard T., dkk. 2019. *Effect of Additives, Cement Type, and Foam Amount on the Properties of Foamed Concrete Developed with Civil Construction Waste*. K Appl. Sci. 2019, 9, 2998; doi:10.3390/app9152998.
- Malau, F.B, dkk. 2014. *Research Strength Pressure And Weight Of Mortar Type For Panel Walls By Comparing The Use Of Bangka Sand And Baturaja Sand With Additional Foaming Agent And Silica Fume*. Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan Vol. 2, No. 2, Juni 2014.
- Nambiar E.K, dkk. 2009. *Shrinkage Behavior of Foam Concrete*. Journal Of Materials In Civil Engineering. Asce November 2009 631.
- Nawy Edward.G. 2010. *Beton Bertulang-Suatu Pendekatan Dasar*, Cetakan Keempat. Bandung. Refika Aditama.
- Neville, A.M., dan J.J. Brooks, 1987. *Concrete Technology*, Penerbit Longman Scientific and Technical, New York.
- Prawito, E., (2010), *Analisis Perbandingan Berat Jenis Dan Kuat Tekan Antara Beton Ringan Dan Beton Normal Dengan Mutu Beton 200*, Skripsi, Fakultas Teknik, USU, Medan.
- Sandy, J.P. 2013. *Analysis Of Use Of Various Brands Of Portland Cement Type I For Making 20 Mpa Concrete By Using Aggregate From Binjai*. Faculty of Civil and Environmental Engineering University Tun Hussein Onn Malaysia (UTHM).
- Timoshenko & Gere. *Mekanika Bahan*. Edisi ke-4, Erlangga. 1997.

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