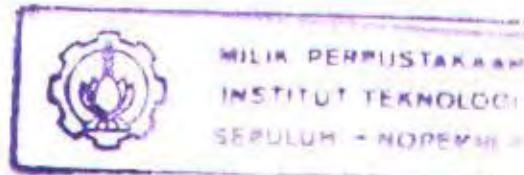


20.191/H/04

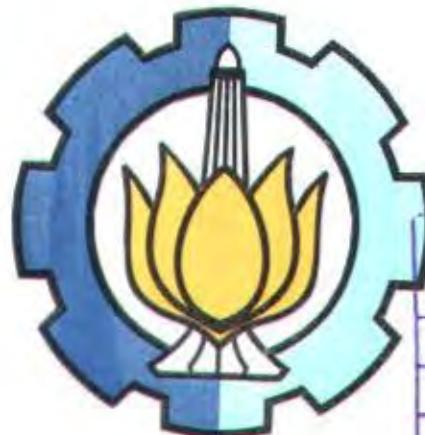


TUGAS AKHIR

OPTIMASI GRADASI COPPER SLAG SEBAGAI AGREGAT HALUS UNTUK MENDAPATKAN BETON MUTU TINGGI

Oleh :
DIAH SARASANTY
NRP. 3101 109 609

RSS
691.3
Sar
0 - 1
2004



| PERPUSTAKAAN ITS | |
|---------------------|-----------|
| Tgl. Terima | 26-3-2004 |
| Terima Dari | 41 |
| No. Agenda Prp. | 220140 |

PROGRAM SARJANA (S-1) EKSTENSI LINTAS JALUR
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2004

TUGAS AKHIR

OPTIMASI GRADASI COPPER SLAG SEBAGAI AGREGAT HALUS UNTUK MENDAPATKAN BETON MUTU TINGGI

SURABAYA, MEI 2004
MENGETAHUI / MENYETUJUI



**PROGRAM SARJANA (S-1) EKSTENSI LINTAS JALUR
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2004**

ABSTRAK

OPTIMASI GRADASI COPPER SLAG SEBAGAI AGREGAT HALUS UNTUK MENDAPATKAN BETON MUTU TINGGI

Dosen Pembimbing :
DR. Ir. Triwulan

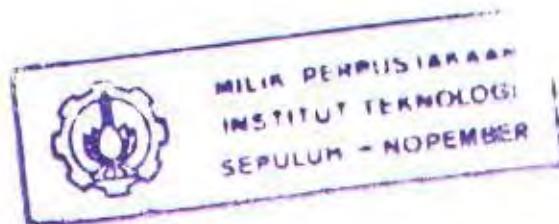
Disusun oleh :
Diah Sarasanty
3101 109 609

Penelitian ini dimaksudkan untuk memanfaatkan kembali limbah industri peleburan tembaga agar tidak mengotori lingkungan dan bahkan bisa bernilai komersial. Fokusnya adalah optimasi gradasi copper slag sebagai bahan pengganti agregat halus untuk mendapatkan beton mutu tinggi.

Penelitian copper slag sebagai material substitusi agregat halus telah dilakukan oleh Hwang dan Laiw. (1989), yang menyimpulkan bahwa pemakaian copper slag dapat mengantikan fine aggregate sebanyak 60 % dengan kenaikan kuat tekan $\pm 20\%$ (Proceedings, Third International Conference, Trondheim, Norway, (1989)). Sedangkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Aulia, Kandar, Triwulan, dan Mudji, (1999) , adalah optimum pada penggantian fine aggregate sebesar 40 % dengan kenaikan kuat tekan $\pm 10\%$. Pada penelitian ini kami mencoba mengaplikasikan copper slag sebagai material pengganti agregat halus dengan prosentase 40 % yang mengoptimasikan pada gradasi copper slag untuk mendapatkan beton mutu tinggi. Kombinasi yang dibuat yaitu kombinasi 1, 2, 3, 4, dan 5 dengan batas daerah gradasi menurut standard ASTM C 33 – 93 dan Zone 2 BS 882 : 1965.

Pada penelitian ini, pertama-tama dilakukan persiapan material, pengujian material, dan pengujian beton. Adapun pengetesan beton yang dilakukan adalah tes beton segar yang meliputi temperatur hidrasi, setting time, dan tes beton keras yang meliputi kuat tekan, porositas beton, serta ultrasonic. Selain kadar copper slag, variable lainnya yaitu faktor air semen tetap dan lima umur pengujian. Dari penelitian tersebut didapatkan pada kombinasi 2 gradasi copper slag – pasir yang mampu meningkatkan kuat tekan beton dibandingkan variasi yang lain. Selain itu campuran beton dengan kombinasi 2 mampu mengurangi porositas yang terjadi pada beton, mempercepat waktu setting time, meningkatkan temperatur hidrasi, serta meningkatkan kecepatan getaran yang berarti pula meningkatkan kuat tekan beton.

Kata kunci : agregat, beton, copper slag, kuat tekan, panas/temperatur hidrasi, porositas, setting time, ultrasonic.



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT karena atas rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi dalam menyelesaikan jenjang pendidikan Strata – 1, Jurusan Teknik Sipil – Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam penulisan Tugas Akhir penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT berkat ridho-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Ibu DR. Ir. Triwulan, selaku Dosen Pembimbing atas segala bimbingan, saran, dan dorongan yang telah diberikan.
3. Bapak Ir. Abdullah Hidayat S.A., selaku Dosen Wali.
4. Bapak Ir. Indra Surya B. M, MSc.,PhD , selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil ITS.
5. Bapak M.T. Munifson, ST, yang telah memberikan kesempatan dan pengarahan saat praktikum di Laboratorium PT. Varia Usaha Beton Sidoarjo.
6. Segenap karyawan Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan PT. Varia Usaha Beton Sidoarjo yang telah banyak membantu dalam pengetesan benda uji dan lain-lain.
7. Segenap karyawan Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Jurusan Teknik Sipil, FTSP - ITS yang telah banyak membantu dalam pengetesan benda uji dan lain-lain.
8. Ayah, Ibu, dan saudara-saudaraku yang telah membantu baik material maupun spiritual hingga selesaiya Tugas Akhir ini.
9. Rekan-rekan mahasiswa, terima kasih atas semua dukungan dan bantuannya.

Penulis menyadari masih banyak terdapat kekurangan dalam Tugas Akhir ini, untuk itu demi kesempurnaan Tugas Akhir ini penulis sangat mengharapkan saran dan kritik yang sifatnya membangun. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan bagi penulis pada khususnya.

Surabaya, April 2004

Penulis

DAFTAR ISI

Hal

HALAMAN JUDUL

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK

| | |
|--|-------|
| KATA PENGANTAR | i |
| DAFTAR ISI | iii |
| DAFTAR TABEL | ix |
| DAFTAR GAMBAR/GRAFIK | xi |
| DAFTAR BAGAN | xiii |
| BAB I PENDAHULUAN | I-1 |
| 1.1. Latar Belakang | I-1 |
| 1.2. Perumusan Masalah | I-3 |
| 1.3. Maksud Dan Tujuan | I-3 |
| 1.4. Ruang Lingkup Penelitian | I-4 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | II-1 |
| 2.1. Beton Mutu Tinggi | II-1 |
| 2.1.1. Pendahuluan | II-1 |
| 2.1.2. Definisi Beton Mutu Tinggi | II-1 |
| 2.1.3. Konsep Desain Beton Mutu Tinggi | II-3 |
| 2.2. Semen Portland | II-4 |
| 2.2.1. Definisi Semen Portland | II-4 |
| 2.2.2. Bahan Dasar Dan Komposisi Senyawa Kimia Semen Portland | II-5 |
| 2.2.3. Sifat-sifat Semen Portland | II-9 |
| 2.2.4. Proses Hidrasi Semen Portland | II-11 |
| 2.2.5. Panas Hidrasi | II-14 |
| 2.2.6. Setting Dan Hardening | II-15 |
| 2.2.6.1. Mekanisme Setting Dan Hardening | II-15 |
| 2.2.6.2. Setting | II-16 |
| 2.2.7. Tipe Semen Portland | II-18 |

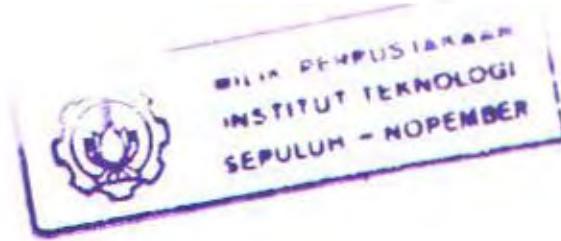
| | |
|--|--------------|
| 2.3. Agregat | II-19 |
| 2.3.1. Pendahuluan | II-19 |
| 2.3.2. Pengelompokkan Jenis Agregat Beton | II-20 |
| 2.3.3. Sifat-sifat Agregat | II-22 |
| 2.3.3.1. Bentuk Butir Dan Keadaan Permukaan | II-22 |
| 2.3.3.2. Kekuatan Agregat | II-23 |
| 2.3.3.3. Berat Jenis Dan Berat Isi Agregat | II-24 |
| 2.3.3.4. Porositas Dan Daya Serap Air..... | II-24 |
| 2.3.3.5. Sifat Kekal Agregat | II-26 |
| 2.3.3.6. Reaksi Alkali Agregat..... | II-26 |
| 2.3.3.7. Sifat-sifat Thermal Agregat..... | II-27 |
| 2.3.4. Susunan Butir Agregat | II-28 |
| 2.3.5. Gradası Agregat Kasar Dan Halus | II-37 |
| 2.3.6. Angka Kehalusinan (Fineness Modulus) | II-40 |
| 2.4. Air | II-41 |
| 2.5. Copper Slag | II-44 |
| 2.5.1. Pendahuluan | II-44 |
| 2.5.2. Proses Copper Slag | II-46 |
| 2.5.3. Sifat Copper Slag | II-48 |
| 2.5.3.1. Sifat Kimia Copper Slag | II-48 |
| 2.5.3.2. Sifat Fisika Copper Slag | II-48 |
| 2.5.4. Copper Slag Sebagai Campuran Beton | II-49 |
| 2.5.4.1. Sifat Fisika | II-49 |
| 2.5.4.2. Sifat Kimia | II-49 |
| 2.6. Curing (Perawatan) Beton | II-55 |
| 2.6.1. Definisi Curing | II-55 |
| 2.6.2. Pengaruh Curing Pada Kuat Tekan Beton | II-55 |
| 2.6.3. Curing Perendaman | II-59 |
| 2.7. Kecepatan Gelombang Ultrasonic | II-59 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | III-1 |
| 3.1. Alur, Item, Dan Standard Penelitian | III-1 |
| 3.2. Benda Uji | III-5 |

| | |
|---|--------|
| 3.3. Persiapan Material | III-7 |
| 3.3.1. Semen Portland | III-7 |
| 3.3.2. Agregat | III-7 |
| 3.3.2.1. Agregat Halus | III-7 |
| 3.3.2.1.1. Analisa Ayakan | III-7 |
| 3.3.2.1.2. Analisa Terhadap Bahan Organik | III-8 |
| 3.3.2.1.3. Analisa Soundness | III-9 |
| 3.3.2.1.4. Analisa Berat Jenis | III-10 |
| 3.3.2.1.5. Analisa Air Resapan | III-11 |
| 3.3.2.1.6. Analisa Kadar Lumpur Cara Basah..... | III-12 |
| 3.3.2.1.7. Analisa Berat Volume..... | III-12 |
| 3.3.2.2. Agregat Kasar | III-13 |
| 3.3.2.2.1. Analisa Ayakan | III-13 |
| 3.3.2.2.2. Analisa Berat Jenis | III-14 |
| 3.3.2.2.3. Analisa Air Resapan | III-15 |
| 3.3.2.2.4. Analisa Keausan..... | III-16 |
| 3.4. Air | III-18 |
| 3.5. Trial Mix Desain | III-18 |
| 3.5.1. Pengamatan Pemakaian Copper Slag | III-18 |
| 3.5.2. Variasi Copper Slag | III-18 |
| 3.5.3. Trial Variasi Campuran | III-19 |
| 3.6. Mix Desain Beton | III-19 |
| 3.6.1. Metode Mix Desain | III-19 |
| 3.6.2. Perhitungan Mix Desain | III-20 |
| 3.6.2.1. Kekuatan Beton Rata-rata | III-20 |
| 3.6.2.2. Penentuan Nilai Slump | III-21 |
| 3.6.2.3. Penentuan Agregat Maksimum | III-22 |
| 3.6.2.4. Penentuan Ratio W/C (FAS) | III-22 |
| 3.6.2.5. Penentuan Kadar Semen Dalam Mix Desain | III-24 |
| 3.6.2.6. Penentuan Kadar Air Bebas..... | III-25 |

| | |
|---|---------------|
| 3.6.2.7. Penentuan Proporsi Agregat Halus Dan Agregat Kasar | III-25 |
| 3.6.2.8. Penentuan Kepadatan Beton..... | III-26 |
| 3.6.2.9. Perhitungan Kadar Agregat Total..... | III-27 |
| 3.6.2.10. Penentuan Kadar Agregat Halus | III-28 |
| 3.6.2.11. Penentuan Kadar Agregat Kasar | III-28 |
| 3.6.2.12. Kesimpulan Hasil Perhitungan Mix Desain | III-29 |
| 3.7. Penelitian Beton..... | III-30 |
| 3.7.1. Pembuatan Campuran Beton..... | III-31 |
| 3.7.2. Pengukuran Slump | III-31 |
| 3.7.3. Pembuatan Benda Uji | III-32 |
| 3.7.4. Perawatan Beton | III-33 |
| 3.7.5. Pengujian Setting Time..... | III-34 |
| 3.7.6. Pengujian Temperatur Hidrasi | III-35 |
| 3.7.7. Pengujian Kuat Tekan Beton..... | III-35 |
| 3.7.7.1. Capping Silinder Benda Uji | III-35 |
| 3.7.7.2. Pengujian Kuat Tekan Beton | III-36 |
| 3.7.8. Pengujian Air Void Beton (Prosentase Rongga Yang Terisi Air)..... | III-37 |
| 3.7.9. Pengujian Ultrasonic..... | III-38 |
| BAB IV ANALISA HASIL..... | IV-1 |
| 4.1. Analisa Material..... | IV-1 |
| 4.1.1. Pendahuluan | IV-1 |
| 4.1.2. Analisa Semen..... | IV-1 |
| 4.1.2.1. Analisa Kimia Semen Portland..... | IV-2 |
| 4.1.2.2. Analisa Fisika Semen Portland..... | IV-3 |
| 4.1.3. Analisa Agregat..... | IV-3 |
| 4.1.3.1. Analisa Agregat Halus..... | IV-3 |
| 4.1.3.1.1. Analisa Pasir Lumajang | IV-4 |
| a. Analisa Ayakan Pasir | IV-4 |
| b. Analisa Kebersihan Pasir Terhadap Bahan Organik | IV-5 |
| c. Analisa Soundness Pasir | IV-5 |

| | | |
|--------------|---|-------|
| d. | Analisa Berat Jenis Pasir..... | IV-6 |
| e. | Analisa Air Resapan Pasir..... | IV-7 |
| f. | Analisa Kadar Lumpur..... | IV-7 |
| g. | Analisa Berat Volume..... | IV-8 |
| | 4.1.3.1.2. Analisa Copper Slag | IV-8 |
| | 4.1.3.1.2.1 Analisa Fisika Copper Slag | IV-8 |
| a. | Analisa Ayakan Copper Slag..... | IV-8 |
| b. | Analisa Kebersihan Copper Slag Terhadap Bahan Organik..... | IV-10 |
| c. | Analisa Soundness Copper Slag.... | IV-10 |
| d. | Analisa Berat Jenis Copper Slag.... | IV-11 |
| e. | Analisa Air Resapan Copper Slag...IV-12 | IV-12 |
| f. | Analisa Kadar Lumpur..... | IV-12 |
| g. | Analisa Berat Volume..... | IV-13 |
| | 4.1.3.1.2.2. Analisa Kimia Copper Slag..... | IV-13 |
| | 4.1.3.1.2.3. Analisa Ayakan Kombinasi Pasir Dan Copper Slag..... | IV-14 |
| | 4.1.3.2. Analisa Agregat Kasar..... | IV-21 |
| a. | Analisa Ayakan Batu Pecah | IV-21 |
| b. | Analisa Abrasi Batu Pecah | IV-23 |
| c. | Analisa Berat Jenis Batu Pecah..... | IV-23 |
| | 4.2. Analisa Beton Segar | IV-24 |
| | 4.2.1. Analisa Kebutuhan Air..... | IV-24 |
| | 4.2.2. Analisa Hasil Pengujian Temperatur Hidrasi..... | IV-26 |
| | 4.2.3. Analisa Hasil Pengujian Setting Time | IV-32 |
| | 4.3. Analisa Beton Keras | IV-39 |
| | 4.3.1. Analisa Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton..... | IV-39 |
| | 4.3.2. Analisa Hasil Pengujian Air Void Beton | IV-45 |
| | 4.3.3. Analisa Hasil Pengujian Ultrasonic | IV-47 |
| BAB V | KESIMPULAN DAN SARAN | V-1 |
| | 5.1. Kesimpulan | V-1 |
| | 5.2. Saran | V-1 |

| | |
|----------------------|-----|
| DAFTAR PUSTAKA | XIV |
| LAMPIRAN | |



DAFTAR TABEL

| | Hal |
|--|--------|
| Tabel 2.1. Metode Pembuatan Beton Kuat Tekan Tinggi..... | II-3 |
| Tabel 2.2. Komposisi Kimia Semen Portland | II-6 |
| Tabel 2.3. Senyawa Baru Yang Dibentuk Oksida Utama | II-6 |
| Tabel 2.4. Standard Komposisi Kimia Menurut ASTM C 150 – 94 | II-8 |
| Tabel 2.5. Kandungan Oksida Utama Semen Portland..... | II-9 |
| Tabel 2.6. Daftar Berat Jenis Beton Dengan Berbagai Agregat | II-21 |
| Tabel 2.7. Klasifikasi Bentuk Butiran Agregat | II-22 |
| Tabel 2.8. Koefisien Pengembangan Linier Agregat Batu Alam | II-27 |
| Tabel 2.9. Susunan Besar Butir (Grading) Agregat Halus..... | II-30 |
| Tabel 2.10. Gradasi Agregat Kasar Menurut ASTM C 33 | II-31 |
| Tabel 2.11. Gradasi Agregat Kasar Menurut BS | II-32 |
| Tabel 2.12. Bahan-bahan Yang Berpengaruh Buruk Terhadap Beton (ASTM C33-93)..... | II-33 |
| Tabel 2.13. Syarat Mutu Agregat Kasar Menurut SII 0052 – 80 | II-34 |
| Tabel 2.14. Syarat Kekerasan Agregat Kasar Menurut SII 0052 – 80 | II-34 |
| Tabel 2.15. Perhitungan Agregat Gabungan | II-39 |
| Tabel 2.16. Pembatasan Modulus Kehalusan..... | II-41 |
| Tabel 3.1. Ayakan Agregat Halus | III-8 |
| Tabel 3.2. Ayakan Agregat Kasar | III-14 |
| Tabel 3.3. Jumlah Kebutuhan Bola Besi | III-16 |
| Tabel 3.4. Grading Benda Uji | III-17 |
| Tabel 3.5. Metode Untuk Mencari Nilai Slump Dari Agregat Max Dan Kadar Air Bebas | III-22 |
| Tabel 3.6. Perkiraan Kuat Tekan Beton ($W/C=0.5$) | III-23 |
| Tabel 3.7. Mix Desain Metode DoE | III-29 |
| Tabel 3.8. Proporsi Campuran Hasil Mix Desain | III-30 |
| Tabel 4.1. Analisa Kimia Dan Standard Mutu Semen PC Tipe I..... | IV-2 |
| Tabel 4.2. Analisa Fisika Dan Standard Mutu Semen PC Tipe I..... | IV-3 |
| Tabel 4.3. Analisa Ayakan Pasir Lumajang | IV-4 |

| | |
|---|-------|
| Tabel 4.4. Analisa Tes Soundness Pasir Lumajang..... | IV-6 |
| Tabel 4.5. Analisa Berat Jenis Pasir Lumajang | IV-6 |
| Tabel 4.6. Analisa Resapan Pasir Lumajang | IV-7 |
| Tabel 4.7. Analisa Kadar Lumpur | IV-7 |
| Tabel 4.8. Analisa Berat Volume | IV-8 |
| Tabel 4.9. Analisa Ayakan Copper Slag..... | IV-9 |
| Tabel 4.10. Analisa Tes Soundness Copper Slag..... | IV-11 |
| Tabel 4.11. Analisa Berat Jenis Copper Slag | IV-11 |
| Tabel 4.12. Analisa Resapan Copper Slag | IV-12 |
| Tabel 4.13. Analisa Kadar Lumpur..... | IV-12 |
| Tabel 4.14. Analisa Berat Volume | IV-13 |
| Tabel 4.15. Analisa Kimia Copper Slag..... | IV-13 |
| Tabel 4.16. Analisa Ayakan Kombinasi 1 Pasir – Copper Slag | IV-14 |
| Tabel 4.17. Analisa Ayakan Kombinasi 2 Pasir – Copper Slag | IV-16 |
| Tabel 4.18. Analisa Ayakan Kombinasi 3 Pasir – Copper Slag | IV-17 |
| Tabel 4.19. Analisa Ayakan Kombinasi 4 Pasir – Copper Slag | IV-19 |
| Tabel 4.20. Analisa Ayakan Kombinasi 5 Pasir – Copper Slag | IV-20 |
| Tabel 4.21. Analisa Ayakan Batu Pecah | IV-22 |
| Tabel 4.22. Analisa Abrasi Batu Pecah | IV-24 |
| Tabel 4.23. Analisa Berat Jenis Batu Pecah | IV-24 |
| Tabel 4.24. Pengamatan Kebutuhan Air Pencampur Beton..... | IV-24 |
| Tabel 4.25. Temperatur Awal Dan Puncak Hidrasi Beton..... | IV-26 |
| Tabel 4.26. Temperatur Hidrasi Beton..... | IV-27 |
| Tabel 4.27. Setting Time Beton | IV-33 |
| Tabel 4.28. Kuat Tekan Beton | IV-39 |
| Tabel 4.29. Analisa Ayakan Pada Beberapa Kombinasi Pasir – Copper Slag..... | IV-42 |
| Tabel 4.30. Air Voids Beton | IV-45 |
| Tabel 4.31. Pembacaan Ultrasonic Dan Kuat Tekan Beton..... | IV-48 |

DAFTAR GAMBAR/GRAFIK

| | Hal |
|---|--------|
| Gambar 2.1. Mekanisme Proses Pengikatan Dan Pengerasan | II-16 |
| Gambar 2.2. Kandungan Air Dalam Agregat | II-25 |
| Gambar 2.3. Daerah Gradasi ASTM C 33 – 93 Dan Zone 2 BS 882 : 1965 | II-40 |
| Gambar 2.4. Skema Produksi Copper Slag | II-47 |
| Gambar 2.5. Efek Moist Curing Pada Suhu 20°C Dan Kelembaban Beton Pada Saat Pengetesan | II-57 |
| Gambar 2.6. Maturity Of Time | II-58 |
| Gambar 2.7. Alat Ultrasonic | II-60 |
| Gambar 2.8. Korelasi Kecepatan Getaran Dengan Kuat Tekan Beton | II-61 |
| Gambar 3.1. Hubungan Antara Standard Deviasi Dan Kuat Tekan Beton | III-21 |
| Gambar 3.2. Hubungan Antara Rasio W/C Terhadap Target Kuat Tekan Rata-rata | III-24 |
| Gambar 3.3. Prosentase Agregat Halus Terhadap Agregat Keseluruhan Untuk Ukuran Butir Maksimum 20 mm | III-26 |
| Gambar 3.4. Hubungan Kandungan Air, Berat Jenis Agregat Campuran, Dan Berat Beton | III-27 |
| Gambar 4.1. Analisa Ayakan Pasir Lumajang | IV-5 |
| Gambar 4.2. Analisa Ayakan Copper Slag | IV-9 |
| Gambar 4.3. Analisa Ayakan Kombinasi 1 Pasir – Copper Slag | IV-15 |
| Gambar 4.4. Analisa Ayakan Kombinasi 2 Pasir – Copper Slag | IV-16 |
| Gambar 4.5. Analisa Ayakan Kombinasi 3 Pasir – Copper Slag | IV-18 |
| Gambar 4.6. Analisa Ayakan Kombinasi 4 Pasir – Copper Slag | IV-19 |
| Gambar 4.7. Analisa Ayakan Kombinasi 5 Pasir – Copper Slag | IV-21 |
| Gambar 4.8. Analisa Ayakan Batu Pecah | IV-23 |
| Gambar 4.9. Hubungan Variasi Copper Slag Dengan Kebutuhan Air | IV-24 |
| Gambar 4.10. Temperatur Awal Dan Puncak Hidrasi Beton | IV-27 |
| Gambar 4.11. Temperatur Hidrasi Beton Variasi Pasir | IV-28 |
| Gambar 4.12. Temperatur Hidrasi Beton Variasi Kombinasi 1 | IV-29 |

| | |
|--|-------|
| Gambar 4.13. Temperatur Hidrasi Beton Variasi Kombinasi 2 | IV-29 |
| Gambar 4.14. Temperatur Hidrasi Beton Variasi Kombinasi 3 | IV-30 |
| Gambar 4.15. Temperatur Hidrasi Beton Variasi Kombinasi 4 | IV-30 |
| Gambar 4.16. Temperatur Hidrasi Beton Variasi Kombinasi 5 | IV-31 |
| Gambar 4.17. Temperatur Hidrasi Beton | IV-31 |
| Gambar 4.18. Setting Time Beton Variasi Pasir | IV-34 |
| Gambar 4.19. Setting Time Beton Variasi Kombinasi 1 | IV-34 |
| Gambar 4.20. Setting Time Beton Variasi Kombinasi 2 | IV-35 |
| Gambar 4.21. Setting Time Beton Variasi Kombinasi 3 | IV-35 |
| Gambar 4.22. Setting Time Beton Variasi Kombinasi 4 | IV-36 |
| Gambar 4.23. Setting Time Beton Variasi Kombinasi 5 | IV-36 |
| Gambar 4.24. Setting Time Beton | IV-37 |
| Gambar 4.25. Hubungan Antara Variasi Kombinasi Pasir – Copper Slag | IV-37 |
| Gambar 4.26. Kuat Tekan Beton Dengan Umur Beton | IV-40 |
| Gambar 4.27. Kenaikan Kuat Tekan Beton Terhadap Umur Beton | IV-41 |
| Gambar 4.28. Analisa Ayakan Pada Beberapa Kombinasi Pasir – Copper Slag | IV-41 |
| Gambar 4.29. Air Voids Beton | IV-45 |
| Gambar 4.30. Grafik Regresi Hubungan Antara Kuat Tekan Dengan Ultrasonic Velocity..... | IV-48 |
| Gambar 4.31. Hubungan Antara Variasi Copper Slag Dengan Kuat Tekan Beton | IV-49 |

DAFTAR BAGAN

| | Hal |
|--|-------|
| Bagan 3.1. Diagram Alir Penelitian | III-4 |
| Bagan 3.2. Variasi Benda Uji | III-6 |

BAB I

PENDAHULUAN

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Beton adalah suatu material yang secara harfiah merupakan bentuk dasar dari kehidupan sosial yang modern. Hampir pada setiap aspek kegiatan sehari-hari kita tidak dapat tak tergantung pada beton baik secara langsung maupun tidak langsung. Sebagai contoh jalan dan jembatan yang kita lewati strukturnya terbuat dari beton, atau lapangan terbang, break water (pemecah gelombang), dam yang digunakan untuk menyimpan air yang dapat dipergunakan untuk pembangkit tenaga listrik juga terbuat dari beton. Jadi dapat kita ambil kesimpulan bahwa kegiatan kita sehari-hari sering dipengaruhi oleh dampak perkembangan teknologi beton.

Menyadari permasalahan diatas salah satu hal yang banyak disoroti saat ini adalah masalah polusi lingkungan. Polusi lingkungan sangat potensial diakibatkan proses-proses industri baik dalam skala kecil, menengah, maupun skala besar. Pada sisi lain, kebutuhan yang semakin kompleks menuntut adanya perkembangan industri yang lebih pesat pula. Hal ini berarti bahwa kuantitas polutan akan semakin bertambah, bahkan jenis dan ragamnya mungkin lebih banyak lagi. Jelaslah bahwa kedua kondisi ini menimbulkan dilema yang harus dicarikan solusinya secara arif dan bijaksana. Salah satu dari sekian banyak alternatif adalah bagaimana memanfaatkan kembali limbah industri tersebut untuk menghasilkan sesuatu yang baru dan bermanfaat. Dengan demikian resiko polusi dapat terhindari dan diperoleh sesuatu yang bernilai ekonomi/komersial.

Salah satu dari industri tersebut adalah industri peleburan tembaga yang akan menghasilkan bahan buangan yang disebut copper slag. Copper slag mempunyai penampilan fisik seperti pasir dengan bentuk butiran pipih, runcing, tajam, serta berwarna hitam. Bila terinjak atau menusuk seperti duri. Selama ini pemanfaatan copper slag khususnya dinegara kita belum mendapat perhatian yang luas untuk diteliti atau mungkin dimanfaatkan. Namun di beberapa negara maju

seperti di Canada, Australia, Eropa, dan Amerika telah dimanfaatkan secara luas pada konstruksi-konstruksi dasar, jalan kereta api, timbunan, dan sebagai material beton.

Penelitian sebelumnya telah dilakukan oleh **Hwang dan Laiw, (1989)**, menyimpulkan bahwa pemakaian copper slag dapat menggantikan agregat halus sebanyak 60 % dengan kenaikan kuat tekan \pm 20 %. Sedangkan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh **Aulia, Kandar, Triwulan dan Mudji, (1999)**, adalah optimasi kandungan copper slag sebagai pengganti agregat halus sebesar 40 % dengan kenaikan kuat tekan \pm 10 %. Penelitian copper slag sebagai material substitusi semen juga telah dilakukan oleh **Antonio dan Barzin, (1999)**, hasilnya adalah terjadi peningkatan kuat tekan beton dengan variasi 5 %, 10 %, dan 15 % terhadap berat semen yang dapat digantikan oleh copper slag. Hal yang sama juga telah dilakukan oleh **Harmonis Rante, (2000)**, yang hasilnya copper slag dapat menggantikan \pm 20 % semen dan terjadi peningkatan kuat tekan beton \pm 21.96 %. Namun aplikasi ke arah teknologi beton yaitu optimasi gradasi copper slag sebagai material pengganti agregat halus sebesar 40 % untuk mendapatkan beton mutu tinggi belum diteliti lebih detail.

Keuntungan pemakaian copper slag sebagai material pengganti pasir adalah meningkatkan kuat tekan, karena specific gravitynya yang relatif besar sehingga beton yang dihasilkan bertambah berat yang berarti meningkatkan kuat tekan. Dalam perencanaan suatu campuran beton sangat dipengaruhi oleh bentuk butiran dan gradasi agregat. Susunan gradasi agregat gabungan akan menentukan sifat dari beton seperti bleeding dan segregasi. Pada pelaksanaan sedapat mungkin grading dapat dipertahankan konstan, ketidakseragaman grading akan mengakibatkan variasi kekuatan yang cukup besar. Dengan ukuran butiran copper slag yang halus akan memberikan keuntungan sendiri bila penggantian terhadap agregat halus dilakukan pada jumlah yang tepat untuk mengurangi bleeding. Sebaliknya bila kasar, maka tingkat dan jumlah bleeding akan bertambah (**ACI Committee 226, (1987)**). Bertolak dari latar belakang hasil penelitian yang telah dilakukan oleh **Aulia, Kandar, Triwulan dan Mudji, (1999)**, adalah optimasi kandungan copper slag sebagai pengganti agregat halus

yang optimum menghasilkan kuat tekan pada prosentase sebesar 40 % dengan kenaikan kuat tekan \pm 10 % , maka peneliti merasa tertarik untuk mencoba mengaplikasikan optimasi gradasi copper slag dengan komposisi pengganti agregat halus yang sama yaitu sebesar 40 % untuk mendapatkan beton mutu tinggi.

1.2. PERUMUSAN MASALAH

Beberapa hal yang menjadi permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh 5 jenis kombinasi gradasi copper slag sebagai pengganti agregat halus sebesar 40 % dalam campuran beton mutu tinggi dengan batas daerah gradasi **Zone 2 BS 882 : 1965** dan **ASTM C 33 – 74** terhadap :

1. Perilaku mekanik
 - Kuat tekan beton.
2. Perilaku fisik
 - Setting time beton.
 - Temperatur hidrasi.
 - Air void beton (prosentase rongga udara yang terisi air).

1.3. MAKSUD DAN TUJUAN

Maksud dan tujuan penelitian adalah :

1. Mencari pengaruh pemakaian gradasi copper slag sebagai pengganti agregat halus sebesar 40 % untuk mendapatkan beton mutu tinggi dengan batas daerah gradasi **Zone 2 BS 882 : 1965** dan **ASTM C 33 – 74** terhadap :
 - Perubahan panas hidrasi.
 - Perkembangan setting time beton.
 - Air void beton (prosentase rongga udara yang terisi air).
 - Perkembangan kuat tekan beton.
 - Perkembangan kualitas beton dengan kecepatan gelombang ultrasonic.

2. Menentukan kombinasi yang ideal dari gradasi copper slag sebagai pengganti agregat halus sebesar 40 % untuk mendapatkan campuran beton mutu tinggi.

1.4. RUANG LINGKUP PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh optimasi gradasi copper slag sebagai pengganti agregat halus sebesar 40 % terhadap kuat tekan beton dan sifat beton lainnya yang mencakup hal-hal sebagai berikut :

1. Mix desain beton metode DoE 1988 dengan batasan sebagai berikut :
 - Faktor air semen tetap = 0,45
 - Slump rencana 30 – 60 mm
2. Benda Uji :
 - Silinder dengan \varnothing 15 cm dan tinggi 30 cm
 - Beton f_c' = 60 MPa
3. Variasi Campuran :
 - Portland Cement (PC) + Pasir + Batu Pecah.
 - Portland Cement (PC) + Agregat halus gabungan (60 % pasir + 40 % copper slag) '*kombinasi 1*' + Batu Pecah.
 - Portland Cement (PC) + Agregat halus gabungan (60 % pasir + 40 % copper slag) '*kombinasi 2*' + Batu Pecah.
 - Portland Cement (PC) + Agregat halus gabungan (60 % pasir + 40 % copper slag) '*kombinasi 3*' + Batu Pecah.
 - Portland Cement (PC) + Agregat halus gabungan (60 % pasir + 40 % copper slag) '*kombinasi 4*' + Batu Pecah.
 - Portland Cement (PC) + Agregat halus gabungan (60 % pasir + 40 % copper slag) '*kombinasi 5*' + Batu Pecah.
4. Perawatan Benda Uji :
 - Metode curing rendaman.
5. Waktu Pengetesan :
 - Beton ditest pada saat berumur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari.

6. Macam data tes yang diambil :
 - Temperatur hidrasi (**ASTM C 1064-86**) pada tiap-tiap variasi.
 - Setting time (**ASTM C 403 - 95**) pada tiap-tiap variasi.
 - Air void beton (prosentase rongga udara yang terisi air) pada tiap-tiap variasi.
 - Tes kuat tekan (**ASTM C 39 – 93a**) pada tiap-tiap variasi.
 - Pengamatan segregasi dan bleeding.
 - Tes kecepatan gelombang ultrasonic (**ASTM C 597**) pada tiap-tiap variasi.
7. Spesifikasi bahan yang dipakai :
 - Semen : Semen Portland Tipe I (PT. Semen Gresik)
 - Copper Slag : PT. Smelting Co, Gresik
 - Agregat Kasar : Batu pecah (BJ > 2.6)
PT. Varia Usaha Beton ex UPB Pandaan
 - Agregat Halus : Pasir Lumajang (BJ > 2.6)
 - Air : Air produksi PDAM, Surabaya



MILIA PERPUSTAKAAN
INSTITUT TEKNOLOGI
SEPULUH - NOPEMBER

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. BETON MUTU TINGGI

2.1.1. Pendahuluan

Kondisi alam Indonesia terutama letak geografi dan iklimnya banyak membantu sehingga dapat memungkinkan dilaksanakannya pembuatan beton bermutu sangat tinggi, yaitu beton dengan kekuatan lebih dari 800 kg/cm^2 . Adanya bahan tambahan mineral dan bahan tambahan admixture kimia seperti silika fume, fly ash, slag, superplastizer, water reducer derajat tinggi, yang digunakan untuk campuran beton merupakan indikasi adanya perkembangan dalam bidang teknologi beton, terutama pada produksi beton mutu tinggi (HSC) dan mutu sangat tinggi (VHSC).

Hal ini telah dibuktikan dengan adanya percobaan di ITS diperoleh mutu tertinggi 1000 kg/cm^2 (**Aman dan Ubaidil, (1991)**) dan penelitian yang dilakukan di Universitas Indonesia (UI) mutu tertinggi yang pernah dihasilkan adalah 850 kg/cm^2 (**FX Sadtono, (1991)**). Penggunaan beton mutu tinggi dan beton mutu sangat tinggi sudah banyak dijumpai terutama pada sistem struktur precast prestressed, seperti pada proyek Two Union Square, Seattle, 1988, Amerika, yang menggunakan silika fume (CSF) dan superplasticizer dengan jumlah semen 515 kg/cm^3 dapat dibuat beton dengan kekuatan 119 MPa (**Prof. Lorrain, (1991)**).

2.1.2. Definisi Beton Mutu Tinggi

Beton mutu tinggi dapat diartikan sebagai beton yang berorientasi pada kekuatan yang tinggi (High Strength Concrete), yang mempertimbangkan keawetan (durability) beton serta kemudahan penggerjaan beton (workability) (**Francis dan Young , (1982)**). Pada saat ini penggunaan beton dengan kekuatan tinggi $\pm 700 \text{ kg/cm}^2$ makin banyak digunakan di Indonesia.

Menurut Strategic Highway Research Program (SHRP) beton mutu tinggi ditetapkan sebagai berikut :

1. Beton yang mempunyai kekuatan :
 - a. 4 jam kekuatannya \geq 2500 psi (17,5 MPa)
 - b. 24 jam kekuatannya \geq 5000 psi (35 MPa)
 - c. 28 hari kekuatannya \geq 10000 psi (70 MPa)
2. Beton yang mempunyai faktor durability lebih besar 80 % setelah 300 kali beban mengalami pencairan dan pembekuan (freezing and thawing).
3. Beton yang mempunyai rasio air terhadap cementitious material ($w/c + p$) ≤ 0.35

Menurut Prof. Lorrain, (1991), klasifikasi beton berdasarkan kekuatannya, dapat dibagi menjadi tiga kelas yaitu :

1. Beton Normal : Kuat tekan karakteristiknya $200 - 500 \text{ kg/cm}^2$ dan disebut Normal Strength Concrete (NSC).
2. Beton Mutu Tinggi : Kuat tekan karakteristiknya $500 - 800 \text{ kg/cm}^2$ dan disebut High Strength Concrete (HSC).
3. Beton Sangat Tinggi : Kuat tekan karakteristiknya lebih dari 800 kg/cm^2 dan disebut Very High Strength Concrete (VHSC).

Beberapa hal yang perlu diperhatikan mengenai pemilihan material pembentuk beton mutu tinggi (ACI 211.4R) :

1. Semen

Pemilihan type semen sebaiknya mengacu pada ASTM C 150, karena variasi komposisi kimia dan fisik semen mempengaruhi kekuatan beton.

2. Air

Air yang dipakai dalam pencampuran beton harus diuji kelayakannya sesuai dengan ASTM C 94.

3. Agregat kasar

Agregat kasar mempengaruhi kekuatan dan sifat struktur beton, oleh karena itu agregat kasar harus dipilih yang cukup keras, tidak retak, tidak mudah pecah, bersih, dan bebas dari kandungan kimia berbahaya.

4. Agregat halus

Grading dan bentuk partikel halus merupakan faktor yang penting. Agregat halus dengan modulus kehalusan 2.5 sampai 3.2 lebih baik untuk beton mutu tinggi.

5. Faktor air semen yang digunakan sekecil mungkin yang berkisar antara 0.25 – 0.40, ini berarti kandungan semen relatif tinggi berkisar antara 400 – 600 kg/m³.

Untuk mutu beton yang berkekuatan 200 kg/cm² - 500 kg/cm² (Normal Strength Concrete) merupakan jumlah terbesar dari produksi beton di Indonesia dan sering dijumpai, misalkan pada pembuatan gedung bertingkat ataupun pada pabrik beton precast. Adapun menurut ACI Committee 363 " State of The Art on High Strength Concrete " bahwasannya batasan minimum untuk High Strength Concrete adalah 6,000 psi (41 Mpa). Dinegara-negara maju seperti Amerika ataupun Eropa penerapan beton mutu tinggi telah banyak dilakukan dalam pembuatan gedung, jembatan, terowongan dan masih banyak lagi. Hal ini merupakan tantangan bagi masyarakat sipil Indonesia untuk menerapkan lebih banyak penggunaan beton mutu tinggi di Indonesia.

2.1.3. Konsep Desain Beton Mutu Tinggi

Beberapa cara yang dapat dilakukan untuk membuat beton kuat tekan tinggi, yaitu (tertera dalam tabel) (Francis & Young, (1982)) :

Tabel 2.1. Metode Pembuatan Beton Kuat Tekan Tinggi

| TIPE | FAS | Kuat tekan 28 hari (MPa) | Keterangan |
|-----------------------|-------------|-----------------------------|---|
| Normal | 0.35 – 0.40 | 30 – 50 | Slump : 50-100 mm, jumlah semen tinggi |
| No Slump | 0.30 – 0.45 | 35 – 50 | Slump kurang dari 25 jumlah semen normal |
| Sangat Rendah | 0.20 – 0.30 | 100 – 170 | Digunakan Admixture |
| Dengan Slump Kecil | 0.30 – 0.50 | 70 – 240 | Compaction Admixture |

Menurut P.K Mehta & Monteiro, (1993), kuat tekan beton dipengaruhi oleh :

1. Karakteristik dan proporsi material
 - a. rasio w/c
 - b. air entrainment
 - c. tipe semen
 - d. agregat
 - e. air
 - f. admixture
2. Kondisi curing
 - a. waktu
 - b. kelembaban
 - c. temperatur
3. Parameter pengetesan
 - a. parameter benda uji
 - b. kondisi pembebahan

2.2. SEMEN PORTLAND

2.2.1. Definisi Semen Portland

Menurut SNI 15-2049-1994, definisi semen portland adalah semen hidraulis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland yang terutama terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidraulis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain.

Menurut SII 0013-1981, definisi semen portland adalah semen hidraulis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidraulis bersama-sama bahan yang lain, biasanya digunakan gipsum.

Semen hidraulis/hydraulic binder (perekat hidraulis) adalah semen yang tidak hanya mengeras karena bereaksi dengan air, tetapi senyawa-senyawa yang terkandung dalam semen tersebut dapat bereaksi dengan air dan membentuk zat baru yang bersifat perekat terhadap batuan.

Oleh karena sifat hidraulis tersebut maka semen portland mempunyai sifat :

- Dapat mengeras bila dicampur dengan air
- Tidak larut dalam air

Semen nonhidraulis didefinisikan sebagai semen yang berasal dari oksidasi gypsum atau karbonat, dan produk hasil proses hidrasi dari bahan-bahan tersebut tidak tahan terhadap air (**P.K. Mehta dan Monteiro, (1993)**).

2.2.2. Bahan Dasar Dan Komposisi Senyawa Kimia Semen Portland

Menurut laporan penelitian dari pusat penelitian semen PT. Semen Gresik, bahan dasar yang digunakan dalam proses produksi semen portland yang telah mencakup kebutuhan akan kalsium dan silika adalah sebagai berikut :

- Batu kapur (Lime stone)
sebagai unsur utama yang mengandung oksida kapur (CaO).
- Tanah Liat (Clay)
sebagai sumber kandungan oksida silika (SiO_2), oksida alumina (Al_2O_3) dan oksida besi (Fe_2O_3).

Selain bahan-bahan tersebut dapat juga diberikan bahan-bahan tambahan yang bersifat memperbaiki kekurangan-kekurangan yang ada pada bahan-bahan dasar tersebut diantaranya adalah :

- Bahan-bahan yang mengandung senyawa kalsium sulfat seperti gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), yang berguna untuk mengkondisi panas hidrasi beton.

Bila perlu diberi tambahan berupa :

- Pasir kwarsa atau batu silika, apabila bahan dasarnya kekurangan SiO_2 .
- Pasir atau biji besi, apabila bahan dasarnya kekurangan Fe_2O_3 .

Menurut F.M. Lea , (1970), komposisi semen portland terutama terdiri :

- Oksida Kapur (CaO)
- Oksida Silika (SiO_2)
- Oksida Alumina (Al_2O_3)
- Oksida Besi (Fe_2O_3)

Komposisi spesifik semen portland tergantung pada jenis semen dan komposisi bahan baku yang dipergunakannya . Komposisi kimia semen portland mempunyai limitasi seperti pada tabel berikut :

Tabel 2.2. Komposisi Kimia Semen Portland (A.M. Neville, (1981))

| Oksida | Komposisi (% berat) |
|--|---------------------|
| Lime (CaO) | 60-67 |
| Silica (SiO ₂) | 17-25 |
| Alumina (Al ₂ O ₃) | 3- 8 |
| Oksida besi (Fe ₂ O ₃) | 0.5-6 |
| Magnesia (MgO) | 0.1-5.5 |
| Soda dan Potash (Na ₂ O + K ₂ O) | 0.5-1.3 |
| Sulphur Trioksida (SO ₃) | 1.3 |

Menurut A.M. Neville, (1981), keempat oksida utama (major oxide) akan membentuk senyawa-senyawa baru yang dikenal dengan nama senyawa “**Bogue**” seperti yang tercantum pada tabel berikut ini, sedangkan sisanya yang terdiri dari magnesium (MgO), alkalis (Na₂O . K₂O) dan oksida sulfur (SO₃) disebut dengan minor oxide :

Tabel 2.3. Senyawa Baru Yang Dibentuk Oksida Utama (A.M. Neville, (1981))

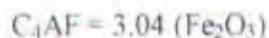
| Senyawa | Rumus Kimia | Singkatan |
|--------------------------------|---|-------------------|
| Tricalcium Silicate | 3 CaO . SiO ₂ | C ₃ S |
| Dicalcium Silicate | 2 CaO . SiO ₂ | C ₂ S |
| Tricalcium Aluminate | 3 CaO . Al ₂ O ₃ | C ₃ A |
| Tetra Calsium Aluminateferrite | 3 CaO . Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃ | C ₄ AF |

Persentase kandungan senyawa yang terkandung didalam semen, menurut R.H. Bogue dapat dihitung berdasarkan rumus “**Bogue Composition**” sebagai berikut :

$$C_3S = 4.07 (CaO) - 7.60 (SiO_2) - 6.72 (Al_2O_3) - 1.43 (Al_2O_3) - 2.85 (SO_3)$$

$$C_2S = 2.87 (SiO_2) - 0.754 (3CaO . SiO_2)$$

$$C_3A = 2.65 (Al_2O_3) - 1.69 (Fe_2O_3)$$



Keempat senyawa tersebut mempunyai perilaku yang berbeda-beda, bisa diuraikan sebagai berikut : (A.M. Neville, (1981))

- C_3S

Sifat C_3S hampir sama dengan semen yaitu bila ditambahkan air akan cepat menjadi kaku dan dalam beberapa jam semen akan mengeras. Senyawa ini menunjang kekuatan awal semen, cenderung tidak berubah dan stabil pada suhu tetap, serta memberikan panas hidrasi ± 500 joule/gram. Kandungan C_3S pada semen portland bervariasi antara 35 % - 55 % dan rata-rata 45 %.

- C_2S

Pada penambahan air segera terjadi reaksi, menyebabkan pasta mengeras dan menimbulkan panas hidrasi ± 250 joule/gram. Perkembangan kekuatan awal lambat pada beberapa minggu, lalu cenderung stabil sampai mencapai kekuatan yang hampir sama dengan C_3S . Kandungan C_2S pada semen portland bervariasi antara 15 % - 35 % dan rata-rata 25 %.

- C_3A

Perkembangan kekuatan terjadi pada satu sampai dua hari, tetapi sangat rendah. Bila bereaksi dengan air, senyawa ini menimbulkan panas hidrasi ± 850 joule/gram. Kandungan C_3A pada semen portland bervariasi antara 7 % - 5 %.

- C_4AF

Bereaksi dengan air sangat cepat, pembentukan pasta semen terjadi dalam beberapa menit. C_4AF menimbulkan panas hidrasi ± 420 joule/gram. Warna abu-abu pada semen dipengaruhi oleh C_4AF . Kandungan C_4AF pada semen portland bervariasi antara 5 % - 10 % dan rata - rata 8 %.

Tabel 2.4. Standard Komposisi Kimia Menurut ASTM C 150 - 94

| Type Semen | Komposisi Kimia | | | | | |
|---------------|---------------------------|---|---|--------------|---|---|
| | SiO ₃ Min % | Al ₂ O ₃ Max % | Fe ₂ O ₃ Max % | MgO Max % | SO ₃ C ₃ A < 8 % | SO ₃ C ₃ A > 8 % |
| I | - | - | - | 6 | 3 | 3.5 |
| II | 20 | 6 | 6 | 6 | 33 | - |
| III | - | - | - | 6 | 3.5 | 4.5 |
| IV | - | - | 6.5 | 6 | 2.3 | - |
| V | - | - | - | 6 | 2.3 | - |

Selain oksida utama tersebut diatas, maka oksida minor pada semen portland juga terdapat pembatasan yang dilakukan karena sifat-sifatnya yang merugikan sebagai berikut : (A.M. Neville, (1981))

- SO₃

Berasal dari gypsum, kandungan SO₃ pada semen diperlukan untuk memperlambat pengerasan, namun apabila jumlahnya terlalu banyak maka akan dapat menyebabkan cracking dan mengacaukan waktu pengerasan semen. Kandungan gipsum yang optimum akan menghasilkan kekuatan tekan maksimum dan penyusutan minimum gipsum dan C₃A beraksi membentuk Ettringite (3C₃A. 3CaSO₄. 31H₂O). Pembentukan Ettringite akan berpengaruh pada kenaikan volume, karena Ettringite memiliki berat jenis yang lebih rendah yaitu 1,73 gram/cm³ bila dibandingkan dengan hasil hidrasi yang lain, yaitu 2,5 gram/cm³.

- Kapur Bebas

Kapur bebas terjadi apabila bahan mentah mengandung lebih banyak kapur daripada oksida silika, alumina, dan besi. Pada reaksi hidrasi, kapur bebas akan membentuk Ca(OH)₂ (kalsium hidroksida) yang mempunyai volume lebih besar daripada CaO, sehingga menyebabkan ekspansi semen (unsoundness) dan menimbulkan cracking.

- MgO

MgO (periclase) dapat berhidrasi menjadi $Mg(OH)_2$ magnesium hidroksida, yang dapat menyebabkan ekspansi semen dan menimbulkan cracking.

- Alkali (Na_2O dan K_2O)

Oksida alkali dalam semen harus diperhatikan apabila dalam pembuatan beton menggunakan agregat yang reaktif terhadap alkali, sebab hal tersebut akan menimbulkan reaksi yang membentuk alkali silika gel yang dapat menyebabkan ekspansi dan menimbulkan cracking.

- Hilang Pijar LOI (Lost Of Ignition)

Apabila semen dipijarkan pada suhu $\pm 1000^{\circ}C$ sebagian dari unsur atau mineral yang terkandung di dalamnya akan terurai atau menguap. Jumlah kandungan hilang pijar ini dibatasi, karena mineral-mineral tersebut akan mengalami metaformosa dalam waktu lama, sehingga dapat menimbulkan kerusakan beton.

Sedangkan menurut **P.K. Mehta, (1993)**, kandungan dari oksida utama tergantung dari type dan jenis semen dengan batasan-batasan seperti pada tabel berikut ini :

Tabel 2.5. Kandungan Oksida Utama Semen Portland (P.K. Mehta, (1993))

| Type Semen | Kandungan Oksida (%) | | | |
|------------|----------------------|---------|--------|---------|
| | C_3S | C_2S | C_3A | C_4AF |
| I | 45 – 55 | 20 – 30 | 8 – 12 | 6 – 10 |
| II | 40 – 50 | 25 – 35 | 5 – 7 | 6 – 10 |
| III | 50 – 65 | 15 – 25 | 8 – 14 | 6 – 10 |
| IV | 40 – 50 | 0 – 4 | 0 – 4 | 10 – 20 |

2.2.3. Sifat – Sifat Semen Portland

Sifat – sifat fisika semen portland meliputi :

- Kehalusan (Fineness)

Kehalusan semen portland disyaratkan karena akan menentukan luas permukaan partikel-partikel semen, dan ini sangat berpengaruh pada

proses hidrasi. Dengan semakin halusnya ukuran butiran semen menyebabkan reaksi hidrasi dari semen portland menjadi semakin cepat. Hal ini disebabkan karena butiran yang semakin kecil akan menyebabkan luas permukaan yang semakin besar. Proses hidrasi yang semakin cepat mengakibatkan semakin cepatnya perkembangan kuat tekan. Partikel semen yang lebih halus akan mengurangi terjadinya bleeding (**A.M. Neville, (1981)**). Menurut **P.K. Mehta & Montiero, (1983)**, standard kehalusan yang dipakai adalah sisa tertahan ayakan 90 mikron (200 mesh) atau 45 mikron (325 mesh) atau dengan alat blaine (air permeability meter).

- Waktu Pengikatan (Setting Time)

Hal ini disyaratkan untuk mengendalikan sifat plastisitas dan workability dari adonan mortar beton. Adapun pengukurannya bisa dilakukan dengan alat vicat atau gillmore test. Secara umum pengertian dari setting adalah perubahan dari keadaan cair (fluid) ke keadaan kaku (rigid) dan selama setting tersebut akan terbentuk kekuatan (**A.M. Neville, (1981)**).

- Kekekalan Bentuk (Soundness)

Kekekalan bentuk (soundness) semen dapat dipengaruhi oleh ekspansi yang tidak diinginkan dari beberapa komponen bahan penting yang kadang-kadang terjadi setelah pengerasan. Perubahan besar pada volume yang mengikuti terjadinya ekspansi bisa menghasilkan disintegration dan kepatahan. Syarat ini untuk pengendalian agar pada beton tidak terjadi pemuaian atau penyusutan, karena dapat mengakibatkan kerusakan pada konstruksi. Alat yang dapat dipakai untuk mengukur kekekalan bentuk adalah alat Le Chatelier Expansion atau autoclave. Ketidakkekalan bentuk tersebut disebabkan karena adanya kapur bebas (free lime) dan magnesium dalam semen (**P.K. Mehta & Monteiro, (1993)**).

- Kekuatan Tekan

Kekuatan tekan adalah sifat kemampuan menahan atau memikul suatu beban tekan. Kekuatan tekan adalah sifat paling penting dari beton. Istilah strength (kekuatan) pada beton selalu dimaksudkan dengan

compressive strength (kekuatan tekan). Hal ini disebabkan karena sifat-sifat beton lainnya, misalnya ketahanan (durability) selalu didasarkan pada kekuatan tekan beton (**Hasan Baraja, (1992)**).

- Panas Hidrasi

Pada proses hidrasi semen, terjadi reaksi yang bersifat eksotermis yaitu reaksi yang mengeluarkan panas yang disebut panas hidrasi. Pembatasan terhadap besarnya panas hidrasi harus diperhatikan sebab dengan panas hidrasi yang tinggi dapat menimbulkan keretakan pada beton. Menurut **A.M. Neville, (1981)** besarnya panas hidrasi sangat tergantung pada :

- Jumlah serta komposisi kimia yang terdapat pada semen.
- Kehalusan butiran semen portland.
- Temperatur dan kelembaban pada saat proses hidrasi berlangsung.
- Umur semen Portland.
- Faktor air semen
- Admixture.

2.2.4. Proses Hidrasi Semen Portland

Proses hidrasi semen portland adalah peristiwa bertemuannya air dengan semen sehingga membentuk suatu senyawa baru yang berfungsi sebagai perekat atau berarti suatu proses eksoterm reaksi hidrasi dimulai saat setelah air tercampur oleh semen (**Roy, (1989)**).

Proses hidrasi semen portland adalah proses terjadinya reaksi antara semen dengan air sehingga menyebabkan semen menjadi bahan perekat. Hidrasi semen merupakan reaksi eksotermis yang menyebabkan panas hingga 120 kal/gram (**A.M. Neville, (1981)**).

Secara fisika, proses hidrasi akan nampak terjadi pada pasta yang plastis dan dapat dibentuk untuk beberapa waktu, lalu mulai terjadi pengerasan sehingga tidak dapat dibentuk. Proses pengikatan dan pengerasan semen dibagi sebagai berikut :

1. Tahap I

Mencakup pelepasan panas yang sangat dini terutama dikarenakan hidrasi C₃A. Ukuran C₃A menyusut dikarenakan reaksi dengan kalsium sulfat yang membentuk hidrasi kalsium sulfo aluminat, yaitu ettringate

yang membentuk suatu lapisan yang menutupi sebagian dan melambatkan hidrasi C_3A . Tahap I untuk C_3S ditandai dengan adanya periode perkembangan panas yang lambat segera setelah dicampur dengan air, yang berhubungan langsung dengan yang dinamakan periode pra-induksi dan induksi. Zat hasil hidrasi yang dihasilkan sebagian besar terdiri dari CSH.

2. Tahap II

Tahap II ditandai dengan perkembangan panas yang sangat cepat. Zat hidrasi yang dihasilkan terutama adalah fibrous atau berserat dan reticulate atau tersebar. Jenis-jenis dari CSH dan $Ca(OH)_2$ yang berbentuk berupa plat atau lempengan. Setting yang terjadi merefleksikan formasi CSH yang mencukupi untuk membentuk struktur jaringan dengan kecepatan tertentu.

3. Tahap III

Tahap ketiga ini sering diketahui karena adanya konversi ettringite (hidrasi tetrakalsium-aluminat trisulfat-32 hidrat) terhadap bentuk hidrasi monosulfat.

Fase belite dan ferrite juga berperan dalam formasi CSH, dan ettringite/monosulfat, reaksi pada tahap I dan II. Semua fase-fase yang penting terurai secara kongruen yang membebaskan ion-ion Ca^{2+} terhadap larutan dan meninggalkan suatu residu padat yang tidak dapat dilarutkan yang menambah kejemuhan zat pelarut, meskipun pada semen proses terurainya zat yang tidak kongruen ini terbatas. Hidrasi awal biasanya terjadi beberapa menit setelah pencampuran. Pada sistem semen normal sebenarnya Ca ditekan oleh adanya alkali (Na^+ , K^+), yang secara efektif meningkatkan konsentrasi hidroksil dan pH. Komposisi dari fluida-fluida yang berhubungan dengan sistem pasta semen yang berhidrasi pada tahap awal, juga dari pori-pori fluida yang diperoleh dari pasta semen pada tahapan akhir hidrasi telah diamati dalam serangkaian penelitian. Hal penting yang terlihat adalah kadar pH yang tinggi (umumnya diatas 13) yang merupakan faktor penting dalam mengaktifkan hidrasi fly ash yang bersifat silika. Ketika setting awal tercapai, proses hidrasi semen berlanjut pada suatu periode beberapa bulan bahkan beberapa tahun. Reaksi-reaksi

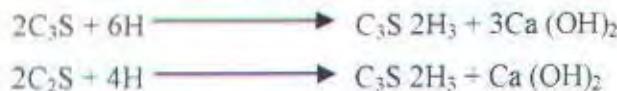
hidrasi dari semen menghasilkan senyawa-senyawa hidrat yang sebagian besar terdiri dari senyawa kalsium silikat hidrat ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), kalsium aluminat hidrat ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), kalsium sulfat aluminat hidrat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4$), yang kesemuanya berbentuk kristal halus dan dikenal dengan *cement gel*. Reaksi-reaksi yang terjadi sebagai berikut :

a. Hidrasi Silikat

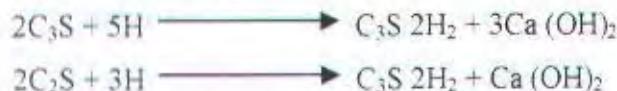
Triksium (C_3A) dan dikalsium silikat (C_2A) akan berhidrasi dengan air membentuk kalsium silikat hidrat (CSH) dan kapur ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Ada beberapa macam proses hidrasi silikat yang telah diteliti oleh para ahli, antara lain :

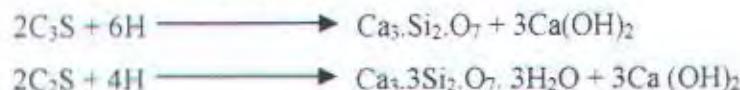
❖ AM NEVILLE (1962)



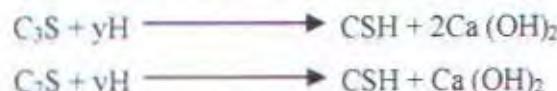
❖ HANSEN (1967)



❖ TAYLOR (1985) DAN GREENE (1964)

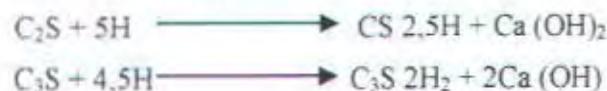


❖ SCHIWIETE DAN LUDWIG (1967)



Dengan perbandingan antara CaO dengan SiO bervariasi antara 0,8 dan 2

❖ LAFUMA (1967)



b. Hidrasi Aluminat

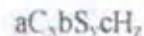
❖ LAFUMA (1952)



Proses hidrasi aluminat akan berlangsung dengan memakai kapur yang terbentuk pada proses hidrasi silikat.

c. Hidrasi Aluminoferrit

Menurut Schiwiete & Iwai, (1967), proses hidrasi aluminoferrit terbentuk pada temperatur 25°C dan membentuk senyawa $\text{C}_3\text{A}_6\text{AF}$. Koefisien serta indeks senyawa – senyawa yang terbentuk pada saat proses hidrasi akan berbeda – beda.



Nilai a,b,c,d serta x,y,z,u berbeda – beda tergantung dari :

- Senyawa kimia yang terkandung pada semen portland.
- Kelembaban serta temperatur pada saat proses hidrasi.

Senyawa-senyawa yang terbentuk pada proses hidrasi pasta semen tersebut merupakan kristal-kristal padat yang akan membentuk suatu kekuatan dengan adanya ikatan Van Der Walls (P.K. Mehta, (1993)). Ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kekuatan dari pasta semen, salah satunya yaitu rasio w/c (faktor air semen). Rasio w/c merupakan perbandingan antara berat air dan semen yang terkandung di dalam pasta semen.

Selain rasio w/c, menurut P.K. Mehta, (1993), faktor – faktor yang mempengaruhi kekuatan pasta semen adalah :

- a. Mineral Admixture.
- b. Derajat hidrasi (Degree Of Hidration), antara lain : lama perawatan (curing time), temperatur, dan kelembaban .
- c. Kandungan udara (Air Content).

2.2.5. Panas Hidrasi

Proses hidrasi semen portland merupakan proses exoterm, dimana pada reaksi kimia tersebut mengeluarkan panas yang disebut dengan panas hidrasi. Menurut A.M Neville, (1981), besarnya panas hidrasi yang dikeluarkan sangat tergantung dari :

- Jumlah dan komposisi senyawa kimia yang terkandung dalam semen portland.
- Kehalusan butiran semen portland.
- Temperatur dan kelembaban pada saat proses hidrasi berlangsung.

- Umur semen Portland.
- Faktor air semen.
- Admixture.

Untuk memperkirakan besarnya panas hidrasi (cal/gr) dalam semen portland menurut **Steinour & Strake, (1933)**, adalah sebagai berikut :



Dimana bagian dalam kurung merupakan besarnya persentase dari masing-masing senyawa tersebut dalam semen portland.

2.2.6. Setting Dan Hardening

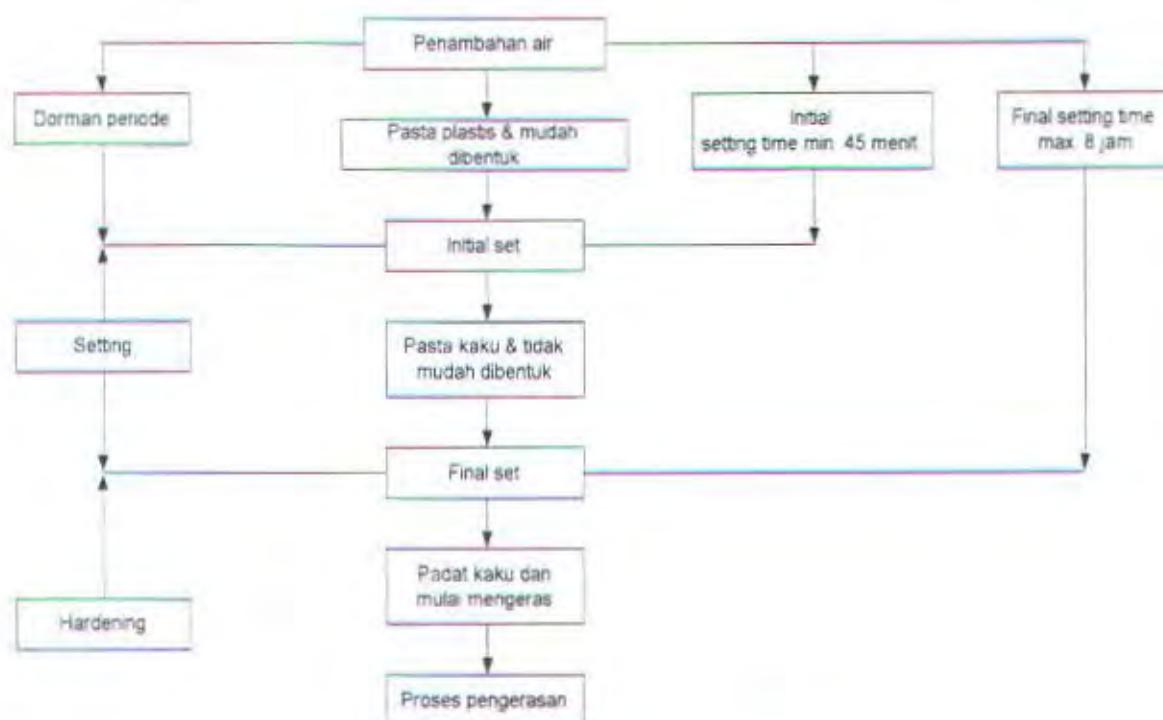
2.2.6.1. Mekanisme setting dan hardening

Pada saat semen dicampur dengan air, maka senyawa-senyawa dalam semen akan berhidrasi. C_3A akan bereaksi paling cepat menghasilkan $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3H_2O$, senyawa ini membentuk gel yang bersifat cepat kaku (set) sehingga senyawa tersebut mengontrol setting time pada semen portland. Tetapi $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ akan bereaksi dengan gypsum yang akan segera membentuk ettringite yang akan membungkus permukaan $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ dan $3CaO \cdot Al_2O_3$, sehingga reaksi hidrasi dari $3CaO \cdot Al_2O_3$ akan dihalangi dan proses setting dapat dicegah. Namun demikian lapisan ettringite baru yang akan membungkus $3CaO \cdot Al_2O_3$ kembali. Proses ini akan menghasilkan setting time. Makin banyak kandungan gypsum dalam semen maka waktu setting time akan menjadi lebih lama. Oleh karena itu, gypsum dikenal sebagai retarder. Dengan adanya gypsum tersebut proses hidrasi tidak hanya menghasilkan cement gel tetapi juga ettringite.

Pada awal mula reaksi hidrasi tersebut akan menghasilkan pengendapan $Ca(OH)_2$. Ettringite dan CSH akan membentuk coating (pembungkus) pada partikel semen serta ettringite akan membentuk coating pada $3CaO \cdot Al_2O_3$, hal ini akan menyebabkan proses hidrasi akan tertahan, dan periode ini dinamakan Dorman periode. Ini terjadi sekitar 1 – 2 jam dan selama itu pasta masih dalam keadaan plastis dan workable. Periode ini berakhir dengan pecahnya coating tersebut serta reaksi hidrasi segera terjadi kembali dan initial set segera tercapai. Pada reaksi hidrasi yang menghasilkan CSH ini akan mengisi rongga dan membentuk titik-titik

kontak yang menghasilkan kekakuan. Pada tahap berikutnya terjadi konsentrasi dari CSH dan konsentrasi dari titik-titik kontak yang akan menghalangi mobilitas partikel-partikel semen, yang akhirnya pasta menjadi kaku dan final setting dicapai serta pengerasan mulai terjadi secara steady (**Hasan Baraja, (1992)**).

Mekanisme terjadinya setting dan hardening dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Mekanisme Proses Pengikatan Dan Pengerasan

2.2.6.2. Setting

Salah satu sifat dari semen adalah sifatnya sebagai pengikat (setting) yaitu gejala terjadinya kekakuan pada adonan semen dengan air. Menurut **A.M Neville, (1981)**, pengertian umum dari setting adalah perubahan dari keadaan fluid (cair) ke keadaan rigid (kaku) dan selama setting tersebut akan terbentuk suatu kekakuan. Waktu pengikatan (setting time) ada dua macam, yaitu :

1. Waktu pengikatan awal (initial setting time) :

Waktu mulai terjadi sampai terjadi kekakuan tertentu yaitu adonan sudah mulai tidak workable.

2. Waktu pengikatan akhir (final setting time) : Waktu mulai adonan terjadi sampai kekuatan penuh .

Menurut **Sandor Popovisc**, (1982), setting time dapat dipengaruhi oleh beberapa hal , antara lain :

- Kandungan C₃A

Makin besar kandungan C₃A cenderung akan menghasilkan setting time yang makin pendek.

- Kandungan Gypsum (CaSO₄.2H₂O)

Makin besar kandungan gypsum dalam semen menghasilkan setting time yang makin panjang.

- Kehalusan butiran semen.

Makin halus partikel-partikel semen akan cenderung menghasilkan setting time yang makin pendek.

Adanya proses setting (pengikatan) ditandai dengan adanya perubahan temperatur pasta semen . Pada initial set (pengikatan awal) ditandai dengan adanya kenaikan temperatur yang cepat, sedangkan final set (pengikatan akhir) merupakan puncak dari temperatur hidrasi (**A.M Neville**, 1981).

Sifat lain dari semen adalah kuat tekan yang menurut **Bogue R.H**, (1955), kuat tekan dari suatu semen sangat dipengaruhi oleh komposisi kimianya. Semen dengan kandungan C₃S yang tinggi akan menghasilkan kekuatan awal yang besar, C₃S memberikan kontribusi yang besar pada perkembangan kekuatan awal. Sedangkan kandungan C₂S dalam semen memberikan kontribusi pada kekuatan tekan untuk umur yang lebih panjang.

Dalam praktik kadang-kadang dijumpai suatu kelainan dari sifat setting pada semen. Kelainan sifat ini adalah kekakuan yang sangat cepat dari adonan semen, mortar atau beton. Gejala ini disebut dengan “**early stiffening**”

Ada dua macam gejala early stiffening yaitu : (**A.M. Neville, (1981)**)

1. False set (Pengikatan semu)

Yaitu gejala terjadinya pengembangan sifat kekakuan dari adonan semen, mortar atau beton tanpa terjadinya pelepasan panas yang

banyak. Gejala tersebut akan hilang dan sifat plastis akan dicapai kembali bila dilakukan pengadukan lebih lanjut tanpa penambahan air.

False set terjadi karena operasi penggilingan klinker dan gypsum dilaksanakan pada suhu operasi yang terlalu tinggi sehingga terjadi dehidrasi (pelepasan air kristal) dari $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ menjadi $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$. Inilah yang menyebabkan terjadinya false set.

2. Quick set (Flash set)

Yaitu gejala terjadinya pengembangan kekakuan yang terlalu cepat dari adonan semen, mortar atau beton dengan disertai pelepasan panas yang cukup besar. Kekakuan ini tidak dapat dihilangkan dengan pengadukan lebih lanjut tanpa penambahan air. Quick set dapat disebabkan karena terlalu tingginya kadar C_3A dalam semen relatif terhadap kadar $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, tetapi dapat juga gejala ini disebabkan oleh terlalu halusnya partikel semen dan tingginya kadar C_3S .

2.2.7. Type Semen Portland

Menurut SNI 15 – 2049 - 1994 semen portland diklasifikasikan menjadi 5 jenis yaitu :

1. Type I : Semen portland yang digunakan untuk pekerjaan teknik sipil pada umumnya yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti disyaratkan pada jenis semen portland yang lain.
2. Type II : Semen portland yang dalam penggunaanya mempunyai ketahanan terhadap sulfat dan kalor hidrasi lebih kecil dari semen type I (kalor hidrasi sedang). Semen ini biasanya digunakan untuk pekerjaan yang bervolume besar. Kandungan C_3S -nya kurang dari 50 % dan kandungan C_3A -nya kurang dari 8 %.
3. Type III : Semen portland yang dalam penggunannya mempunyai kekuatan awal yang tinggi setelah pengikatan terjadi. Biasanya kandungan C_3S -nya maksimum.
4. Type IV : Semen portland yang dalam penggunaanya memerlukan kalor hidrasi yang rendah, hampir sama dengan type II.

5. Type V : Semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan yang tinggi terhadap sulfat. Biasanya C₃A-nya rendah.

2.3. AGREGAT

2.3.1. Pendahuluan

Menurut SKSNI T-15-1991-03 definisi agregat adalah material granular, misalnya pasir, kerikil, batu pecah dan kerak tungku besi, yang dipakai secara bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk suatu beton semen hidraulik atau adukan.

Menurut ASTM C 125 – 93 terminologi dari agregat adalah bahan berbentuk butiran seperti pasir, kerikil, pecahan kerikil atau batu pecah yang digunakan bersama semen dan air untuk membentuk beton. Fungsinya adalah sebagai material pengisi dan kandungan normal agregat dalam beton berkisar antara 70% - 80% dari total volume beton (J.M. Illston, (1979)).

Perhatian khusus harus diberikan pada agregat, karena kandungan agregat dalam beton jumlahnya cukup besar dan mempengaruhi sifat dari beton. Misalnya ketahanan beton terhadap pengaruh pembekuan - pencairan, keadaan basah – kering, pemanasan – pendinginan dan abrasi – kerusakan akibat reaksi kimia (Portland Cement Association, **Principles of Quality Concrete**, (1975)). Material yang digunakan sebagai agregat banyak jenisnya, diantaranya adalah pasir, kerikil, batu pecah, blast furnace slag, batu tulis (shale), diatomite, barite (mengandung BaSO₄), hemamite (mengandung besi juga mengandung Fe₂O₄).

Menurut Troxell dan Davis, (1956) agregat harus mempunyai 3 fungsi pokok, yaitu :

- Mempunyai nilai ekonomis sebagai bahan campuran beton.
- Mempunyai kemampuan menahan pembebanan, serangan abrasi, dan pengaruh cuaca.
- Mengurangi perubahan volume akibat dari setting dan proses hardening dan dari perubahan kelembaban dalam semen – air.

2.3.2. Pengelompokan Jenis Agregat Beton

Dalam teknologi beton, agregat dapat digolongkan berdasarkan beberapa kriteria :

1. Berdasarkan susunan butir atau ukuran dari butiran agregat dibagi dalam dua bagian, adapun kedua bagian tersebut adalah : (**ASTM C 125 – 93**)
 - a. Agregat halus (fine aggregate), yaitu agregat yang semua butir menembus ayakan No.4 (diameter 4.75 mm) dan tertahan ayakan No.200 (diameter 75 μm).
 - b. Agregat kasar (coarse aggregate), yaitu agregat yang semua butirannya tertinggal diatas ayakan No.4 (diameter 4.75 mm).
2. Menurut **SKSNI T-15-1991-03** perbedaan antara keduanya adalah :
 - a. Agregat halus (fine aggregate), yaitu pasir alam sebagai hasil disintegrasi "alami" batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butiran terbesar 5 mm.
 - b. Agregat kasar (coarse aggregate), yaitu kerikil alam sebagai hasil disintegrasi "alami" batuan atau berupa batu pecah yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butiran 5 – 40 mm.
3. Berdasarkan berat jenisnya :
 - a. Agregat ringan
Agregat ringan digunakan untuk membentuk beton dengan berat isi yang rendah yaitu 300 kg/m^3 – 1800 kg/m^3 . Jenis agregat ringan yang biasa dipakai dalam industri beton ringan adalah ALWA (Artificial Light Weight Aggregate). Jenis agregat tersebut berasal dar tanah liat dengan bahan pembentuk gas yang dihembuskan pada saat suhu mendekati suhu leleh (suhu sinter). Dengan menggunakan ALWA beton yang dihasilkan dapat mencapai kuat tekan maksimum 450 kg/m^2 .
 - b. Agregat normal
Merupakan jenis agregat yang biasa digunakan dalam pembuatan beton sehari-hari dengan berat isi beton 1800 kg/m^3 – 2500 kg/m^3 . Agregat yang dipakai umumnya menggunakan batuan alam yang padat dan kompak dari jenis

batuan beku, batuan endapan atau batuan metamorfosa. Untuk pembuatan beton normal biasa digunakan agregat dengan berat isi antara 2.50 kg/m^3 – 3.00 kg/m^3 sedangkan yang banyak ditemui berkisar antara 2.60 kg/m^3 – 2.70 kg/m^3 .

c. Agregat berat

Agregat jenis ini dipakai untuk membuat beton dengan berat isi yang tinggi. Jenis beton ini terutama dipakai untuk mencegah terjadinya radiasi akibat bahan radio aktif, misalnya untuk pembuatan reaktor nuklir. Untuk membuat beton dengan berat isi yang tinggi biasanya digunakan agregat dari batu barit (BaSO_4) dengan berat isi 4.15 – 4.45 ; bijih besi (batu magnetit atau limonit) dengan berat isi 4.40 – 5.00 ; butiran atau potongan besi baja dengan berat isi 6.80 – 7.60 .

Tabel 2.6. Daftar Berat Jenis Beton Dengan Berbagai Agregat

| | Jenis Agregat | Berat jenis beton kg/m^3 |
|--------|-------------------|--------------------------------------|
| Ringan | Vermiculite | 250 – 650 |
| | Perlite | 300 – 800 |
| | Pumice | 800 – 1300 |
| Biasa | Terak dpr. tinggi | 1450 – 1900 |
| | Kerikil alam | 1900 – 2400 |
| Berat | Barit | 3350 – 3700 |
| | Hemalit | 3850 – 4150 |
| | Magnetit | 3350 – 4150 |
| | Butiran baja | 4650 – 6100 |

4. Berdasarkan proses produksinya :
 - a. Agregat alam (natural aggregate)
 - b. Agregat buatan (artificially aggregate)
5. Berdasarkan kandungan mineral (ASTM C 294, (1975)) :
 - a. Group silica mineral
 - b. Carbonate minerals
 - c. Iron sulphide minerals
 - d. Clay minerals
 - e. Micaceous minerals

- f. Sulfat minerals
- g. Ferromagnesian minerals
- h. Iron oxides

2.3.3. Sifat-sifat Agregat

2.3.3.1. Bentuk Butir dan Keadaan Permukaan

Agregat beton butirannya mempunyai bentuk-bentuk tertentu. Kondisi permukaan agregat beton akan mempengaruhi sifat ikatan antara pasta semen portland dan permukaan agregat. Ikatan antara pasta semen portland dan agregat merupakan hal yang sangat penting terhadap kekuatan beton terutama kekuatan lenturnya. Agregat yang mempunyai permukaan kasar atau berpori akan menghasilkan ikatan yang lebih baik dari agregat yang mempunyai permukaan licin. Berdasarkan BS 812 : Part 1, 1975 klasifikasi bentuk agregat yaitu :

Tabel 2.7. Klasifikasi Bentuk Butiran Agregat

| Klasifikasi | Uraian | Contoh |
|------------------------|--|--|
| Bulat | Bentuk bulat akibat gesekan atau pengausan air | kerikil |
| Bentuk tidak beraturan | disebabkan oleh alam, sebagian terbentuk karena gesekan, bentuk sisinya bulat | kebanyakan kerikil yang dapat dijumpai |
| Bersudut | sisi-sisinya jelas terbentuk pada perpotongan bidang datar yang permukaannya kasar | agregat sebagai hasil pemecahan |
| Pipih | tebal bahan kecil dibandingkan dengan kedua dimensi lainnya | |
| Memanjang | biasanya bersudut panjang bahan jauh lebih besar dibandingkan dengan kedua dimensi lainnya | |

| | |
|---------------------|--|
| Pipih dan memanjang | panjang bahan jauh lebih besar dari lebarnya dan lebar lebih jauh lebih besar dibanding tebalnya |
|---------------------|--|

2.3.3.2. Kekuatan Agregat

Kekuatan dan elastisitas agregat tergantung dari jenis batuan agregat, susunan mineral, tekstur butiran atau kristalnya. Kekuatan dari agregat beton sangat berpengaruh terhadap beton yang dibentuknya. Agregat yang kuat dan baik juga akan menghasilkan kekuatan beton yang baik. Kekuatan agregat akan diperoleh dengan pengujian langsung terhadap sejumlah benda uji.

Untuk melakukan pengujian terhadap kekuatan agregat beberapa negara mengeluarkan standard uji :

- British Standard BS 812-1976** untuk agregat kasar, dengan memakai cara pengujian kekuatan hancur (*Crushing Value*), nilai kekuatan pukul (*Impact Value*), dan *Ten Percent Value*.
- ASTM Standard C-131 and C-535** memakai pengujian geseran dengan mesin aus Los Angeles. Ketahanan ausnya dinyatakan dengan prosentase bagian yang aus dari agregat kasar. Cara tersebut dianut di Indonesia dalam SII 0087-75.

Teknik pengujian **Standard Industri Indonesia No.78/SI/1975** untuk pengujian agregat halus dilakukan dengan cara penggilingan terhadap agregat halus yaitu kekerasannya dibandingkan antara bagian aus yang menembus ayakan 0,3 mm dengan kekerasan pasir Kwarsa atau pasir Bangka. Nilai kekerasan pasir dinyatakan dengan indeks.

2.3.3.3. Berat Jenis dan Berat Isi Agregat

Berat jenis agregat dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- Berat jenis absolut

Merupakan perbandingan antara berat suatu massa yang masif dengan berat air murni pada volume yang sama pada suhu tertentu. Volume dalam berat jenis absolut harus massif sehingga tidak terdapat pori sama sekali didalamnya. Untuk menentukan berat jenis ini agregat harus

dibuat dalam bentuk tepung, sehingga pori-pori didalamnya dapat dihilangkan.

b. Berat jenis nyata

Merupakan berat jenis absolut akan tetapi didalam volume benda termasuk volume pori-pori yang tidak tembus air dan tidak termasuk volume pori-pori kapiler yang dapat terisi air.

c. Berat jenis pada keadaan jenuh kering permukaan (*s.s.d condition*)

Merupakan perbandingan berat suatu benda pada keadaan jenuh kering muka dengan berat air murni pada volume yang sama pada suhu tertentu. Volume benda termasuk volume pori-pori yang tidak tertembus air sedangkan pori-pori kapiler penuh terisi air.

d. Berat jenis dalam keadaan kering

Merupakan berat jenis dalam keadaan jenuh kering permukaan tetapi dalam volume benda termasuk seluruh pori-pori yang terkandung dalam agregat.

Berat isi agregat adalah perbandingan antara berat suatu benda dengan volumenya, yang biasanya dinyatakan dalam satuan kg/liter atau kg/m³. Berat agregat yang mengisi suatu ruang dari suatu volume tertentu dinamakan isi atau *bulk density*. Karena itu untuk agregat yang mempunyai berat jenis yang sama akan mempunyai *bulk density* yang bermacam-macam.

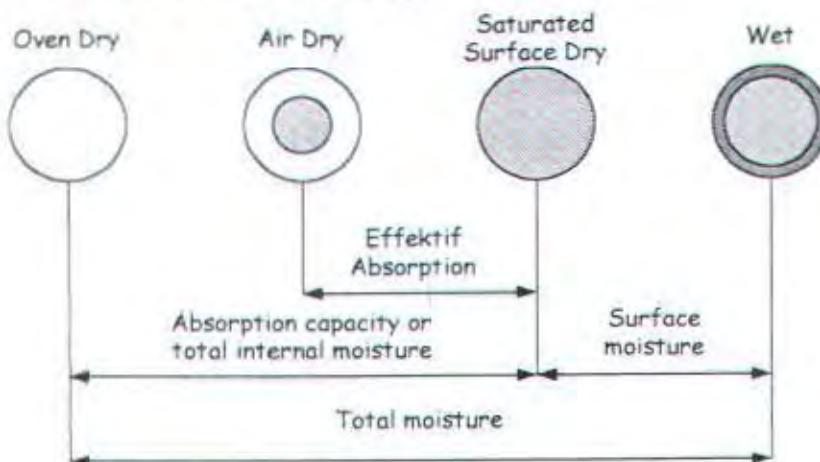
2.3.3.4. Porositas dan Daya Serap Air

Pori-pori yang terdapat dalam agregat dapat berupa rongga yang tersebar pada batuan tersebut dan berupa pori-pori kapiler. Rongga-rongga dan pori-pori yang terdapat dalam batuan tersebut terjadi waktu proses terbentuknya batuan itu. Untuk tiap-tiap batuan mempunyai kandungan rongga dan pori yang sangat bervariasi. Jumlah volume rongga dan pori yang terdapat dalam batuan disebut **porositas** dan besarnya dinyatakan dalam prosen terhadap volume batuannya.

Pori yang terdapat dalam agregat mempunyai sifat ada yang dapat ditembus oleh air ada pula yang tidak dapat ditembus oleh air. Kemampuan dari air untuk menembus pori-pori tersebut tergantung dari dimensi dari pori-pori dan kontinuitasnya porinya. Adanya rongga dan pori sangat

erat hubungannya dengan sifat-sifat agregat seperti : berat jenis, daya serap air, modulus elastisitas, ketahanan aus dan stabilitas beton yang tersusun dari agregat tersebut terhadap zat kimia.

Gambaran dari daya serap agregat terhadap air yaitu :



Gambar 2.2. Kandungan Air Dalam Agregat

Kondisi dari keempat keadaan tersebut adalah sebagai berikut :

- Kondisi kering sempurna (Oven Dry)

Merupakan kondisi rongga dan pori agregat tersebut sama sekali tidak terdapat air. Keadaan ini terjadi bila agregat dipanaskan pada suhu $100^{\circ}\text{C} - 110^{\circ}\text{C}$.

- Kondisi kering udara (Air Dry)

Merupakan kondisi agregat tidak mengandung air permukaan, yang ada air yang terperangkap dalam pori-pori agregat dan tidak bisa teruapkan karena suhu lingkungannya.

- Kondisi jenuh kering muka (Saturated Surface Dry)

Merupakan kondisi agregat tidak mengandung air bebas, tetapi seluruh rongga dan pori yang ada pada agregat tersebut terisi penuh oleh air.

- Kondisi basah (Wet or Damp)

Merupakan kondisi seluruh rongga dan pori agregat terisi penuh oleh air. Agregat mempunyai selaput air bebas yang ada pada permukaan agregat tersebut.

2.3.3.5. Sifat Kekal Agregat

Sifat kekal agregat merupakan kemampuan agregat untuk menahan terjadinya perubahan volume yang berlebihan akibat adanya perubahan kondisi fisik. Kondisi fisik yang dapat mempengaruhi perubahan volume butiran agregat ialah kondisi suhu antara beku dan mencair, perubahan panas pada suhu diatas titik beku, basah, dan mengering yang silih berganti. Agregat disebut kekal apabila perubahan volumenya akibat perubahan kondisi fisik tidak menimbulkan kerusakan pada beton yang dibuat dari agregat tersebut. Kerusakan yang terjadi dapat berupa kerutan-kerutan setempat, retak-retak pada permukaan, pecah-pecah yang agak dalam, sampai kepada kerusakan yang berbahaya bagi konstruksi. Sifat tidak kekal ditimbulkan oleh adanya lempung dan tanah liat atau mineral sejenisnya yang terdapat antara lapisan-lapisan batuan atau mengisi sebagian volume butiran agregat. Pori-pori yang terdapat dalam agregat dapat diresapi air akibatnya agregat dapat berkondisi basah maupun kering karena pengaruh cuaca yang dapat merusak agregat.

2.3.3.6. Reaksi Alkali Agregat

Reaksi alkali agregat adalah reaksi antara alkali (Na_2O dan K_2O) dalam semen portland atau dari luar dengan silika aktif yang terkandung dalam agregat. Silika yang reaktif adalah yang berbentuk opal yang amorf, chelcedony, dan trydimyte. Reaksi terjadi antara alkali hidroksida yang berasal dari alkali dalam semen portland dengan silika aktif dalam agregat, membentuk alkali silika gel dipermukaan agregat. Gel ini bersifat mengikat air lalu mengembang volumenya. Karena agregat terselimuti oleh pasta semen, maka terjadilah membesarnya volume gel yang memecahkan dan merusak pasta semen portland. Membesarnya volume gel terjadi oleh tekanan hidrolik osmose dan mengembangnya zat padat hasil reaksi antara alkali dan silika aktif. Reaksi yang menyebabkan berkembangnya volume beton tersebut berjalan lambat sekali. Reaksi tersebut hanya terjadi apabila beton berada dilingkungan basah karena tanpa adanya air reaksi tersebut tidak berlangsung (A.M. Neville, *Properties of Concrete*, (1981)).

2.3.3.7. Sifat-sifat Thermal Agregat

Sifat thermal agregat yang berpengaruh terhadap sifat-sifat beton yaitu

- Koefisien pengembangan linier
- Panas jenis
- Daya hantar panas

Pengaruh panas jenis dan daya hantar panas sangat penting untuk beton massa dan beton untuk isolasi panas. Sifat thermal pengembangan linier dari agregat akan sangat berpengaruh terhadap beton yang mengalami suhu yang berubah-ubah. Agregat yang baik ialah yang mempunyai sifat pengembangan linier yang sama dengan pasta semen. Jika pengembangan thermal agregat berbeda dengan pasta semen maka akan menyebabkan terjadinya gesekan antara pasta semen dan permukaan agregat sehingga merusak ikatan pasta semen dengan agregat yang menyebabkan beton retak. Besarnya koefisien pengembangan linier agregat tergantung dari jenis batuannya yang dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2.8. Koefisien Pengembangan Linier Agregat Batu Alam

| Rock Type | Thermal coefficient of linear expansion | |
|-------------------------|---|----------------------------------|
| | 10^{-6} per $^{\circ}\text{C}$ | 10^{-6} per $^{\circ}\text{F}$ |
| Granite | 1.8 to 11.9 | 1.0 to 6.6 |
| Diorite, andesite | 4.1 to 10.3 | 2.3 to 5.7 |
| Gabbro, basalt, diabase | 3.6 to 9.7 | 2.0 to 5.4 |
| Sandstone | 4.3 to 13.9 | 2.4 to 7.7 |
| Dolomite | 6.7 to 8.6 | 3.7 to 4.8 |
| Limestone | 0.9 to 12.2 | 0.5 to 6.8 |
| Chert | 7.4 to 13.1 | 4.1 to 7.3 |
| Marble | 1.1 to 16.0 | 0.6 to 8.9 |

2.3.4. Susunan Butir Agregat

Susunan besar butir agregat berpengaruh terhadap sifat baik tidaknya beton dikerjakan dan pemedatan beton segar. Beberapa standard mensyaratkan dan menetapkan batas-batas susunan besar butir untuk agregat beton guna mendapatkan mutu beton yang baik dan ekonomis. Gradasi yang baik akan memberikan tingkat pemedatan yang optimal untuk

mendapatkan density dan kekuatan beton yang maksimum. Menurut "density theory Fuller's" beton akan mempunyai kepadatan yang baik bila menggunakan gradasi agregat yang berbentuk parabolik atau bagian parabolik.

Beberapa mutu dan syarat untuk agregat halus dan kasar pada beton antara lain berdasarkan :

a. Ketentuan dan persyaratan SII 0052 – 80

"Mutu dan cara uji agregat beton". Bila tidak tercakup dalam SII 0052 – 80 maka "Specification for Concrete Aggregates".

b. Ketentuan dan persyaratan ASTM C 33 - 93

1. **Agregat Halus**

Pengetahuan tentang properties agregat halus sangat penting untuk bisa mendapatkan beton sesuai mutu yang diinginkan dengan harga yang lebih ekonomis.

Syarat mutu agregat halus menurut ASTM C 33 - 93 :

- Agregat halus tidak boleh mengandung bagian yang lolos lebih dari 45 % pada suatu ukuran ayakan yang tertahan pada ayakan berikutnya. Modulus kehalusannya tidak kurang dari 2,3 dan tidak lebih dari 3,1.
- Kadar lumpur atau bagian butir yang lebih kecil dari 75 mikron (ayakan no. 200) dalam % berat, maksimum :
 - untuk beton yang mengalami abrasi 3 %
 - untuk jenis beton lainnya 5 %
- Kadar gumpalan tanah liat dan partikel yang mudah direpihkan, maksimum 3 %.
- Kandungan arang dan lignit
 - Bila tampak permukaan beton dipandang penting, kandungan maksimum 0,5 %.
 - Untuk beton jenis lainnya, maksimum 1,0 %.
- Agregat halus bebas dari pengotoran zat organik yang merugikan beton. Bila diuji dengan larutan Na-sulfat dan dibandingkan dengan warna standard/pembanding, tidak berwarna lebih tua dari warna

standar. Jika berwarna lebih tua maka agregat halus itu harus ditolak, kecuali apabila :

- Warna lebih tua timbul oleh adanya sedikit arang, lignit atau yang sejenisnya.
- Diuji dengan cara melakukan percobaan perbandingan kuat tekan mortar yang memakai agregat tersebut terhadap kuat tekan mortar yang memakai pasir standar silika, menunjukkan nilai kuat tekan mortar tidak kurang dari 95 % kuat tekan mortar memakai pasir standar. Uji kuat tekan mortar harus dilakukan sesuai cara **ASTM C 87**.
- Agregat halus yang akan digunakan untuk pembuat beton yang akan mengalami basah dan lembab terus menerus atau yang akan berhubungan dengan tanah basah, tidak boleh mengandung bahan yang bersifat reaktif terhadap alkali semen, yang jumlahnya cukup dapat menimbulkan pemuaian yang berlebihan didalam mortar atau beton. Agregat yang reaktif terhadap alkali boleh dipakai untuk membuat beton dengan semen yang kadar alkalinnya dihitung setara dengan Natrium Oksida ($\text{Na}_2\text{O} + 0.6 \text{K}_2\text{O}$) tidak lebih dari 0.6 %, atau dengan penambahan bahan yang dapat mencegah terjadinya pemuaian yang membahayakan oleh karena reaksi alkali agregat tersebut.
- Sifat kekal, diuji dengan larutan garam sulfat :
 - Jika dipakai natrium sulfat, bagian hancur maksimum 10 %.
 - Jika dipakai magnesium sulfat, bagian hancur maksimum 15 %.

- Susunan besar butir (grading)

Agregat halus harus mempunyai susunan besar butir dalam batas-batas berikut :

Tabel 2.9. Susunan Besar Butir (grading) Agregat Halus

Menurut BS dan ASTM C 33

| Ukuran lubang ayakan (mm) | Percentase lolos kumulatif | | | | | Menurut ASTM C 33 - 93 |
|---------------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|----------------------------|---------------------------|
| | Menurut BS 882 : 1965 | | | | Menurut AST M C 33 - 93 | |
| | Zone 1 | Zone 2 | Zone 3 | Zone 4 | | |
| 9.5 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 4.75 | 90-100 | 90-100 | 95-100 | 95-100 | 95 – 100 | 95 – 100 |
| 2.36 | 60-95 | 75-100 | 85-100 | 95-100 | 80 – 100 | 80 – 100 |
| 1.18 | 30-70 | 55-90 | 75-100 | 90-100 | 50 – 85 | 50 – 85 |
| 0.60 | 25-34 | 35-59 | 60-79 | 80-100 | 25 – 60 | 25 – 60 |
| 0.30 | 5-20 | 8-30 | 12-40 | 15-50 | 10 – 30 | 10 – 30 |
| 15 | 0-10 | 0-10 | 0-10 | 0-15 | 2 – 10 | 2 – 10 |

Syarat mutu agregat halus menurut SII 0052 - 80 :

- Susunan besar butir mempunyai modulus kehalusan antara 1,5 sampai 3,8.
- Kadar lumpur atau bagian butir lebih kecil dari 70 mikron maksimum 5 %.
- Kadar zat organik ditentukan dengan larutan Natrium Sulfat 3 %, jika dibandingkan dengan warna standard atau pembanding tidak lebih tua dari warna standard.
- Kekerasan butir jika dibandingkan dengan kekerasan butir pasir pembanding yang berasal dari pasir kwarsa Bangka, memberikan angka hasil bagi tidak lebih besar dari 2,2.
- Sifat kekal, diuji dengan larutan jenuh garam sulfat :
 - Jika dipakai natrium sulfat, bagian yang hancur maksimum 10 %.
 - Jika dipakai magnesium sulfat, bagian yang hancur maksimum 15 %.

2. Agregat Kasar

Secara umum, agregat kasar dapat terdiri dari kerikil alam, kerikil alam yang dipecah, batu yang dipecah, terak tanur yang telah mendingin, atau beton semen hidrolik yang dipecah atau kombinasi dari material-material tersebut.

Syarat mutu agregat kasar menurut ASTM C 33 - 93 :

- Agregat kasar yang akan dipergunakan untuk membuat beton yang akan mengalami basah dan lembab terus menerus atau yang akan berhubungan dengan tanah basah, tidak boleh mengandung bahan yang bersifat reaktif terhadap alkali dalam semen, yang jumlahnya cukup dapat menimbulkan pemuaian yang berlebihan didalam mortar atau beton. Agregat yang reaktif terdapat alkali boleh dipakai untuk membuat beton dengan semen yang kadar alkalinya dihitung sebagai setara Natrium Oksida ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$) tidak lebih dari 0,60 % atau dengan penambahan bahan yang dapat mencegah terjadinya pemuaian yang membahayakan oleh karena reaksi alkali agregat tersebut.
- Susunan besar butir (Grading)

Tabel 2.10. Gradasi Agregat Kasar Menurut ASTM C 33

| Ukuran lubang ayakan (mm) | Percentase lolos kumulatif | | |
|---------------------------|----------------------------|----------------|---------------|
| | Ukuran butir nominal | | |
| | 38,1 – 4,76 mm | 19,0 – 4,76 mm | 9,6 – 4,76 mm |
| 76,2 | 100 | - | - |
| 38,1 | 95 – 100 | 100 | - |
| 19,0 | 30 – 70 | 95 – 100 | 100 |
| 9,52 | 10 – 35 | 25 – 55 | 50 – 85 |
| 4,76 | 0 – 5 | 0 – 10 | 0 – 10 |

Tabel 2.11. Gradasi Agregat Kasar Menurut BS

| Ukuran lubang ayakan (mm) | Percentase lolos kumulatif | |
|------------------------------|----------------------------|---------------|
| | 38,1 mm (1 in) | 19,0 (3/4 in) |
| 76,2 | 100 | - |
| 38,1 | 95 – 100 | 100 |
| 19,0 | 45 – 75 | 95 – 100 |
| 4,76 | 25 – 45 | 30 – 50 |
| 0,60 | 8 – 30 | 10 – 35 |
| 0,15 | 0 – 6 | 0 – 6 |

- Kadar bahan atau partikel yang berpengaruh buruk pada beton (deleterious) adalah seperti tertera pada tabel 2.12.
- Sifat fisika yang mencakup kekerasan butir diuji dengan bejana abrasi Los Angeles dan sifat kekal (soundness) adalah seperti tertera pada tabel 2.12.

Tabel 2.12. Bahan-bahan yang berpengaruh buruk terhadap beton ASTM C33 - 93

TABLE 3 Limits for Deleterious Substances and Physical Property Requirements of Coarse Aggregate for Concrete

Fig. 1 for the location of the weathering regions and Note 10 for guidance in using the map. The weathering regions are defined as follows:

(S) Severe Weathering Region—A cold climate where concrete is exposed to deicing chemicals or other aggressive agents, or

where concrete may become saturated by continued contact with moisture or free water prior to repeated freezing and thawing.

(M) Moderate Weathering Region—A climate where occasional freezing is expected, but where concrete in outdoor service will not

be continually exposed to freezing and thawing in the presence of moisture or to deicing chemicals.

(N) Negligible Weathering Region—A climate where concrete is rarely exposed to freezing in the presence of moisture.

| Type or Location of Concrete Construction | Maximum Allowable, % | | | | | | |
|---|----------------------------------|---|---|---|------------------|-----------------------|---|
| | Clay Lumps and Finable Particles | Chert ^c (Less Than 2.40 sp gr SSD) | Sum of Clay Lumps, Finable Particles, and Chert (Less Than 2.40 sp gr SSD) ^c | Material Finer Than No. 200 (75-μm) Sieve | Coal and Lignite | Abrasion ^d | Magnesium Sulfate Soundness (5 cycles) ^e |
| Severe Weathering Regions | | | | | | | |
| Footings, foundations, columns and beams not exposed to the weather, interior floor slabs to be given coverings | 10.0 | ... | ... | 1.0 ^b | 1.0 | 50 | --- |
| Interior floors without coverings | 5.0 | ... | ... | 1.0 ^b | 0.5 | 50 | --- |
| Foundation walls above grade, retaining walls, abutments, piers, girders, and beams exposed to the weather | 5.0 | 5.0 | 7.0 | 1.0 ^b | 0.5 | 50 | 15 |
| Pavements, bridge decks, driveways and curbs, walks, patios, garage floors, exposed floors and porches, or waterfront structures, subject to frequent wetting | 3.0 | 5.0 | 5.0 | 1.0 ^b | 0.5 | 50 | 15 |
| Exposed architectural concrete | 2.0 | 3.0 | 3.0 | 1.0 ^b | 0.5 | 50 | 15 |
| Moderate Weathering Regions | | | | | | | |
| Footings, foundations, columns, and beams not exposed to the weather, interior floor slabs to be given coverings | 10.0 | ... | ... | 1.0 ^b | 1.0 | 50 | --- |
| Interior floors without coverings | 5.0 | ... | ... | 1.0 ^b | 0.5 | 50 | --- |
| Foundation walls above grade, retaining walls, abutments, piers, girders, and beams exposed to the weather | 5.0 | 8.0 | 10.0 | 1.0 ^b | 0.5 | 50 | 15 |
| Pavements, bridge decks, driveways and curbs, walks, patios, garage floors, exposed floors and porches, or waterfront structures subject to frequent wetting | 5.0 | 5.0 | 7.0 | 1.0 ^b | 0.5 | 50 | 15 |
| Exposed architectural concrete | 3.0 | 3.0 | 5.0 | 1.0 ^b | 0.5 | 50 | 15 |
| Negligible Weathering Regions | | | | | | | |
| Slabs subject to traffic abrasion, bridge decks, floors, sidewalks, pavements | 5.0 | ... | ... | 1.0 ^b | 0.5 | 50 | --- |
| All other classes of concrete | 10.0 | ... | ... | 1.0 ^b | 1.0 | 50 | --- |

^aCool-blast-furnace slag is excluded from the abrasion requirements. The rodded or jiggled unit weight of crushed air-cooled blast-furnace slag shall be 100 lb/m³ (1120 kg/m³). The grading of slag used in the unit weight test shall conform to the grading to be used in the concrete. Abrasion loss of gravel, crushed stone shall be determined on the test size or sizes most nearly corresponding to the grading or gradings to be used in the concrete. When more than one to be used, the limit on abrasion loss shall apply to each.

^bAllowable limits for soundness shall be 12 % if sodium sulfate is used.

^cLimitations apply only to aggregates in which chert appears as an impurity. They are not applicable to gravels that are predominantly chert. Limitations on such aggregates must be based on service records in the environment in which they are used.

^dLimitation may be increased under either of the following conditions: (1) if the material finer than the No. 200 (75-μm) sieve is essentially free of clay or shale the percentage limit may be increased to 1.5; or (2) if the source of the fine aggregate to be used in the concrete is known to contain less than the specified maximum amount of sand in the concrete as a percent of total aggregate, $T =$ the Table 1 limit for the amount permitted in the fine aggregate, and $A =$ the actual amount in aggregate. (This provides a weighted calculation designed to limit the maximum mass of material passing the No. 200 (75-μm) sieve in the concrete to that which would result if both the fine and coarse aggregate were supplied at the maximum tabulated percentage for each of these ingredients.)

Syarat mutu agregat kasar menurut SII 0052 - 80 :

Tabel 2.13. Syarat Mutu Menurut SII 0052 - 80

| Uraian | Agregat Kasar |
|--|--------------------------------|
| 1. Modulus kehalusan | 6.0 – 7.1 |
| 2. Kadar Lumpur | 1 % |
| 3.a. Kadar zat organik ditentukan dengan larutan sulfat 3 % | - |
| 3.b. Kadar yang diuji dengan goresan batang tembaga | 5 % |
| 4.a Kekerasan batu dibanding dengan pasir bangka | - |
| 4.b. Kekerasan Los Angeles | lihat Tabel 2.11 |
| 5. Sifat kekal benda diuji dengan larutan jenuh garam sulfat | |
| a. Natrium Sulfat | < 12 % |
| b. Magnesium Sulfat | < 18 % |
| 6. Tidak bersifat reaktif terhadap alkali, bila semen $\text{Na}_2\text{O} > 0.6 \%$ | $\text{Na}_2\text{O} < 0.6 \%$ |
| 7. Batuan pipih | < 20 % berat |
| 8. Susunan grading | BS 882 – 1983 |

Tabel 2.14. Syarat Kekerasan Agregat

| Klas dan Mutu Beton 1971* | Kekerasan dengan bejana Rudolf bagian hancur menembus ayakan 2 mm maks. % | | Kekerasan dengan bejana geser Los Angeles bagian hancur tembus ayakan 1,7 mm maks. % |
|--|--|-----------------------------|---|
| | Fraksi butir 19 – 30 mm | Fraksi butir 9,5 – 19 mm | |
| Beton klas I dan mutu BO serta mutu B | 22 – 30 | 24 – 32 | 40 – 50 |
| Beton klas II atau beton mutu K ₁₂₅ , K ₁₇₅ , K ₂₂₅ | 14 – 22 | 16 – 24 | 27 – 40 |
| Beton klas III dan atau beton mutu diatas K ₂₂₅ atau beton pratekan | < 14 | < 16 | < 27 |

* Klas mutu perlu disesuaikan PB 1989

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan agregat adalah :

1. Ukuran agregat

Ukuran bagian konstruksi tidak boleh kurang dari 4 kali ukuran agregat maksimum dan tidak lebih besar dari 1/5 jarak terkecil antara bidang-bidang samping acuan. Selain itu ukuran agregat maksimum tidak boleh lebih besar dari 3/4 kali jarak bersih minimum diantara tulangan dan tidak lebih besar dari 1/3 kali tebal plat dan lapisan penutup beton harus lebih tebal dari ukuran maksimum agregat.

2. Bahan pengotor

Agregat tidak boleh mengandung bahan-bahan pengotor yang pada akhirnya akan menyulitkan pembuatan dan pengecoran beton, menghasilkan beton yang tidak awet dan permukaannya jelek serta mengurangi kuat tekan. Bahan-bahan yang mungkin mengotori agregat adalah :

a. Lempung dan Lanau

Efeknya adalah menutupi permukaan agregat sehingga ikatan antara pasta semen dan agregat berkurang. Sifat absorbsinya yang tinggi akan menambah kebutuhan air yang pada akhirnya mengurangi kekuatan dan keawetan beton serta sensitif terhadap penyusutan dan pemuaian.

b. Arang Batu, Fragmen-Fragmen Kayu, dan Gips

Arang batu dan fragmen kayu akan mengurangi kekuatan tekan beton dan permukaan beton menjadi kotor dan jelek. Sedang gips keberadaannya dapat berupa butiran-butiran kasar dan halus. Butiran gips yang kasar tidak begitu membahayakan beton karena bereaksi sempurna dengan semen dan akhirnya akan mengembang. Standar semen portland membatasi pemakaian gips minimal 5 %.

c. Bahan Organik

Bahan organik dapat berupa bahan-bahan yang telah membusuk seperti humus atau tanah yang mengandung organik. Efeknya akan negatif terhadap perkembangan kekuatan awal, tetapi setelah jangka waktu yang lama kekuatan beton akan bertambah lagi (pulih kembali). Sedang garam organik dapat berupa garam sulfat. Efeknya tidak berpengaruh pada perkembangan kekuatan tekan awal tetapi pada umur tua beton.

3. Kekerasan

Memiliki kekerasan yang cukup agar tahan terhadap pengausan, pemecahan degradasi (penurunan mutu) dan disintegrasi (penguraian) saat mengalami gerakan-gerakan yang keras dalam mixer serta menerima gesekan pada saat pengecoran dan pemasatan. Kekerasan agregat diuji dengan menggunakan Los Angeles Machine Test.

4. Kemulusan

Agregat yang mulus secara fisik tidak akan mengalami perubahan volume yang besar akibat pemanasan dan pendinginan atau pembahasan dan pengeringan. Partikel batuan yang secara fisik bersifat lunak akan memiliki daya absorpsi yang besar, mudah pecah serta mudah menyusut/mengembang akibat pengaruh air, sehingga bila terjadi perubahan cuaca permukaannya akan bergelembung yang bila pecah akan meninggalkan lubang pada permukaan beton. Kemulusan agregat dipengaruhi oleh porositasnya, yaitu kontinuitas pori-pori dan jumlahnya. Akibatnya mudah kemasukan air dan larutan-larutan agresif, sehingga kuat tekan beton berkurang, mudah aus, modulus elastisitas berkurang dan terjadi penyusutan yang besar.

5. Bentuk Butiran

Suatu rangkaian percobaan telah membuktikan bahwa beton dengan agregat kasar berbentuk bulat akan mempunyai

rongga udara yang lebih sedikit dibandingkan beton dari agregat kasar yang bersudut. Dengan demikian dibutuhkan jauh lebih banyak mortar untuk beton dengan agregat yang bersudut daripada yang beragregat bulat. Dikenal beberapa jenis bentuk butiran, seperti bulat, tidak beraturan, bersudut, pipih, memanjang serta pipih dan memanjang.

2.3.5. Gradasi Agregat Kasar dan Halus

Susunan gradasi gabungan merupakan hal yang sangat penting. Susunan gradasi agregat tersebut akan menentukan sifat dari beton, yaitu kemudahan pekerjaan, ekonomis dari campuran beton. Gradasi agregat terutama agregat halus sangat besar perannya dalam membuat beton yang bermutu, karena gradasi agregat akan berpengaruh terhadap beberapa sifat beton :

1. Terhadap beton segar

- Mempengaruhi kelacakan (workability)
- Mempengaruhi sifat kohesif
- Mempengaruhi jumlah air pencampur dan semen portland yang diperlukan untuk suatu campuran beton.
- Mempengaruhi pengecoran dan pemanasan.
- Mempengaruhi finishing dan keadaan permukaan.
- Kontrol terhadap pemisahan butir (segregasi) dan terpisahnya air kepermukaan beton (bleeding).

2. Terhadap beton keras

Bila beton keras sukar dipadatkan, maka akan terjadi segregasi dan bleeding, akibat hal tersebut akan menghasilkan beton keras yang porous, tidak kedap air, berongga atau cacat-cacat yang dapat mengakibatkan kekuatan dan ketahanan beton menjadi berkurang (**Sumardi K., (1987)**).

Gradasi agregat dapat mempengaruhi hal-hal berikut :

- Jumlah pemakajian air
- Bleeding
- Pengecoran beton
- Pemanasan beton

- Penyelesaian beton
- Dan sifat-sifat beton yang sudah mengeras

Gradasi yang baik akan dapat menghasilkan density maksimum dan minimum voids (porositas) dan minimum luas permukaan agregat. Dalam pelaksanaan sedapat mungkin grading ini dipertahankan konstan, karena ketidakseragaman grading akan mengakibatkan variasi kekuatan yang cukup besar. Cara penggabungan agregat ada beberapa cara antara lain :

- Cara Grafis
- Cara Matematis
- Cara Numerik

Pembahasan dalam laporan kami hanya menyangkut metode penggabungan agregat kasar dan halus dengan cara numeric. Untuk menggabungkan dua jenis agregat dapat digunakan cara numerik dengan tahapan sebagai berikut :

- a. Misal kita akan menggabungkan dua macam agregat halus (pasir), dimana pasir I = Y (p1) terlalu halus, termasuk zone 4 dan pasir II = Y (p2) terlalu kasar, termasuk zone 1. Dalam segala penggabungan pasir sebaiknya menghasilkan pasir yang tingkat kehalusannya termasuk zone 2 (**Prof. Ir. Rachmat P., MSc, (1997)**).
- b. Dalam contoh ini, agar lengkung gradasi gabungan melalui titik yang menunjukkan 45 % dari bahan agregat halus lewat saringan 0.6 mm, dapat diterima. Prosentase-prosentase dikehendaki pasir I dan pasir II dapat dihitung sebagai berikut :

$$Y = Yp1 \times \frac{x}{100} + Yp2 \times \frac{100-x}{100}$$

$$45 = Yp1 \times \frac{x}{100} + Yp2 \times \frac{100-x}{100}, \text{ dimana } x \text{ adalah persentase pasir}$$

- c. Dengan memasukkan harga-harga $Yp1 = 85$, sesuai dengan 85 % dari pasir I dan yang lewat saringan 0.6 mm, $Yp2 = 10$, sesuai dengan 10 % dari pasir II lewat saringan 0.6 mm dan akan diperoleh :

$$45 = 85 \times \frac{x}{100} + 10 \times \frac{100-x}{100}$$

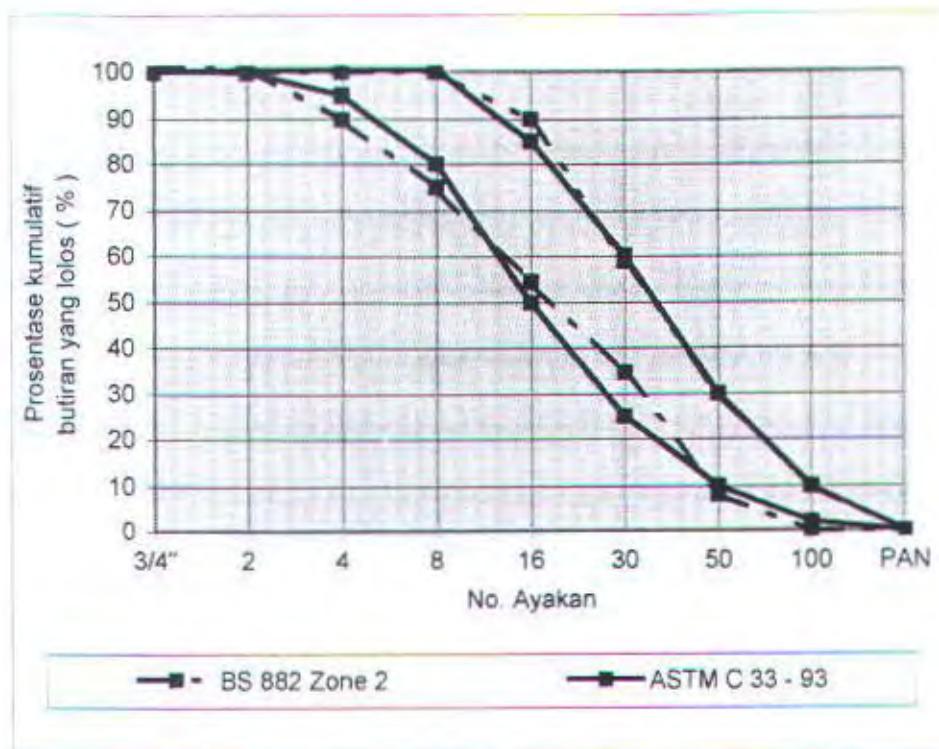
$$x = 47\%$$

Jadi diperlukan pasir 1 = 47 % Yp1, dan (100-47)% Yp2 agar didapat lengkung gradasi gabungan melewati sebuah titik pada diagram yang sesuai dengan 45 % dari bahan agregat gabungan yang lewat saringan 0.6 mm.

Tabel 2.15. Perhitungan Agregat Gabungan

| Ukuran saringan | Pasir | Pasir | Pasir gabungan Yp1p2 | | | Pasir gabungan Yp1p2 | | |
|-----------------|-------|-------|----------------------|---------|-------|----------------------|---------|-------|
| | p1 | p2 | 47% Yp1 + 53% Yp2 | | | 36% Yp1 + 64% Yp2 | | |
| | (%) | (%) | lolos | | | lolos | | |
| | Yp1 | Yp2 | 47%*Yp1 | 53%*Yp2 | Yp1p2 | 36%*Yp1 | 64%*Yp2 | Yp1p2 |
| 9.6 | 100 | 100 | 47 | 53 | 100 | 36 | 64 | 100 |
| 4.8 | 100 | 100 | 47 | 53 | 100 | 36 | 64 | 100 |
| 2.4 | 100 | 62 | 47 | 33 | 80 | 3 | 40 | 76 |
| 1.2 | 100 | 30 | 47 | 16 | 63 | 36 | 19 | 55 |
| 0.6 | 85 | 10 | 40 | 5 | 45 | 31 | 6 | 37 |
| 0.3 | 60 | 0 | 27 | 0 | 27 | 22 | 0 | 22 |
| 0.15 | 30 | 0 | 14 | 0 | 14 | 11 | 0 | 11 |
| < 0.15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Sangat sulit sekali memperoleh agregat alam yang mempunyai susunan butir sesuai dengan yang diharapkan untuk pembuatan beton. Mungkin saja pasir yang kasar perlu digabung dengan agregat kasar untuk memperoleh susunan butir agregat gabungan sesuai yang diharapkan. Tujuan utama dari penggabungan agregat adalah untuk mendapatkan gradasi akhir dari agregat yang masuk dalam standard gradasi yang dikeluarkan oleh standard tertentu. Standard yang dipakai dalam tugas akhir ini yaitu standard ASTM C 33 – 93 dan Zone 2 BS 882 : 1965.



Gambar 2.3. Daerah Gradasi ASTM C 33 – 93 dan Zone 2 BS 882 : 1965

2.3.6. Angka Kehalusan (Fineness Modulus)

Angka kehalusan (fineness modulus) adalah jumlah persen tertinggal kumulatif pada tiap-tiap ayakan dari suatu seri ayakan yang ukuran lubangnya berbanding dua kali lipat dimulai dari ayakan 0,15 mm dibagi 100 (D.A. Abrams, (1981)). Metode-metode pengabungan agregat kasar dan agregat kasar yang optimal akan didapat campuran beton yang murah dan gampang dikerjakan, sebagai pegangan batasan maksimum dan minimum modulus kehalusan dapat dilihat pada Tabel 2.16.

Tabel 2.16. Pembatasan Modulus Kehalusan

| Type Agregat | Diameter maksimum agregat (mm) | Modulus Kehalusan | |
|------------------|--------------------------------|-------------------|------|
| | | Maks. | Min. |
| Agregat halus | | 3.5 | 2.0 |
| Agregat kasar | 20 | 6.9 | 6.0 |
| | 40 | 7.5 | 6.9 |
| | 75 | 8.0 | 7.5 |
| | 150 | 8.5 | 8.0 |
| Agregat campuran | 20 | 5.1 | 4.7 |
| | 25 | 5.5 | 5.0 |
| | 32 | 5.7 | 5.2 |
| | 40 | 5.9 | 5.4 |
| | 75 | 6.3 | 5.8 |
| | 150 | 7.6 | 6.5 |

Angka kehalusan tidak bisa dijadikan acuan penilaian terhadap gradasi agregat karena dapat terjadi dengan nilai angka kehalusan yang sama gradasi agregatnya berbeda. Angka kehalusan memberikan indikasi terhadap beton yang akan dibuat dengan menggunakan agregat yang bergradasi baik, selain itu angka kehalusandapat digunakan sebagai taksiran dalam melakukan mix design beton sehingga agregat mempunyai gradasi dengan distribusi yang baik (**A.M. Neville, (1981)**).

2.4. AIR

Air adalah salah satu bahan yang penting dalam pembuatan beton yang fungsinya sebagai perekensi agar terjadi reaksi kimia antara air dengan semen untuk membasahi agregat dan untuk pelumas campuran agar mudah penggerjaannya. Semen tidak akan berfungsi tanpa bereaksi dengan air. Karena fungsinya sebagai perekensi, maka kualitas air yang digunakan harus benar-benar dikontrol dan sesuai dengan standar yang telah ditentukan (**Portland Cement Association, Principles of Quality Concrete, (1975)**). Air yang mengandung bahan-bahan pengotor akan menimbulkan efek yang serius pada setting time, perubahan warna permukaan beton, penurunan kuat tekan dan efek korosi terhadap tulangan beton (**Portland Cement Association, Principles of Quality Concrete, (1975)**).

Umumnya air tawar yang dapat diminum, baik yang diolah oleh perusahaan air minum maupun tanpa diolah dapat digunakan untuk pembuatan beton. Tujuan utama penggunaan air adalah agar terjadi hidrasi, yaitu reaksi kimia antara semen dan air yang menyebabkan campuran ini menjadi keras setelah lewat beberapa waktu tertentu. Air yang dibutuhkan agar terjadi proses hidrasi $\pm 20\%$ dari berat semen. Penambahan air ini harus dibatasi sebab dapat mengakibatkan kurangnya kekuatan. Proses hidrasi akan berlangsung dengan baik apabila dipakai air tawar serta murni.

Menurut **PBI 1971** dan **SKSNI S-04-1989 F** persyaratan air sebagai campuran beton adalah sebagai berikut:

1. Air yang dipergunakan untuk membuat beton harus bersih, tidak boleh mengandung garam, asam, alkali, minyak, zat-zat organik atau bahan-bahan lain yang dapat merusak beton atau baja tulangan. Air tawar yang dapat diminum baik diolah diperusahaan air minum maupun tanpa diolah dapat dipakai pembuatan beton.
2. Air tawar yang tidak dapat diminum, tidak boleh dipakai untuk pembuatan beton, kecuali bila telah diuji.
3. Air yang dipergunakan untuk membuat beton pratekan dan beton yang didalamnya akan tertanam logam alumunium, serta beton bertulang tidak boleh mengandung sejumlah ion klorida. Kadar ion klorida tidak boleh melebihi 500 mg per liter air. Didalam beton ion klorida dapat berasal dari air, agregat, bahan tambahan (admixture), dan biasanya total klorida dinyatakan dalam persen terhadap berat semen didalam beton. Kadar total klorida maksimum (dalam persen terhadap berat semen) yang disyaratkan adalah :
 - Beton pratekan 0,06 %.
 - Beton bertulang yang selamanya berhubungan dengan klorida 0,15 %.
 - Beton bertulang yang selamanya kering atau terlindung 1,00 %.
 - Konstruksi beton bertulang lainnya 0,30 %.

Menurut **BS 3148 : 1980** menyebutkan bahwasannya air yang digunakan dalam campuran beton tidak boleh mengandung minyak, alkali,

garam-garaman, zat-zat organik serta bahan-bahan lain yang mempunyai sifat merusak beton seperti :

1. Garam-garam Klorida dan Sulfat

Keberadaannya dapat merusak beton dan menimbulkan korosi pada logam yang tertanam dalam beton. Kadar sulfat dalam air tergantung pada kadar sulfat pada agregat dan semen karena yang menentukan adalah jumlah sulfat yang terkandung dalam beton. Kadar sulfat dalam beton tidak boleh melampaui 4 % SO_3 terhadap berat semen.

2. Zat-zat Organik, Garam anorganik, Karbonat, dan Bikarbonat

Efeknya akan berpengaruh pada lambatnya waktu pengikatan semen (setting time) dan turunnya kuat tekan beton. Air yang berwarna tua, berbau tidak sedap atau mengandung lumut perlu mendapat perhatian khusus dan harus dilakukan pengujian sebelum digunakan.

3. Kotoran dan bahan-bahan industri

Beberapa diantaranya adalah gula, garam nitrat, beberapa jenis asam, minyak, kotoran dan serat-serat sisa pembakaran. Pengaruhnya adalah dapat memperlambat seting time dan mengurangi kekuatan beton. Bahan-bahan ini dapat ditemukan pada air buangan industri atau air yang berasal dari daerah berlumpur atau tergenang. Sebelum digunakan sebaiknya air ini terlebih dahulu diuji kandungan kotorannya dan diuji terhadap waktu pengikatan semen dan kekuatan beton. Air pengaduk dianggap tidak mempunyai pengaruh berarti terhadap waktu pengikatan dan sifat pengerasan beton apabila setelah diuji menunjukkan :

- Perbedaan waktu pengikatan awal semen yang memakai air yang digunakan dan yang memakai air suling (kontrol) tidak lebih dari 30 menit.
- Kuat tekan rata-rata dari kubus beton yang memakai air yang diragukan tidak boleh kurang dari 90 % kuat tekan rata-rata kuat tekan kubus beton yang menggunakan air bersih atau air suling (kubus kontrol).

Jika ketentuan tersebut tidak dipenuhi, maka air yang diragukan tersebut jangan digunakan untuk pembuatan beton.

4. Beberapa Jenis Minyak

Beberapa jenis minyak juga kadang-kadang terkandung dalam air dan umumnya akan mengurangi kekuatan beton. Minyak mineral (hasil tambang), jika tidak tercampur oleh minyak yang berasal dari binatang atau tumbuhan-tumbuhan tidak terlalu berpengaruh pada penambahan kekuatan dibandingkan dengan jenis minyak lainnya. Namun minyak mineral dalam jumlah yang lebih besar dari 2 % berat semen akan mengurangi kekuatan beton lebih besar dari 20 % (**Portland Cement Association, Principles of Quality Concrete, (1975)**).

2.5. COPPER SLAG

2.5.1. Pendahuluan

Penelitian sebelumnya telah dilakukan oleh **Hwang dan Laiw, (1989)**, menyimpulkan bahwa pemakaian copper slag dapat menggantikan agregat halus sebanyak 60 % dengan kenaikan kuat tekan \pm 20 % (**Proceedings, Thrid International Conference, Trondheim, Norway, (1989)**). Penelitian copper slag sebagai material substitusi semen juga telah dilakukan oleh **Antonio dan Barzin, (1999)**, hasilnya adalah terjadi peningkatan kuat tekan beton dengan variasi 5 %, 10 %, dan 15 % terhadap berat semen yang dapat digantikan oleh copper slag.

Penelitian oleh **Kandar, (2000)** mengenai sifat fisik dan mekanik beton mutu tinggi dengan campuran copper slag dilingkungan air laut menunjukkan hasil bahwa pada rendaman air tawar prosentase optimum copper slag dalam campuran beton adalah 40 % yang mampu meningkatkan kuat tekan beton bila dibandingkan dengan variasi lain. Sedangkan direndaman air laut pada umur 0-56 hari kuat tekan optimum dicapai pada variasi 40 %, namun pada umur diatas 56 hari yaitu 90 serta 120 hari kuat tekan optimum dicapai pada variasi 50 %. Campuran copper slag dalam beton mampu mengurangi rongga udara yang terjadi pada beton, selain itu mampu mempercepat waktu setting time, meningkatkan temperatur hidrasi dan meningkatkan modulus elastisitas beton.

Hal yang sama juga telah dilakukan oleh **Harmonis Rante, (2000)**, yang hasilnya copper slag dapat menggantikan \pm 20 % semen dan terjadi

peningkatan kuat tekan beton $\pm 21.96\%$, modulus elastisitas 17.432% , kekerasan, permeabilitas 45.87% , dan porositas beton berkurang 0.11% . Namun aplikasi terhadap optimasi gradasi copper slag sebagai material pengganti agregat halus untuk mendapatkan beton mutu tinggi belum diteliti lebih detail. Bertolak dari latar belakang hasil penelitian yang telah dilakukan oleh **Aulia, Kandar, Triwulan dan Mudji, (1999)** . adalah optimasi kandungan copper slag sebagai pengganti agregat halus sebesar 040% dengan kenaikan kuat tekan $\pm 10\%$, maka peneliti merasa tertarik untuk mencoba mengaplikasikan optimasi gradasi copper slag sebagai agregat halus dengan komposisi yang sama yaitu sebesar 40% untuk mendapatkan beton mutu tinggi dengan batas daerah gradasi **Zone 2 BS 882 : 1965** dan **ASTM C 33 - 93**.

Dari hasil produksi bijih logam (metal) didapatkan sisa batuan tambang yang diambil dari tungku pembakaran. yang biasa disebut dengan limbah (slag). Slag yang dihasilkan bervariasi jenisnya tergantung dari produksi logamnya. Jenis slag yang ada diantaranya adalah instant – chilled steel slag, blast furnace slag, nickel slag, copper slag dan masih banyak lagi (**D.G. Mongomery dan G.Wang, (1991)**). Dinegara-negara maju seperti Amerika, Eropa, Jepang serta Taiwan slag yang dihasilkan dalam jumlah yang sangat besar, sehingga hal ini tentu mengganggu kelestarian lingkungan bila tidak ada penyelesaian lebih lanjut.

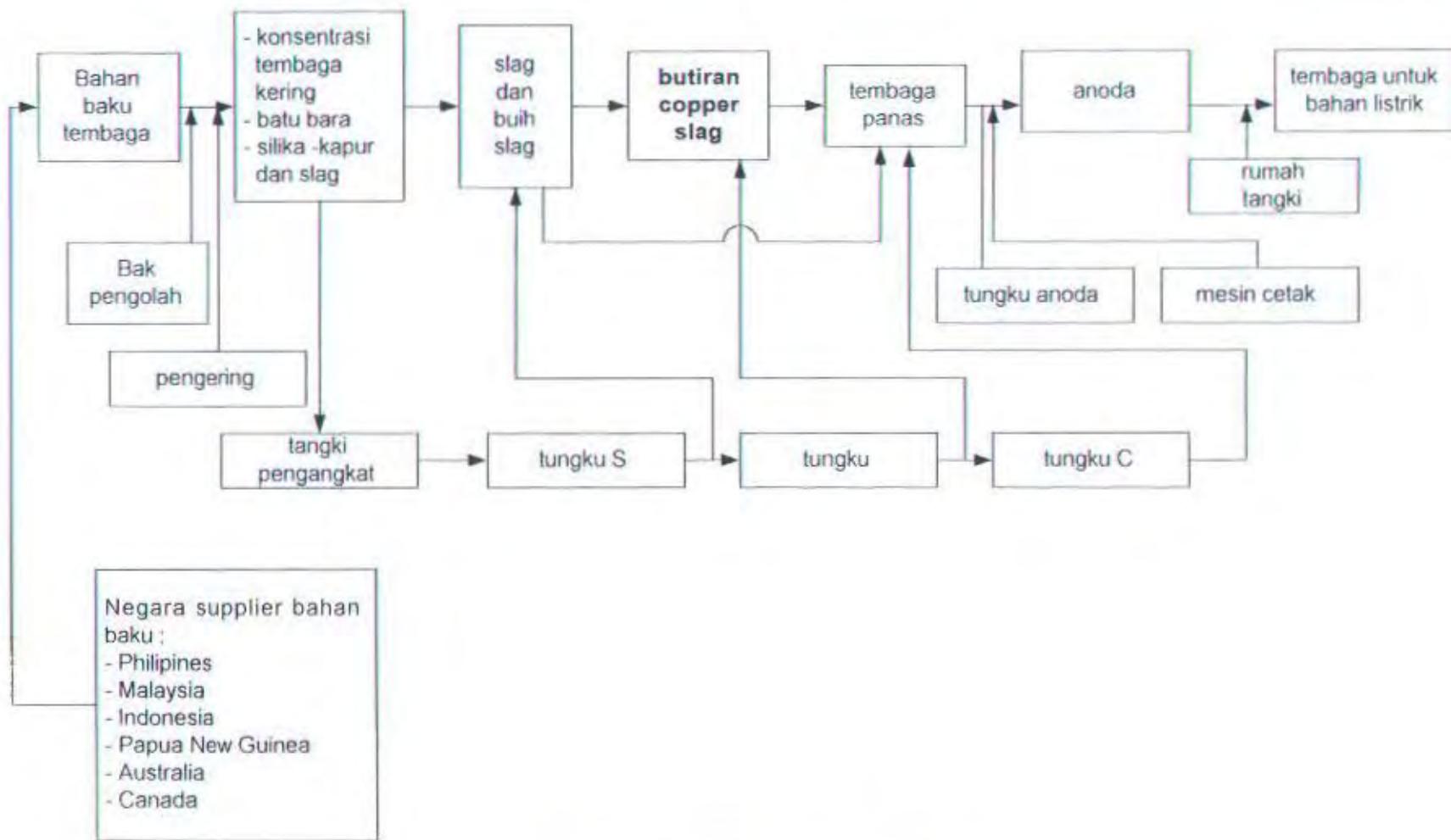
Pemikiran dan penelitian terus dilakukan, hingga akhirnya slag yang semula kurang bermanfaat maka sekarang ini dinegara-negara maju tersebut slag telah menjadi barang yang mempunyai daya jual yang tinggi. Slag yang ada telah dimanfaatkan dengan luas dalam bidang konstruksi, diantaranya adalah sebagai bahan baku semen (raw material cement) (**Mitsubishi Copper Slag, (1999)**), agregat baik agregat halus maupun agregat kasar, bahan untuk konstruksi jalan, material untuk reklamasi pantai, dan masih banyak lagi. Dalam penelitian ini digunakan limbah industri peleburan tembaga, yang biasa disebut sebagai **Copper Slag**. Pada saat ini diIndonesia keberadaan dan manfaat copper slag kurang dimanfaatkan untuk bidang konstruksi, padahal dinegara Jepang limbah ini telah dipakai cukup luas dibidang konstruksi dan perkapalan. Sebagaimana

yang dijelaskan oleh **Mitsubishi Copper Slag**, (1999) tentang manfaat dari limbah ini, diantaranya adalah :

- a. Sebagai bahan baku semen (cement material)
- b. Sebagai pengisi pondasi caisson (caisson filter)
- c. Untuk pembersihan karat pada kapal (sand blasting)
- d. Sebagai block pemecah gelombang (wave-breaking block)
- e. Sebagai agregat halus beton (superior agregat for concrete)
- f. Sebagai campuran pembuatan paving beton

2.5.2. Proses Copper Slag

Proses menghasilkan copper slag merupakan suatu rangkaian dengan produksi logam tembaga, adapun proses tersebut adalah dengan adanya bahan baku tembaga yang berasal dari beberapa negara,diantaranya adalah dari Indonesia, Australi, Kanada dan lain-lain. Setelah itu dimasukkan dalam bak pengolah lalu dengan pengeringan (sekitar 500°C) bahan baku tersebut dipilah-pilah dan menghasilkan beberapa senyawa, yaitu konsentrasi tembaga kering yang dihasilkan , lalu dengan pemanasan melalui tungku (sekitar 1200°C) didapatkan copper slag dan Buih Tembaga. Dan buih tembaga ini diolah melalui electrical system yang dihasilkan logam tembaga (**M.J. Bradley** dan **S.E. Wiberly**, (1993)).



Gambar 2.4. Skema Produksi Copper Slag

2.5.3. Sifat Copper Slag

2.5.3.1. Sifat Kimia

Sebagaimana informasi yang didapat dari **Mitsubhisi Copper Slag**, (1991) menyebutkan, bahwasannya komponen utama yang terdapat dari copper slag adalah besi oksida, silicon dioksida, kalsium oksida serta aluminium oksida. Prosentase senyawa kimia tersebut adalah sebagai berikut:

- Besi Oksida (Fe_2O_3) : 45 – 55 %
- Silikon Dioksida (SiO_2) : 30 – 36 %
- Calcium Oksida (CaO) : 2 – 7 %
- Aluminium Oksida (Al_2O_3) : 3 – 6 %

Komposisi ini sebenarnya hampir sama dengan pozzolan pada umumnya yaitu fly ash, abu sekam, silica fume dan lain-lain, sehingga hal ini sangat menguntungkan bagi tercapainya reaksi terhadap semen dan pada akhirnya akan menambah kekuatan beton.

2.5.3.2. Sifat Fisika

Kandungan besi yang tinggi pada copper slag menyebabkan berat jenis/specific gravity tinggi (specific gravity mendekati 3,5 – 3,7), lebih tinggi dari pasir alami serta sifatnya sebagai pengantar panas (thermal conductivity) yang baik (**Hwang dan Laiw**, (1989)). Lalu dengan kandungan besi yang tinggi itu pula menyebabkan kekerasan dari butiran copper slag sangat tinggi. Karena merupakan sisa dari olahan industri pertambangan, sehingga tidak terdapat kadar organik ataupun kadar lumpur sebagaimana yang terdapat pada natural sand (pasir pada umumnya). Selain itu dengan adanya kandungan senyawa logam, maka porositas yang terjadi sangat kecil yang mengakibatkan kepadatan tinggi, sehingga copper slag memiliki kekedapan yang tinggi pula, hal ini dapat ditinjau dari bentuk fisiknya yaitu warna hitam mengkilap.

Dengan porositas yang kecil menyebabkan copper slag sulit untuk menyerap air (absorbtion kecil). Butiran copper slag bervariasi bentuknya ada yang berbentuk seperti pasir, namun agak besar sedikit serta permukaan tidak rata, ada yang berbentuk pipih dan runcing, sehingga jika terkena tangan akan seperti tersayat, serta ada yang berbentuk serbuk dengan ukuran

yang sangat halus, kesemua bentuk butiran yang ada pada copper slag tersebut bercampur menjadi satu. Dan distribusi partikel tersebut sifatnya konstan karena merupakan hasil olahan industri, dimana produksinya selalu dikontrol (production control).

2.5.4. Copper Slag Sebagai Campuran Beton

Dalam penelitian-penelitian sebelumnya, telah memberikan indikasi yang positif bahwasannya copper slag dapat digunakan sebagai bahan campuran beton, dimana copper slag tersebut berfungsi sebagai cementitious ataupun berfungsi sebagai agregat halus. Adapun penelitian tersebut diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh **Hwang dan Laiw, (1989)**. Keduanya berasal dari Taiwan yang pada awal penelitiannya didasarkan atas kesadaran yang tinggi terhadap lingkungan, karena copper slag yang dihasilkan dari industri di Taiwan yang jumlahnya ribuan ton setahunya dibuang langsung begitu saja pada lepas pantai. Untuk itu timbul pemikiran untuk memanfaatkan copper slag sebagai agregat halus bahan campuran beton, karena copper slag tersebut mempunyai sifat fisik dan sifat kimia yang mendekati kesamaan dengan sifat dari natural sand.

2.5.4.1. Sifat Fisika (C.L. Hwang and J.C. Laiw, (1989))

- Specific gravity : 3.55
- Absorbtion : 0.2 %
- Berat volume (unit weight) : 1620 kg/m³
- Kadar Lumpur : 0 %
- Kandungan material dibawah no.200 : 1.79 %
- Modulus kehalusan : 2.21
- Kadar organik : tidak ada
- Soundness : 0.8 %
- Bentuk partikel : irregular
- Tekstur permukaan : kasar (rough)

2.5.4.2. Sifat Kimia (C.L. Hwang and J.C. Laiw, (1989))

- SiO₂ : 34.3 %
- Al₂O₃ : 3.83 %

- Fe_2O_3 : 53,72 %
- CaO : 7,91 %
- MgO : 0,94 %
- SO_3 : 3,02 %
- Na_2O : 0,42 %
- K_2O : 0,55 %

Sedangkan penelitian copper slag sebagai cementitious yang dilakukan oleh **Antonio M. Arino dan Barzin Mobasher, (1997)** dimana komponen penyusun copper slag adalah SiO_2 (35 %), Fe_2O_3 (53 %), CaO (3,3 %), Al_2O_3 (5 %), serta tambahan kandungan curprite (copper silikat) sekitar 1 – 2 %. Dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan suatu kesimpulan bahwasannya secara umum pada variasi 10 % dengan w/c 0,4 mempunyai kuat tekan yang lebih tinggi dari kuat tekan campuran normal (kontrol), serta nilai modulus elastisitasnya juga lebih besar pada variasi 10 % tersebut.

Penggunaan kerak hasil pembakaran tungku/tanur sebagai cementitious material telah dilakukan pada tahun 1774, yaitu pada saat itu dibuat mortar dengan menggunakan kerak tanur dan kapur mati. Secara komersial, untuk pertama kalinya semen dari kerak –kapur diproduksi di Jerman pada tahun 1865 dan semen jenis ini telah digunakan di Perancis tahun 1889 untuk membangun Paris Underground Micro System (**ACI Committee 226, (1987)**). Penggunaan terak besi (iron blast-furnace slag) pada beton mulai dikenal di United States sejak tahun 1905, baik sebagai agregat maupun sebagai bahan campuran dalam pabrik semen, atau mungkin keduanya secara bersamaan. Bahkan perhatian berikutnya diarahkan pada penggunaannya sebagai material pengganti beberapa bagian dari semen portland pada campuran beton. Sampai tahun 1950-an, terak tanur telah digunakan dalam proses produksi semen atau sebagai material cementitious dalam dua cara, yaitu sebagai *bahan mentah* (raw material) untuk pabrik semen portland dan sebagai *material cementitious* yang dikombinasikan dengan semen, hydrated lime, dan gypsum.

Sejak tahun 1950, penggunaan slag sebagai material cementitious yang ditambahkan pada campuran beton dengan semen portland telah

mendapat perhatian dibeberapa negara seperti Afrika Selatan, Australi, Kerajaan Inggris, Jepang, Canada dan Amerika Serikat. Penggunaan slag ini akan memberikan hasil yang maksimal apabila slag dihaluskan sampai kehalusan optimumnya dan proporsinya diatur seteliti mungkin (ACI Committee 226, (1987)).

Dalam penelitian ini kami akan mencoba menggunakan salah satu dari blast furnace slag, yaitu copper slag. Namun sebelum membahas lebih jauh, ada baiknya kita tinjau suatu masalah sejenisnya yang pernah dilakukan sebelumnya. Adapun hal tersebut adalah pemanfaatan gradasi iron blast-furnace slag sebagai substitusi agregat halus pada campuran beton. Hal ini dimaksudkan agar kita dapat memperoleh sedikit gambaran atau setidak-tidaknya memprediksi apa yang akan terjadi bila yang digunakan adalah copper slag. Blast-furnace slag adalah produk nonmetalik yang pada dasarnya mengandung silika dan aluminium silika, kalsium dan beberapa kandungan lain, yang dihasilkan dari proses peleburan logam dalam suatu tanur.

Sedang granulated blast furnace adalah material yang terdiri dari butiran-butiran mengkilap (glass) yang terbentuk saat pendinginan blast furnace-slag atau pada saat dicelupkan kedalam air. Beberapa hal yang penting untuk dikaji pada riset tersebut adalah :

1. Hydraulic Reactivity

Hidrasi ground granulated blast-furnace slag yang dikombinasikan dengan semen portland, pada dasarnya adalah sama dengan hidrasi yang dihasilkan oleh semen portland, yaitu hidrasi kalsium-silika. Hidrasi ground granulated blast-furnace slag pada umumnya lebih bersifat menyerupai gel dibandingkan dengan hidrasi dari portland cement sehingga dengan demikian akan lebih menambah kepadatan pasta semen. Jika ground granulated blast-furnace slag diberi air, maka hidrasi awal akan lebih rendah dibandingkan dengan semen portland. Oleh karena itu ditambahkanlah semen portland atau garam alkali untuk mempercepat reaksi. Hidrasi ground granulated blast furnace slag membutuhkan calcium hidroksida untuk menambah pembentukan hidrasi calcium silica (ACI Committee 226, (1987)).

Beberapa faktor yang menentukan efektif tidaknya penggunaan ground granulated blast-furnace slag dengan semen hidraulis adalah :

- Komposisi kimia dari ground granulated blast-furnace slag.
- Konsentrasi alkali dalam reaksi.
- Kandungan glass dari ground granulated blast-furnace slag.
- Kehalusan ground granulated blast-furnace slag dan semen portland.
- Temperatur saat fase awal dari proses hidrasi.

2. Workability

Workability dari beton dengan ground granulated blast-furnace slag adalah lebih baik dibandingkan dengan tanpa ground granulated blast-furnace slag (**Wood, (1981)**). Selanjutnya hal ini berpengaruh pada karakteristik permukaan dari pasta ground granulated blast-furnace slag, yang mana terbentuk dari bidang geser yang licin (halus). Dia juga berpendapat bahwa kehalusan permukaan pasta ground granulated blast-furnace slag akan berkurang bila sedikit air yang diserap pada selama pencampuran awal, sebagaimana tidak terjadi pada semen portland. Pada tahun 1974, **Fulton** menginvestigasi fenomena tersebut secara lebih detail dan menyimpulkan bahwa cementitious dengan ground granulated blast-furnace slag memperlihatkan workability yang lebih baik dan kerekatan pastanya bertambah pasta. Pada tahun 1982, **Wu dan Roy** mengemukakan bahwa pasta dengan ground granulated blast-furnace slag memberikan perilaku rheologi yang berbeda dibandingkan dengan pasta semen portland. Hasil penelitian mereka mengindikasikan terjadinya penyebaran partikel dengan baik dan kemudahan mengalir dari pasta dan mortar, baik itu dengan atau tanpa reduksi air pada campuran (**ACI Committee 226, (1987)**).

3. Setting Time

Dengan menggunakan ground granulated blast-furnace slag untuk mengganti sebagian dari pada campuran beton, maka setting time akan bertambah lambat. Lambat atau cepatnya setting time tergantung pada temperatur pada saat curing, proporsi ground granulated blast-furnace slag yang digunakan pada campuran, rasio air-cementitious, karakteristik semen portland dan jenis akselerator (bahan pempercepat) yang

digunakan. Umumnya, setting time awal (pengikatan awal) adalah antara 1 sampai 1 $\frac{1}{2}$ jam pada temperatur 23° C (ACI Committee 226, (1987)).

4. Bleeding

Besarnya kapasitas dan tingkat penguapan tergantung pada rasio luas permukaan terhadap volume air. Dengan demikian, apabila menggunakan ground granulated blast-furnace slag, pengaruh efek ini akan tergantung pada kehalusan ground granulated blast-furnace slag dibandingkan terhadap kehalusan semen dan efek kombinasi dari kedua material cementitious tersebut. Dengan ukuran butiran copper slag yang halus akan memberikan keuntungan sendiri bila penggantian terhadap agregat halus dilakukan pada jumlah yang tepat untuk mengurangi bleeding. Sebaliknya bila kasar, maka tingkat dan jumlah bleeding akan bertambah (ACI Committee 226, (1987)).

5. Kuat Tekan

Dibandingkan dengan beton dari semen portland, maka pada umur-umur awal (1 sampai 3 hari) penggunaan ground granulated blast-furnace slag akan mengurangi kekuatan. Penambahan kekuatan akan terlihat mulai pada umur 7 hari dan kemudian akan meningkat terus. Kuat tekan maksimum terjadi pada penggantian agregat oleh slag sebanyak 40 % dan kuat tekan yang dicapai lebih tinggi dibandingkan dengan sample control. Efek penambahan kekuatan akibat ground granulated blast-furnace slag tergantung pada activity slag dan komposisinya dalam campuran. Faktor lain yang berpengaruh terhadap performa ground granulated blast-furnace slag pada beton adalah rasio semen w/(s + c), karakteristik fisik dan kimia semen portland dan kondisi serta temperatur perawatan pada umur muda (ACI Committee 226, (1987)).

Penggunaan copper slag pada penelitian ini adalah sama dengan penggunaan terak besi seperti diuraikan diatas, yaitu dimanfaatkan sebagai material untuk menggantikan agregat halus. Copper slag dihasilkan dari industri peleburan tembaga yaitu bahan buangan (limbah). Beberapa sifat fisiknya adalah porositas kecil, kepadatan, kekerasan dan kekedapannya

tinggi, penampilan fisiknya berwarna hitam dan bentuk butirannya pipih dan runcing/tajam.

Komposisi kimianya tidak jauh berbeda dengan slag lainnya, yaitu mengandung oksida-oksida besi (FeO), silica (SiO_2), kalsium (CaO), Aluminium (Al_2O_3), dan oksida-oksida lain dari silicon, aluminium, calcium, dan magnesium.

Dibeberapa negara maju seperti Canada, Australia, Eropa dan Amerika, penelitian dan pemanfaatan copper slag telah banyak dilakukan, misalnya dimanfaatkan pada konstruksi-konstruksi dasar, jalan kereta api, timbunan dan sebagai mineral admixture pada beton (Antonio & Barzin, (1999)). Disamping itu, penelitian mengenai pemanfaatan copper slag sebagai pengganti agregat halus pada beton juga telah dilakukan.

Peneliti dari National Taiwan Institute of Technologi, **Hwang dan Laiw**, (1989), telah melakukan penelitian mengenai copper slag sebagai material pengganti agregat halus. Dari penelitian tersebut diketahui bahwa copper slag dapat menggantikan agregat halus sebesar 60 % dan terjadi peningkatan kuat tekan beton. Selain itu, penelitian yang sama juga telah dilakukan oleh **Aulia, Kandar, Triwulan dan Mudji**, (1999), dengan kesimpulan bahwa copper slag dapat menggantikan agregat halus sebanyak 40 % dengan kenaikan kuat tekan 10 % dibandingkan dengan beton biasa. Copper slag yang digunakan merupakan produksi **PT. Smelting Co, Gresik**.

Penelitian mengenai penggunaan copper slag sebagai cementitious sebenarnya telah dilakukan **Antonio dan Barzin**, (1999). Copper slag yang digunakan mempunyai kehalusan yang tidak terlalu jauh berbeda dengan kehalusan semen portland (specific surface copper slag adalah $9450 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ dan $10900 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ untuk semen portland tipe I). Sedang variasi copper slag yang digunakan yaitu 5 %, 10 %, dan 15 % terhadap berat semen, baik untuk pasta, mortar, maupun beton sehingga tidak memberikan indikasi berapa bagian yang ideal dari semen yang dapat digantikan oleh copper slag.

Hal yang menarik dari laporan ini adalah peningkatan kuat tekan beton seperti pada pemanfaatan gradasi copper slag sebagai material substitusi agregat halus. Metode yang dilakukan oleh **Antonio dan Barzin, (1999)** adalah pertama-tama melakukan uji pasta dan mortar sebelum melakukan uji beton terhadap tiga faktor air-semen (w/c + s) yang masing-masing dihubungkan dengan tiga variasi copper slag, yaitu 5 %, 10 %, 15 % dan 0 % sebagai specimen pengontrol (**Antonio & Barzin, (1999)**). Komposisi kimia copper slag dibeberapa tempat adalah tidak sama. Untuk itu perlu dilakukan penelitian mengenai pengaruh gradasi copper slag yang ada di Indonesia (PT. Smelting Co, Gresik) dalam kapasitas sebagai pengganti agregat halus sebesar 40 % terhadap campuran beton mutu tinggi.

2.6. CURING (PERAWATAN) BETON

2.6.1. Definisi Curing

Curing adalah prosedur / cara perawatan untuk meningkatkan proses pengerasan beton pada kondisi suhu dan kelembaban tertentu, dimana menorong pada perkembangan pengikatan yang sempurna dari bahan penyusun semen (**W.H. Taylor, (1977)**).

Curing adalah cara – cara yang digunakan untuk meningkatkan untuk proses hidrasi semen dimana di dalamnya termasuk pengaturan perubahan suhu dan kelembaban (**A.M Neville, (1981)**).

Jenis – jenis curing adalah (**W.H. Taylor , (1977)**) :

1. Moist curing
2. Membrane curing
3. Steam curing
4. Hydrothermal curing
5. Carbonation Treatment

2.6.2. Pengaruh Curing Pada Kuat Tekan Beton

Setelah dicetak, beton harus segera di curing pada lingkungan yang cocok selama tahap awal pengerasan untuk mendapatkan hasil seperti yang direncanakan. Tujuan utama curing adalah mencegah kehilangan kelembaban yang diperlukan dalam proses hidrasi karena hal itu tidak hanya meningkatkan kuat tekan beton , tapi juga meningkatkan durabilitas,

impemcability, ketahanan abrasi serta kesetabilan bentuk secara umum (**W.H. Taylor, (1977)**).

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam perawatan beton adalah beton tersebut harus dirawat pada kondisi lingkungan yang mendukung terjadinya proses hidrasi semen secara kontinyu. Hidrasi semen dapat berlangsung jika pori-pori kapiler dalam kondisi jenuh air. Untuk itu pencegahan kehilangan air pada pori-pori kapiler harus dilakukan dengan cara curing. Mix desain yang baik dengan kadar air yang rendah tidak menjamin akan menghasilkan beton yang berkualitas baik, tetapi dengan dilakukannya prosedur perawatan yang benar diharapakan dapat menghasilkan beton yang benar-benar berkualitas (**M.L. Gambhir, (1986)**).

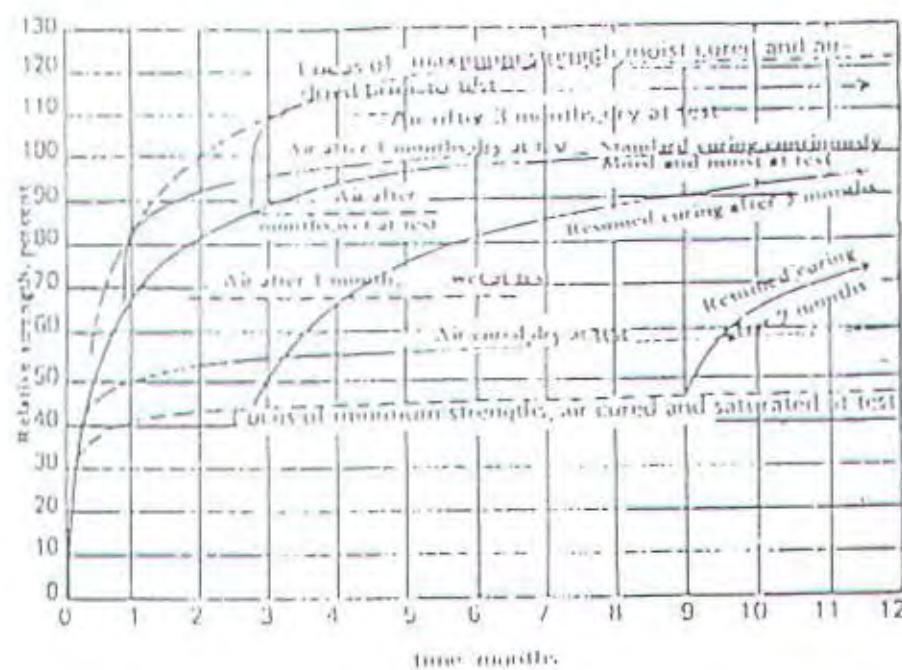
Proses curing dalam pelaksanaannya mempunyai pengaruh pada perkembangan kuat tekan beton selanjutnya, hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Pengaruh Kelembaban

Proses hidrasi dapat berlangsung secara kontinyu hanya pada keadaan pori-pori kapiler jenuh air (saturated). Untuk itu pada beton perlu dijaga agar tidak terjadi penguapan air secara berlebihan, karena jika hal ini terjadi maka proses hidrasi tidak akan berlangsung dengan sempurna (**A.M. Neville, (1981)**).

Peranan air sangat dominan pada proses hidrasi semen sehingga bila air dibiarkan menguap selama tahap awal proses hidrasi, maka proses hidrasi selanjutnya tidak akan berlangsung (**Torben C Hansen, (1970)**).

Menurut **M.L. Gambhir, (1986)**, bahwa proses hidrasi semen hanya dapat berlangsung jika tekanan kapiler lebih dari 80 % tekanan dalam keadaan jenuh. Pengaruh kelembaban terhadap kekuatan beton dapat dilihat sebagai berikut :



Grafik 2.5. Efek Moist Curing Pada Suhu 20° C dan Kelembaban Beton Pada Saat Pengetesan

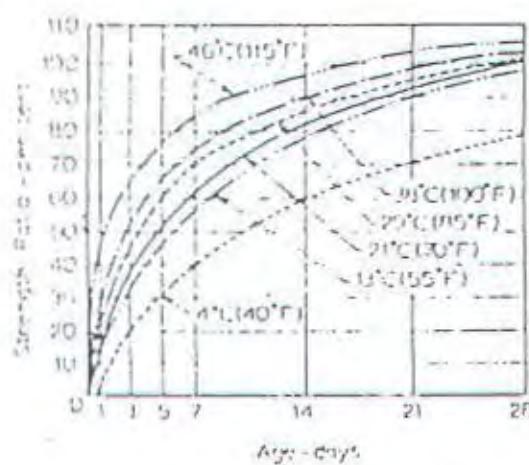
Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa kekuatan beton semakin bertambah seiring dengan lamanya proses moist curing dan beton yang dites pada kondisi kering mempunyai kuat tekan lebih besar daripada yang dites pada kondisi lembab.

2. Pengaruh temperatur dan waktu

Sebagian besar proses kimia dipercepat pada temperatur yang tinggi, tanpa kecuali untuk proses hidrasi semen. Kecepatan peningkatan kekuatan pada beton tidak hanya dipengaruhi oleh periode curing, tetapi juga dipengaruhi oleh temperatur pada saat proses curing berlangsung. (M.L. Gambhir, (1986)). Korelasi antara suhu, waktu dan kuat tekan di tunjukkan dengan "Maturity of time" (faktor M) yang merupakan hasil dari umur a_t dan temperatur curing T (A.M. Neville , (1981)) :

$$M = a_t \times T$$

Hal tersebut dapat dilihat pada grafik dibawah ini :



Grafik 2.6. Maturity of Time

Jika pada saat proses pengikatan semen (proses hidrasi) dalam keadaan suhu yang tinggi maka hal itu akan dapat menambah kekuatan awal, tetapi hal tersebut dapat memberikan pengaruh yang berlawanan pada kekuatan beton umur 7 hari keatas (A.M. Neville, (1981)). Penjelasannya adalah untuk proses hidrasi awal yang dipercepat akan membentuk produk fisik yang lemah karena lebih berongga. Hal ini bisa diikuti dari aturan perbandingan gel/ruang hasil proses hidrasi . Dengan pori yang lebih kecil, meskipun proses hidrasi lebih berjalan lambat, perbandingan gel/ruang yang tinggi akan tercapai.

Penjelasan tentang efek kebalikan dari temperatur awal yang tinggi terhadap kekuatan akhir dilanjutkan oleh Verbeck dan Helmuth, (1960) yang memperkirakan bahwa kecepatan proses hidrasi awal yang tinggi karena temperatur yang tinggi memperlambat sebagian proses hidrasi karena menghasilkan distribusi yang tidak merata dari proses hidrasi.

Alasannya adalah pada kecepatan proses hidrasi awal yang tinggi, waktu yang tersedia tidak cukup untuk proses difusi bagi hasil hidrasi lepas dari butir semen untuk pengendapan, akibatnya hasil hidrasi dengan konsentrasi yang tinggi akan terbentuk didekat butir-butir yang berhidrasi, hal ini menahan sebagian yang akan mengalami proses hidrasi selanjutnya sehingga mempengaruhi kekuatan jangka panjang.

2.6.3. Curing Perendaman

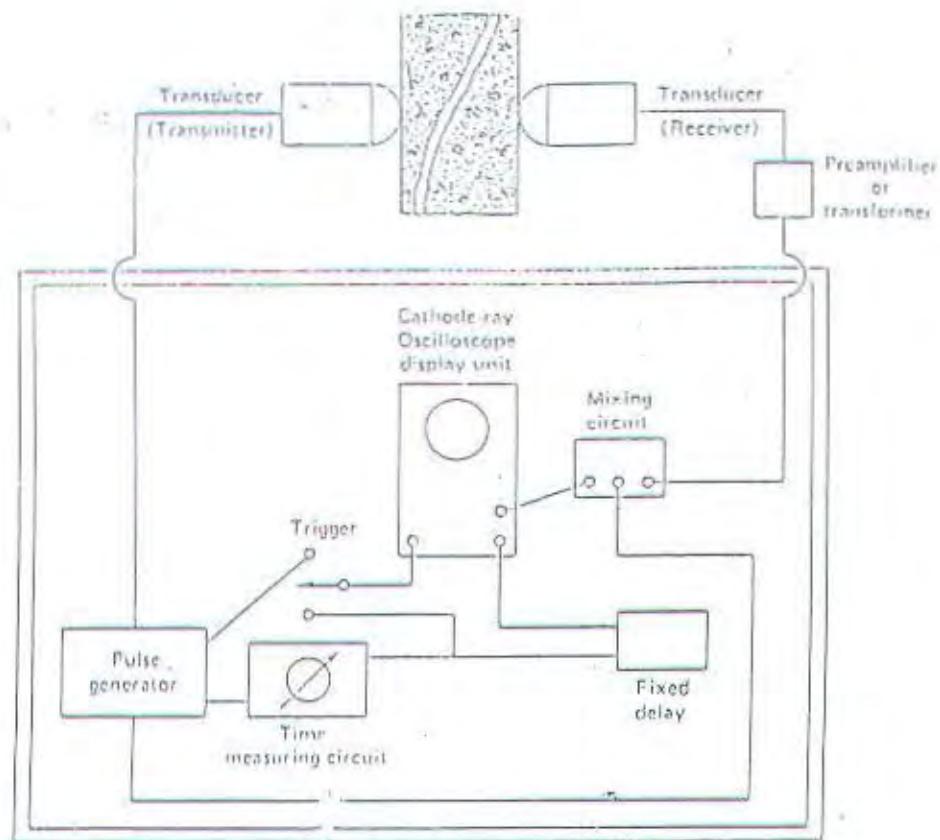
Benda uji dimasukkan ke bak perendaman dengan suhu air (23 ± 2) $^{\circ}\text{C}$. Air di bak perendaman paling tidak 1 – 2 minggu diganti agar bak tersebut kondisi suhu dan bakteri / lumut tidak tumbuh sehingga tidak mempengaruhi kondisi dari benda uji.

2.7. KECEPATAN GELOMBANG ULTRASONIC

Metode ini didasarkan pada kenyataan mengenai adanya kecepatan suara, V , pada bahan yang dikaitkan dengan modulus, E , dengan rumus berikut:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \text{ dimana } \rho = \text{kepadatan bahan (density)}$$

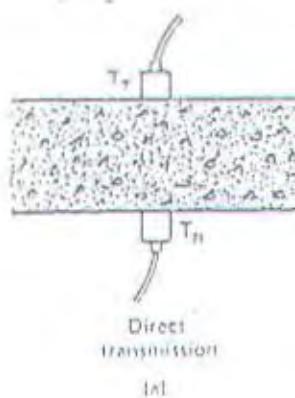
Karena kecepatan getaran bergantung pada sifat elastis bahan dan tidak pada bentuk geometris, maka jenis uji ini merupakan cara yang sangat mudah untuk menguji kualitas beton. Pada dasarnya alat semacam ini yang ditunjukkan secara skematis pada gambar 2.7.digunakan untuk menentukan kecepatan getaran melalui ketebalan beton yang diketahui, dengan melalui langkah-langkah yang dirancang dalam **ASTM C 597** dan **BS 4408 Bab 5**. Sejumlah alat perdagangan yang memenuhi untuk kebutuhan ini memiliki ketepatan pengukuran $\pm 1\%$.



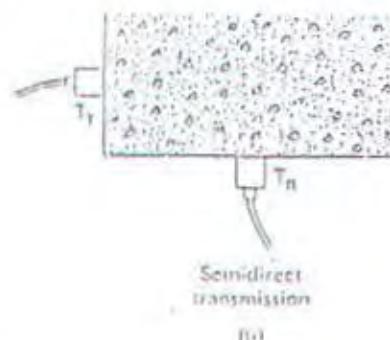
Gambar 2.7. Alat Ultrasonic

Pada kenyataannya getaran impuls mekanis yang dibebankan bahan menimbulkan tiga jenis gelombang yaitu :

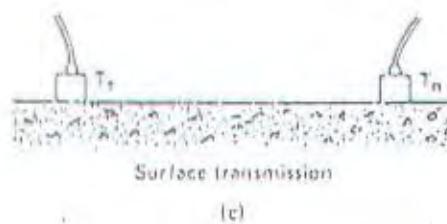
- a. Longitudinal (compressional)



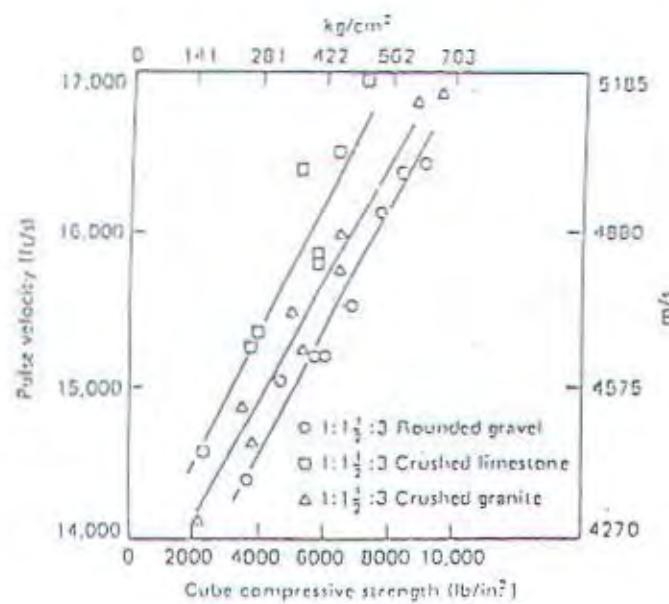
b. Pembelah (transversal)



c. Permukaan rata (rayleigh)



Gelombang longitudinal adalah yang tercepat dan paling bermanfaat untuk keperluan uji, kecepatan getaran digunakan secara langsung sebagai pengukuran kontrol kualitas, tetapi biasanya dikorelasikan dengan kekuatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Korelasi kecepatan getaran dengan kuat tekan beton

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. ALUR, ITEM, DAN STANDARD PENELITIAN

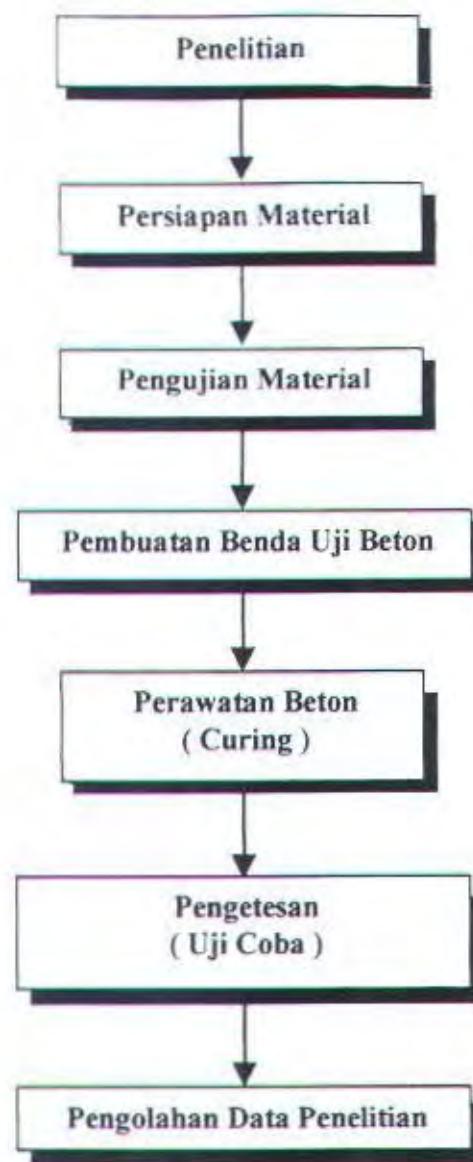
Pelaksanaan penelitian " Optimasi gradasi copper slag sebagai pengganti agregat halus sebanyak 40 % untuk mendapatkan beton mutu tinggi " dilakukan dengan tahapan secara garis besar sebagai berikut :

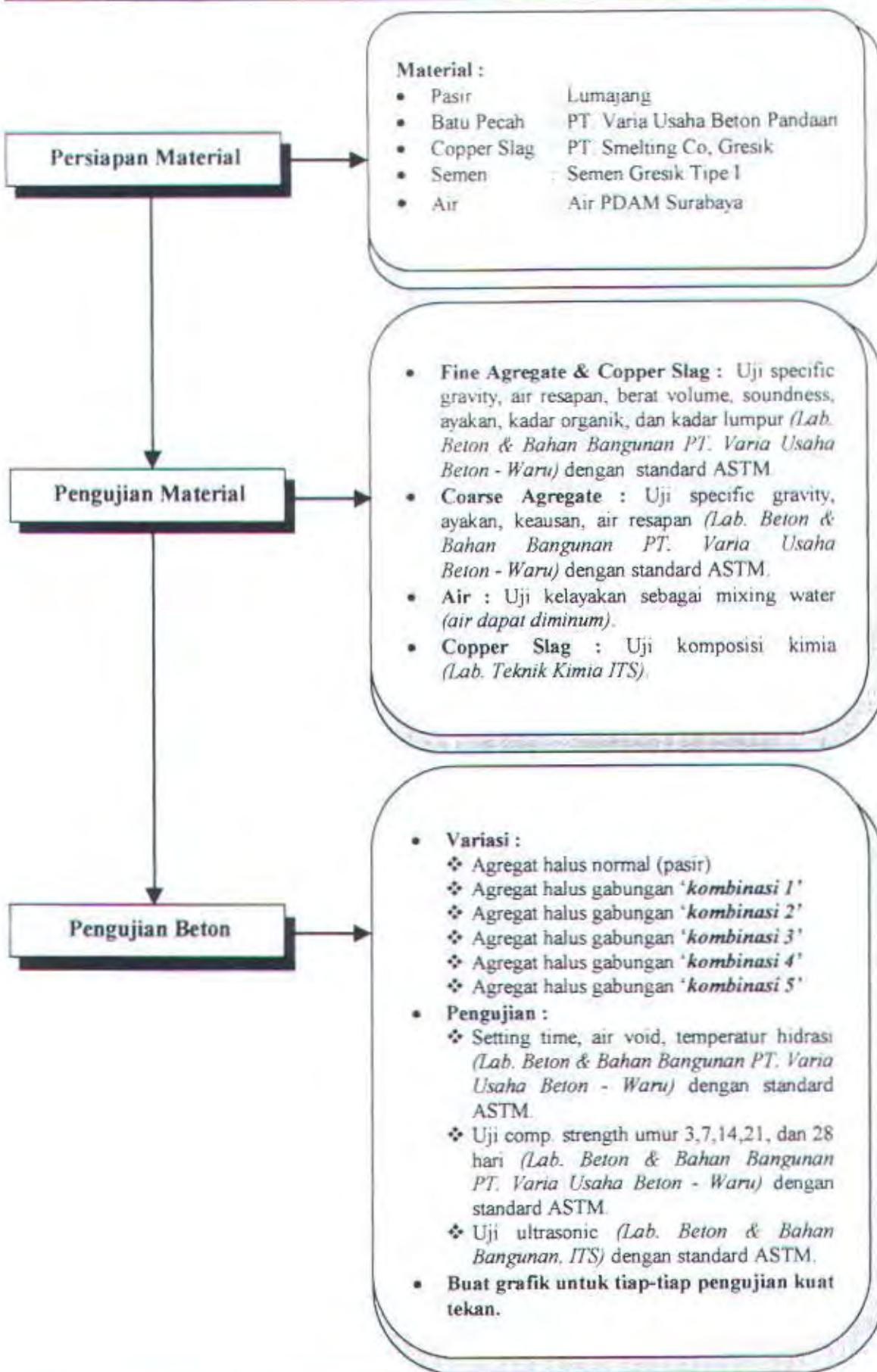
1. Persiapan dan pengujian material yang dibutuhkan dalam percobaan.
2. Persiapan peralatan yang dipakai.
3. Perancangan campuran.
4. Pembuatan benda uji silinder ukuran 15 x 30 cm.
5. Pengambilan sampel dari beton segar untuk pengukuran temperatur hidrasi dan setting time.
6. Pengetesan benda uji terhadap kuat tekan, air void, dan ultrasonic.

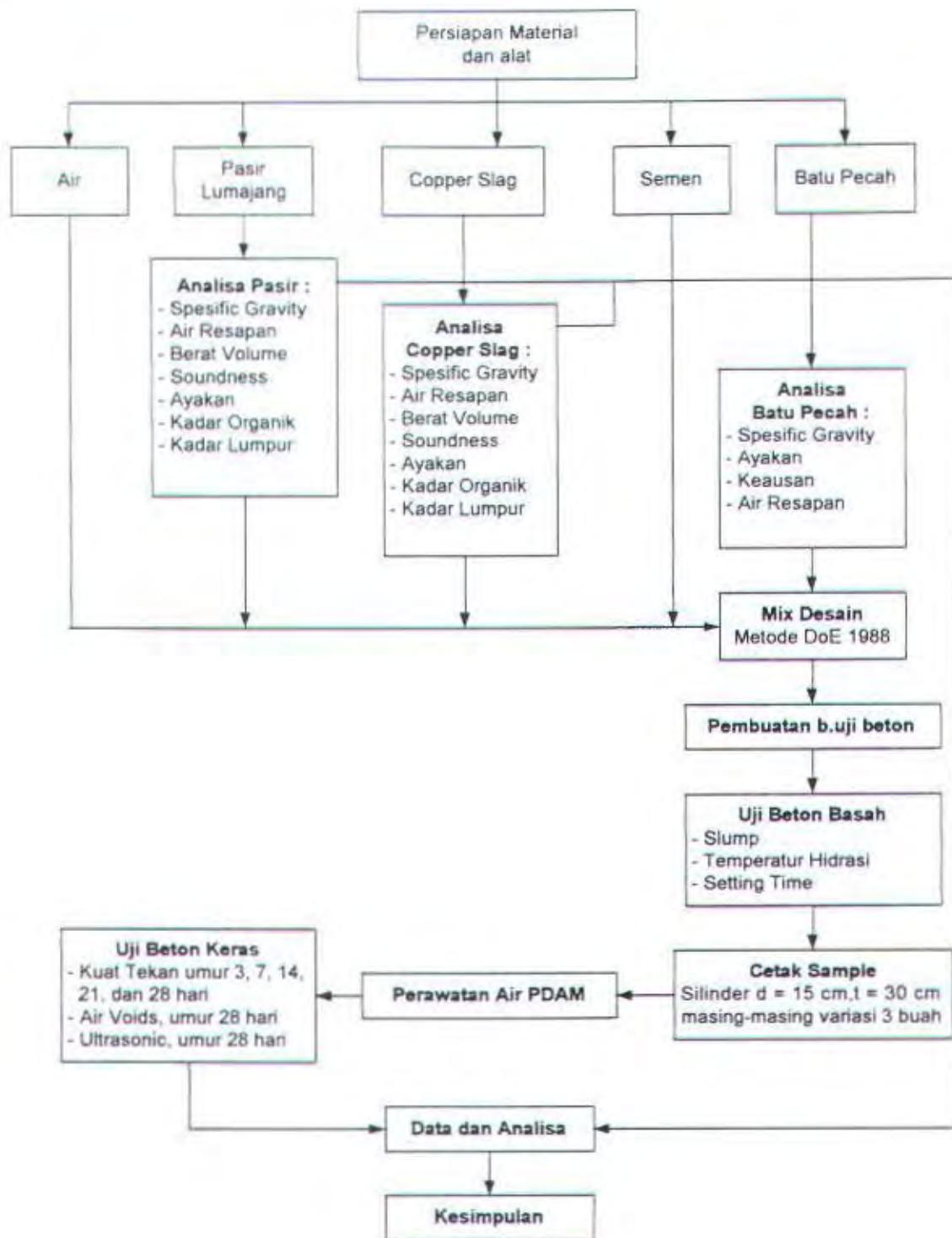
Hal ini dilakukan dengan alasan efisiensi biaya dan menghindari penggunaan benda uji beton dalam jumlah banyak. Secara ringkas, alurnya adalah uji material kemudian dilanjutkan uji beton dengan benda uji silinder 15 cm x 30 cm.

Beton dibuat dengan kombinasi pasir dan copper slag, yaitu 60 % pasir dan 40 % copper slag dengan kombinasi pada gradasi gabungan agregat halus. Beton ini diuji tekan pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Kombinasi yang menentukan adalah kombinasi pasir-copper slag pada beton yang memberikan kuat tekan tertinggi. Beberapa hal yang menjadi variabel dalam penelitian ini adalah gradasi gabungan pasir-copper slag, prosentase copper slag terhadap berat pasir, dan umur pengujian.

Lebih jelasnya rangkaian penelitian digambarkan dalam diagram alir berikut :

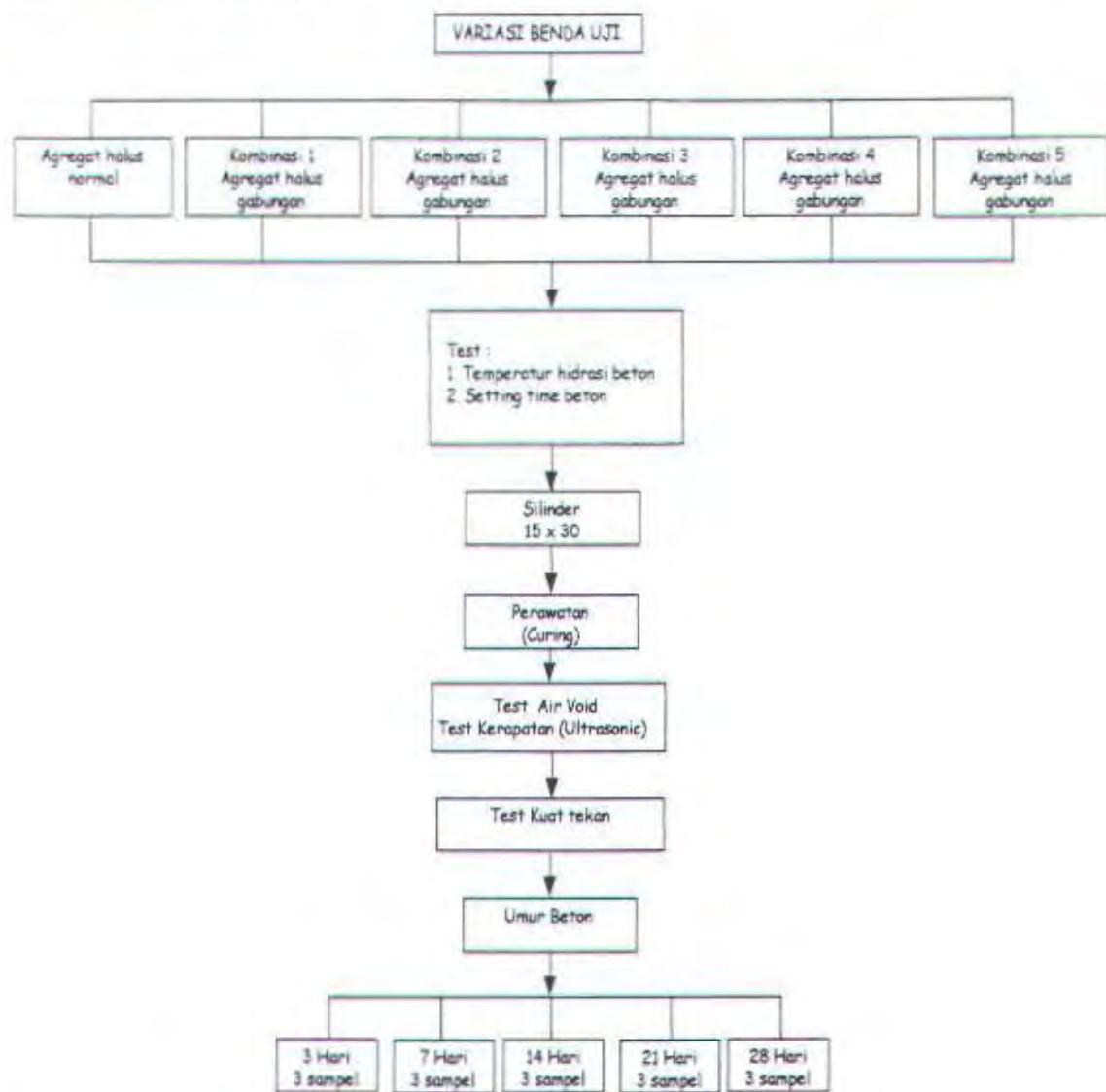






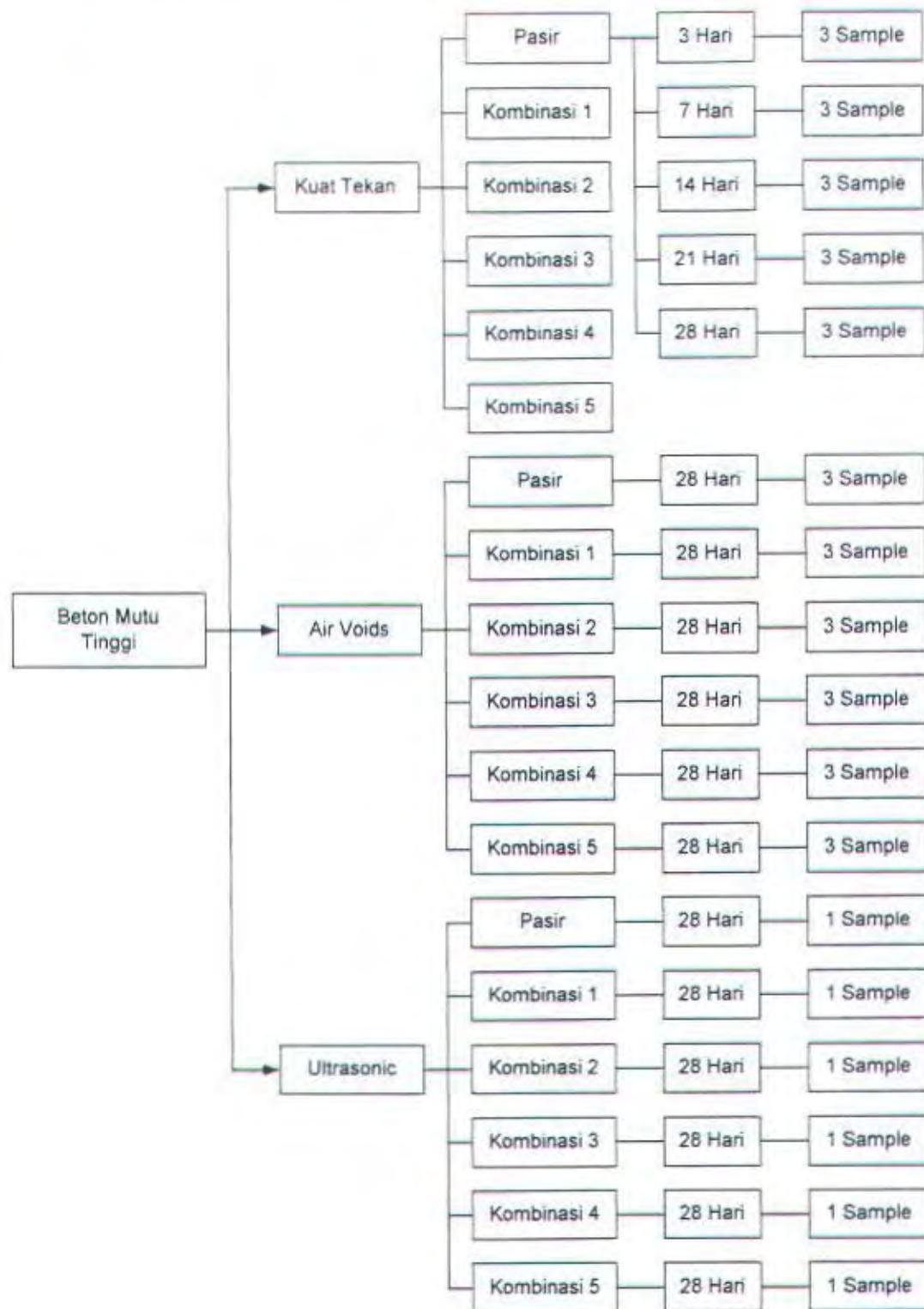
Bagan 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2. BENDA UJI



Keterangan jumlah benda uji :

- Beton f_c' 60 Mpa agregat halus pasir = 19 silinder
 - Beton f_c' 60 Mpa 'kombinasi 1' agregat halus gabungan = 19 silinder
 - Beton f_c' 60 Mpa 'kombinasi 2' agregat halus gabungan = 19 silinder
 - Beton f_c' 60 Mpa 'kombinasi 3' agregat halus gabungan = 19 silinder
 - Beton f_c' 60 Mpa 'kombinasi 4' agregat halus gabungan = 19 silinder
 - Beton f_c' 60 Mpa 'kombinasi 5' agregat halus gabungan = 19 silinder
- Total benda uji = 114 sampel



Bagan 3.2. Variasi Benda Uji

3.3. PERSIAPAN MATERIAL

3.3.1. Semen Portland

Dalam penelitian ini digunakan semen portland tipe 1 produksi PT. Semen Gresik. Semen tersebut termasuk type standard yang digunakan untuk keperluan konstruksi umum yang tidak memerlukan persyaratan khusus. Dalam campuran beton mutu tinggi semen tipe 1 ini dapat digunakan.

Data mengenai sifat fisik dan kimia semen diambil dari data brosur dan data-data tersebut telah memenuhi syarat ASTM C 150 – 94 dan SNI 15 – 2049 – 94.

3.3.2. Agregat

3.3.2.1. Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan terdiri dari 2 macam yaitu pasir alami (uncrushed) berasal dari Lumajang yang dikonsumsi oleh PT. Varia Usaha Beton dan copper slag berasal dari PT. Smelting Co, Gresik. Untuk keperluan mix desain beton, dilakukan analisa material yang meliputi analisa ayakan (ASTM C 136 – 93), spesific gravity (ASTM C 128 – 93), kebersihan agregat terhadap bahan organik (ASTM C 33 – 86), air resapan (ASTM C 128 – 93), soundness (SII 0088 – 75), analisa kadar lumpur (ASTM C 142 – 78) dan berat volume (ASTM C 29 – 78).

3.3.2.1.1. Analisa Ayakan (ASTM C 136 – 93)

- **Tujuan**

- ☒ Untuk menentukan distribusi ukuran butir/gradasi dari pasir/copper slag.

- **Bahan**

- ☒ Pasir/copper slag dalam kondisi kering oven.

- **Peralatan**

- ☒ Timbangan analitis 2600 gr.
 - ☒ Satu set ayakan ASTM yang disusun menurut urutan pada Tabel 3.1.
 - ☒ Alat penggetar listrik.

Tabel 3.1. Ayakan agregat halus

| Nomor Ayakan | Diameter Lubang (mm) |
|--------------|------------------------|
| 2 | 9,50 |
| 4 | 4,76 |
| 8 | 2,38 |
| 16 | 1,19 |
| 30 | 0,59 |
| 50 | 0,29 |
| 100 | 0,15 |
| Pan | |

- **Prosedur Pelaksanaan :**

- ☒ Timbang pasir/copper slag (dalam keadaan kering oven) sebanyak 1000 gram.
- ☒ Masukkan pasir/copper slag dalam ayakan dengan ukuran atau nomor saringan paling besar di atas. Kemudian digetarkan dengan mesin penggetar kurang lebih 10 menit.
- ☒ Pasir/copper slag yang tertinggal pada ayakan ditimbang.
- ☒ Untuk kontrol, berat pasir/copper slag keseluruhan yaitu 1000 gram.
- ☒ Setelah itu plot hasilnya dalam grafik hubungan antara nomor ayakan versus persen lolos, dan kecenderungan grafik dilihat sesuai zona 1, 2, 3, 4 (**BS 882 - 1965**).

3.3.2.1.2. Analisa Terhadap Bahan Organik (ASTM C 33 - 86)

- **Tujuan :**

- ☒ Menentukan kebersihan pasir/copper slag terhadap bahan-bahan organik.

- **Bahan :**

- ☒ Timbang pasir/copper slag (dalam keadaan kering oven) sebanyak 1000 gr.
- ☒ Larutan NaOH 3% sebanyak 200 cc.
- ☒ Pasir/copper slag asli.

- **Peralatan :**

- Botol bening 350 cc.

- **Prosedur Pelaksanaan :**

- Isi botol dengan pasir/copper slag sebanyak 130 cc.

- Isi NaOH sebanyak 200 cc.

- Botol dikocok dan didiamkan selama 24 jam.

- Warna yang terjadi dibandingkan dengan warna standard.

- Pasir/copper slag tersebut memenuhi syarat bila warna yang terjadi tidak lebih tua dari warna standard pembanding.

3.3.2.1.3. Analisa Soundness (SII 0088 - 75)

- **Tujuan :**

- Memberikan keterangan mengenai sifat kekal agregat terhadap pengaruh cuaca, terutama mengenai daya tahannya.

- **Bahan :**

- Agregat halus (pasir/copper slag) kering oven.

- Larutan garam Magnesium Sulfat dengan berat jenis tidak kurang dari 1.295 dan tidak lebih dari 1.308.

- **Peralatan :**

- Satu set ayakan dengan seri 4, 8, 16, 30, 50, 100 serta pan.

- Tempat/wadah merendam contoh yang tahan terhadap larutan.

- Alat pengatur suhu.

- Timbangan.

- Oven.

- Alat pengukur berat jenis larutan (aerometer).

- **Prosedur Pelaksanaan :**

- Agregat halus (pasir/copper slag) kering oven.

- Ayaklah sejumlah agregat halus sesuai ayakan tersebut diatas sehingga masing-masing fraksi tertinggal tidak kurang dari 100 gram dan ayakan no. 4, 8, 16, 30, 50 yang terletak tidak kurang dari 5%.

- Masukkan butiran dalam fraksi tersebut masing-masing 100 gram kedalam wadah dan direndam dalam larutan Magnesium Sulfat selama tidak kurang dari 16 jam dan tidak lebih dari 18 jam.

- » Setelah mengalami perendaman, wadah-wadah contoh diangkat lalu ditiris 10-20 menit, setelah itu masukkan dalam oven pada suhu 110 derajat = 5 derajat celcius. Keringkan sampai berat tetap.
- » Dinginkan contoh sampai mencapai suhu ruangan, kemudian siapkan untuk direndam lagi dalam larutan.
- » Untuk pengujian ini, contoh dengan masing-masing fraksinya tersebut diatas direndam dan dikeringkan selama 5 kali.
- » Setelah itu masing-masing fraksi diayak sesuai no. ayakannya sampai didapatkan total persen berat bagian yang hilang dari contoh asli.
- » Hasil soundness merupakan total persen berat bagian yang hilang dari contoh asli.

3.3.2.1.4. Analisa Berat Jenis (ASTM C 128 - 93)

- Tujuan :
 - » Menentukan berat jenis pasir/copper slag dalam kondisi SSD.
- Bahan :
 - » Pasir/copper slag dalam kondisi SSD.
- Peralatan :
 - » Timbangan analitis 2600 gr.
 - » Labu takar 1000 cc.
 - » Hair dryer/kipas angin.
 - » Oven.
- Prosedur Pelaksanaan :
 - » Labu takar 1000 cc ditimbang.
 - » Pasir/copper slag dalam kondisi SSD ditimbang seberat 500 gram.
 - » Pasir/copper slag dimasukkan ke dalam labu takar dan beratnya ditimbang.
 - » Labu takar yang telah berisi pasir/copper slag diisi air sampai kira-kira kedudukan air sedikit diatas pasir dan kemudian digoyang-goyang hingga gelembung udara keluar. Pengisian air sampai batas 1000 cc beratnya ditimbang (W_1).
 - » Labu takar kosong diisi air sampai batas 1000 cc dan beratnya ditimbang (W_2).

- Berat jenis pasir/copper slag ditentukan dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{Berat Jenis} = \frac{500}{500 - (W_1 - W_2)} \times 100\%$$

Dimana :

W_1 = berat labu + pasir/copper slag + air

W_2 = berat labu + air

3.3.2.1.5. Analisa Air Resapan (ASTM C 128 - 93)

- Tujuan :

- Menentukan kadar air resapan pasir/copper slag.

- Bahan :

- Pasir/copper slag dalam kondisi SSD.

- Peralatan :

- Timbangan analitis 2600 gr.

- Nampan/ember.

- Cetok.

- Hair dryer/kipas angin.

- Oven.

- Prosedur Pelaksanaan :

- Ambil pasir/copper slag dari lapangan secukupnya, kemudian direndam air selama 24 jam.

- Pasir/copper slag diambil dari rendaman kemudian kondisinya dijadikan SSD dengan menggunakan alat hair dryer.

- Ambil pasir/copper slag yang telah dalam keadaan SSD sebanyak 500 gr, kemudian dioven sampai suhu 110 ± 5 derajat celcius selama 24 jam.

- Pasir/copper slag yang telah dioven ditimbang (W_1).

- Besarnya air resapan pasir/copper slag ditentukan dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{Berat Jenis} = \frac{500 W_1}{W_2} \times 100\%$$

Dimana :

W_1 = berat pasir/copper slag kering oven

3.3.2.1.6. Analisa Kadar Lumpur Cara Basah (ASTM C 142 - 78)

- **Tujuan :**
 - Menentukan banyaknya kadar lumpur dalam pasir/copper slag.
- **Bahan :**
 - Pasir/copper slag SSD.
 - Air.
 - Larutan garam 3% dibuat dengan mencampur air 400 ml dan garam 12 gr.
- **Peralatan :**
 - Gelas ukur.
- **Prosedur Pelaksanaan :**
 - Isi gelas ukur dengan pasir/copper slag sebanyak \pm 250 ml.
 - Isikan larutan garam kedalam gelas ukur yang terisi pasir/copper slag sebanyak 400 ml.
 - Gelas ukur yang berisi pasir/copper slag + larutan garam di kocok dan didiamkan selama 24 jam.
 - Catat lumpur yang mengendap (h).
 - Catat juga tinggi pasir/copper slag (H).
 - Besarnya kadar lumpur ditentukan dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{Kadar Lumpur} = (h/H) \times 100\%$$

3.3.2.1.7. Analisa Berat Volume (ASTM C 29 - 78)

- **Tujuan :**
 - Menentukan berat volume pasir/copper slag.

- **Bahan dan Peralatan :**

- Pasir/copper slag asli.
- Timbangan analitis 20 kg.
- Takaran silinder volume 7 liter.
- Alat perojok diameter 16 mm, panjang 60 cm.

- **Prosedur Pelaksanaan :**

- Timbang silinder (W_1).
- Silinder diisi tiap 1/3 bagian, dan masing-masing 1/3 tersebut lalu dirojok.
- Timbang berat pasir/copper slag yang telah dirojok bersamaan dengan silindernya (W_2).
- Cara perhitungan :

$$\text{Berat volume} = ((W_2 - W_1) / V)$$

Dimana :

V = volume silinder

Tanpa Rojokan :

- Timbang silinder (W_1).
- Isi silinder dengan agregat halus (pasir/copper slag), lalu ratakan kemudian ditimbang (W_2).
- Cara perhitungan sama dengan pada rojokan.

3.3.2.2. Agregat Kasar

Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini adalah batu pecah (crushed) dengan diameter 10 - 20 mm berasal dari UPB Pandaan dan dikonsumsi oleh PT. Varia Usaha Beton, Waru - Sidoarjo. Untuk keperluan mix desain beton, dilakukan analisa material yang meliputi analisa ayakan (ASTM C 136 – 93), spesific gravity (ASTM C 128 – 93), air resapan (ASTM C 127 – 77) dan keausan/abrsasi (ASTM C 131 – 89).

3.3.2.2.1. Analisa Ayakan (ASTM C 136 - 93)

- **Tujuan :**

- Menentukan distribusi ukuran butir / gradasi dari batu pecah.

- **Bahan :**

- Batu pecah dalam kondisi kering oven.

- **Peralatan :**

- Timbangan 25 kg.
- Satu set ayakan ASTM, sesuai dengan tabel 3.2.
- Alat penggerak listrik.

Tabel 3.2. Ayakan Agregat Kasar

| Nomor Ayakan | Diameter Lubang (mm) |
|--------------|------------------------|
| 1,5" | 38,1 |
| 1" | 25,4 |
| 3/4" | 19,1 |
| 3/2" | 12,7 |
| 2 | 9,5 |
| 4 | 4,76 |
| 8 | 2,38 |
| 16 | 1,19 |
| 30 | 0,59 |
| 50 | 0,29 |
| 100 | 0,15 |
| Pan | - |



- **Prosedur Pelaksanaan :**

- Timbang batu pecah dalam keadaan kering sebanyak 3000 gr.
- Masukkan batu pecah dalam ayakan dengan ukuran saringan paling besar atau nomor saringan paling besar di atas.
- Kemudian digetarkan dengan mesin penggetar \pm 10 menit. Batu pecah yang tertinggal pada tiap-tiap ayakan ditimbang.

3.3.2.2. Analisa Berat Jenis (ASTM C 128 - 93)

- **Tujuan :**

- Menentukan berat jenis agregat kasar dalam kondisi SSD.

- **Bahan :**

- Agregat kasar dalam kondisi SSD.

- **Peralatan :**

- Timbangan 25 kg.

- Keranjang kawat.
- Oven.
- Hair dryer/kipas angin.
- **Prosedur Pelaksanaan :**
 - Batu pecah yang direndam selama 24 jam diangkat kemudian dilap satu persatu.
 - Timbang batu pecah sebanyak 3000 gr, kemudian masukkan kedalam keranjang kawat.
 - Batu pecah tersebut ditimbang beratnya dalam air (W_1).

$$\text{Berat Jenis} = \frac{3000}{3000 - W_1} \times 100 \%$$

Dimana : W_1 = berat batu pecah dalam air

3.3.2.2.3. Analisa Air Resapan (ASTM C 127 - 77)

- **Tujuan :**
 - Menentukan kadar air resapan batu pecah.
- **Bahan :**
 - Batu pecah dalam kondisi SSD.
- **Peralatan :**
 - Timbangan 25 kg.
 - Oven.
- **Prosedur Pelaksanaan :**
 - Timbang kerikil kondisi SSD sebanyak 300 gr.
 - Masukkan dalam oven selama 24 jam.
 - Batu pecah dikeluarkan dan setelah dingin ditimbang beratnya (W_1).

- Besarnya kadar air resapan ditentukan dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{Kadar air resapan} = ((300 - W_1) / W_1) \times 100\%$$

Dimana :

W_1 = berat kerikil kondisi kering oven

3.3.2.2.4. Analisa Keausan (ASTM C 131 - 89)

- Tujuan :

- Menentukan prosentase keausan dan kelayakan dari batu pecah dengan mesin Los Angeles.

- Bahan :

- Batu pecah dalam keadaan kering.

- Peralatan :

- Mesin Los Angeles.

- Siapkan bola-bola baja dengan diameter rata-rata 4,68 cm dengan berat masing-masing 390-445 gram (jumlah kebutuhan bola lihat tabel 3.3).

Tabel 3.3. Jumlah Kebutuhan Bola Besi

| Zona Grading | Jumlah Bola | Berat B.Uji (gr) |
|--------------|-------------|------------------|
| A | 12 | 5000 ± 25 |
| B | 11 | 4584 ± 25 |
| C | 8 | 3300 ± 25 |
| D | 6 | 2500 ± 25 |

- Satu set ayakan ASTM.
- Timbangan dengan ketelitian 0,1 gram.
- Oven.

- Prosedur Pelaksanaan :

- Ambil benda uji sesuai Tabel 3.4

Tabel 3.4. Grading Benda Uji

| Ukuran Ayakan | | Indikasi Berat (Gram) Grading | | | |
|---------------|----------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Lolos | Tertahan | A | B | C | D |
| 37,5 mm | 25,0 mm | 1250 ± 25 | - | - | - |
| 25,0 mm | 19,0 mm | 1250 ± 25 | - | - | - |
| 19,0 mm | 12,5 mm | 1250 ± 10 | 1250 ± 25 | - | - |
| 12,5 mm | 9,5 mm | 1250 ± 10 | 1250 ± 25 | - | - |
| 9,5 mm | 6,2 mm | - | - | 2500 ± 25 | - |
| 6,3 mm | 4,75 mm | - | - | 2500 ± 25 | - |
| 4,75 mm | 2,36 mm | - | - | - | 5000 ± 10 |
| Total | | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 | 5000 ± 10 |

- Benda uji dibersihkan dan dikeringkan dalam oven pada suhu 105-110 derajat celcius sampai beratnya konstan.
- Masukkan benda uji dan bola-bola baja ke dalam mesin Los Angeles.
- Mesin Los Angeles diputar sebanyak 500 putaran dengan kecepatan 30-33 rpm.
- Setelah selesai dilakukan pemutaran, benda uji dikeluarkan dari mesin Los Angeles dan dilakukan penyaringan dengan saringan No.12 (1,70 mm). Butiran yang tertahan diatasnya kemudian dicuci bersih, selanjutnya dikeringkan dalam oven dengan suhu 105-110 derajat celcius sampai beratnya konstan.

II Perhitungan :

$$\text{Prosentase Lolos} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% < 50\%$$

Dimana :

W_1 = berat awal benda uji

W_2 = berat benda uji setelah pemutaran

3.4. AIR

Air yang dipakai adalah air yang berasal dari PDAM. Total air dalam mix beton terdiri dari air yang diserap oleh agregat sampai menjadi kondisi jenuh kering permukaan (saturated surface dry) dan air bebas yang digunakan untuk hidrasi semen dan untuk workabilitas dari beton segar.

Workabilitas dari beton tergantung dari besarnya eksistensi kandungan air bebas. Jumlah kandungan air yang sama digunakan dengan agregat kering, yang mempunyai perbedaan workabilitas. Serupa dengan di atas, kekuatan beton dapat dikaitkan dengan faktor air semen secara lebih tepat karena dasar kekuatan beton tidak tergantung dari karakteristik absorpsi agregat. Faktor air semen ditunjukkan dalam penelitian ini dengan rasio dari berat faktor air semen dalam campuran dan agregat pada kondisi permukaan kering jenuh (saturated surface dry).

3.5. TRIAL MIX DESAIN

3.5.1. Pengamatan Pemakaian Copper Slag

Copper Slag yang digunakan dalam campuran beton memiliki kekédapan yang tinggi yang berarti kelembaban material ini juga lebih kecil. Resapan yang kecil ini mampu mempengaruhi kebutuhan air dalam beton, sehingga dapat diperkirakan campuran beton yang menggunakan copper slag akan membutuhkan jumlah air yang lebih sedikit bila dibandingkan dengan beton yang tanpa copper slag.

3.5.2. Variasi Copper Slag

Kadar Copper Slag yang digunakan dalam penelitian ini merujuk pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Hwang, CL., and Laiw J.S dengan topik ‘Properties of Concrete Using Copper Slag as a Substitute for Fine Aggregat’, (1989), yang menggunakan variasi 0 - 100% persentase copper slag dari agregat halus dengan interval 20%. Penelitian yang dilakukan oleh Kandar, (1999), juga digunakan kadar yang sama, akan tetapi dengan kondisi material yang berbeda dari penelitian diatas dan didapat hasil yang tidak terlalu jauh antara 0% copper slag dengan 20% copper slag, maka diambil kadar copper slag mulai dari 30% hingga 60% dengan interval 10% sehingga persentase pengganti agregat halus yaitu 0%, 30%, 40%, 50% dan 60%. Pada penelitian ini kami menggunakan hasil kombinasi persentase agregat halus yang menghasilkan kuat tekan yang paling optimum dari penelitian Kandar yaitu 40 % copper slag dan 60 % pasir dengan mengoptimasikan pada variasi gradasi agregat halus. Selanjutnya tanpa menggunakan bahan tambahan dibuat campuran beton untuk benda uji High Strength Concrete.

3.5.3. Trial Variasi Campuran

Copper Slag yang digunakan sebagai substitusi terhadap agregat halus pasir Lumajang dengan kombinasi 40 % copper slag dan 60 % pasir, dicoba variasi 5 kombinasi pada gradasi gabungan agregat halus , dimana trial ini dilakukan pada kuat tekan umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari.

3.6. MIX DESAIN BETON

3.6.1. Metode Mix Desain

Metode yang digunakan dalam pembuatan campuran beton adalah **Metode DoE 1988** (Department of Environmental), dimana pada metoda ini tidak lagi menggunakan zona grading seperti pada metode DoE tahun 1973. Dan sebagai acuan untuk mencari kadar agregat halus didasarkan pada persentase agregat halus yang lolos ayakan 600 mikron (No.30). Sesuatu yang paling diutamakan pada beton adalah kuat tekan, dari kuat tekan dominan dipengaruhi nilai

faktor air semen (w/c), sedangkan w/c tergantung pada penentuan kadar air bebas.

Dengan semakin beratnya agregat, berarti porositas kecil sehingga penyerapan air sedikit, hal ini menyebabkan campuran beton akan memerlukan jumlah air kecil untuk mencapai workabilitas yang sama dengan agregat yang beratnya kecil. Dari hal tersebut maka dengan pengurangan air dalam campuran beton akan memperkecil faktor air semen yang pada akhirnya justru memperbesar strength yang terjadi.

Batasan terkecil yang ditentukan dalam besarnya kuat tekan beton mutu tinggi (High Strength Concrete) adalah 41 Mpa (6000 psi), sesuai dengan ACI Committee 363 "State-of-the-Art on High Strength Concrete". Untuk satu daerah dengan daerah lainnya, kriteria High Strength adalah bervariasi, karena ada daerah yang mampu memproduksi beton dengan kuat tekan 62 Mpa.

3.6.2. Perhitungan Mix Desain

3.6.2.1. Kekuatan Beton Rata-rata

Pada penelitian ini target kekuatan yang direncanakan adalah beton dengan kuat tekan karakteristik 60 MPa (N/mm^2). Dengan mempertimbangkan adanya suatu probabilitas akan mendapat hasil dibawah kekuatan yang diharapkan menurut standard BS. 5328 dan BS. 8110 benda uji direkomendasikan cacat besar 5 %. Kecenderungan beton bervariasi dalam proses produksi merupakan sesuatu yang sangat penting untuk mendesain dengan kekuatan target rata-rata melebihi kuat tekan minimum/karakteristik sesuai rumus :

$$f_m = f_c' + k * s$$

Dimana :

f_m = Target kuat tekan rata-rata

f_c' = Kuat tekan karakteristik

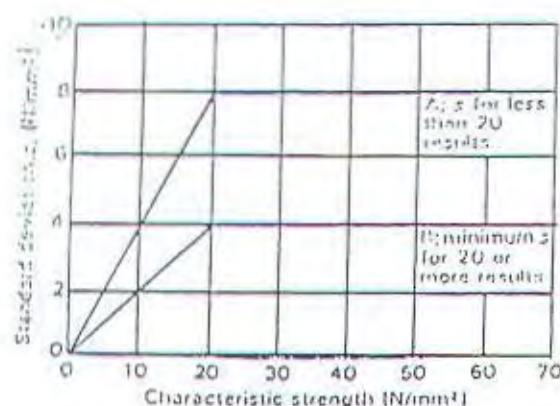
k = Nilai yang disesuaikan dengan % cacat yang diijinkan (bila direncanakan 5 % cacat, $k = 1,64$)

s = Standard deviasi (besarnya standard deviasi rencana dapat dilihat pada gambar 3.1).

Beton dengan spesifikasi kekuatan karakteristik sebesar 60 MPa, standard deviasinya adalah 8 MPa. Sehingga :

$$f_m = 60 + (1,64 \times 8)$$

$$f_m = 73,12 \text{ MPa}$$



Gambar 3.1. Hubungan Antara Standard Deviasi Dan Kuat Tekan Karakteristik

3.6.2.2. Penentuan Nilai Slump

Dalam penelitian ditetapkan nilai slump antara 30 – 60 mm. Untuk mengetahui apakah campuran beton workable atau tidak, ukuran yang paling mudah adalah dengan melihat slump yang dihasilkan merupakan metode tertua dan banyak dipakai. Dan satu hal lagi ketentuan yang harus dimiliki beton mutu tinggi yaitu pumpability, merupakan beton untuk dipompa oleh concrete pump untuk kecepatan penyelesaian pekerjaan dari pada pengecoran manual.

Sesuai dengan standard ASTM C 107 tentang flowing concrete, didefinisikan sebagai beton yang mempunyai nilai slump 190 mm. Karena beton yang dibuat dalam penelitian ini tanpa menggunakan chemical admixture untuk mempertahankan kekuatan beton sehingga tercapai digunakan dan diperoleh dari tabel 3.5.

Tabel 3.5. Metode Untuk Mencari Nilai Slump Dari Agregat

Max Dan Kadar Air Bebas

| Ukuran agregat Maksimum (mm) | Type Agregat | Kadar air bebas (kg/m ³) | | | |
|-----------------------------------|-----------------|--------------------------------------|---------|---------|----------|
| | | Pada slump (mm) | | | |
| | | 0 - 10 | 10 – 30 | 30 - 60 | 60 - 180 |
| 10 | Uncrushed | 150 | 180 | 205 | 225 |
| | Crushed | 180 | 205 | 230 | 250 |
| 20 | Uncrushed | 135 | 160 | 180 | 195 |
| | Crushed | 170 | 190 | 210 | 225 |
| 40 | Uncrushed | 115 | 140 | 160 | 175 |
| | Crushed | 155 | 175 | 190 | 205 |

3.6.2.3. Penentuan Ukuran Agregat Maksimum

Dalam penelitian ini ukuran agregat maksimum yang digunakan sebesar 20 mm . Kuat tekan beton optimum diperoleh dengan faktor air semen minimum, tetapi untuk alasan workabilitas dan pumpability yang tinggi maka digunakan ukuran agregat maximum yang rendah / kecil, seperti 12,7 mm atau 9,5 mm (ACI Committee 363, ‘State-of-the-Art Report on High Strength Concrete’).

3.6.2.4. Penentuan Ratio W/C (FAS)

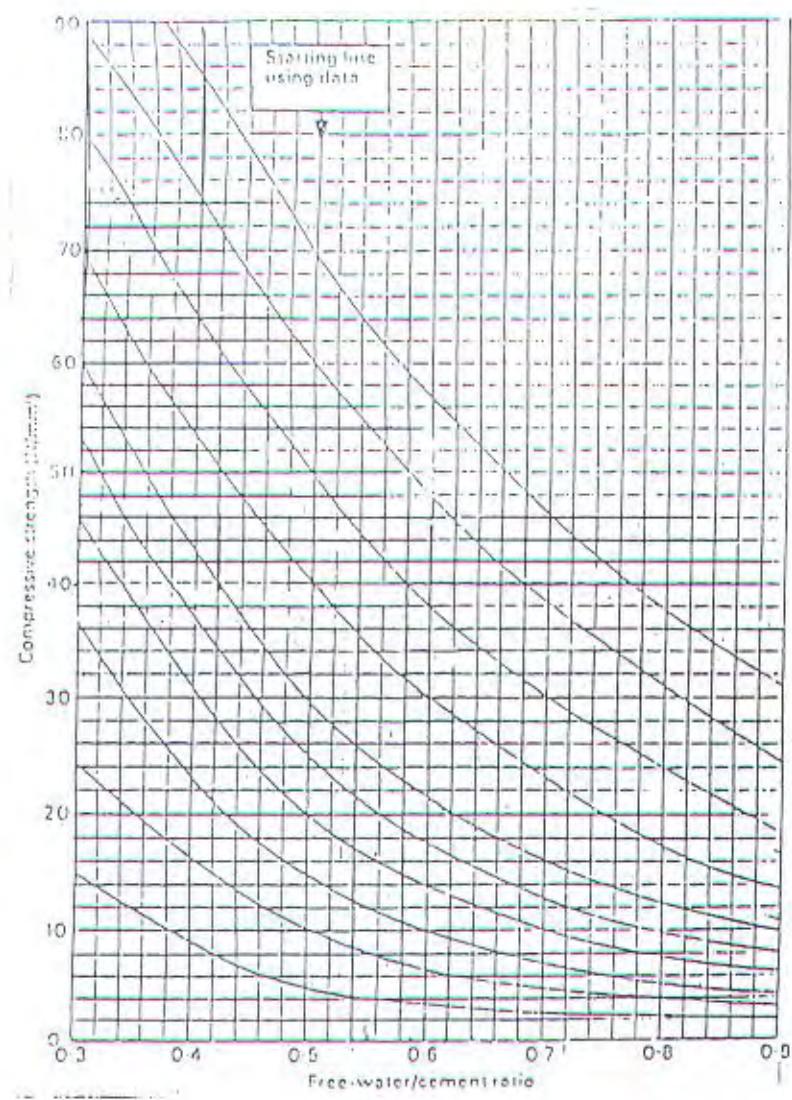
Rasio w/c merupakan perbandingan antara kadar air bebas terhadap kadar semen dalam campuran beton. Faktor air semen atau rasio w/c berhubungan langsung dengan kekuatan tekan beton yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan pendapat Troxell and Davis, (1956), yang menyatakan bahwa salah satu yang mempengaruhi kuat tekan beton adalah water – cement (w/c ratio). Dimana semakin kecil rasio w/c maka kuat tekan beton semakin besar. Pada prinsipnya kekuatan beton khususnya beton mutu tinggi mengandalkan porositas atau kekedapan yang ditentukan langsung oleh rasio w/c. Kisaran rasio w/c pada beton mutu tinggi antara 0,25 - 0,40 (ACI Committee 363 “State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete”).

Setelah target kuat tekan rata-rata ditentukan, maka langkah selanjutnya adalah penentuan rasio w/c. Penentuan w/c yang dibutuhkan

untuk mendapatkan kekuatan beton seperti yang direncanakan tergantung pada target kekuatan rata-rata, jenis semen yang dipakai, tipe agregat kasar yang digunakan dan umur rencana kekuatan beton yang akan dicapai. Kuat tekan yang didapat dari tabel 3.6 kemudian diplot pada grafik 3.2 sehingga didapatkan faktor air semen yang sesuai dengan target kuat tekan rata-rata yang dikehendaki. Dalam penelitian ini menggunakan rasio (w/c) 0.45 karena tidak menggunakan bahan tambahan chemical.

Tabel 3.6. Perkiraan Kuat Tekan Beton (w/c = 0.5)

| Tipe Semen | Tipe Agregat Kasar | Kuat Tekan (MPa), Umur (Hari) | | | |
|--|-----------------------|-------------------------------|----|----|----|
| | | 3 | 7 | 28 | 92 |
| Normal portland cement atau sulfat resisting Portland cement | Uncrushed | 22 | 30 | 42 | 49 |
| | Crushed | 27 | 36 | 49 | 56 |
| Rapid hardening portland cement | Uncrushed | 29 | 37 | 48 | 54 |
| | Crushed | 34 | 43 | 55 | 61 |



Gambar 3.2. Hubungan Antara Rasio w/c Terhadap Target Kuat Tekan Rata-rata

3.6.2.5. Penentuan Kadar Semen Dalam Mix Desain

Karena pemakaian rasio w/c telah ditentukan besarnya, maka sekaligus kadar semen per meter kubiknya juga ditetapkan sesuai mix desain beton mutu tinggi pada umumnya. Menurut ACI Committee 363, pada umumnya semen yang digunakan dalam pembuatan High Strength Concrete antara $392 - 557 \text{ kg/m}^3$. Pada penelitian ini digunakan kadar semen 500 kg/m^3 , dimana mendekati titik optimum dan diharapkan akan menghasilkan kekuatan tekan yang optimum.

3.6.2.6. Penentuan Kadar Air Bebas

Dengan ditetapkannya rasio w/c dan kadar semen, secara otomatis kadar air bebas dapat ditentukan. Kadar air bebas sangat mempengaruhi sifat-sifat beton antara lain workabilitas, pumpabilitas dan sifat fisik semen. Dalam penelitian ini diperoleh kadar air bebas :

$$\text{Kadar semen (PC)} = \text{kadar air bebas} / \text{ratio (W/C)}$$

$$\text{Kadar air bebas} = \text{kadar semen (PC)} \times \text{ratio (W/C)}$$

$$\text{Kadar air bebas} = 500 \text{ kg/m}^3 \times 0,45$$

$$\text{Kadar air bebas} = 225 \text{ kg/m}^3$$

3.6.2.7. Penentuan Proporsi Agregat Halus Dan Agregat Kasar

Dalam menentukan agregat halus yang proporsional untuk campuran beton tergantung pada faktor air semen, ukuran agregat maksimum, slump rencana dan grading agregat. Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan campuran antara pasir Lumajang dengan copper slag, yang terdiri dari komposisi 40% copper slag dan 60% pasir untuk 5 kombinasi gradasi gabungan agregat halus. Sehingga proporsi agregat halus adalah sebagai berikut :

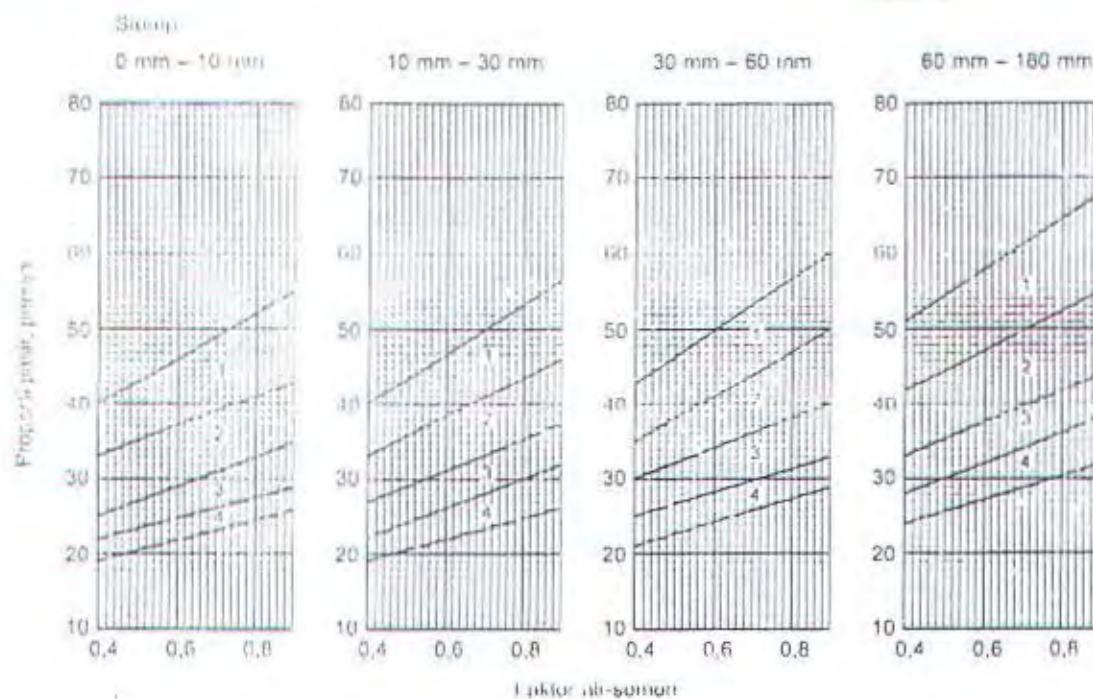
$$\text{Kadar agregat halus} = \text{kadar agregat total} \times \text{proporsi agregat halus}$$

$$\text{Kadar agregat kasar} = \text{kadar agregat total} - \text{kadar agregat halus}$$

Pada grafik 3.3. ditunjukkan nilai yang proporsional dari agregat halus tergantung dari :

- Ukuran agregat maksimum
- Tingkat workability
- Grading dari agregat halus (ditentukan prosentase butiran lolos ayakan 600 mikron).
- Dan rasio FAS

Proporsi agregat halus dicari dengan mengetahui data persentase agregat halus yang lolos ayakan 600 mikron (No. 30 ukuran 0,59 mm) dalam kasus ini diketahui 46,36 %, Sehingga menunjukkan pada grafik 3.2 dengan ukuran agregat maksimum 20 mm dan slump diantara 30 – 60 mm, sehingga diperoleh proporsi agregat halus sebesar 37,5 %.



Gambar 3.3. Persentase Agregat Halus Terhadap Agregat Keseluruhan
Untuk Ukuran Butir Maksimum 20 mm

3.6.2.8. Penentuan Kepadatan Beton

Untuk mencari kadar agregat total maka terlebih dahulu kita mencari kepadatan beton basah. Kepadatan beton basah dapat dicari dengan menggunakan grafik 3.3, dimana sangat bergantung pada :

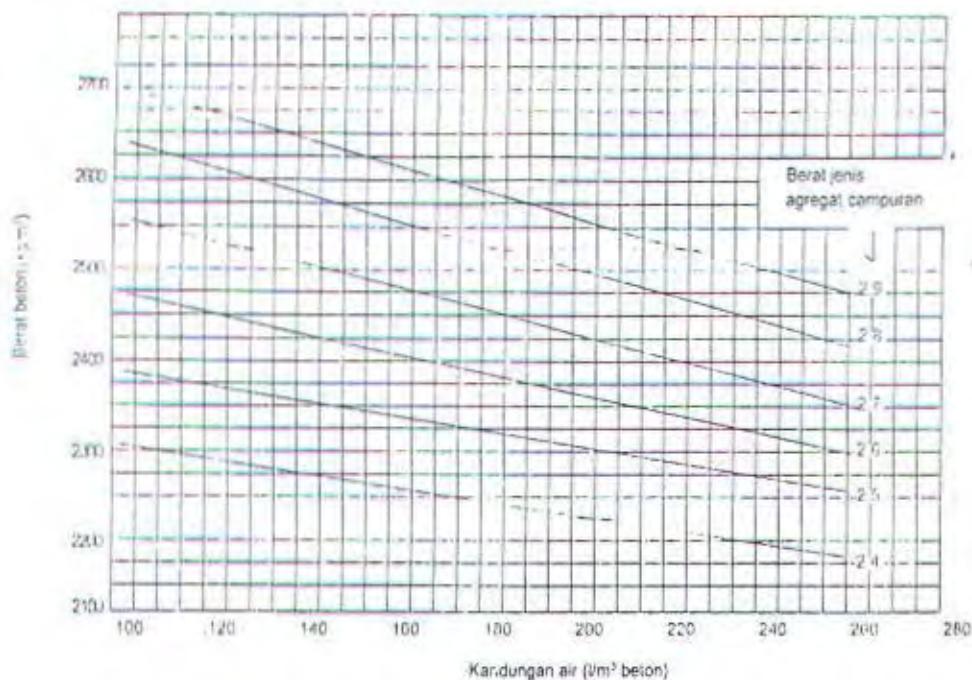
- Kadar air bebas
- Berat jenis kombinasi relatif agregat

Setelah mengetahui BJ gabungan agregat halus yaitu 2,98 kg / l dan BJ agregat kasar 2,71 kg / l serta proporsi agregat halus 37,5 % terhadap agregat gabungan diperoleh BJ agregat gabungan :

$$\begin{aligned}
 &= 0,375 \times 2,98 + 0,625 \times 2,71 \\
 &= 2,81 \text{ kg / l}
 \end{aligned}$$

Dengan adanya data – data kadar air bebas dan BJ relatif agregat, maka kepadatan beton dapat dicari untuk masing – masing campuran dengan menggunakan grafik 3.4 :

Untuk beton normal kepadatan beton = 2450 kg / m³



Gambar 3.4. Hubungan Kandungan Air, Berat Jenis Agregat Campuran, Dan Berat Beton

3.6.2.9. Perhitungan Kadar Agregat Total

Agregat menempati 70 - 80% volume total beton sehingga pengaruh agregat dalam menentukan sifat-sifat beton sebenarnya sangat besar terutama dalam hal kuat tekan dan harga dari agregat sendiri sangat murah. Untuk itu perlu diusahakan pembuatan campuran beton dengan menggunakan agregat sebanyak mungkin, tetapi karena alasan workabilitas dan pumpabilitas pemakaian agregat dibatasi.

Perhitungan kadar agregat total dalam campuran beton berdasarkan volume dari material untuk menghasilkan volume beton satu meter kubik dengan toleransi kurang lebih 2 %. Perhitungan dalam membuat satu meter kubik beton dengan kadar semen 500 kg/m^3 yaitu :

$$\text{Kadar agregat total (SSD)} = D - C - W$$

Dimana : D = Kepadatan beton basah (kg/m^3)

C = Kadar semen (kg/m^3)

W = Kadar air bebas (kg/m^3)

$$\begin{aligned}\text{Jadi kadar agregat total} &= D - C - W \\ &= 2450 - 500 - 225 \\ &= 1725 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Sehingga kebutuhan agregat total untuk pembuatan satu meter kubik beton dengan semen 500 kg adalah sebesar 1725 kg/m^3 yang terdiri dari agregat halus dan agregat kasar.

3.6.2.10. Penentuan Kadar Agregat Halus

Kadar agregat halus ini adalah hasil kali antara proporsi agregat halus dengan kadar total agregat, sehingga :

$$\begin{aligned}\text{Kadar agregat halus} &= 0,375 \times 1725 \\ &= 647 \text{ Kg /m}^3\end{aligned}$$

3.6.2.11. Penentuan Kadar Agregat Kasar

Total agregat kasar dicari dari selisih antara total kadar agregat dengan kadar agregat halus sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned}\text{Kadar agregat kasar} &= 1725 - 647 \\ &= 1078 \text{ kg / m}^3\end{aligned}$$

3.6.2.12. Kesimpulan hasil perhitungan mix desain

Hasil perhitungan mix desain dari keempat variasi dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 3.7. Mix Desain Metode DoE

| Arahap | Item | Jenis | Variasi Campuran | | | | | |
|--------|------|---|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | Pasir | Kombinasi 1 | Kombinasi 2 | Kombinasi 3 | Kombinasi 4 | Kombinasi 5 |
| 1. | 1.1 | Kuat tekan karakteristik (MPa) | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| | 1.2 | Standar deviasi (MPa) | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| | 1.3 | Margin ($k = 1,64$) (MPa) | 13,12 | 13,12 | 13,12 | 13,12 | 13,12 | 13,12 |
| | 1.4 | Target kuat tekan Rata – rata (MPa) | 73,12 | 73,12 | 73,12 | 73,12 | 73,12 | 73,12 |
| | 1.5 | Tipe Semen | I | I | I | I | I | I |
| | 1.5 | Tipe Agregat Kasar | Crushed | Crushed | Crushed | Crushed | Crushed | Crushed |
| 2. | 2.1 | Tipe Agregat Halus | Uncrushed | Uncrushed | Uncrushed | Uncrushed | Uncrushed | Uncrushed |
| | 2.1 | W/C | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 |
| | 2.2 | Slump (mm) | 30 - 60 | 30 - 60 | 30 - 60 | 30 - 60 | 30 - 60 | 30 - 60 |
| 3. | 2.2 | Ukuran Agregat Maximum (mm) | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | 2.3 | Kadar Air Bebas (kg / m ³) | 225 | 225 | 225 | 225 | 225 | 225 |
| 3. | 3.1 | Kadar Semen (kg / m ³) | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| | 3.2 | W / C | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 |
| 4. | 4.1 | Berat jenis relatif Agregat (SSD) (kg / m ³) | 2,81 | 2,81 | 2,81 | 2,81 | 2,81 | 2,81 |
| | 4.2 | Kepadatan Beton (kg / m ³) | 2450 | 2450 | 2450 | 2450 | 2450 | 2450 |
| | 4.3 | Kadar Agregat Total (kg / m ³) | 1725 | 1725 | 1725 | 1725 | 1725 | 1725 |

| | | | | | | | |
|-----|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5. | Grading agregat halus | | | | | | |
| 5.1 | Prosentase lolos saringan 600 mikron (%) | 46,36 | 46,36 | 46,36 | 46,36 | 46,36 | 46,36 |
| 5.2 | Proporsi agregat Halus (%) | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 |
| 5.3 | Kadar agregat halus (kg / m ³) | 647 | 647 | 647 | 647 | 647 | 647 |
| 5.4 | Kadar agregat kasar (kg / m ³) | 1078 | 1078 | 1078 | 1078 | 1078 | 1078 |
| | <u>Per m³ beton</u> | | | | | | |
| | Semen (kg) | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| | Air (liter) | 225 | 225 | 225 | 225 | 225 | 225 |
| 5.5 | Pasir (kg) | 647 | 388,2 | 388,2 | 388,2 | 388,2 | 388,2 |
| | Copper Slag (kg) | - | 258,8 | 258,8 | 258,8 | 258,8 | 258,8 |
| | Batu pecah 10 mm (kg) | 431,2 | 431,2 | 431,2 | 431,2 | 431,2 | 431,2 |
| | Batu pecah 20 mm (kg) | 646,8 | 646,8 | 646,8 | 646,8 | 646,8 | 646,8 |

Tabel 3.8. Proporsi Campuran Hasil Mix Desain

| Per m ³ | Semen | Air | Agg. Halus | Agg. Kasar |
|--------------------|-------|------|------------|------------|
| | (kg) | (kg) | (kg) | (kg) |
| | 500 | 225 | 647 | 1078 |

3.7. PENELITIAN BETON

Benda uji beton yang digunakan adalah silinder 15 x 30 cm. Pengujian yang dilakukan adalah setting time (ASTM C 403 - 95), panas hidrasi beton (ASTM C 1064 - 86), compressive strength (ASTM C 39 – 93a), dan air void beton. Pengujian tersebut akan dilakukan di laboratorium beton & bahan bangunan PT. Varia Usaha Beton Waru - Sidoarjo. Sedangkan pengujian test kecepatan gelombang ultrasonic (ASTM C 597) dilakukan di laboratorium beton & bahan bangunan ITS.

3.7.1. Pembuatan Campuran Beton (ASTM C 192 – 90a)

- **Tujuan**

Campuran beton ini dibuat berdasarkan analisa pada mix desain yang telah dibuat sebelumnya.

- **Peralatan**

- Timbangan 100 Kg
- Gelas ukur.
- Ember dan cetok.
- Molen.
- Palu karet.

- **Bahan**

- Semen portland type I.
- Pasir.
- Copper slag.
- Batu pecah (diameter 10 mm dan 20 mm).

- **Prosedur Pelaksanaan**

1. Disiapkan semua bahan yang diperlukan dalam pembuatan campuran beton.
2. Molen diisi air secukupnya tetapi hanya sekedar untuk membasahi molen tersebut.
3. Dimasukkan semua batu pecah lalu molen mulai diputar untuk beberapa waktu.
4. Dimasukkan semen lalu molen diputar lagi agar agregat dengan semen dapat bercampur dengan merata.
5. Lalu pasir dan copper slag dimasukkan dalam campuran.
6. Air dimasukkan secara bertahap menggunakan gelas ukur ke dalam campuran, molen tetap dalam keadaan berputar.
7. Sejak air mulai dimasukkan sampai adonan dikeluarkan dari molen kira – kira membutuhkan waktu selama 5 – 8 menit.

3.7.2. Pengukuran Slump (ASTM 143 – 90a)

- **Tujuan**

Menentukan nilai slump pada campuran beton segar.

- **Peralatan**

- Cetakan kerucut terpanggung.
- Perojok dengan diameter 16 mm dan panjang 600 mm.
- Penggaris.

- **Bahan**

Beton dalam kondisi basah.

- **Prosedur Pelaksanaan**

1. Adonan beton segar dimasukkan ke dalam alat pengukur slump yang telah dibasahi terlebih dahulu pada tempat yang rata, kuat dan keras.
2. Alat pengukur slump ini harus dipegang dengan mantap.
3. Adonan beton segar ini dimasukkan ke dalam alat pengukur slump tiap 1/3 bagian.
4. Setiap lapisan dirojok masing –masing 25 kali alat rojok. Perojukan harus dilakukan secara merata disetiap sudut permukaan dan dilakukan dengan arah tetap vertikal.
5. Rojokan pada lapisan kedua harus sampai pada permukaan lapisan pertama atas, demikian lapisan ketiga pada lapisan kedua paling atas tetapi masih dimungkinkan sedikit over lap antara lapisan – lapisan tersebut.
6. Setelah penuh lapisan diratakan dengan meng gulung batang perojok dipermukaan sehingga tercapai tingkat kerataan yang diinginkan.
7. Secara perlahan alat pengukur slump diangkat dalam arah vertikal dengan angkatan yang mantap tanpa adanya goyangan maupun usikan.
8. Segera ukur penurunan yang terjadi dengan meletakkan penggaris di sebelah adonan beton tersebut dengan mengambil acuan alat pengukur slump.

3.7.3. Pembuatan Benda Uji (ASTM C 192 – 90a)

- **Tujuan**

Mencetak adonan beton pada cetakan (molding) silinder 15 x 30 cm.

- **Peralatan**

- Cetakan silinder besi ukuran 15 x 30 dengan tebal dinding cetakan 0,33 mm.

- Perojok dengan diameter 16 mm dan panjang 600 mm.
- Palu karet.
- Cetok.
- **Bahan**
Beton dalam kondisi basah.
- **Prosedur Pelaksanaan**
 1. Adonan beton segar dimasukkan ke dalam alat pencetak silinder yang telah dibasahi dindingnya terlebih dahulu dengan oli pada tempat yang rata, kuat dan keras.
 2. Alat cetakan ini harus dipegang dengan mantap.
 3. Adonan beton segar dimasukkan dalam cetakan silinder benda uji tiap 1/3 tinggi cetakan silinder.
 4. Setiap lapisan dirojok masing-masing 25 kali dengan alat perojok, perojokan harus dilakukan secara merata disetiap permukaan luasan dan dilakukan dengan arah tepat vertikal.
 5. Rojokan pada lapisan kedua harus sampai pada permukaan lapisan pertama paling atas, demikian lapisan ketiga pada lapisan kedua paling atas tetapi masih dimungkinkan sedikit over lap antara lapisan – lapisan tersebut.
 6. Setelah penuh diratakan dengan menggulung batang perojok di permukaannya sehingga tercapai tingkat kerataan yang diinginkan.

3.7.4. Perawatan Beton

3.7.4.1. Curing Benda Uji (ASTM C 192 – 90a)

- **Tujuan**
Perawatan (curing) benda uji setelah dikeluarkan dari cetakan sampai hari pengetesan bertujuan untuk :
 - Mencegah pengukuran air secara berlebihan dari lapisan beton yang belum mengeras yang justru dibutuhkan untuk proses pengerasan beton.
 - Mencegah penguapan kebutuhan air selama proses hidrasi semen.
- **Peralatan**
 - Bak curing dengan air tawar.

- **Bahan**

- Benda uji silinder ukuran 15 x 30 cm.
- Air.

- **Prosedur Pelaksanaan**

- Bak curing diisi dengan air sampai batas penempatan benda uji beton.
- Benda uji yang telah dilepas dan cetakannya dimasukkan ke dalam bak curing.

3.7.5. Pengujian Setting Time (ASTM C 403 – 95)

- **Tujuan**

Untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan oleh beton dalam melakukan proses pengikatan beton yang meliputi initial setting dan final setting.

- **Bahan**

Campuran beton sesuai hasil mix desain dengan koreksi seperlunya bila agregat dalam kondisi alami.

- **Peralatan**

- Mesin aduk.
- Sendok aduk.
- Ayakan no.4.
- Wadah adukan.
- Cetakan kubus 150 mm x 150 mm x 150 mm.
- Pnetrometer kapasitas 700 psi.
- Stop watch.

- **Prosedur Pelaksanaan :**

- Campuran beton basah diambil dari mesin aduk dengan menggunakan sendok aduk, lalu diayak dengan menggunakan ayakan no.4 hingga didapatkan campuran beton mortar dan ditampung pada wadah adukan.
- Campuran beton mortar hasil ayakan dimasukkan kedalam cetakan kubus hingga lebih kurang 3/4 bagian.
- Waktu mulai pencampuran beton dalam mesin aduk dicatat.

- Penetrasi dilakukan pada campuran beton mortar dalam cetakan kubus dan dicatat waktu melakukan penetrasi serta nilai yang terbaca pada alat pnetrometer.
- Penetrasi dilakukan sampai didapatkan keadaan nilai yang ditunjukkan alat pnetrometer yaitu 3,5 MPa (initial setting) dan 27,6 MPa (final setting).

3.7.6. Pengujian Temperatur Hidrasi (ASTM C 1064 - 86)

- **Tujuan**

Mengetahui perkembangan temperatur hidrasi beton mulai dari tahap awal proses pengikatan sampai temperatur konstan.

- **Bahan**

Adonan beton yang telah memenuhi slump rencana.

- **Peralatan**

- Kontainer dengan ukuran yang memungkinkan alat pengukur temperatur terbenam minimal 3 in (75 mm) dalam setiap arah dan termometer dengan akurasi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

- **Prosedur Pelaksanaan :**

- Adonan beton yang telah memenuhi slump rencana, kemudian dimasukkan kontainer.
- Letakkan termometer pada campuran tersebut hingga terbenam minimum 75 mm dalam setiap arah. Perlahan-lahan padatkan dan ratakan permukaan beton disekitar termometer agar temperatur udara tidak terpengaruh terhadap pembacaan.
- Biarkan selama 2 menit atau sampai pembacaan temperatur pada termometer stabil. Baca dan catat pembacaan termometer.
- Pengamatan temperatur dilakukan selang 30 menit selama 24 jam.

3.7.7. Pengetesan Kuat Tekan Beton

3.7.7.1. Capping Silinder Benda Uji (ASTM C 617 – 94)

- **Tujuan**

Meratakan permukaan benda uji sebelum dilakukan test tekan hancur.

- **Peralatan**

- Pelat capping terbuat dari metal dengan tebal lapisan 13 mm, dimana pada pelat capping tersebut terdapat lubang diameter untuk

meletakkan silinder benda uji yang berdiameter 25 mm lebih besar dari diameter benda uji dan berkedalaman 0.05 mm.

- Alat penuntun / penyearah beton yang akan dicapping tergabung dengan pelatnya berfungsi mendorong benda uji menuju ke tengah lubang dengan cakupan tidak lebih dari 2 mm.

- **Bahan**

Belerang dengan titik nyala 227 °C

- **Prosedur Pelaksanaan**

1. Belerang dipanaskan sampai meleleh sehingga siap untuk dituang dalam celah/lubang pada alat capping.
2. Pelat capping dilumasi dengan oli, kemudian belerang yang sudah leleh tersebut segera dituangkan.
3. Benda uji silinder beton segera dimasukkan ke pelat capping dengan arah tegak lurus terhadap permukaan alas hingga menyentuh permukaan belerang. Proses ini dapat diper mudah dengan adanya besi siku yang membuat arah beton tegak lurus jika disentuhkan pada besi tersebut.
4. Ditunggu sebentar kemudian benda uji silinder diangkat / dilepaskan dengan ketebalan capping 3 mm setelah belerang pada pelat capping mengeras.

3.7.7.2. Pengujian Kuat Tekan Beton (ASTM C 39 – 93a)

- **Tujuan**

Untuk mengetahui kuat tekan hancur dari beton terhadap pembebanan.

- **Bahan**

Benda uji silinder ukuran 15 x 30 cm

- **Peralatan**

- Alat uji tekan

Merk : Torsee Universal Testing Machine

Type : RAT – 200

Kapasitas : 200 ton

Manufacture ; Tokyo Testing Machine MFG.Ltd. Tokyo Japan

- **Prosedur Pelaksanaan**

- Setelah benda uji mencapai umur yang telah ditentukan, bersihkan kotoran yang menempel dan biarkan sebentar agar air yang menempel dapat menguap.
- Hidupkan mesin uji kuat tekan dan atur kapasitasnya (maks. 200 ton).
- Angkat hammer pembebanan dan letakkan benda uji tepat ditengah garis sumbu pembebanan pada bidang alas hammer.
- Turunkan hammer pembebanan hingga menyentuh permukaan benda uji.
- Mulailah pembebanan dengan kecepatan $1,4 - 3,4 \text{ kg/cm}^2$.
- Catat bacaan hasil kuat tekan test hancur

Adapun besarnya kuat tekan karakteristik dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$f_c' = \frac{P}{A}$$

Dimana :

f_c' = kuat tekan karakteristik, dalam MPa atau dalam kg/cm^2

P = beban uji maximum (beban hancur) yang ditunjukkan mesin uji, dalam N atau dalam kg

A = luas permukaan benda uji yang tertekan, dalam mm^2 atau dalam cm^2

3.7.8. Pengujian Air Void Beton (Prosentase Rongga Yang Terisi Air)

- **Tujuan**

Untuk mengetahui prosentase rongga udara dari benda uji.

- **Peralatan**

▫ Oven

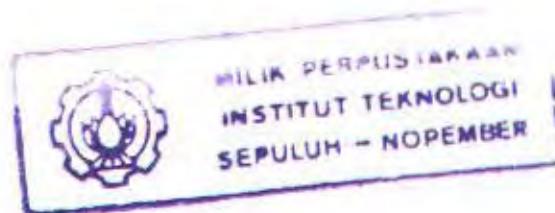
▫ Timbangan

- **Bahan**

Benda uji silinder $15 \times 30 \text{ cm}$

- **Prosedur Pelaksanaan**

▫ Benda uji diangkat dari tempat curing umur 28 hari.



- Kemudian benda uji ditimbang dalam keadaan kering permukaan.
- Selanjutnya dioven pada suhu $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ sampai didapat berat konstan.
- Besamya air void didapat dengan rumus :

$$\text{Prosentase air void} = \frac{W_{ssd} - W_0}{V \times B_{J_1}} \times 100\%$$

Dimana :

W_{ssd} = berat benda uji keadaan kering permukaan setelah direndam (Kg)

W_0 = berat benda uji setelah dioven (Kg)

V = volume benda uji (m^3)

B_{J_1} = berat jenis larutan (Kg / m^3)

3.7.9. Pengujian Ultrasonic

- **Tujuan**

Untuk mengetahui kualitas beton dan mengindikasi adanya rongga dan retak pada beton

- **Peralatan**

▫ MARUI & CO. LTD NO.1176 OSAKA JAPAN TOKYO

- **Bahan**

▫ Benda uji silinder 15×30 cm.

▫ Minyak Pelumas/Stempet.

- **Prosedur Pelaksanaan**

▫ Setelah benda uji mencapai umur yang telah ditentukan yaitu 28 hari, bersihkan kotoran yang menempel.

▫ Kemudian permukaan atas dan bawah benda uji diolesi stempet yang bertujuan untuk menghindari adanya kontak udara antara permukaan diafragma tranducer dengan permukaan beton .

▫ Selanjutnya ukur ketinggian benda uji sebelum dilakukan pengetesan.

- ii. Hitung kecepatan getaran (pulse velocity) dengan menggunakan rumus .

$$V = \frac{L}{T}$$

Dimana : V = Kecepatan getaran (m/s)

L = Jarak antar tranducer (m)

T = Waktu efektif transit (s)

BAB IV
ANALISA HASIL

BAB IV

ANALISA HASIL

4.1. ANALISA MATERIAL

4.1.1. Pendahuluan

Semen, agregat halus, agregat kasar serta air merupakan material penyusun beton. Material yang digunakan tersebut harus memenuhi standart persyaratan teknis, sehingga nantinya beton yang digunakan sebagai struktur dapat bertahan sesuai dengan umur rencana.

Tiap-tiap negara memiliki standart tes material, misalnya untuk negara Amerika menggunakan standart ASTM (American Society for Testing Material), untuk negara Inggris menggunakan standart BS (British Standard), dan untuk negara Jepang menggunakan standart JIS (Japan Industry Standard). Sedangkan untuk Indonesia menggunakan SII (Standard Industri Indonesia), yang dalam pelaksanaannya banyak mengacu pada ASTM serta BS.

Dalam penelitian ini dilakukan analisa material penyusun campuran beton yang meliputi semen, agregat halus, agregat kasar dan air, yang standart testnya mengacu pada ASTM dan SII.

4.1.2. Analisa Semen

Semen yang digunakan adalah semen tipe I, semen standard yang digunakan untuk keperluan konstruksi umum yang tidak memerlukan persyaratan khusus. Semen yang dipakai ini merupakan produksi dari PT. Semen Gresik, Tbk. Standart mutu yang digunakan mengacu pada ASTM C 150 - 94 dan SNI 15 – 2049 – 94. Analisa yang dilakukan adalah analisa kimia dan analisa fisika.

4.1.2.1. Analisa Kimia Semen Portland

Adapun komposisi senyawa kimia semen Gresik dapat dilihat pada tabel 4.1. dibawah ini :

Tabel 4.1. Analisa Kimia Dan Standard Mutu PC Tipe 1

(PT. Semen Gresik, Tbk.)

| Analisa Kimia | Semen Gresik | SNI 15-2049-94 | ASTM C 150 – 94 |
|---|-----------------|-------------------|--------------------|
| SiO ₂ (% min) | 20,70 | - | - |
| Al ₂ O ₃ (% max) | 6,20 | - | - |
| Fe ₂ O ₃ (% max) | 3,24 | - | - |
| CaO | 64,16 | - | - |
| MgO (% max) | 1,30 | 5,00 | 6,00 |
| SO ₃ (% max) | 1,98 | 3,50 | 3,50 |
| LOI (% max) | 1,13 | 5,00 | 3,00 |
| C ₃ S (% max) | 57,70 | - | - |
| C ₂ S (% max) | 11,15 | - | - |
| C ₃ A (% max) | 10,95 | - | - |
| C ₄ AF + 2C ₃ A (% max) | - | - | - |

Dari data analisa kimia di atas Semen Gresik memenuhi standard mutu yang ditetapkan SNI 15 – 2049 - 94 dan ASTM C 150 - 94.

4.1.2.2. Analisa Fisika Semen Portland

Adapun hasil analisa fisika semen Gresik dapat dilihat pada tabel 4.2 sebagai berikut :

Tabel 4.2. Analisa Fisika Dan Standard Mutu Semen PC Tipe I

| Analisa Fisika | Semen Gresik | SNI 15-2049-94 | ASTM C 150-94 |
|---|--------------|----------------|---------------|
| 1. Kehalusan | | | |
| • Sisa diatas ayakan 0,09 mm % (max) | 2,0 | 10 | - |
| • Blaine, cm^2/gram (min) | 3582 | 2800 | 2800 |
| 2. Waktu pengikatan | | | |
| • Dengan alat vicat | | | |
| Awal, menit (min) | 150 | 45 | 45 |
| Akhir, jam (max) | 5:40 | 8 | 8 |
| • Dengan alat gilmore | | | |
| Awal, menit (min) | 70 | 60 | 60 |
| Akhir, jam (max) | 6:05 | 10 | 10 |
| 3. Kekekalan | | | |
| • Pemuaian autoclave | 0,039 | 0,80 | 0,80 |
| 4. Kekuatan | | | |
| • 3 hari, kg/cm^2 (min) | 212 | 125 | 126 |
| • 7 hari, kg/cm^2 (min) | 298 | 200 | 197 |
| • 28 hari, kg/cm^2 (min) | 407 | 280 | 281 |
| 5. Panas Hidrasi | | | |
| • Setelah 7 hari, cal/gram (min) | - | - | - |
| • Setelah 28 hari, cal/gram (min) | - | - | - |
| 6. Pemuaian karena sulfat | | | |
| • Setelah 14 hari, % max | - | - | - |
| 7. Pengikatan semu | | | |
| • Penetrasi semu, % max | 83,33 | 50 | 50 |

Dari data analisa fisika semen diatas, Semen Portland Tipe I produksi PT. Semen Gresik, Tbk. tersebut memenuhi standard mutu yang ditetapkan oleh SNI 15 – 2049 - 94 dan ASTM C 150 - 94.

4.1.3. Analisa Agregat

4.1.3.1. Analisa Agregat Halus

Dalam penelitian ini digunakan dua jenis agregat halus, yaitu pasir Lumajang yang dikombinasikan dengan copper slag. Keduanya harus memenuhi syarat sebagai bahan campuran beton, karenanya perlu dilakukan tes material sebagai berikut :

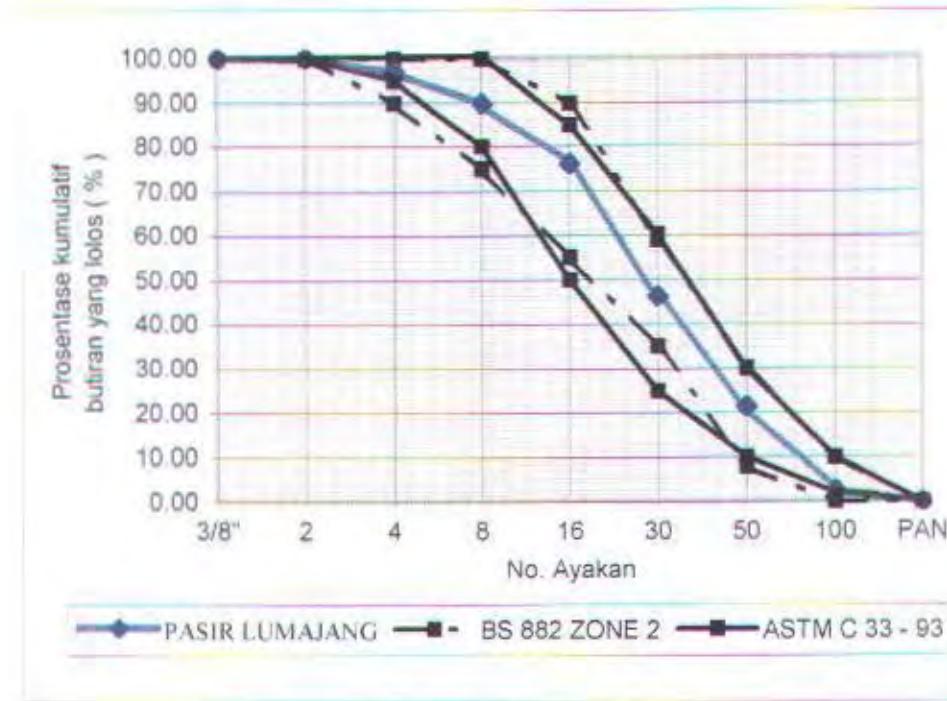
4.1.3.1.1. Analisa Pasir Lumajang

a. Analisa Ayakan Pasir (ASTM C 136 - 93)

Pasir yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir alami Lumajang yang disuplai dari PT. Varia Usaha Beton. Tabel 4.3. dan gambar 4.1. merupakan hasil dari analisa ayakan pasir Lumajang.

Tabel 4.3. Analisa Ayakan Pasir Lumajang

| No. Ayakan | Sive Size (mm) | Tertahan (gram) | Tertahan (%) | Tertahan Kum. (%) | Lolos Kum. (%) |
|---------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| ¾" | 12,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 2 | 9,50 | 9,00 | 0,90 | 0,90 | 100,00 |
| 4 | 4,76 | 22,50 | 2,25 | 3,15 | 96,85 |
| 8 | 2,38 | 69,60 | 6,96 | 10,11 | 89,89 |
| 16 | 1,19 | 137,60 | 13,76 | 23,87 | 76,13 |
| 30 | 0,59 | 297,70 | 29,77 | 53,64 | 46,36 |
| 50 | 0,29 | 248,90 | 24,89 | 78,53 | 21,47 |
| 100 | 0,15 | 188,70 | 18,87 | 97,40 | 2,60 |
| Pan | | 26,00 | 2,60 | - | - |
| Total | | 1000,00 | 100,00 | 267,60 | |
| Modulus Kehalusan = 2,67 | | | | | |



Gambar 4.1. Analisa Ayakan Pasir Lumajang

Dari analisa ayakan diatas, ukuran dari pasir Lumajang masuk dalam batasan ASTM C 33 serta BS 882, ini berarti pasir Lumajang memenuhi standard mutu ASTM C33 - 93 dan masuk dalam **Zone 2** BS 882, dengan modulus kehalusan yang didapat yaitu 2,67. Dan berdasarkan SKSNI S-04-1989-F modulus kehalusan agregat halus berkisar antara 1,5 – 3,8 , sehingga modulus kehalusan pasir Lumajang memenuhi standard SKSNI S-04-1989-F.

b. Analisa Kebersihan Pasir Terhadap Bahan Organik (ASTM C 40 - 79)

Warna hasil pengujian pasir dengan NaOH adalah kuning muda, warna dari pasir Lumajang ini berwarna lebih terang dibandingkan dengan warna pembanding (warna standard yaitu kuning tua). Hal ini sesuai dengan ketentuan yang terdapat pada SKSNI S-04-1989-F dan ASTM C33 – 93.

c. Analisa Soundness (SII . 0088 - 75)

Standard ini meliputi cara uji agregat untuk beton terhadap daya tahan hancur karena pengaruh larutan jenuh garam Natrium Sulfat atau Magnesium Sulfat. Cara uji ini membantu memberikan keterangan mengenai sifat kekal agregat akibat pengaruh garam.

Tabel 4.4. Hasil Analisa Tes Soundness Pasir Lumajang

| No. Ayakan | Susunan Butir Dalam % Berat Dari Contoh Asli (%) | Berat Tiap Fraksi Butir Yang Diuji (gram) | Berat Tiap Fraksi Butir Setelah Diuji (gram) | Persen Berat Bagian Yang Hilang Dari Contoh Asli (%) |
|---------------|--|--|---|--|
| Pan | 2,60 | - | - | - |
| No. 100 | 18,87 | - | - | - |
| No. 50 | 24,89 | 100 | 96,40 | 0,900 |
| No. 30 | 29,77 | 100 | 95,80 | 1,050 |
| No. 16 | 13,76 | 100 | 95,10 | 1,225 |
| No. 8 | 6,96 | 100 | 94,30 | 1,425 |
| No. 4 | 2,25 | - | - | - |
| No. 2 | 0,90 | - | - | - |
| Total | 100,00 | 400,00 | 381,60 | 4,60 |

Jadi besarnya soundness agregat pasir Lumajang dengan larutan magnesium sulfat adalah 4,60 %. Nilai ini masuk dalam ASTM C 33 – 86 persyaratan agregat halus pada tes kekekalan agregat dengan larutan magnesium sulfat yaitu max 15%.

d. Analisa Berat Jenis Pasir (ASTM C 128 - 93)

Tabel 4.5. Analisa Berat Jenis Pasir Lumajang

| Percobaan ke | 1 | 2 | 3 |
|--|------|------|------|
| Berat labu + pasir + air (W_1) (gr) | 1496 | 1498 | 1497 |
| Berat pasir SSD (gr) | 500 | 500 | 500 |
| Berat labu + air (W_2) (gr) | 1185 | 1185 | 1185 |
| $BJ \text{ pasir} = 500 / 500 - (W_1 - W_2)$ | 2,65 | 2,67 | 2,66 |

Berat jenis rata-rata pasir Lumajang = 2,66

Dari data diatas berat jenis pasir Lumajang tersebut dikatakan tergolong jenis normal weight atau beton dengan berat jenis agregat normal yaitu antara 1,60 sampai 3,20 (ACI Committee 221, "Guide for use normal weight aggregate in concrete").

e. Analisa Air Resapan Pasir (ASTM C 128 - 93)

Tabel 4.6. Analisa Resapan Pasir Lumajang

| Percobaan ke | 1 | 2 | 3 |
|---|-------|-------|-------|
| Berat pasir SSD (gr) | 500 | 500 | 500 |
| Berat pasir oven (W_1) (gr) | 493,5 | 493,4 | 493,2 |
| Kadar resapan pasir $= (500 - W_1 / W_1) \times 100\%$ | 1,31 | 1,33 | 1,37 |

Kadar air resapan rata-rata pasir Lumajang = 1,34 %

Air yang meresap kedalam agregat berada dalam pori-pori antar butir dan ini tidak tampak dari permukaan. Banyaknya air ini dipengaruhi banyaknya pori-pori yang ada dalam butir agregat. Pada agregat normal kemampuan menyerap air pada agregat sekitar 1 % - 2 %. Jadi dari data diatas, pasir Lumajang tersebut dikatakan tergolong jenis agregat normal. Harga itu adalah kadar air dalam agregat jenuh kering muka (Dr.Wuryati S. ,M.Pd dan Candra R. ,ST, " Teknologi Beton").

f. Analisa Kadar Lumpur (ASTM C 142 - 78)

Tabel 4.7. Analisa Kadar Lumpur

| Percobaan ke | 1 | 2 | 3 |
|-------------------------------------|------|------|------|
| Tinggi Lumpur (h) | 2 | 2 | 2 |
| Tinggi Pasir (H) | 178 | 179 | 182 |
| Kadar Lumpur = $(h/H) \times 100\%$ | 1,12 | 1,11 | 1,09 |

Kadar lumpur rata-rata = 1,11 %

Menurut SKSNI S-04-1989-F, nilai ini masuk dalam persyaratan agregat halus pada tes kadar lumpur maksimum 5%.

g. Analisa Berat Volume (ASTM C 29 - 78)

Tabel 4.8. Analisa Berat Volume

| Percobaan | Dengan rojokan | Tanpa rojokan |
|---|----------------|---------------|
| Berat Silinder (W_1) | 2585 | 2585 |
| Volume Silinder | 3000 | 3000 |
| Berat Silinder + Pasir (W_2) | 7415 | 6755 |
| Berat Volume Pasir = $(W_2 - W_1) / \text{Volume Silinder}$ | 1,61 | 1,39 |

Berat volume pasir rata-rata : 1,5 gr/lt

Dari data berat volume pasir Lumajang yaitu 1,5 gr/lt, nilai ini masuk dalam persyaratan agregat halus pada tes berat volume yaitu sesuai dengan berat jenisnya, juga tergolong jenis normal weight atau beton dengan berat volume agregat normal yaitu minimal 1120 kg/m^3 atau 70 lb/ft^3 (ASTM C 330 - 89). Secara umum dinyatakan bahwa semakin besar berat jenis agregat maka semakin massif dan semakin besar pula berat volume agregat, sehingga kuat tekan beton yang dihasilkan akan semakin meningkat.

4.1.3.1.2. Analisa Copper Slag

Untuk analisa terhadap copper slag, dalam tugas akhir ini pengamatan spesifik dilakukan terhadap material tersebut meliputi analisa fisika dan kimia.

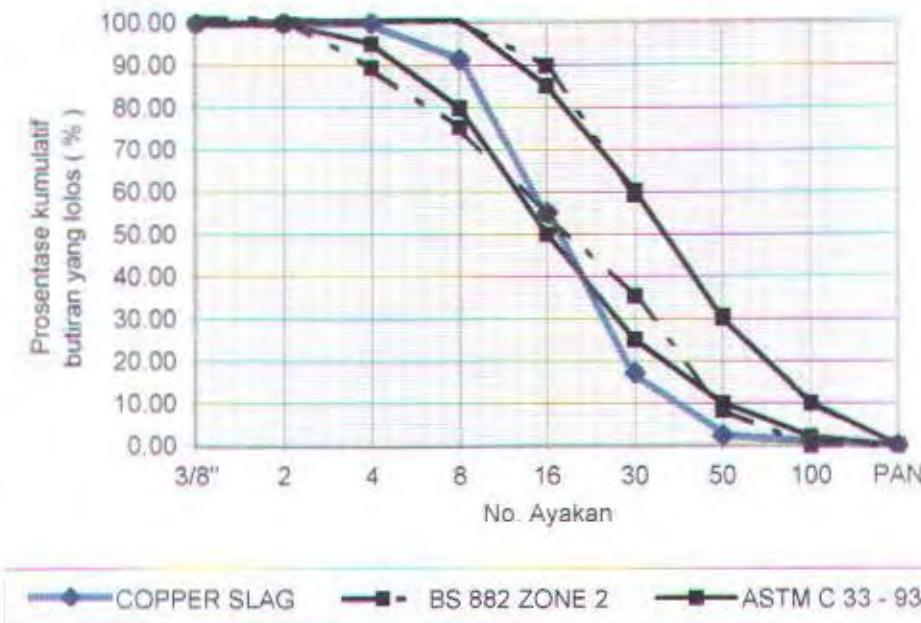
4.1.3.1.2.1. Analisa Fisika Copper Slag

a. Analisa Ayakan Copper Slag (ASTM C 136 - 93)

Copper Slag yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari PT. Smelting Co. Gresik. Berikut ini Tabel 4.9 dan gambar 4.2 merupakan hasil dari analisa ayakan agregat halus copper slag.

Tabel 4.9. Analisa Ayakan Copper Slag

| No. Ayakan | Sive Size (mm) | Tertahan (gram) | Tertahan (%) | Tertahan Kum. (%) | Lolos Kum. (%) |
|-----------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| 3/2" | 12,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 2 | 9,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 4 | 4,76 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 2,38 | 86,40 | 8,64 | 8,64 | 91,36 |
| 16 | 1,19 | 363,50 | 36,50 | 44,99 | 55,01 |
| 30 | 0,59 | 376,30 | 37,63 | 82,62 | 17,38 |
| 50 | 0,29 | 149,00 | 14,90 | 97,52 | 2,48 |
| 100 | 0,15 | 15,20 | 1,52 | 99,04 | 0,96 |
| Pan | | 9,60 | 0,96 | - | - |
| Total | | 1000,00 | 100,00 | 332,81 | |
| Modulus Kehalusinan = 3,33 | | | | | |



Gambar 4.2. Analisa Ayakan Copper Slag

Dari grafik ayakan tersebut diatas menunjukkan bahwa gradasi copper slag tidak keseluruhan termasuk dalam standard **ASTM C 33 - 93** dan **Zone 2 BS 882**, ada kecenderungan bahwa grafik bergeser kekiri sehingga copper slag merupakan butiran kasar. Modulus kehalusannya yaitu 3,33 sesuai dengan **SKSNI S-04-1989-F** persyaratan besarnya modulus kehalusan agregat halus berkisar antara 1,5 - 3,8.

b. Analisa Kebersihan Copper Slag Terhadap Bahan Organik (ASTM 40 - 79)

- Warna hasil pengujian copper slag dengan NaOH adalah bening
- Warna standard adalah kuning tua

Warna yang terjadi lebih muda dari warna standard, hal ini sesuai dengan ketentuan yang terdapat pada **SKSNI S-04-1989-F** dan **ASTM C33 – 93**, jadi copper slag produksi PT. Smelting Co, Gresik ini dapat digunakan sebagai bahan campuran beton.

c. Analisa Soundness Copper Slag (SII. 0088 - 75)

Standard ini meliputi cara uji agregat untuk beton terhadap daya tahan hancur karena pengaruh larutan jenuh garam Natrium Sulfat atau Magnesium Sulfat. Cara uji ini membantu memberikan keterangan mengenai sifat kekal agregat akibat pengaruh garam.

Tabel 4.10. Hasil Analisa Tes Soundness Copper Slag

| No. Ayakan | Susunan Butir Dalam % Berat Dari Contoh Asli (%) | Berat Tiap Fraksi Butir Yang Diuji (gram) | Berat Tiap Fraksi Butir Setelah Diuji (gram) | Persen Berat Bagian Yang Hilang Dari Contoh Asli (%) |
|------------|--|---|--|--|
| Pan | 0,96 | - | - | - |
| No.100 | 1,52 | - | - | - |
| No. 50 | 14,90 | 100 | 98,66 | 0,335 |
| No. 30 | 37,63 | 100 | 98,90 | 0,275 |
| No. 16 | 36,35 | 100 | 98,84 | 0,290 |
| No. 8 | 8,64 | 100 | 98,86 | 0,285 |
| No. 4 | 0,00 | - | - | - |
| No. 2 | 0,00 | - | - | - |
| Total | 100,00 | 400,00 | 395,26 | 1,19 |

Jadi besarnya nilai soundness untuk agregat copper slag dengan larutan magnesium sulfat adalah 1,19 %. Nilai ini masuk dalam ASTM C 33 – 86 persyaratan agregat halus pada tes kekekalan agregat dengan larutan magnesium sulfat yaitu max 15%.

d. Analisa Berat Jenis Copper Slag (ASTM C 128 - 93)

Tabel 4.11. Analisa Berat Jenis Copper Slag

| Percobaan ke | 1 | 2 | 3 |
|--|--------|------|--------|
| Berat labu + pasir + air (W_1) (gr) | 1024,5 | 1026 | 1026,5 |
| Berat pasir SSD (gr) | 500 | 500 | 500 |
| Berat labu + air (W_2) (gr) | 670 | 670 | 670 |
| $BJ \text{ pasir} = 500 / 500 - (W_1 - W_2)$ | 3,43 | 3,47 | 3,48 |

$$\text{Berat jenis rata-rata copper slag} = 3,46$$

Dari data diatas berat jenis copper slag tersebut dikatakan tergolong jenis beton dengan berat jenis berat yaitu lebih dari 2,80 gr/lt (Dr.Wuryati S. ,M.Pd dan Candra R. ,ST, "Teknologi Beton").

e. Analisa Air Resapan Copper Slag (ASTM C 128 - 93)

Tabel 4.12. Analisa Resapan Copper Slag

| Percobaan ke | 1 | 2 | 3 |
|--|-------|-------|-------|
| Berat pasir SSD (gr) | 500 | 500 | 500 |
| Berat pasir oven (W_1) (gr) | 497,9 | 497,2 | 498,5 |
| Kadar resapan pasir $= (500 - W_1 / W_1) \times 100 \%$ | 0,422 | 0,563 | 0,300 |

Kadar air resapan rata-rata copper slag = 0,428 %

Pada agregat normal kemampuan menyerap air pada agregat sekitar 1 % - 2 %. Jadi dari data kadar air resapan copper slag sebesar 1,62 % tersebut dikatakan tergolong jenis agregat normal. Harga itu adalah kadar air dalam agregat jenuh kering muka (Dr.Wuryati S. ,M.Pd dan Candra R. ,ST, " Teknologi Beton").

f. Analisa Kadar Lumpur (ASTM C 142 - 78)

Tabel 4.13. Analisa Kadar Lumpur

| Percobaan ke | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|
| Tinggi Lumpur (h) | 0 | 0 | 0 |
| Tinggi Copper Slag (H) | 174 | 177 | 175 |
| Kadar Lumpur = $(h/H) \times 100 \%$ | 0 | 0 | 0 |

Kadar lumpur rata-rata = 0 %

Menurut SKSNI S-04-1989-F, nilai ini masuk dalam persyaratan agregat halus pada tes kadar lumpur maksimum 5%.

g. Analisa Berat Volume (ASTM C 29 - 78)

Tabel 4.14. Analisa Berat Volume

| Percobaan | Dengan rojokan | Tanpa rojokan |
|---|----------------|---------------|
| Berat Silinder (W_1) | 2585 | 2585 |
| Volume Silinder | 3000 | 3000 |
| Berat Silinder + Copper Slag (W_2) | 8375 | 8135 |
| Berat Volume Copper Slag = $(W_2 - W_1) / \text{Volume Silinder}$ | 1,93 | 1,85 |

Berat volume copper slag rata-rata : 1,89 gr/lt

Dari data berat volume pasir 1,89 gr/lt, nilai ini masuk dalam persyaratan agregat halus pada tes berat volume, dikatakan tergolong jenis normal weight atau beton dengan berat volume normal yaitu minimal 1120 kg/m³ atau 70 lb/ft³ (ASTM C 330 - 89).

4.1.3.1.2.2. Analisa Kimia Copper Slag

Komposisi kimia yang terkandung dalam copper slag ini memiliki senyawa utama oksida silika, besi, kalsium, dan aluminium.

Hasil analisa kimia diperoleh dari **Laboratorium Team Afiliasi dan Konsultasi Industri (TAKI), ITS**.

Tabel 4.15. Analisa Kimia Copper Slag

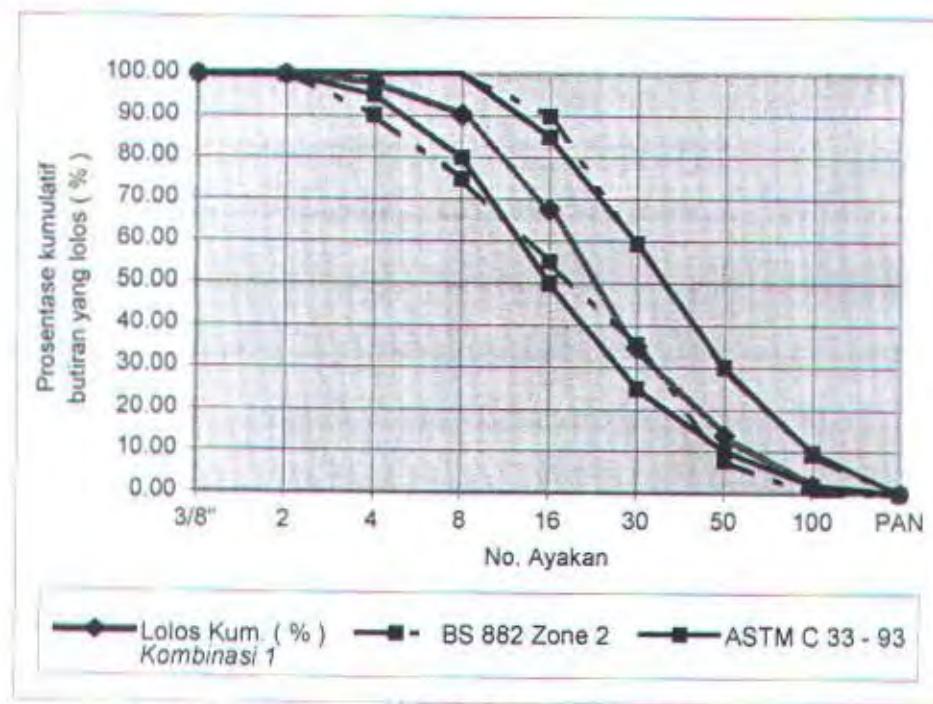
| No. | Senyawa / Parameter | Jumlah | ASTM C - 618 |
|-----|--------------------------------|---------|---|
| 1. | SiO ₂ | 41,27 % | |
| 2. | Al ₂ O ₃ | 0,75 % | SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , min 50 % |
| 3. | Fe ₂ O ₃ | 39,60 % | |
| 4. | CaO | 4,09 % | - |
| 5. | MgO | 4,20 % | - |
| 6. | Na ₂ O | 0,50 % | Max 1,5 |
| 7. | K ₂ O | 4,04 % | - |
| 8. | CuO | 0,62 % | - |
| 9. | Hilang Pijar | 0,00 % | - |

4.1.3.1.2.3. Analisa Ayakan Kombinasi Pasir dan Copper Slag

Copper Slag yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari PT. Smelting Co. Gresik, berikut ini Tabel 4.16 dan gambar 4.3 merupakan hasil dari analisa ayakan agregat halus kombinasi pasir dan copper slag.

Tabel 4.16. Analisa Ayakan **Kombinasi I** Pasir – Copper Slag

| No. Ayakan | Sive Size (mm) | Tertahan (gram) | Tertahan (%) | Tertahan Kum. (%) | Lolos Kum. (%) |
|-----------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|----------------------|-------------------|
| 3/2" | 12,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 2 | 9,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 4 | 4,76 | 18,90 | 1,89 | 1,89 | 98,11 |
| 8 | 2,38 | 76,32 | 7,63 | 9,52 | 90,48 |
| 16 | 1,19 | 227,96 | 22,80 | 32,32 | 67,68 |
| 30 | 0,59 | 329,14 | 32,91 | 65,25 | 34,77 |
| 50 | 0,29 | 208,94 | 20,89 | 86,13 | 13,87 |
| 100 | 0,15 | 119,30 | 11,93 | 98,06 | 1,94 |
| Pan | | 19,44 | 1,94 | - | - |
| Total | | 1000,00 | 100,00 | 293,14 | |
| Modulus Kehalusinan = 2,93 | | | | | |



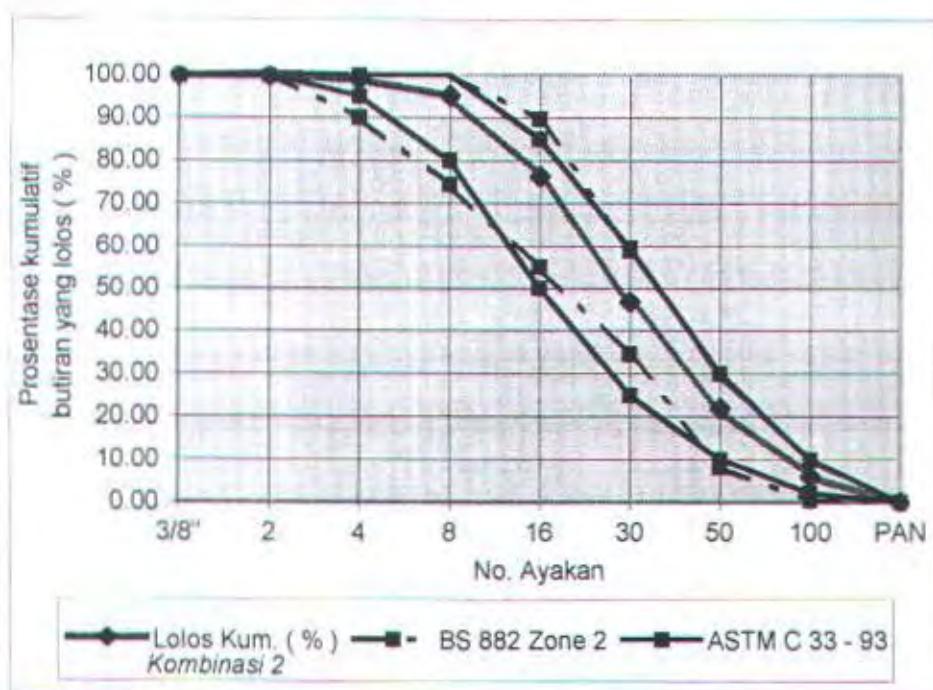
Gambar 4.3. Analisa Ayakan *Kombinasi 1* Pasir - Copper Slag

Dari hasil analisa saringan *kombinasi 1* pasir dan copper slag (tabel 4.16), dapat dibuat lengkung saringan *kombinasi 1* pasir dan copper slag (gambar 4.3) dan didapatkan gradasi butiran *kombinasi 1* pasir dan copper slag yang masuk dalam batas atas dan batas bawah lengkung saringan (**Zone 2 BS 882** dan **ASTM C 33 – 93**). Syarat modulus kehalusan agregat halus menurut SII 0052 – 80 adalah antara 1,50 – 3,80. Sedangkan menurut **ASTM C 33** syarat modulus kehalusan agregat halus adalah antara 2,30 – 3,20. Dari hasil analisa saringan *kombinasi 1* pasir dan copper slag yang digunakan dalam penelitian ini didapat modulus kehalusan *kombinasi 1* pasir dan copper slag sebesar 2,93 sehingga memenuhi persyaratan yang ada.

Hal yang sama juga diungkapkan oleh **Ronald L.Blick** dengan judul “**Some factor influencing high strength concrete**” yang dimuat dalam ACI 363R bahwa agregat halus dengan modulus kehalusan sekitar tiga akan memberikan campuran beton yang workabilitasnya tinggi dan jika modulus kehalusannya dibawah 2,50 maka konsistensinya tidak baik dan campuran beton itu tidak kompak. Modulus kehalusan yang cocok adalah 2,50 sampai 3,0.

Tabel 4.17. Analisa Ayakan *Kombinasi 2* Pasir – Copper Slag

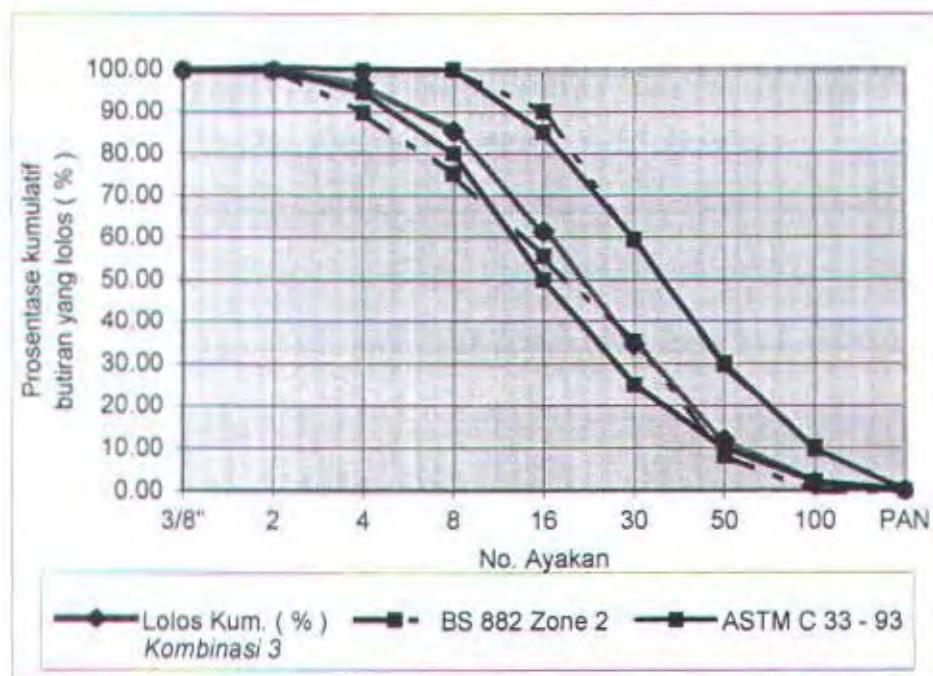
| No. Ayakan | Sive Size (mm) | Tertahan (gram) | Tertahan (%) | Tertahan Kum. (%) | Lolos Kum. (%) |
|---------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| 3/2" | 12,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 2 | 9,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 4 | 4,76 | 9,45 | 0,94 | 0,94 | 99,06 |
| 8 | 2,38 | 38,15 | 3,82 | 4,76 | 95,24 |
| 16 | 1,19 | 189,00 | 18,90 | 23,66 | 76,34 |
| 30 | 0,59 | 294,55 | 29,46 | 53,12 | 46,89 |
| 50 | 0,29 | 249,50 | 24,95 | 78,07 | 21,94 |
| 100 | 0,15 | 159,65 | 15,97 | 94,03 | 5,97 |
| Pan | | 59,70 | 5,97 | - | - |
| Total | | 1000,00 | 100,00 | 254,58 | |
| Modulus Kehalusan = 2,55 | | | | | |

Gambar 4.4. Analisa Ayakan *Kombinasi 2* Pasir - Copper Slag

Dari hasil analisa saringan *kombinasi 2* pasir dan copper slag (tabel 4.17), dapat dibuat lengkung saringan *kombinasi 2* pasir dan copper slag (gambar 4.4) dan didapatkan gradasi butiran *kombinasi 2* pasir dan copper slag yang masuk dalam batas atas dan batas bawah lengkung saringan (**Zone 2 BS 882 dan ASTM C 33 – 93**). Syarat modulus kehalusan agregat halus menurut SII 0052 – 80 adalah antara 1,50 – 3,80. Sedangkan menurut **ASTM C 33** syarat modulus kehalusan agregat halus adalah 2,30 – 3,20. Dari hasil analisa saringan *kombinasi 2* pasir dan copper slag yang digunakan dalam penelitian ini didapat modulus kehalusan *kombinasi 2* pasir dan copper slag sebesar 2,55 sehingga memenuhi persyaratan yang ada.

Tabel 4.18. Analisa Ayakan *Kombinasi 3* Pasir – Copper Slag

| No. Ayakan | Sive Size (mm) | Tertahan (gram) | Tertahan (%) | Tertahan Kum. (%) | Lolos Kum. (%) |
|---------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| 3/2" | 12,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 2 | 9,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 4 | 4,76 | 34,50 | 3,45 | 3,45 | 96,55 |
| 8 | 2,38 | 113,11 | 11,31 | 14,76 | 85,24 |
| 16 | 1,19 | 239,00 | 23,90 | 38,66 | 61,34 |
| 30 | 0,59 | 266,85 | 26,69 | 65,35 | 34,66 |
| 50 | 0,29 | 227,20 | 22,72 | 88,07 | 11,94 |
| 100 | 0,15 | 100,25 | 10,03 | 98,09 | 1,91 |
| Pan | | 19,10 | 1,91 | - | - |
| Total | | 1000,00 | 100,00 | 308,37 | |
| Modulus Kehalusan = 3,08 | | | | | |

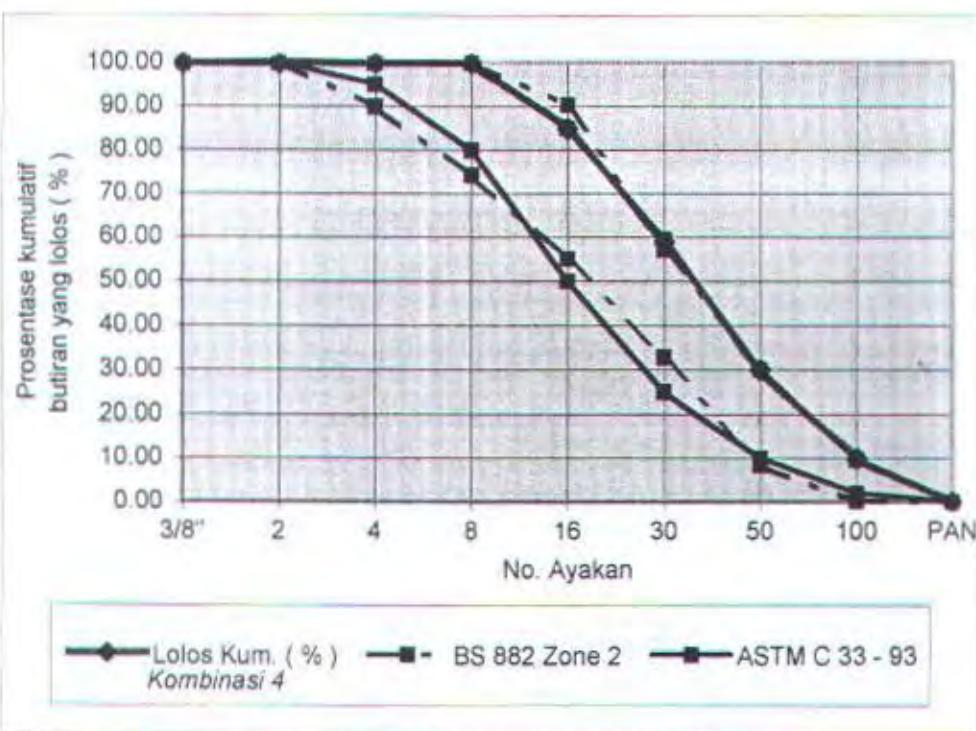


Gambar 4.5. Analisa Ayakan *Kombinasi 3* Pasir - Copper Slag

Dari hasil analisa saringan *kombinasi 3* pasir dan copper slag (tabel 4.18), dapat dibuat lengkung saringan *kombinasi 3* pasir dan copper slag (gambar 4.5) dan didapatkan gradasi butiran *kombinasi 3* pasir dan copper slag yang masuk dalam batas atas dan batas bawah lengkung saringan (**Zone 2 BS 882** dan **ASTM C 33 – 93**). Syarat modulus kehalusan agregat halus menurut SII 0052 – 80 adalah antara 1,50 – 3,80. Sedangkan menurut **ASTM C 33** syarat modulus kehalusan agregat halus adalah 2,30 – 3,20. Dari hasil analisa saringan *kombinasi 3* pasir dan copper slag yang digunakan dalam penelitian ini didapat modulus kehalusan *kombinasi 3* pasir dan copper slag sebesar 3,08 sehingga memenuhi persyaratan yang ada.

Tabel 4.19. Analisa Ayakan **Kombinasi 4** Pasir – Copper Slag

| No. Ayakan | Sive Size (mm) | Tertahan (gram) | Tertahan (%) | Tertahan Kum. (%) | Lolos Kum. (%) |
|-----------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| 3/2" | 12,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 2 | 9,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 4 | 4,76 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 2,38 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 16 | 1,19 | 150,00 | 15,00 | 15,00 | 85,00 |
| 30 | 0,59 | 260,00 | 26,00 | 41,00 | 59,00 |
| 50 | 0,29 | 290,00 | 29,00 | 70,00 | 30,00 |
| 100 | 0,15 | 200,00 | 20,00 | 90,00 | 10,00 |
| Pan | | 100,00 | 10,00 | - | - |
| Total | | 1000,00 | 100,00 | 216,00 | |
| Modulus Kehalusinan = 2,16 | | | | | |

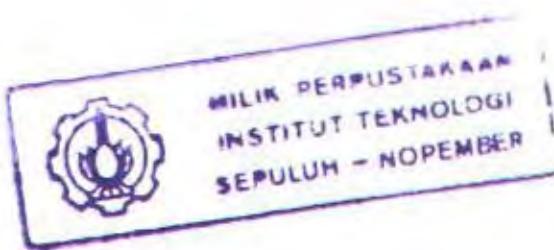
Gambar 4.6. Analisa Ayakan **Kombinasi 4** Pasir - Copper Slag

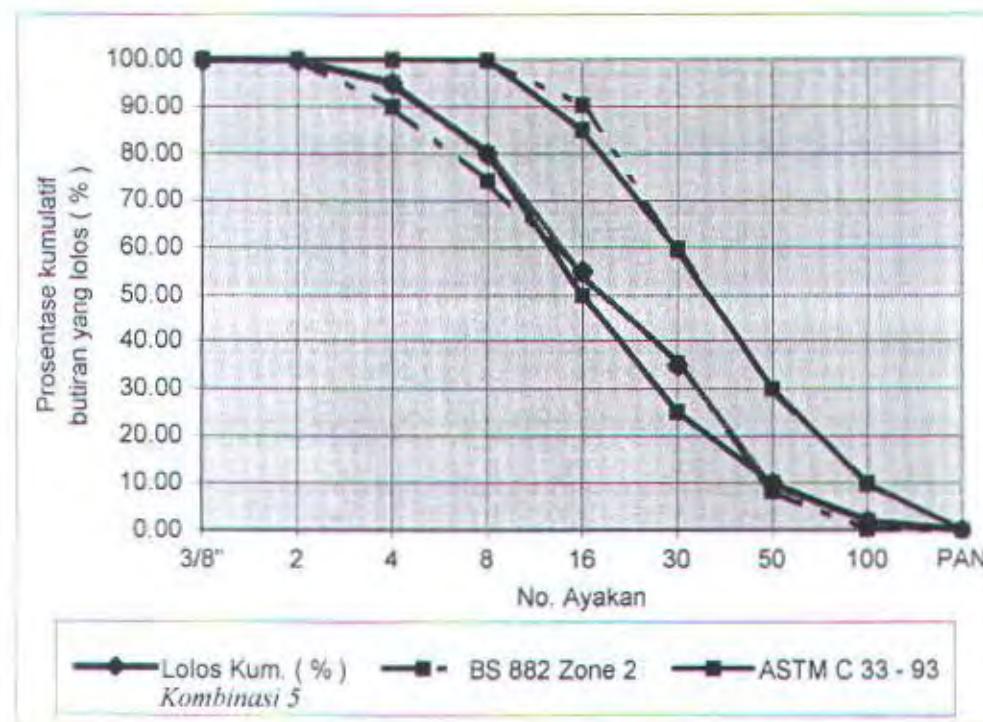
Dari hasil analisa saringan *kombinasi 4* pasir dan copper slag (tabel 4.19), dapat dibuat lengkung saringan *kombinasi 4* pasir dan copper

slag (gambar 4.6) dan didapatkan gradasi butiran *kombinasi 4* pasir dan copper slag yang masuk dalam batas atas dan batas bawah lengkung saringan (**Zone 2 BS 882 dan ASTM C 33 – 93**). Syarat modulus kehalusan agregat halus menurut SII 0052 – 80 adalah antara 1,50 – 3,80. Dari hasil analisa saringan *kombinasi 4* pasir dan copper slag yang digunakan dalam penelitian ini didapat modulus kehalusan *kombinasi 4* pasir dan copper slag sebesar 2,16 sehingga memenuhi persyaratan yang ada.

Tabel 4.20. Analisa Ayakan *Kombinasi 5* Pasir – Copper Slag

| No. Ayakan | Sive Size (mm) | Tertahan (gram) | Tertahan (%) | Tertahan Kum. (%) | Lolos Kum. (%) |
|---------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| 3/2" | 12,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 2 | 9,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 4 | 4,76 | 50,00 | 5,00 | 5,00 | 95,00 |
| 8 | 2,38 | 150,00 | 15,00 | 20,00 | 80,00 |
| 16 | 1,19 | 250,00 | 25,00 | 45,00 | 55,00 |
| 30 | 0,59 | 200,00 | 20,00 | 65,00 | 35,00 |
| 50 | 0,29 | 250,00 | 25,00 | 90,00 | 10,00 |
| 100 | 0,15 | 80,00 | 8,00 | 98,00 | 2,00 |
| Pan | | 20,00 | 2,00 | - | - |
| Total | | 1000,00 | 100,00 | 323,00 | |
| Modulus Kehalusan = 3,23 | | | | | |





Gambar 4.7. Analisa Ayakan *Kombinasi 5* Pasir - Copper Slag

Dari hasil analisa saringan *kombinasi 5* pasir dan copper slag (tabel 4.20), dapat dibuat lengkung saringan *kombinasi 5* pasir dan copper slag (gambar 4.7) dan didapatkan gradasi butiran *kombinasi 5* pasir dan copper slag yang masuk dalam batas atas dan batas bawah lengkung saringan (**Zone 2 BS 882** dan **ASTM C 33 – 93**). Syarat modulus kehalusan agregat halus menurut **SII 0052 – 80** adalah antara 1,50 – 3,80. Dari hasil analisa saringan *kombinasi 5* pasir dan copper slag yang digunakan dalam penelitian ini didapat modulus kehalusan *kombinasi 5* pasir dan copper slag sebesar 3,23 sehingga memenuhi persyaratan yang ada.

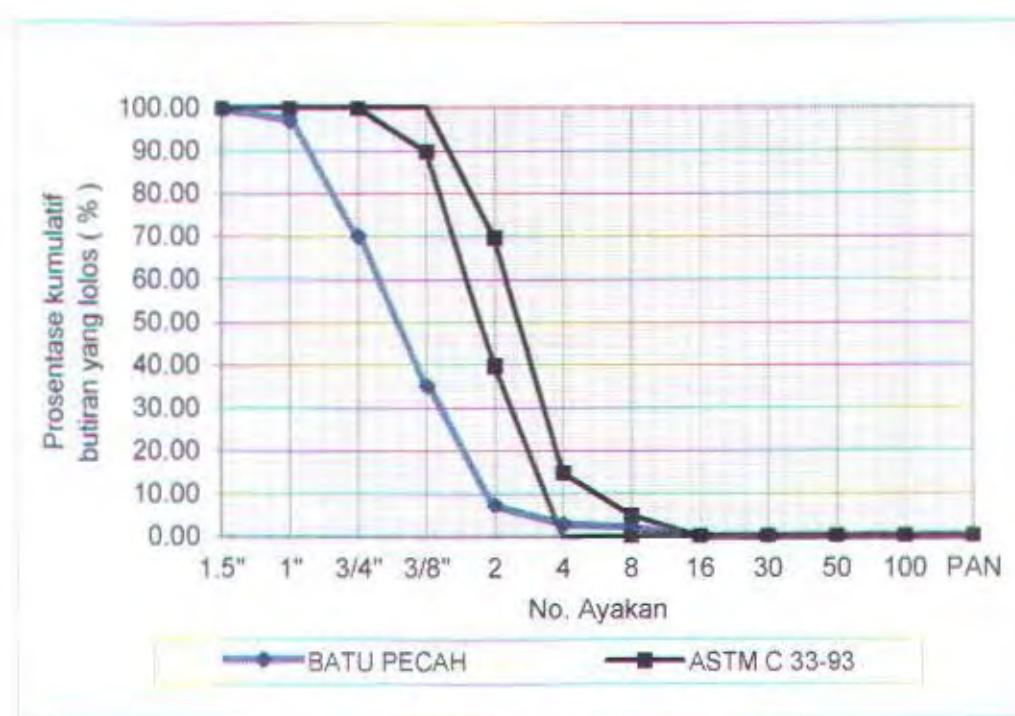
4.1.3.2. Analisa Agregat Kasar

a. Analisa Ayakan Agregat Kasar (ASTM C 136 – 93)

Dalam penelitian ini digunakan jenis agregat kasar, yaitu batu pecah dari UPB PT. Varia Usaha Beton, Pandaan yang mempunyai ukuran nominal antara 20 mm dan 10 mm. Berikut ini tabel 4.21. dan gambar 4.8. merupakan hasil dari analisa material tersebut.

Tabel 4.21. Analisa Ayakan Batu Pecah

| No. Ayakan | Sive Size (mm) | Tertahan (gram) | Tertahan (%) | Tertahan Kum. (%) | Lolos Kum. (%) |
|---------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|----------------------|-------------------|
| 1,5" | 37,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 1" | 25,40 | 28,50 | 2,85 | 2,85 | 97,15 |
| 3/4" | 19,50 | 270,50 | 27,05 | 29,90 | 70,10 |
| 3/8" | 12,50 | 349,00 | 34,90 | 64,80 | 35,20 |
| 2 | 9,50 | 278,00 | 27,80 | 92,60 | 7,40 |
| 4 | 4,76 | 45,00 | 4,50 | 97,10 | 2,90 |
| 8 | 2,38 | 7,00 | 0,70 | 97,80 | 2,20 |
| 16 | 1,19 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 |
| 30 | 0,59 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 |
| 50 | 0,29 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 |
| 100 | 0,15 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 |
| Pan | | 22,00 | 2,20 | 0,00 | 0,00 |
| Total | | 1000,00 | 100,00 | 678,50 | |
| Modulus Kehalusan = 6,78 | | | | | |



Gambar 4.8. Analisa Ayakan Batu Pecah

Dari analisa ayakan diatas, batu pecah tersebut tidak seluruhnya masuk dalam batasan yang terdapat pada ASTM C 33 – 93, ada kecenderungan material bergeser kekiri, sehingga ukuran gradasi lebih kasar. Sedangkan besarnya modulus kehalusan agregat kasar 6,78 sesuai dengan SKSNI S-04-1989-F besarnya modulus kehalusan agregat kasar berkisar antara 6,0 – 7,1.

b. Analisa Abrasi Agregat Kasar (ASTM C 131 – 89)

Tabel 4.22. Analisa Abrasi Batu Pecah

| Ukuran saringan (mm) | | Berat dan Gradasi Benda Uji |
|---|----------|-----------------------------|
| Jumlah bola | | 11 |
| Berat bola (gram) | | 4584 |
| Lewat | Tertahan | |
| 19,50 | 12,50 | 2500 |
| 12,50 | 9,50 | 2500 |
| Total | | 5000 |
| Lolos ayakan 1,7 mm | | 3906 |
| Prosentase lolos ayakan 1,7 mm | | 21,88 |
| Syarat lolos ayakan 1,7 mm menurut PB 89 harus < 27 % | | |

c. Analisa Berat Jenis Agregat Kasar (ASTM C 128 – 93)

Tabel 4.23. Analisa Berat Jenis Batu Pecah

| Percobaan ke | 1 | 2 | 3 |
|--|-------|-------|-------|
| Berat kerikil diudara (W_1) (gram) | 3000 | 3000 | 3000 |
| Berat kerikil diudara (W_2) (gram) | 1893 | 1891 | 1896 |
| BJ batu pecah = $W_1 / (W_1 - W_2)$ | 2,710 | 2,705 | 2,717 |

Berat jenis rata-rata batu pecah = 2,710

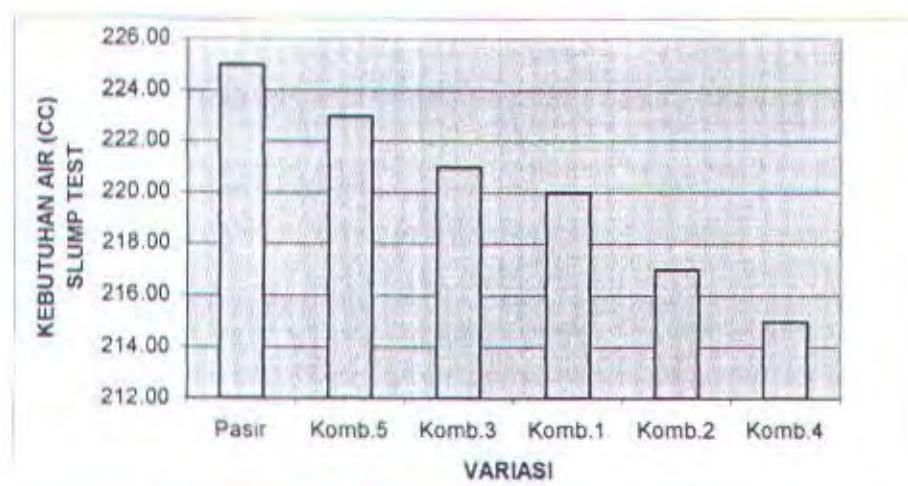
Dari data diatas berat jenis batu pecah tersebut dikatakan tergolong jenis normal weight atau beton dengan berat jenis normal yaitu antara 1,60 sampai 3,20 gr/lit (ACI Committee 221, “ Guide for use normal weight aggregate in concrete”). Secara umum dinyatakan bahwa semakin besar berat jenis agregat maka semakin massif, sehingga kuat tekan beton yang dihasilkan akan semakin meningkat.

4.2. ANALISA BETON SEGAR

4.2.1. Analisa Kebutuhan Air

Tabel 4.24. Pengamatan Kebutuhan Air Pencampur Beton

| No. | Variasi Campuran | Slump Rencana (mm) | Slump Real (mm) | Kebutuhan Air (cc) |
|-----|------------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| 1. | Pasir | 60 | 66 | 225 |
| 2. | Kombinasi 1 | 60 | 63 | 223 |
| 3. | Kombinasi 2 | 60 | 63 | 221 |
| 4. | Kombinasi 3 | 60 | 63.5 | 220 |
| 5. | Kombinasi 4 | 60 | 63 | 217 |
| 6. | Kombinasi 5 | 60 | 64 | 215 |



Gambar 4.9. Hubungan Variasi Copper Slag Dengan Kebutuhan Air

Slump adalah salah satu cara untuk mengetahui workabilitas dari beton. Dengan slump tes keseragaman dan perataan dari campuran beton dapat diketahui. Ini berarti tingkat kelecekan (kebasahan) dari beton dapat ditentukan.

Perhitungan mix desain sebagaimana yang telah direncanakan, menggunakan slump rencana yang sama pada setiap variasi campuran beton yaitu 60 mm (6 cm). Pada setiap variasi campuran beton tersebut telah direncanakan kebutuhan air sebesar 225 CC. Dari tabel dan grafik diatas didapatkan adanya kecenderungan penurunan kebutuhan air yang seiring dengan kenaikan prosentase tingkat kehalusan kombinasi gradasi dari copper slag dan pasir Lumajang. Hal ini dikarenakan sifat dari copper slag yang memiliki permeabilitas yang sangat kecil. Sesuai dengan

pendapat Hwang C.L. and J.C. Laiw, (1989) yang berpendapat bahwa copper slag yang merupakan material industri, absorptionnya lebih rendah bila dibandingkan dengan natural sand. Dari analisa resapan agregat halus terlihat, resapan copper slag sebesar 0,428 % jauh lebih kecil dari resapan pasir Lumajang sebesar 1,34 %, ini berarti resapan pasir Lumajang hampir sekitar tiga kali resapan copper slag.

Peningkatan copper slag terhadap pasir Lumajang yang diperkirakan adanya bleeding (keluarnya air pada permukaan beton sesudah dicampur tetapi terjadi pengikatan yang disebabkan partikel-partikel tidak mampu atau kurang mampu menyerap air). Namun pada pengamatan dilaboratorium, untuk semua variasi campuran beton tidak ditemukan adanya bleeding, hal ini dikarenakan adanya cement content yang tinggi untuk setiap pembuatan variasi campuran beton mutu tinggi, sehingga air yang digunakan untuk bereaksi dengan semen pada proses pengikatan guna membentuk kekuatan. Penelitian ini menggunakan semen murni tanpa bahan tambahan apapun, dimaksudkan agar dapat diketahui perilaku yang alami dari copper slag.

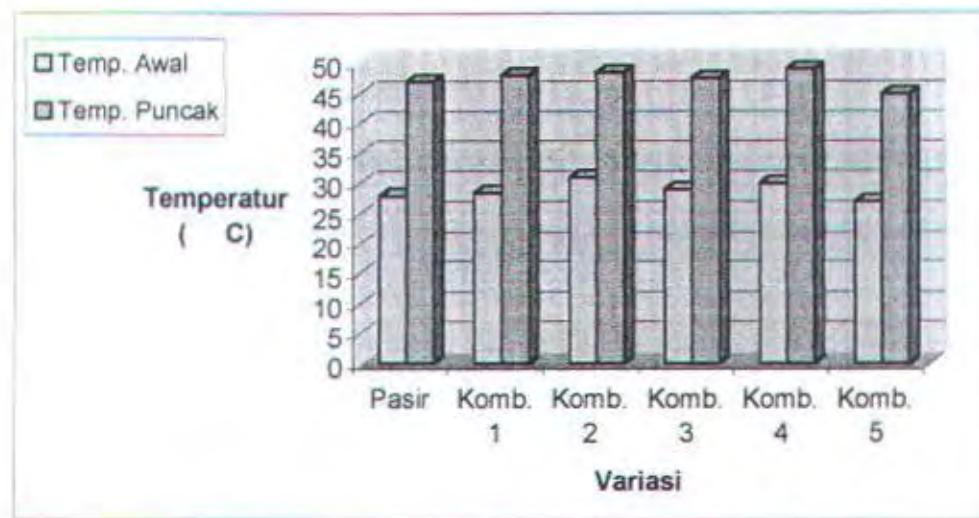
4.2.2. Analisa Hasil Pengujian Temperatur Hidrasi

Pengamatan hasil temperatur hidrasi dilakukan dengan interval waktu setengah jam sambil dicatat perubahan suhu yang terjadi hingga suhu mencapai puncak kemudian turun kembali sampai konstan. Data hasil pengujian temperatur hidrasi pada setiap kombinasi ditunjukkan tabel 4.25, yang terlihat besarnya nilai awal temperatur hidrasi pada masing-masing kombinasi campuran beton dan adanya kenaikan suhu secara perlahan-lahan seiring bertambahnya waktu sampai tercapainya nilai puncak dari masing-masing variasi tersebut. Kemudian dari nilai puncak ini akan terjadi penurunan secara perlahan-lahan.

Dari data tabel 4.25, akan dibuat gambar 4.10 yang menunjukkan hubungan antara variasi dari kombinasi gradasi copper slag dengan besarnya temperatur hidrasi dan pada gambar 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, dan 4.16 yaitu menunjukkan hubungan antara temperatur hidrasi dengan waktu yang diperlukan untuk hidrasi pada masing-masing variasi.

Tabel 4.25. Temperatur Awal Dan Puncak Hidrasi Beton

| Macam Variasi | Temperatur Hidrasi ($^{\circ}\text{C}$) | |
|---------------|---|--------|
| | Awal | Puncak |
| Pasir | 28 | 47 |
| Kombinasi 1 | 28.5 | 48 |
| Kombinasi 2 | 31 | 48.5 |
| Kombinasi 3 | 29 | 47.5 |
| Kombinasi 4 | 30 | 49 |
| Kombinasi 5 | 27 | 45 |

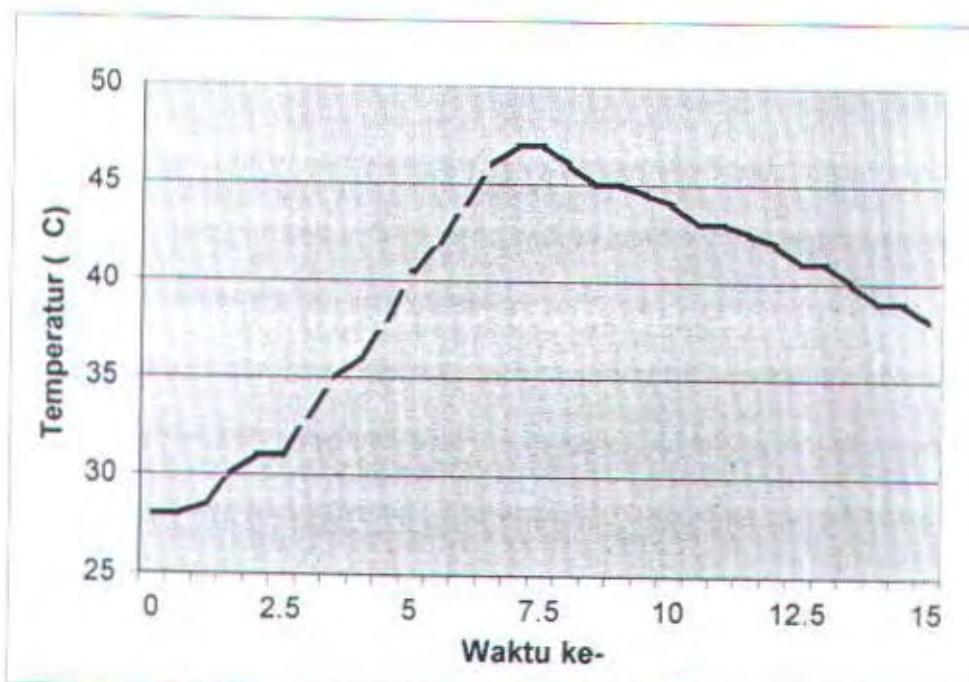


Gambar 4.10. Temperatur Awal Dan Puncak Hidrasi Beton

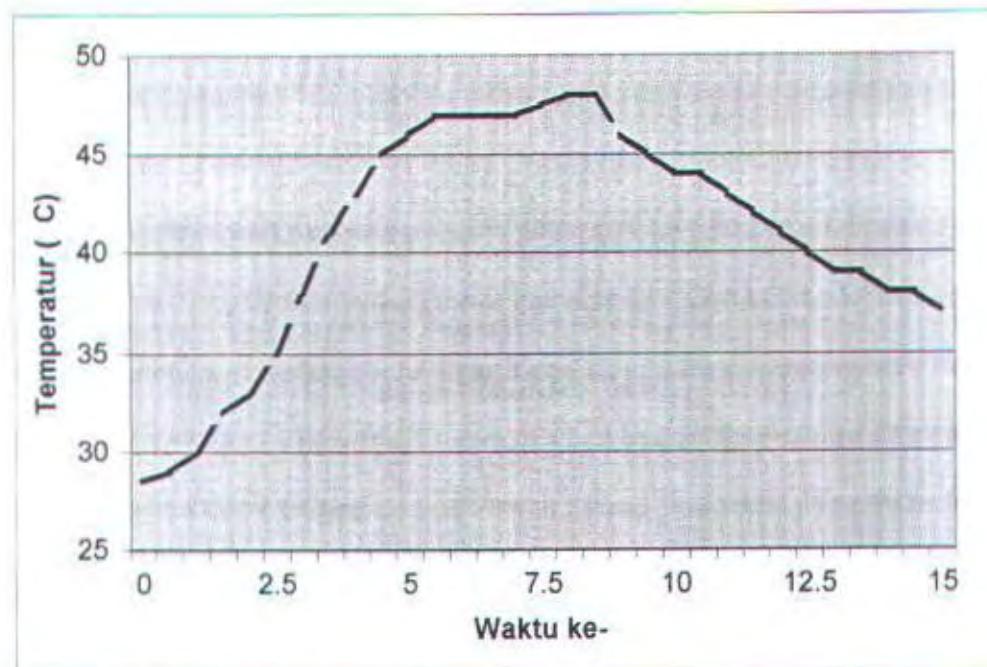
Tabel 4.26. Temperatur Hidrasi Beton

| Waktu ke- | Variasi | | | | | |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Pasir | Komb. 1 | Komb. 2 | Komb. 3 | Komb. 4 | Komb. 5 |
| 0 | 28 | 28.5 | 31 | 29 | 30 | 27 |
| 0.5 | 28 | 29 | 32.5 | 29.5 | 30 | 27 |
| 1 | 28.5 | 30 | 33 | 30 | 31 | 27 |
| 1.5 | 30 | 32 | 35 | 31 | 34 | 28 |
| 2 | 31 | 33 | 37 | 32 | 36 | 29.5 |
| 2.5 | 31 | 35 | 39 | 33 | 38 | 31 |
| 3 | 33 | 38 | 42 | 35 | 41 | 33 |
| 3.5 | 35 | 41 | 43 | 36 | 44 | 35 |
| 4 | 36 | 43 | 45 | 38.5 | 46 | 37 |
| 4.5 | 38 | 45 | 45.5 | 41 | 46.5 | 39 |
| 5 | 40.5 | 46 | 46 | 43.5 | 47 | 41 |
| 5.5 | 42 | 47 | 47 | 45 | 48 | 43 |
| 6 | 44 | 47 | 48 | 46 | 48.5 | 45 |
| 6.5 | 46 | 47 | 48.5 | 47.5 | 49 | 45 |
| 7 | 47 | 47 | 48 | 47 | 48 | 45 |
| 7.5 | 47 | 47.5 | 48 | 46 | 48 | 44 |
| 8 | 46 | 48 | 47 | 46 | 47 | 44 |

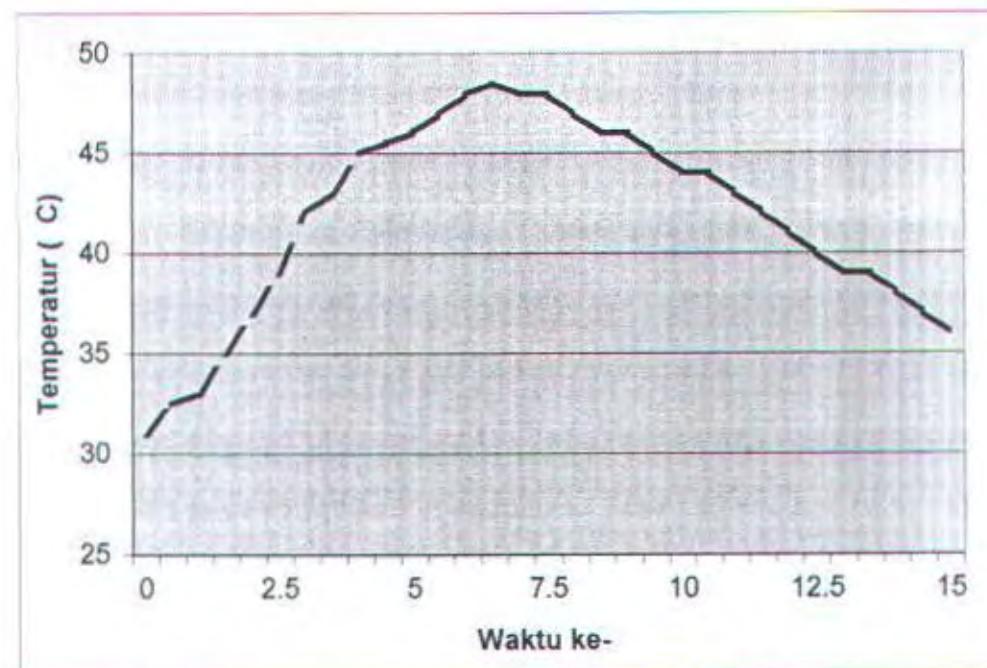
| | | | | | | |
|------|------|----|----|------|----|----|
| 8.5 | 45 | 48 | 46 | 45 | 46 | 43 |
| 9 | 45 | 46 | 46 | 45 | 45 | 43 |
| 9.5 | 44.5 | 45 | 45 | 44 | 44 | 43 |
| 10 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 42 |
| 10.5 | 43 | 44 | 44 | 43.5 | 43 | 42 |
| 11 | 43 | 43 | 43 | 43 | 42 | 41 |
| 11.5 | 42.5 | 42 | 42 | 42 | 41 | 41 |
| 12 | 42 | 41 | 41 | 42 | 40 | 40 |
| 12.5 | 41 | 40 | 40 | 41 | 39 | 40 |
| 13 | 41 | 39 | 39 | 41 | 39 | 39 |
| 13.5 | 40 | 39 | 39 | 40 | 39 | 39 |
| 14 | 39 | 38 | 38 | 39 | 38 | 38 |
| 14.5 | 39 | 38 | 37 | 38 | 37 | 37 |
| 15 | 38 | 37 | 36 | 37 | 36 | 36 |



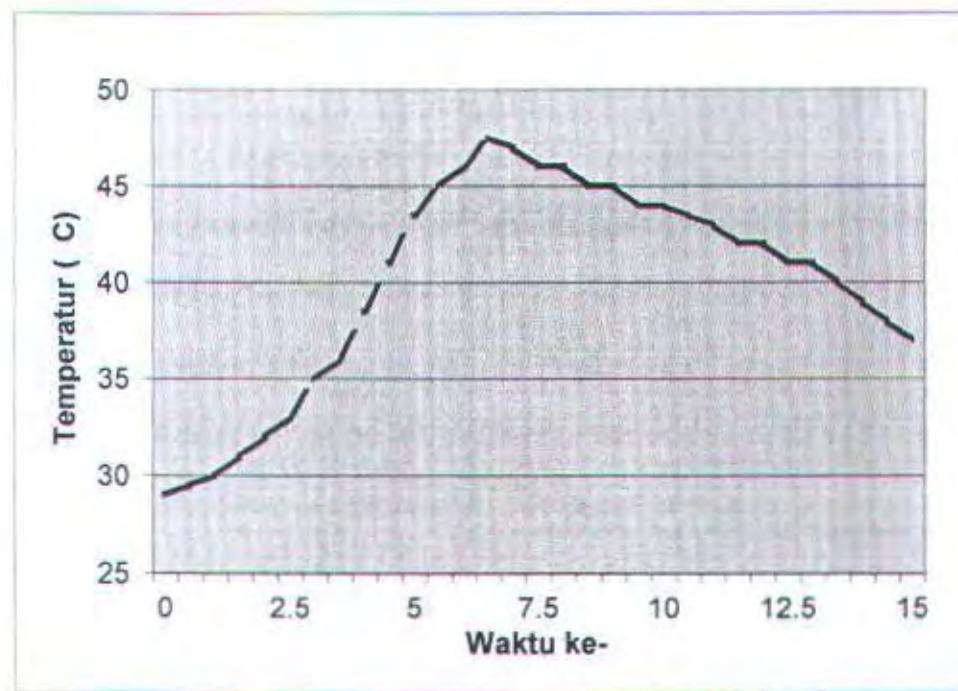
Gambar 4.11. Temperatur Hidrasi Beton Untuk Pasir



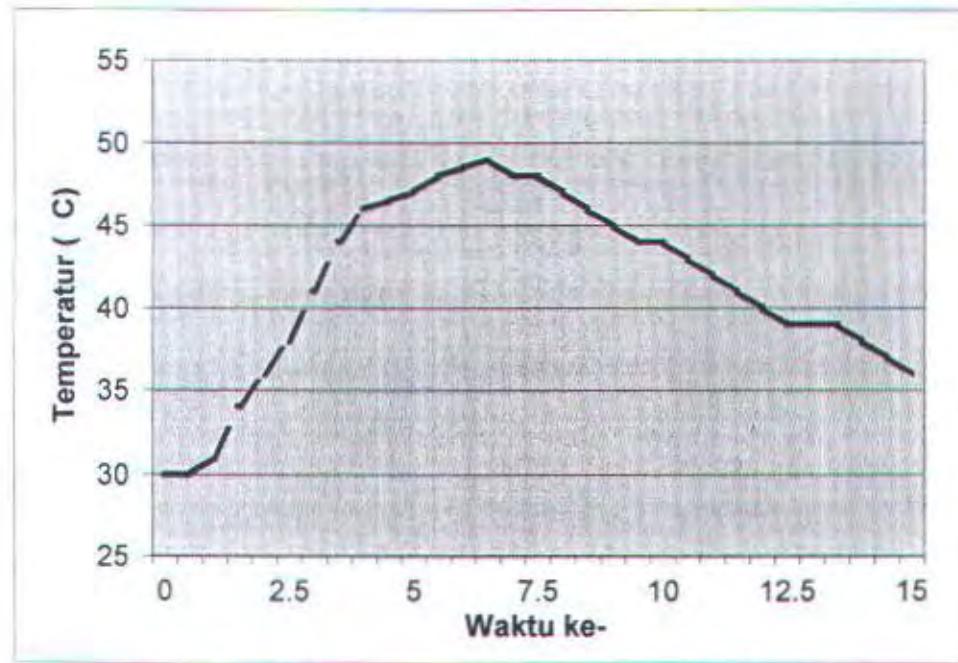
Gambar 4.12. Temperatur Hidrasi Beton Untuk Kombinasi 1



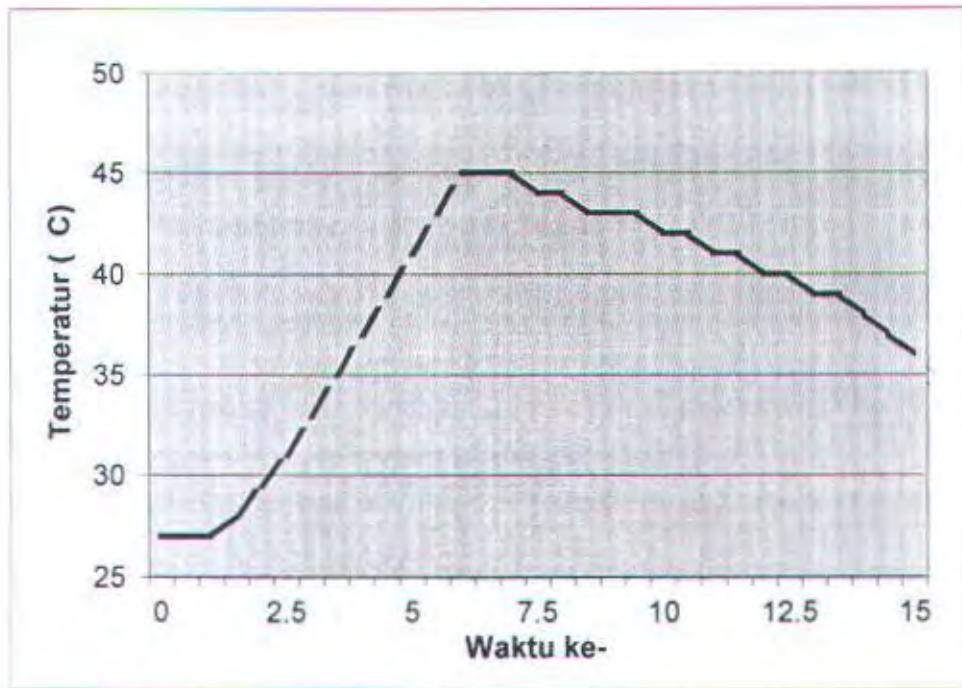
Gambar 4.13. Temperatur Hidrasi Beton Untuk Kombinasi 2



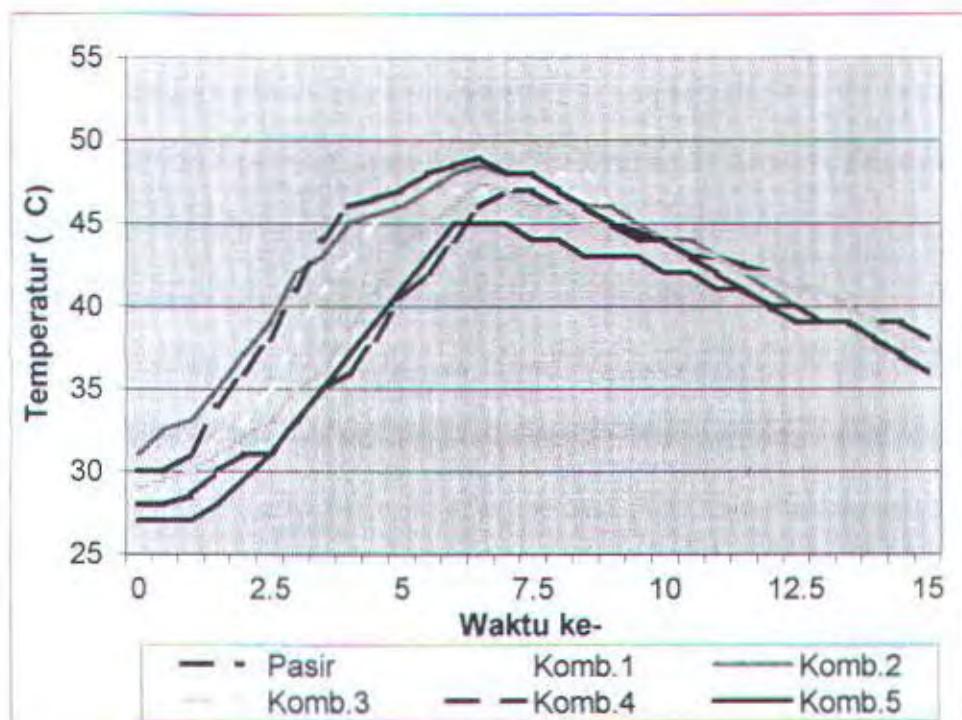
Gambar 4.14. Temperatur Hidrasi Beton Untuk Kombinasi 3



Gambar 4.15. Temperatur Hidrasi Beton Untuk Kombinasi 4



Gambar 4.16. Temperatur Hidrasi Beton Untuk Kombinasi 5



Gambar 4.17. Temperatur Hidrasi Beton

Dari gambar 4.10 dan 4.17 diatas, menunjukkan bahwasannya adanya tendensi besarnya temperatur hidrasi mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan prosentase tingkat kehalusan kombinasi gradasi dari copper slag. Hal ini dapat terjadi karena panas yang dihasilkan dari proses hidrasi dihantarkan dengan baik oleh copper slag, yang mempunyai kandungan utama besi. Pernyataan tersebut sesuai dengan pendapat **Robert M. B. and Robert B. G.**, (1965) yang menyatakan bahwa sifat metal, termasuk besi mempunyai sifat pengantar panas yang baik. Jika ada aliran panas dari luar, maka panas ditransfer kemental tersebut melalui atom-atom penyusunnya., sehingga kesemua atom menerima panas dan menahan panas tersebut. Panas yang tertahan oleh atom akan berkurang seiring dengan menurunnya pengaruh panas dari luar. Ini berarti panas yang tersebar pada beton akan dihantarkan dengan baik oleh copper slag, sehingga semakin tinggi prosentase tingkat kehalusan kombinasi gradasi copper slag maka temperatur hidrasinya semakin meningkat pula.

Sedangkan menurut **A.M. Neville**, (1981), tinggi rendahnya puncak temperatur hidrasi dipengaruhi oleh :

1. Jumlah dan komposisi senyawa kimia yang terkandung dalam semen portland .
2. Kehalusn butiran semen portland.
3. Temperatur dan kelembaban udara pada saat proses hidrasi berlangsung.
4. Umur semen Portland.
5. Rasio W/C.
6. Bahan tambahan (Admixture).

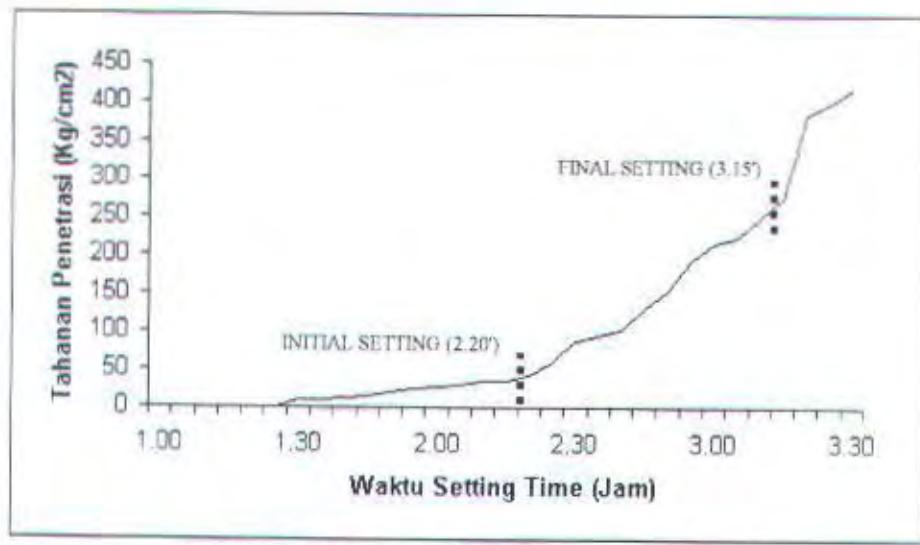
4.2.3. Analisa Hasil Pengujian Setting Time

Pada saat semen bertemu dengan air maka akan terbentuk pasta yang lunak, dan pasta itu secara bertahap akan menjadi lebih kaku dan akhirnya menjadi keras. Proses perubahan dari keadaan cair (lunak) kekeadaan kaku yang disertai dengan terbentuknya kekuatan (tahanan) dinamakan dengan setting. Hasil tahanan penetrasi, dapat dilihat pada tabel 4.27 dan gambar 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, dan 4.23.

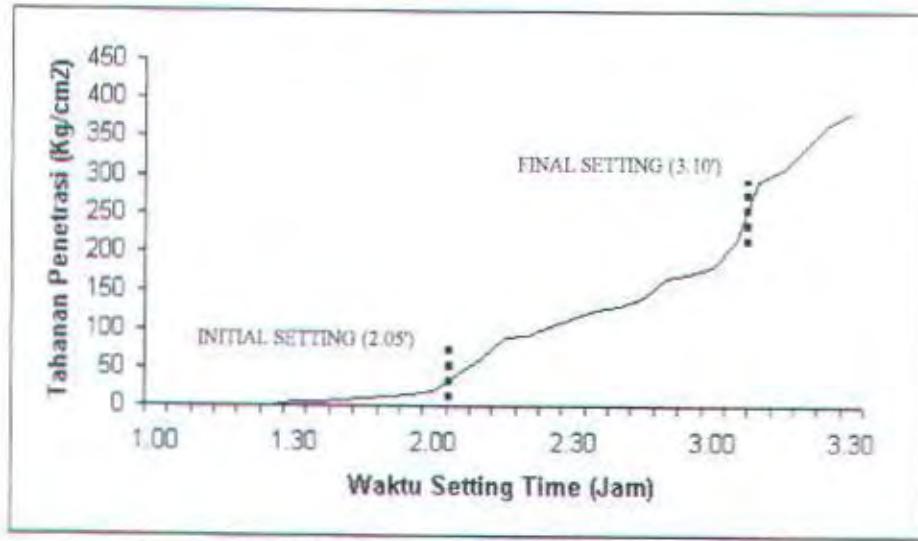
Tabel 4.27. Setting Time Beton

| Waktu ke- | Variasi | | | | | |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Pasir | Komb. 1 | Komb. 2 | Komb. 3 | Komb. 4 | Komb. 5 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.30 | 9 | 4 | 6 | 1 | 11 | 6 |
| 1.35 | 11 | 6 | 7 | 3 | 14 | 4 |
| 1.40 | 13 | 7 | 9 | 4 | 16 | 5 |
| 1.45 | 16 | 9 | 11 | 6 | 20 | 7 |
| 1.50 | 20 | 13 | 15 | 10 | 24 | 8 |
| 1.55 | 25 | 15 | 20 | 13 | 32 | 9 |
| 2.00 | 27 | 20 | 43 | 17 | 37 | 14 |
| 2.05 | 30 | 42 | 64 | 26 | 43 | 16 |
| 2.10 | 34 | 63 | 87 | 33 | 62 | 19 |
| 2.15 | 36 | 89 | 92 | 44 | 89 | 25 |
| 2.20 | 43 | 92 | 103 | 48 | 97 | 31 |
| 2.25 | 61 | 104 | 114 | 52 | 110 | 37 |
| 2.30 | 87 | 115 | 127 | 57 | 129 | 43 |
| 2.35 | 95 | 126 | 132 | 72 | 136 | 66 |
| 2.40 | 102 | 131 | 144 | 86 | 152 | 85 |
| 2.45 | 131 | 143 | 169 | 114 | 193 | 96 |
| 2.50 | 155 | 169 | 180 | 131 | 200 | 112 |
| 2.55 | 192 | 174 | 192 | 146 | 212 | 130 |
| 3.00 | 216 | 183 | 221 | 181 | 226 | 151 |
| 3.05 | 223 | 215 | 230 | 215 | 253 | 186 |
| 3.10 | 250 | 295 | 293 | 263 | 270 | 200 |
| 3.15 | 276 | 310 | 320 | 298 | 315 | 210 |

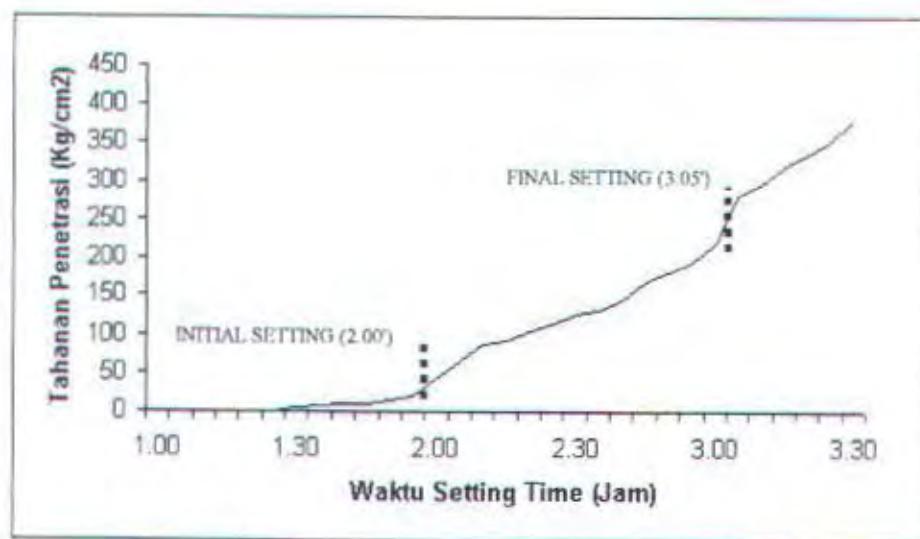
| | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 3.20 | 385 | 339 | 334 | 325 | 398 | 226 |
| 3.25 | 400 | 368 | 352 | 341 | 403 | 234 |
| 3.30 | 421 | 384 | 381 | 356 | 411 | 287 |



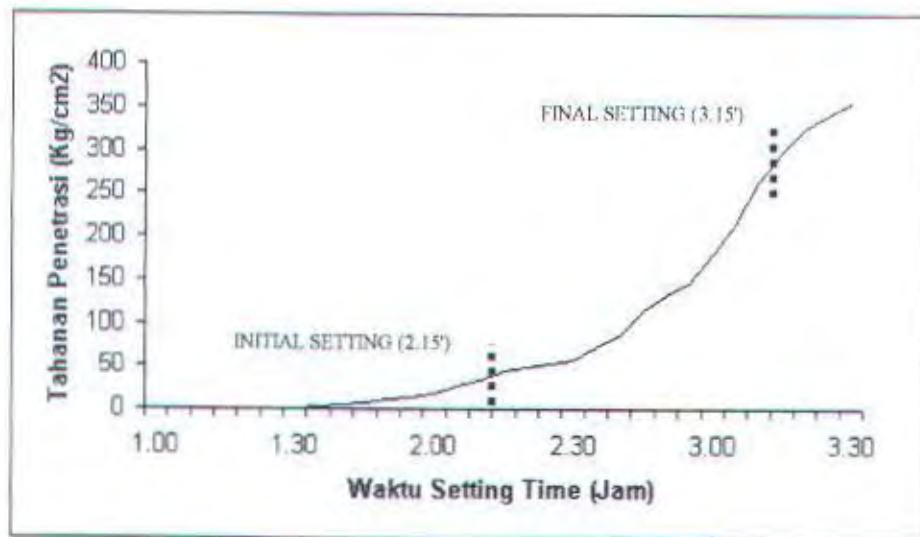
Gambar 4.18. Setting Time Beton Variasi Pasir



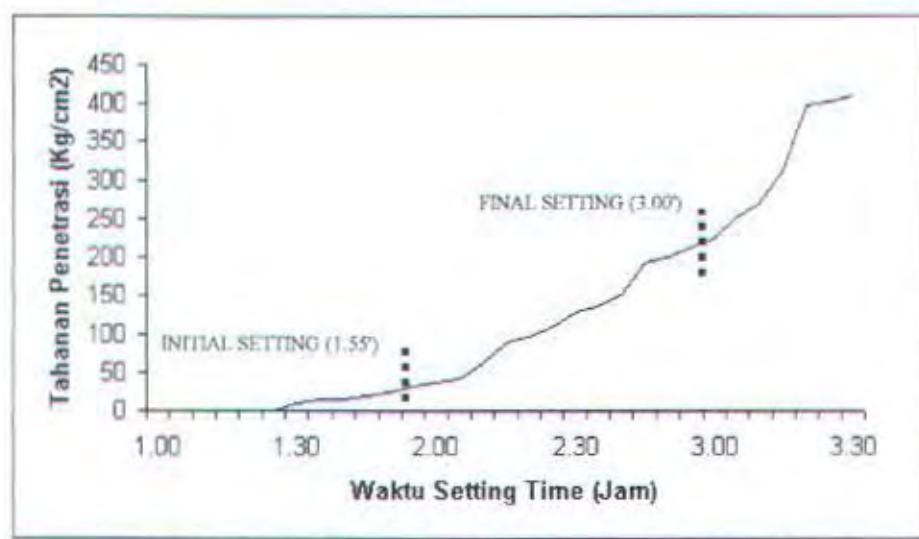
Gambar 4.19. Setting Time Beton Variasi Kombinasi 1



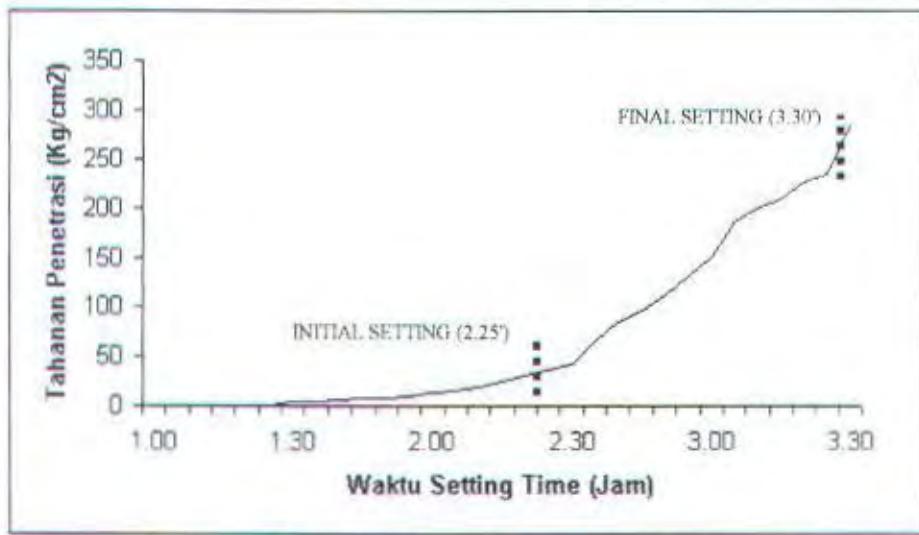
Gambar 4.20. Setting Time Beton Variasi Kombinasi 2



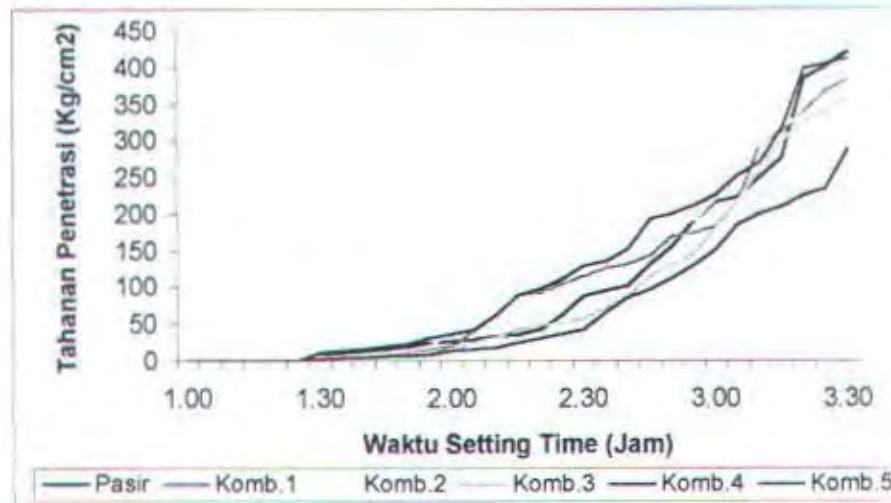
Gambar 4.21. Setting Time Beton Variasi Kombinasi 3



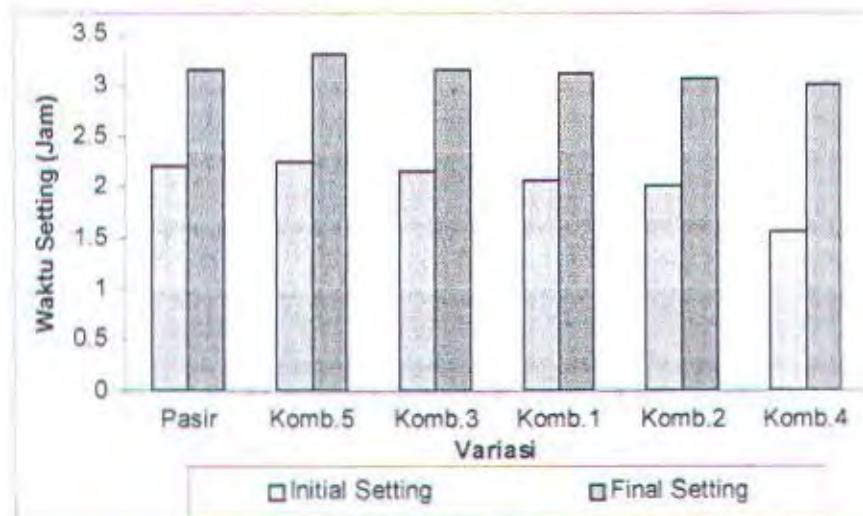
Gambar 4.22, Setting Time Beton Variasi Kombinasi 4



Gambar 4.23, Setting Time Beton Variasi Kombinasi 5



Gambar 4.24. Setting Time Beton



Gambar 4.25. Hubungan Antara Variasi Kombinasi Pasir – Copper Slag

Terhadap Waktu Setting Time Beton

Dari tabel 4.27 dan gambar 4.25, terlihat bahwa dengan penggunaan copper slag pada beton mutu tinggi memerlukan waktu setting time menjadi lebih pendek, terutama pada prosentase tertinggi tingkat kehalusan gradasi copper slag. Pengaruh kehalusan copper slag adalah makin halus kombinasi gradasi copper slag yang digunakan maka setting time menjadi lebih cepat. Dari grafik tersebut menggambarkan penurunan prosentase tingkat kehalusan gradasi copper slag secara bertahap, mengakibatkan waktu setting time yang lebih lama.

Hal tersebut disebabkan oleh kebutuhan air yang digunakan untuk campuran beton. Kebutuhan air secara bertahap mengalami penurunan

seiring dengan kenaikan prosentase tingkat kehalusan gradasi copper slag. Kemampuan copper slag dalam menyerap air sangat lemah, sehingga dibutuhkan air yang lebih sedikit untuk mencapai workabilitas yang sama. Dengan jumlah kandungan semen yang sama untuk tiap kombinasi dan air yang lebih sedikit, maka air tersebut dimanfaatkan untuk hidrasi semen pada proses pengikatan, ini berarti setting time yang terjadi lebih pendek.

Sesuai dengan pendapat **Troxell and Davis, (1956)**, yang berpendapat bahwa setting time akan lebih cepat bila kandungan airnya (water content) lebih rendah. Hidrasi yang terjadi menimbulkan temperatur hidrasi/panas, seperti pada pembahasan pengujian temperatur hidrasi terlihat bahwa dengan bertambahnya tingkat kehalusan gradasi copper slag maka temperatur hidrasinya meningkat. Hal tersebut berarti terdapat suatu hubungan bahwasannya dengan prosentase tingkat kehalusan gradasi copper slag maka temperatur hidrasi meningkat dan setting time yang terjadi lebih pendek. Menurut **Troxell and Davis, (1956)**, tersebut selain kandungan air yang lebih rendah, maka setting time yang lebih pendek juga dipengaruhi oleh temperatur yang tinggi.

Dapat disimpulkan bahwasannya kebutuhan air serta temperatur hidrasi dari semen dan air menentukan cepat atau lambatnya waktu yang diperlukan untuk setting. Semakin rendah kebutuhan air dan semakin tinggi temperatur, maka semakin pendek waktu yang diperlukan untuk pengikatan (setting time).

4.3. ANALISA BETON KERAS

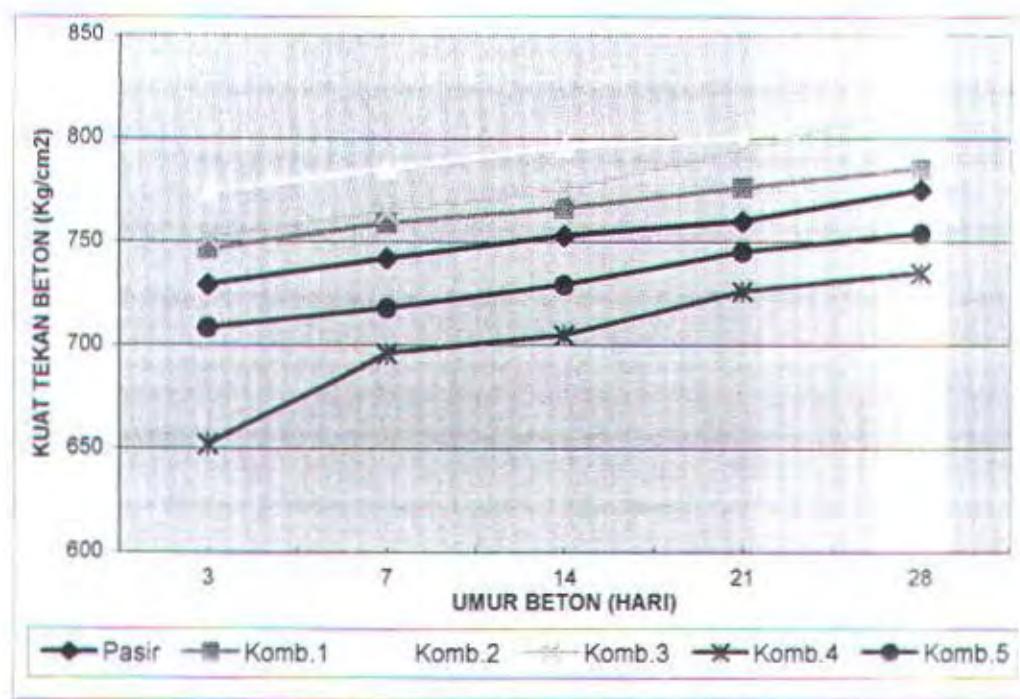
4.3.1. Analisa Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Sifat yang penting dari beton keras diantaranya adalah kekuatan tekan beton (strength), yang didefinisikan sebagai kemampuan dari beton pada struktur untuk menahan kekuatan dari luar (J.W. Kelly, (1956)). Salah satu yang menentukan kekuatan tekan beton adalah macam dan gradasi agregat yang well graded serta permukaan yang kasar sehingga mampu meningkatkan kuat tekan beton (Prof. Ir. Rachmat P., MSc, (1997)). Copper slag merupakan salah satu alternatif agregat campuran beton yang kandungan utamanya adalah besi (Fe_2O_3) sekitar 40 %, sehingga kekerasannya tinggi dan permukaannya yang kasar namun bergradasi gap graded. Untuk menghasilkan beton yang workable dengan kuat tekan yang optimal maka copper slag ini dipadukan dengan natural sand (pasir Lumajang) dengan berbagai variasi. Dalam penelitian ini prosentase kombinasi copper slag terhadap pasir yaitu 40 % yang bervariasi pada gradasi copper slag. Nilai kuat tekan dari kombinasi tersebut dapat dilihat pada tabel 4.28. Lalu dari tabel 4.28 kemudian dibuatkan grafik hubungan antara kuat tekan beton dengan umur beton seperti terlihat pada gambar 4.26.

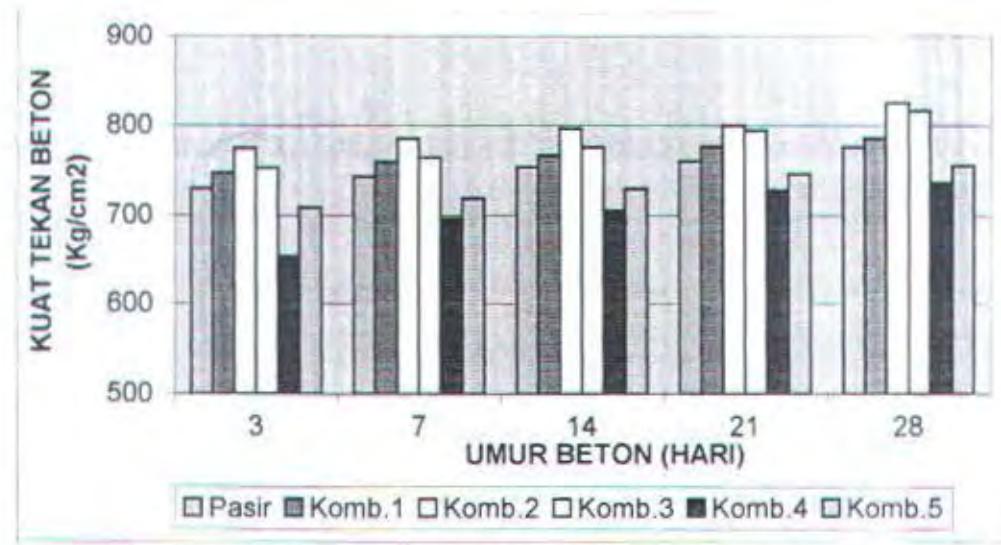
Tabel 4.28. Kuat Tekan Beton

| Kuat Tekan Beton (kg/cm^2) | | | | | | |
|--------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Umur (Hari) | Variasi | | | | | |
| | Pasir | Komb.1 | Komb.2 | Komb.3 | Komb.4 | Komb.5 |
| 3 | 727 | 762 | 779 | 747 | 674 | 711 |
| | 742 | 720 | 773 | 758 | 635 | 709 |
| | 718 | 756 | 770 | 751 | 647 | 704 |
| MEAN | 729 | 746 | 774 | 752 | 652 | 708 |
| 7 | 741 | 757 | 786 | 770 | 683 | 709 |
| | 747 | 756 | 780 | 767 | 674 | 711 |
| | 738 | 763 | 788 | 755 | 717 | 734 |
| MEAN | 742 | 759 | 785 | 764 | 696 | 718 |

| | | | | | | |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 767 | 774 | 794 | 779 | 709 | 722 |
| 14 | 756 | 768 | 788 | 771 | 695 | 720 |
| | 736 | 756 | 806 | 775 | 711 | 745 |
| MEAN | 753 | 766 | 796 | 775 | 705 | 729 |
| | 749 | 769 | 809 | 788 | 736 | 740 |
| 21 | 758 | 779 | 796 | 789 | 688 | 747 |
| | 773 | 780 | 795 | 805 | 754 | 748 |
| MEAN | 760 | 776 | 800 | 794 | 726 | 745 |
| | 780 | 782 | 840 | 818 | 727 | 766 |
| 28 | 772 | 774 | 815 | 814 | 742 | 753 |
| | 773 | 799 | 820 | 816 | 736 | 743 |
| MEAN | 775 | 785 | 825 | 816 | 735 | 754 |

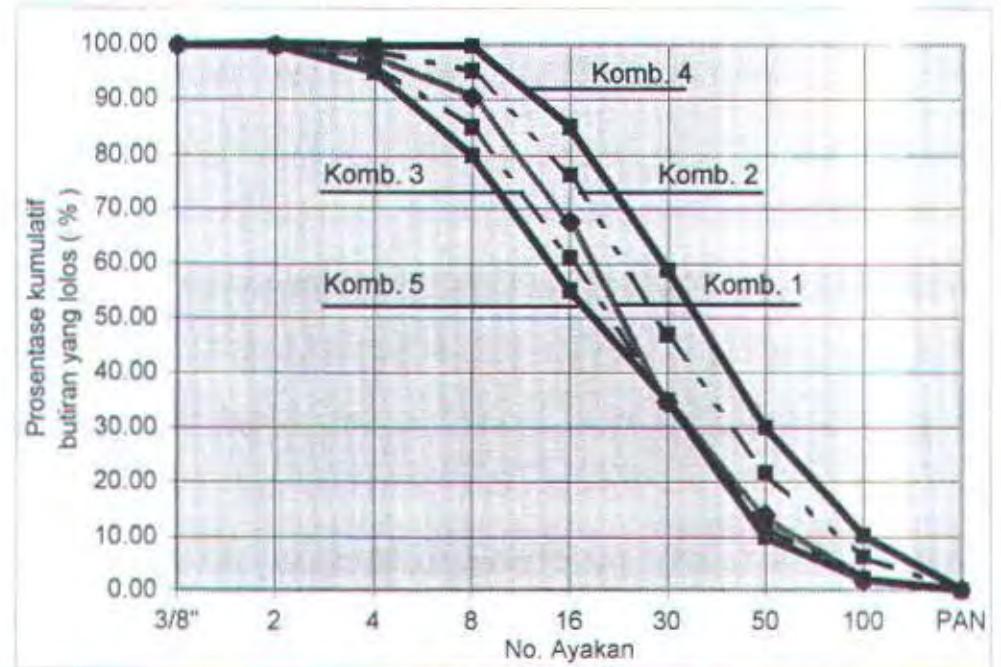


Gambar 4.26. Kuat Tekan Beton Dengan Umur Beton



Gambar 4.27. Kenaikan Kuat Tekan Beton Terhadap Umur Beton

Dari gambar 4.27 menunjukkan bahwa terdapat kenaikan secara bertahap pada masing-masing variasi. Untuk kombinasi 2 dan kombinasi 3 menunjukkan adanya nilai kuat tekan yang lebih tinggi dari kombinasi yang lain, terutama nampak jelas pada kombinasi 2.

Gambar 4.28. Analisa Ayakan Pada Beberapa Kombinasi
Pasir – Copper Slag

Tabel 4.29. Analisa Ayakan Pada Beberapa Kombinasi
Pasir – Copper Slag

| No. Ayakan | Sive Size (mm) | Tertahan (gram) | | | | |
|---------------|-------------------|-----------------|---------|---------|---------|---------|
| | | Komb. 1 | Komb. 2 | Komb. 3 | Komb. 4 | Komb. 5 |
| 3/2" | 12.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 9.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4 | 4.76 | 18.90 | 9.45 | 34.50 | 0.00 | 50.00 |
| 8 | 2.38 | 76.32 | 38.15 | 113.11 | 0.00 | 150.00 |
| 16 | 1.19 | 227.96 | 189.00 | 239.00 | 150.00 | 250.00 |
| 30 | 0.59 | 329.14 | 294.55 | 266.85 | 260.00 | 200.00 |
| 50 | 0.29 | 208.94 | 249.50 | 227.20 | 290.00 | 250.00 |
| 100 | 0.15 | 119.30 | 159.65 | 100.25 | 200.00 | 80.00 |
| PAN | | 19.44 | 59.70 | 19.10 | 100.00 | 20.00 |

Dalam hal ini susunan besar butir agregat sangat berpengaruh terhadap sifat baik/tidaknya beton dikerjakan (workability) dan pemasangan beton segar. Dari gambar 4.28 dan tabel 4.29 terlihat bahwa gradasi gabungan pada kombinasi 4 lebih banyak agregat dengan ukuran yang lebih kecil/halus (ukuran 1.19 mm, 0.59 mm, 0.29 mm, 0.15 mm, dan PAN) sebaliknya untuk gradasi gabungan kombinasi 5 lebih banyak agregat dengan ukuran yang lebih besar/kasar (ukuran 4.76 mm dan 2.38 mm) sedangkan untuk kombinasi 2, 3, dan 1 mempunyai gradasi gabungan yang bervariasi pada agregat dengan ukuran 2.38 mm - PAN dan well graded pada agregat dengan ukuran 1.19 mm, 0.59 mm, dan 0.29 mm.

Dikatakan bahwa pasir yang terlalu kasar, menyebabkan kekurangan bagian butir yang menembus ayakan 0,30 mm, dan mengandung banyak butir lebih besar dari 5 mm dan pasir yang terlalu halus, mengandung banyak bagian yang halus yang menembus ayakan 0,30 mm dan 0,15 mm atau mengandung banyak lumpur. Pada kombinasi 4 mempunyai agregat dengan ukuran halus yang lebih banyak dibandingkan pada kombinasi lainnya, walaupun bahan halus tersebut penting, namun penggunaannya harus dibatasi, karena bila berlebihan bahan halusnya maka beton akan tidak ekonomis sebab kebutuhan air

meningkat sehingga perlu ditambah semen agar kekuatannya tetap. Selain itu, sifat susut dan creep (rangkak) bertambah serta beton mudah retak (cracking, pecah telur) disamping pendebuan pada permukaan beton (**Rachmat P., (1997)**), ini berarti akan mempengaruhi kepadatan betonnya (porous atau padatnya), sehingga akan berpengaruh terhadap berkurangnya kekuatan dan keawetan beton pada kombinasi 4 dibandingkan pada kombinasi 2, 3, 1, dan 5.

Menurut pendapat **Wuryati S. dan Candra R., "Teknologi Beton"**, (2003), bila butiran-butiran agregat mempunyai ukuran yang sama (seragam), volume pori antar butiran akan menjadi besar. Sebaliknya jika ukuran butiran-butirannya bervariasi, maka pori antar butiran menjadi kecil karena sebagian pori-pori akan terisi oleh butiran yang lebih kecil, sehingga pori-porinya menjadi berkurang. Dengan kata lain, agregat dengan besar butiran bervariasi akan menghasilkan beton yang lebih padat (rapat). Pada kombinasi 5 yang mempunyai agregat dengan ukuran besar/kasar lebih banyak dibandingkan dengan kombinasi yang lain sehingga volume pori antar butiran menjadi lebih besar. Hal ini dikarenakan kekurangan agregat dengan ukuran yang lebih kecil atau lebih halus sehingga pori-pori tidak terisi oleh butiran yang lebih kecil, ini berarti pori-porinya menjadi lebih besar dibandingkan pada kombinasi 2, 3, dan 1 yang mempunyai gradasi yang ideal (tidak seragam). Dengan adanya pori yang lebih banyak tersebut maka beton tidak dapat memberikan tingkat yang optimum untuk mendapatkan density dan kekuatan beton pada kombinasi 4 dan 5 menjadi berkurang dibandingkan dengan kombinasi 2, 3, dan 1.

Kecuali berpengaruh terhadap kepadatan beton, gradasi agregat sangat berpengaruh terhadap beberapa sifat beton antara lain :

1. Terhadap Beton Segar

Terhadap beton segar, gradasi agregat dapat mempengaruhi kelecanan (workability), sifat kohesif, jumlah air pencampur, jumlah semen yang diperlukan, pengecoran, pemadatan, finishing keadaan permukaan, kontrol terhadap segregasi (pemisahan butir), dan bleeding (terpisahnya air ke permukaan beton).

2. Terhadap Beton Keras

Terhadap beton keras, gradasi agregat akan mempengaruhi mudah atau sukaranya pekerjaan pemanfaatan beton, kepadatan beton (porous atau padatnya) beton karena kemungkinan terjadinya segregasi, kedap air, banyaknya rongga-rongga, dari semua sifat yang dipengaruhi oleh gradasi itu akan berpengaruh terhadap kekuatan dan keawetan beton.

Pada kombinasi 2, 3, dan 1 terlihat adanya kombinasi yang baik dari gradasi copper slag dengan pasir Lumajang. Copper slag dengan gradasinya yang well graded, maka akan menghasilkan agregat halus gabungan yang ideal yang berarti menghasilkan beton yang workable dan mempengaruhi kuat tekan beton. Kombinasi tersebut dapat dicapai sampai maksimum pada kombinasi 2, akan tetapi untuk kombinasi yang lain yaitu kombinasi 4 dan 5 terjadi penurunan kuat tekan. Hal tersebut dikarenakan kombinasi gradasi yang kurang baik antara copper slag dan pasir Lumajang yaitu kombinasi gradasi yang terlalu banyak butiran halus dan kasarnya. Copper slag pada kombinasi tersebut mempunyai gradasi yang gap graded yang didalamnya terdapat sejumlah butiran yang relatif besar, kasar, serta sebagian lagi butiran yang sangat halus. Beton yang dihasilkan tidak workable yang berarti kuat tekan yang dihasilkan juga tidak optimal.

Hal tersebut sesuai dengan pendapat **C. L. Hwang and J. C. Laiw, (1989)**, yang berpendapat bahwa copper slag dapat digunakan sebagai material substitusi agregat halus, namun apabila substitusi tersebut berlebihan, maka workabilitas dari beton akan semakin jelek, sehingga tidak mampu memperbaiki kuat tekan beton. Hal ini juga sesuai dengan pendapat **C. A. Herubin and T. Marotta, (1977)**, yang berpendapat bahwa agregat haruslah mempunyai bentuk gradasi yang well graded untuk mencapai kekuatan yang tinggi, berarti dengan kombinasi gradasi copper slag dengan pasir Lumajang pada kombinasi 2 akan didapatkan kombinasi yang ideal (well graded), sehingga bila untuk campuran beton maka workabilitas beton menjadi baik, yang berarti akan meningkatkan kuat tekan beton.

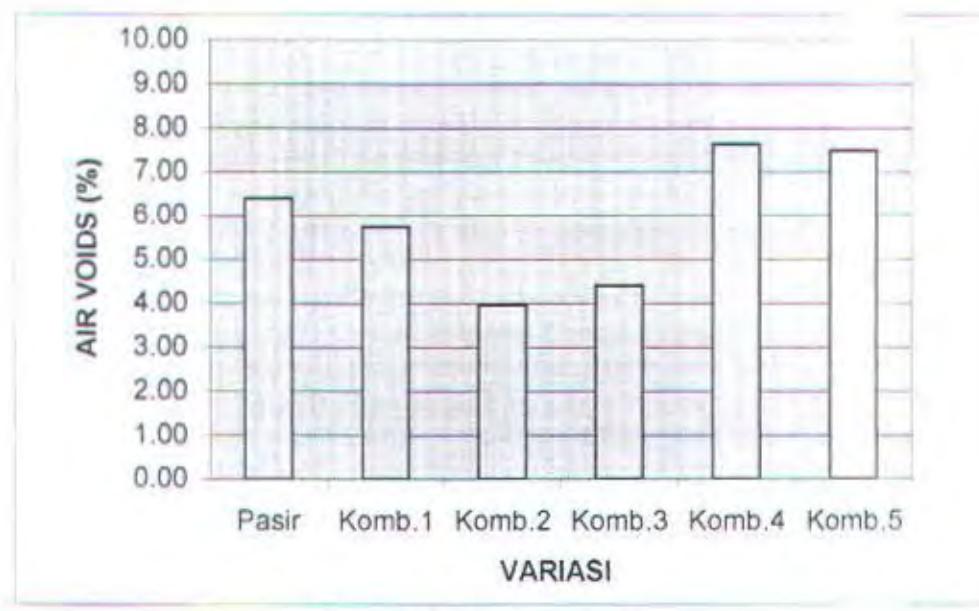
4.3.2. Analisa Hasil Pengujian Air Void Beton

Beton mempunyai kecenderungan mengandung rongga-rongga yang diakibatkan oleh adanya gelembung udara yang terbentuk selama atau sesudah pencetakan selesai. Adanya porositas dalam beton merupakan masalah yang tidak dapat terlepas, karena tidak semua ruang diantara partikel agregat terisi oleh pasta semen. Semakin banyaknya porositas, maka penyerapan air oleh beton melalui kapilaritas akan terjadi.

Dari pengamatan, lalu dibuatkan tabel 4.30 dan gambar 4.29 seperti yang terlihat :

Tabel 4.30 Air Voids Beton (Rendaman 28 hari)

| Variasi | Air Voids Beton (%) | | | Mean Air Voids Beton |
|---------|---------------------|------|------|-------------------------|
| | I | II | III | |
| Pasir | 6.22 | 6.58 | 6.42 | 6.41 |
| Komb. 1 | 5.89 | 5.74 | 5.61 | 5.75 |
| Komb. 2 | 4.34 | 3.96 | 3.58 | 3.96 |
| Komb. 3 | 4.39 | 4.25 | 4.57 | 4.40 |
| Komb. 4 | 7.53 | 7.46 | 7.92 | 7.64 |
| Komb. 5 | 7.33 | 7.51 | 7.62 | 7.49 |



Gambar 4.29. Air Voids Beton

Dari gambar tersebut memperlihatkan untuk kombinasi 2 dan kombinasi 3 menunjukkan nilai porositas yang lebih kecil daripada kombinasi 4 dan 5. Ini berarti dengan semakin kecil porositas beton, maka semakin tinggi kekedapannya. Hal tersebut disebabkan oleh karena sifat dari copper slag sebagai bahan material campuran beton, yaitu mempunyai resapan air yang kecil, sehingga kekedapan copper slag tersebut relatif tinggi. Sifat ini ditunjang oleh banyaknya butiran halus seperti serbuk yang mudah terbawa oleh angin. Adanya sifat copper slag yang mempunyai kekedapan yang tinggi berarti beton yang menggunakan copper slag ini akan mempunyai nilai kekedapan yang lebih baik.

Gradasi yang baik pada agregat, dapat menghasilkan beton yang padat, sehingga volume rongga berkurang dan penggunaan semen Portland berkurang pula. Susunan beton yang padat dapat dapat menghasilkan beton dengan kekuatan yang besar. Hal ini sesuai dengan pendapat **Troxell and Davis, (1956)**, yang menyatakan bahwa salah satu yang menunjang kekedapan beton adalah porositas yang kecil dari agregat penyusun beton. Kekedapan tersebut juga ditunjang oleh adanya sejumlah butiran halus yang terkandung dalam copper slag, sehingga butiran ini mampu mengisi rongga yang masih kosong dalam beton. Dengan kombinasi gradasi copper slag dan pasir Lumajang yang well graded pada kombinasi 2, maka akan menghasilkan beton yang workable sehingga akan mempengaruhi kekedapan beton yang juga semakin tinggi sehingga kerusakan pada beton juga dapat terkurangi.

Hal tersebut juga sesuai dengan pendapat **Wuryati S. dan Candra R., "Teknologi Beton", (2003)**, yang menyatakan faktor-faktor yang mempengaruhi sifat kedap air pada beton antara lain yaitu :

- Mutu dan porositas agregat
- Umur beton yaitu kekedapan air akan berkurang dengan adanya perkembangan umur. Pada campuran basah penurunan daya kedap air lebih besar daripada campuran kering.
- Gradasi yang dipilih sedemikian agar beton dapat mudah dikerjakan dengan baik dengan jumlah air yang minimal.

- Perawatan beton merupakan faktor yang sangat penting untuk mendapatkan beton kedap air.

Sedangkan pada kombinasi 4, karena berlebihan bahan halusnya maka beton akan tidak ekonomis sebab kebutuhan air meningkat sehingga perlu ditambah semen agar kekuatannya tetap. Selain itu, sifat susut dan creep (rangkak) bertambah serta beton mudah retak (cracking, pecah telur) disamping pendebuan pada permukaan beton (**Rachmat P., (1997)**), ini berarti akan mempengaruhi kepadatan betonnya (porous atau padatnya), sehingga akan berpengaruh terhadap berkurangnya kekuatan dan keawetan beton pada kombinasi 4 dibandingkan pada kombinasi 2, 3, 1, dan 5.

Pada kombinasi 5 yang mempunyai agregat dengan ukuran besar/kasar lebih banyak dibandingkan dengan kombinasi yang lain sehingga volume pori antar butiran menjadi lebih besar. Hal ini dikarenakan kekurangan agregat dengan ukuran yang lebih kecil atau lebih halus sehingga pori-pori tidak terisi oleh butiran yang lebih kecil, ini berarti pori-porinya menjadi lebih besar dibandingkan pada kombinasi 2, 3, dan 1 yang mempunyai gradasi yang ideal (tidak seragam). Dengan adanya pori yang lebih banyak tersebut maka beton tidak dapat memberikan tingkat yang optimum untuk mendapatkan density dan kekuatan beton pada kombinasi 4 dan 5 menjadi berkurang dibandingkan dengan kombinasi 2, 3, dan 1.

4.3.3. Analisa Hasil Pengujian Ultrasonic

Pada tes ultrasonic merupakan salah satu metode yang didasarkan pada kenyataan mengenai adanya kecepatan suara (V) pada bahan yang dikaitkan dengan modulus elastisitas (E).

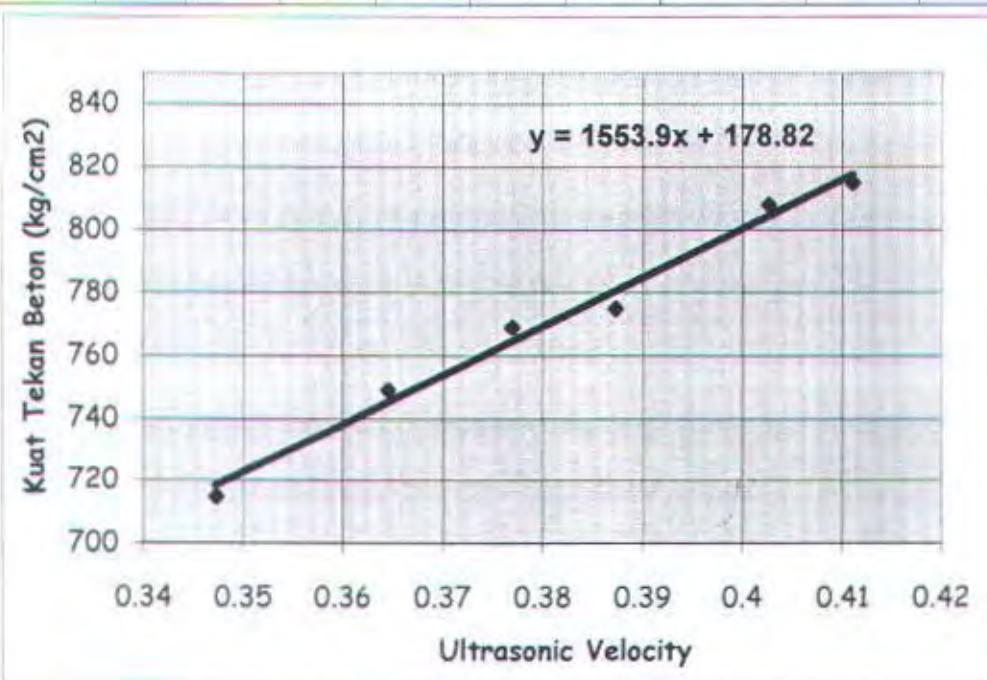
Dari hasil pengamatan kecepatan gelombang ultrasonic pada beton menunjukkan bahwa semakin besar kekuatan beton, maka semakin besar pula nilai kecepatan gelombangnya (velocity). Dari tabel 4.31 dan gambar 4.30, serta 4.31 memperlihatkan bahwa kekuatan tekan beton pada umur 28 hari pada variasi kombinasi 2 dan kombinasi 3 mempunyai nilai yang lebih besar daripada variasi yang lain, hal ini terjadi karena

kombinasi yang well graded antara copper slag dengan pasir Lumajang, sehingga menjadikan kuat tekannya lebih baik dari variasi yang lain.

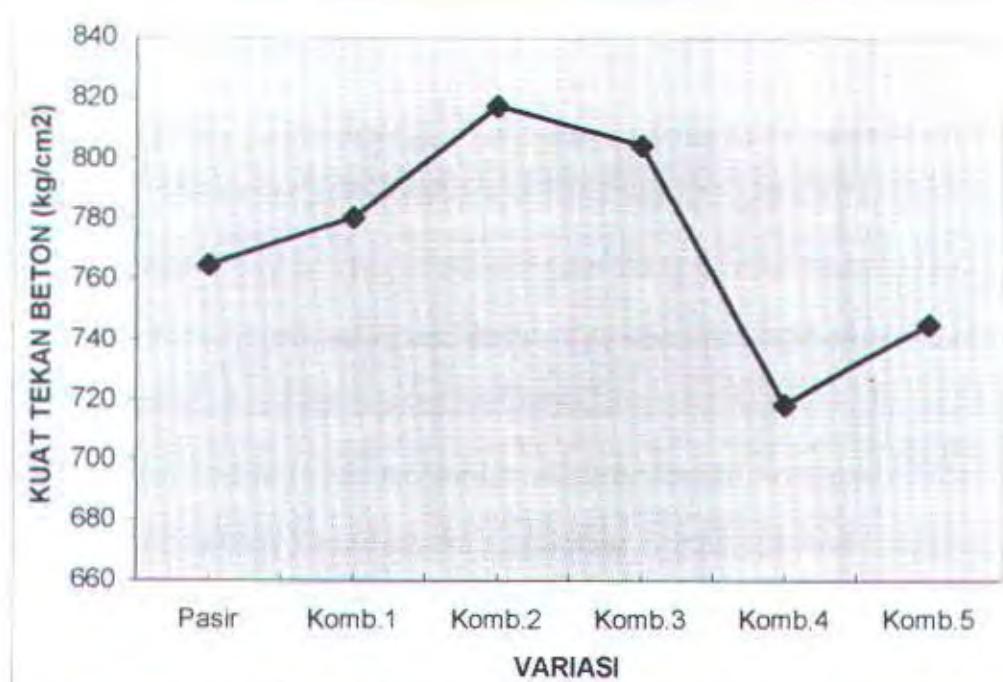
Dari pengamatan, lalu dibuatkan tabel 4.30 dan gambar 4.31 seperti yang terlihat :

Tabel 4.31. Pembacaan Ultrasonic Dan Kuat Tekan Beton
(Rendaman 28 Hari)

| Variasi | Jarak (cm) | Pembacaan Ultrasonic | | | | | Rata-rata | Veloc. | Tegangan (kg/cm ²) |
|---------|---------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------|-----------------------------------|
| | | h_{tot} | 1 | 2 | 3 | 4 | | | |
| Pasir | 30 | 79.40 | 78.80 | 79.50 | 79.80 | 80.40 | 79.58 | 0.377 | 764.60 |
| Komb. I | 30 | 77.50 | 76.50 | 77.10 | 77.90 | 78.30 | 77.46 | 0.387 | 780.64 |
| Komb. 2 | 30 | 74.60 | 72.60 | 72.90 | 72.70 | 72.30 | 72.98 | 0.411 | 817.58 |
| Komb. 3 | 30 | 75.10 | 74.10 | 74.50 | 74.20 | 74.60 | 74.50 | 0.403 | 804.55 |
| Komb. 4 | 30 | 86.70 | 84.30 | 86.60 | 87.50 | 86.80 | 86.38 | 0.347 | 715.49 |
| Komb. 5 | 30 | 81.50 | 82.30 | 82.9 | 83.60 | 81.20 | 82.30 | 0.365 | 745.25 |



Gambar 4.30. Grafik Regresi Hubungan Antara Kuat Tekan Dengan Ultrasonic Velocity



Gambar 4.31. Hubungan Antara Variasi Copper Slag Dengan Kuat Tekan Beton

Hal tersebut sesuai dengan Rachmad P., (1997) yang menyatakan faktor yang menentukan pada pengujian kecepatan gelombang ultrasonic adalah kuat tekan dari beton itu sendiri, sedangkan faktor kuat tekannya ditentukan oleh kecepatan getaran yang dipengaruhi oleh faktor-faktor diantaranya yaitu :

1. Kehalusan permukaan yang saling menyentuh bila permukaan tidak cukup halus sebaiknya dihaluskan dengan tanah yaitu medium gabungan semacam pelumas harus digunakan untuk menimbulkan persentuhan yang baik antara transduser dan beton.
2. Kecepatan getaran kelihatannya tergantung pada panjangnya arus yang dilewati , berkurangnya kecepatan menambah panjangnya jalan/arus yang dilewati.
3. Kecepatan getaran tidak terpengaruh pada suhu dengan rentangan 5 °C hingga 30 °C pada suhu yang lebih kecepatan getaran berkurang dan suhu dibawah titik beku, kecepatan getaran bertambah.
4. Kecepatan getaran bertambah dengan adanya kadar kelembaban yang meningkat.

5. Batang-batang baja akan condong lebih menambah kecepatan getaran.
6. Untuk kecepatan getaran yang diberikan, kekuatan daya tekannya akan menjadi lebih tinggi pada bahan yang lebih tua pada umumnya.

Sesuai dengan **BS 4408 : Part 5 : 1974** hasil dari tes dengan kecepatan gelombang ultrasonic dipengaruhi oleh :

1. Tipe dan pembuatan alat, ketepatan pembacaan, frekuensi gelombang.
2. Struktur atau bagian yang dites.
3. Spesifikasi beton.
4. Komposisi beton yang meliputi :
 - Tipe semen
 - Kadar semen
 - W/C
 - Tipe dan ukuran agregat.
 - Admixture.
5. Kondisi curing, temperatur, dan umur pada saat beton dites.
6. Kondisi pemukaan (halus atau kasarnya permukaan).
7. Kondisi beton pada saat dites yaitu basah atau kering.
8. Panjang bagian yang diuji, metode pelaksanaan, dan ketepatan alat.
9. Pengukuran dipengaruhi oleh kecepatan gelombang (pulse velocity).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari penelitian dapatlah ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari peninjauan sifat fisika dan kimia dari copper slag terlihat bahwa copper slag mempunyai sifat yang hampir sama dengan sifat dari pasir Lumajang, yang berarti copper slag dapat digunakan sebagai material agregat halus dalam campuran pembuatan beton.
2. Copper slag yang mempunyai kemampuan menyerap air yang rendah, maka kebutuhan air yang digunakan lebih sedikit dibandingkan dengan beton tanpa campuran copper slag untuk mencapai workabilitas (kelecanan) yang sama.
3. Substitusi copper slag terhadap pasir Lumajang dalam campuran beton , didapatkan hasil temperatur hidrasi terus meningkat seiring dengan kenaikan tingkat kehalusan kombinasi grada si dari copper slag dalam beton. Kenaikan temperatur hidrasi beton tersebut disebabkan karena kandungan besi yang sangat tinggi. Besi merupakan bahan yang bersifat konduksi yaitu dapat mengantarkan panas. Kadar besi yang tinggi menyebabkan panas hidrasi yang terjadi akibat reaksi air dan semen didistribusikan keseluruh bagian beton sehingga meningkatkan panas.
4. Adanya copper slag dalam campuran beton, menyebabkan waktu setting lebih pendek dibandingkan dengan tanpa copper slag, hal tersebut dikarenakan kandungan air yang lebih sedikit dalam beton serta adanya kenaikan temperatur hidrasi dalam campuran beton.
5. Pada campuran beton yang menggunakan copper slag menunjukkan kombinasi 2 pasir – copper slag, kuat tekan yang dihasilkan semakin besar, sedangkan untuk kombinasi lainnya kekuatan tekan menjadi menurun. Hal tersebut disebabkan karena kombinasi grading agregat halus yang well graded sehingga menghasilkan sifat mekanik beton yaitu kuat tekan yang optimum, sedangkan untuk kombinasi lainnya

mengalami penurunan kuat tekan dikarenakan kombinasi grading yang kurang baik.

6. Pada campuran beton yang menggunakan copper slag mempunyai porositas yang lebih kecil dibandingkan tanpa campuran copper slag. Dengan kombinasi gradasi copper slag yang well graded untuk mensubstitusi pasir Lumajang, maka akan menghasilkan beton yang workable sehingga akan mempengaruhi semakin tingginya kekakuan pada beton.
7. Pada pegujian yang mempergunakan kecepatan gelombang ultrasonic menunjukkan tegangan yang dihasilkan untuk campuran beton pada kombinasi 2 lebih besar. Hal ini disebabkan karena nilai kecepatan getaran (velocity) yang besar dan kuat tekan yang besar.

5.2. SARAN

1. Dalam penelitian ini, lingkungan yang digunakan adalah lingkungan air tawar, sehingga perlu pengkajian lebih lanjut terhadap perilaku gradasi copper slag dalam campuran beton bila dikondisikan pada lingkungan agresif misalnya lingkungan air laut, lingkungan asam.
2. Jenis curing (perawatan) merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi nilai kuat tekan pada campuran beton. Dalam penelitian ini menggunakan wet curing (perendaman). Untuk itu perlu penelitian lebih lanjut mengenai sifat fisik dan mekanik dari campuran beton tersebut bila dikondisikan pada jenis curing lainnya.
3. Pada pembuatan beton mutu tinggi biasanya menggunakan bahan tambahan mineral, seperti silika fume yang bertujuan untuk memperkecil nilai porositas beton sehingga menghasilkan beton yang durable, sedangkan pada penelitian ini beton dibuat tanpa adanya bahan tambahan dengan tujuan untuk mengetahui sifat alami dari copper slag terhadap beton. Untuk itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai perilaku copper slag dalam beton bila diberi bahan tambahan, seperti silika fume.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

1. Neville, A.M, "Properties of Concrete", 3 rd edition, London, Pitman, 1981.
2. Hwang, C.L. and Laiw, J.S., "Properties of Concrete Using Copper Slag as a substitute for Fine Aggregate", Fly Ash, Silika Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, SP – 114, V-2, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 1989, pp. 1677-1695.
3. K.R. Tretheway and J. Chamberlain, "Corrosion", London, 1988.
4. G.E. Troxell and H.E. Davis, "Composition and Properties of Concrete", California, 1956.
5. Aman Subakti, "Teknologi Beton Dalam Praktek", Divisi Percetakan Jurusan Teknik Sipil – ITS, 1994.
6. Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, Concrete and Aggregates, 1994.
7. Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.01, Concrete and Aggregates, 1994.
8. Antonio M.Arino and Barzin Mobasher, "Effect of Ground Copper Slag on Strength and Toughness of Cementitious Mixes", ACI Materials Journal, January-February, 1999.
9. M.J. Bradley and S.E. Wiberly, "Studies on the Effect of the Copper and Zinc content in a silica by product material when used in mortar", ACI Materials Journal, July, 1993.
10. R.M. Brick and R.B. Gordon, "Structure and Properties of Alloys", New York, 1989.
11. C.A. Herubin and T. Marotta, "Basic Construction Material", Virginia, Amerika, Serikat, 1977.
12. D.G. Mongomeryand G. Wang, "Instant Chilled Steel Slag Aggregate in Concrete – Strength related properties", Cement and Concrete Research, Vol 21, USA, 1991.
13. Dr. Wuryati S. M.Pd dan Candra R, ST, "Teknologi Beton", 2003.
14. A.Galan, "Combined Ultrasound Methods of Concrete Testing", Czechoslovakia, 1990.

LAMPIRAN



JURUSAN TEKNIK KIMIA FTI - ITS
TEAM AFILIASI DAN KONSULTASI INDUSTRI

KAMPUS ITS, SUKOLILO - SURABAYA, TELP. 5922935 FAX. (031) 5999282

KETERANGAN HASIL ANALISA

No. 7031/LTAKI/II/2004

terima dari : **Sdr. Diah Sara Samy**
Mhs. T. Sipil FTSP-ITS
SURABAYA
nis contoh :Cupper Slag
terima tgl. :16 Februari 2004

| Parameter | Hasil analisa | Metode |
|-----------------------------------|---------------|------------------|
| SiO ₂ ,% | 41,27 | Gravimetri |
| Al ₂ O ₃ ,% | 0,75 | Spektrofotometri |
| Fe ₂ O ₃ ,% | 39,60 | AAS |
| CaO ,% | 4,09 | Titrimetri |
| MgO ,% | 4,20 | " |
| Na ₂ O ,% | 0,50 | Flamefotometri |
| Cl ₂ O ,% | 4,04 | " |
| CuO ,% | 0,62 | AAS |

eterangan :

Hasil analisa tersebut diatas berdasarkan contoh yang kami terima.

Surabaya, 20 Februari 2004



Hoedijono Ismarwanto, MT
Kepala Laboratorium TAKI

