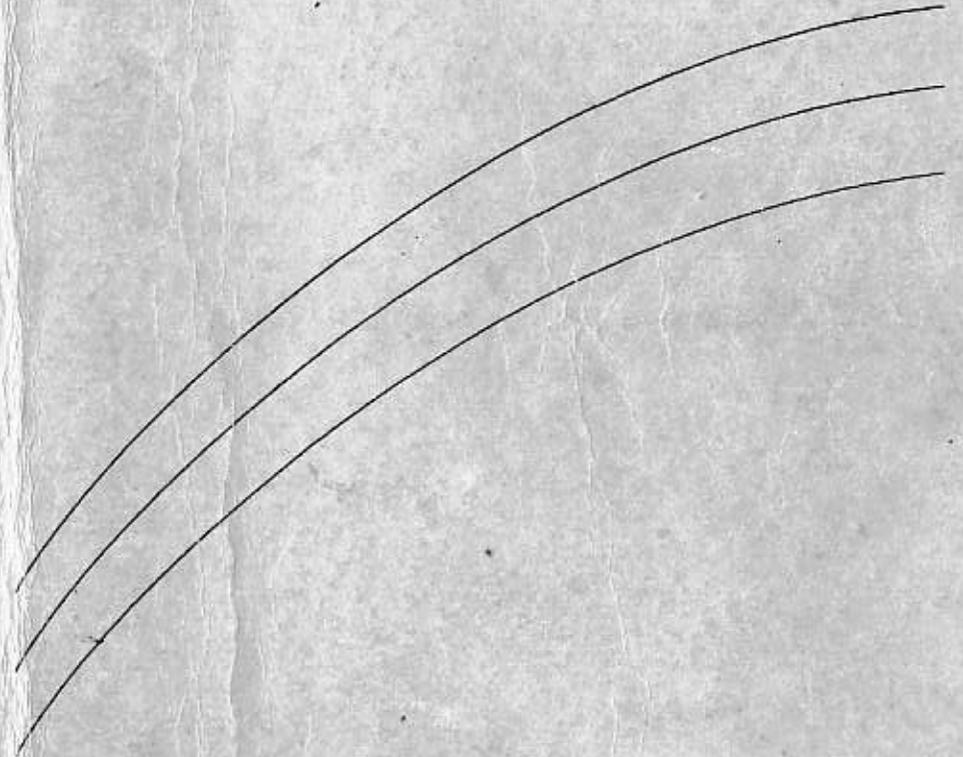


TEKNOLOGI **BETON**



KARDIYONO TJOKRODIMULJO

NF

TEKNOLOGI BETON

Hadi dr. P. Kardiyono
Seminar Politeknik Negeri Grogol

[Handwritten Signature]
09/6/09

KARDIYONO TJOKRODIMULJO

N

PRAKATA

Beton merupakan salah satu bahan bangunan yang pada saat ini banyak dipakai dalam pembuatan bangunan fisik di Indonesia. Karena sifatnya yang unik maka memerlukan pengetahuan yang cukup luas, antara lain mengenai sifat bahan dasarnya, cara pembuatannya, cara evaluasinya, dan variasi bahan tambahannya. Oleh karena itu cara pembuatannya perlu diketahui dengan benar agar sesuai dengan ketersediaan bahan dasarnya di lapangan maupun persyaratan pemakaiannya. Berdasarkan atas hal tersebut maka penulis terdorong untuk menyumbangkan sedikit pengetahuannya tentang teknologi beton dalam bentuk buku.

Buku ini merupakan kumpulan bahan kuliah yang diberikan penulis untuk mahasiswa Teknik Sipil program Sarjana (S-1), Pasca Sarjana (S-2) Universitas Gadjah Mada, Maupun kursus-kursus singkat bagi Dosen dan Staf Ahli Teknik yang pernah diselenggarakan oleh Pusat Antar Universitas, Universitas Gadjah Mada maupun di Instansi lain pada beberapa waktu yang lalu.

Dalam penulisan buku ini telah diusahakan pencantuman beberapa Standar Nasional Indonesia yang terbaru yang berhubungan dengan teknologi beton agar mempermudah cara pemakaiannya di lapangan dan sesuai pula dengan standar teknik yang berlaku di Indonesia saat ini.

Mengingat keterbatasan penulis maka tentu buku ini jauh dari sempurna, oleh karena itu saran dan kritik dari Para Pembaca agar pada penerbitan yang akan datang dapat lebih baik akan diterima penulis dengan senang hati.

Ucapan terima kasih sebesar-besarnya disampaikan kepada Isteri tercinta yang memberikan semangat dan teman sejawat atas dorongannya sehingga dapat diterbitkan buku ini. Semoga buku ini bermanfaat bagi kita sekalian.

Penulis,

Ir. Kardiyono Tjokrodimuljo, M.E.

DAFTAR ISI

PRAKATA	iii
DAFTAR ISI	v
Bab 1 PENDAHULUAN	1
Bab 2 SEMEN PORTLAND	5
2.1. Umum	5
2.2. Sejarah Semen Portland	5
2.3. Pembuatan Semen Portland	6
2.4. Sifat-Sifat Semen Portland	11
2.5. Jenis-jenis Semen Portland	11
2.6. Penyimpan Semen	13
Bab 3 AGREGAT	13
3.1. Umum	13
3.2. Agregat Alami dan Agregat Buatan	15
3.3. Berat Jenis Agregat	16
3.4. Berat Satuan dan Kepadatan	17
3.5. Ukuran Butir Agregat	18
3.6. Ukuran Lubang Ayakan	19
3.7. Ukuran Maksimum Butir Agregat	19
3.8. Gradasi Agregat	25
3.9. Gradasi Khusus	25
3.10. Modulus Halus Butir	28
3.11. Serapan Air Dalam Agregat	29
3.12. Kadar Air Agregat	30
3.13. Pengembangan Volume Pasir	31
3.14. Kekuatan dan Keuletan Agregat	33
3.15. Ketahanan Cuaca (Kekekalan)	34
3.16. Reaksi Alkali-Silika	34
3.17. Sifat Termal Agregat	35
3.18. Zat-Zat Yang Berpengaruh Buruk Pada Beton	36
3.19. Bentuk Agregat	38
3.20. Tekstur Permukaan Butiran	38
3.21. Persyaratan Agregat	45
Bab 4 AIR	47
Bab 5 BAHAN TAMBAH	47
5.1. Bahan Kimia Tambahan	48
5.2. Pozolan	48
5.3. Serat	49

Bab 6	PENGOLAHAN BETON	53
	6.1. Pengadukan Beton	53
	6.2. Pengangkutan Adukan beton	53
	6.3. Penuangan Adukan beton	54
	6.4. Pemadatan Adukan Beton	54
	6.5. Pekerjaan Perataan	55
	6.6. Perawatan Beton	55
	6.7. Sifat Beton Segar	55
	6.7. 1. Kemudahan Pengerjaan (<i>workability</i>)	56
	6.7. 2. Pemisahan Kerikil	57
	6.7. 3. Pemisahan Air	57
Bab 7	PERANCANGAN CAMPURAN ADUKAN BETON	59
	7.1. Pendahuluan	59
	7.2. Kuat Tekan Beton	59
	7.3. Perancangan Menurut "Road Note no. 4"	62
	7.4. Perancangan Menurut "American Concrete Institute"	66
	7.5. Perancangan Menurut Cara Inggris	70
	7.6. Campuran Cara Coba-coba	86
	7.7. Cara Perancangan Campuran di Laboratorium	87
	7.8. Campuran Coba	91
	7.9. Kesimpulan	92
Bab 8	EVALUASI PEKERJAAN BETON	103
	8.1. Pendahuluan	103
	8.2. Evaluasi Pekerjaan Beton	103
	8.3. Evaluasi Mutu Perawatan Beton di Lapangan	106
	8.4. Langkah-langkah yang Harus Diambil Jika Hasil Uji Beton Kurang Memuaskan	106
Bab 9	PENGAMBILAN CONTOH	109
	9.1. Pendahuluan	109
	9.2. Pengambilan Contoh Agregat	109
	9.3. Pengambilan Contoh Beton Segar	111
	9.4. Pengambilan Contoh Beton Keras	113
	9.5. Jumlah Contoh	114
	9.6. Bentuk Benda Uji	115
Bab 10	BETON JENIS LAIN	117
	10.1. Beton Ringan	117
	10.2. Beton Massa	117
	10.3. Ferosemen	120
	10.4. Beton Serat	122
	10.5. Beton Non-Pasir	123
	10.6. Beton Siklop	124
	10.7. Beton Hampa (<i>Vacuum Concrete</i>)	125
	10.8. Mortar	125

DAFTAR PUSTAKA	130
----------------------	-----

1 PENDAHULUAN

Beton sangat banyak dipakai secara luas sebagai bahan bangunan. Bahan tersebut diperoleh dengan cara mencampurkan semen Portland, air, dan agregat (dan kadang-kadang bahan tambah, yang sangat bervariasi mulai dari bahan kimia tambahan, serat, sampai bahan buangan non-kimia) pada perbandingan tertentu. Campuran tersebut bilamana dituang dalam cetakan kemudian dibiarkan maka akan mengeras seperti batuan. Pengerasan itu terjadi oleh peristiwa reaksi kimia antara air dan semen, yang berlangsung selama waktu yang panjang, dan akibatnya campuran itu selalu bertambah keras setara dengan umurnya. Beton yang sudah keras dapat dianggap sebagai batu-tiruan, dengan rongga-rongga antara butiran yang besar (agregat kasar, kerikil atau batu pecah) diisi oleh butiran yang lebih kecil (agregat halus, pasir), dan pori-pori antara agregat halus ini diisi oleh semen dan air (pasta semen). Dalam adukan beton, air dan semen membentuk pasta yang disebut pasta semen. Pasta semen ini selain mengisi pori-pori diantara butiran-butiran agregat halus juga bersifat sebagai perekat/pengikat dalam proses pengerasan, sehingga butiran-butiran agregat saling terikat dengan kuat dan terbentuklah suatu massa yang kompak/padat.

Kekuatan, keawetan, dan sifat beton yang lain tergantung pada sifat-sifat bahan-bahan dasar tersebut di atas, nilai perbandingan bahan-bahannya, cara pengadukan maupun cara pengerjaan selama penuangan adukan beton, cara pemadatan, dan cara perawatan selama proses pengerasan. Luasnya pemakaian beton disebabkan oleh karena terbuat dari bahan-bahan yang umumnya mudah diperoleh, serta mudah diolah sehingga menjadikan beton mempunyai sifat yang dituntut sesuai dengan keadaan situasi pemakaian tertentu. Kemajuan pengetahuan tentang teknologi beton telah dapat memenuhi berbagai tuntutan tertentu, misalnya pemakaian bahan lokal yang dapat diperoleh di suatu daerah tertentu dengan mengubah perbandingan bahan dasar yang sesuai, maupun cara pengerjaan yang cocok dengan kemampuan pekerja, serta kebutuhan penampilan yang sesuai. Saat ini pengetahuan cara pembuatan beton tampaknya lebih populer daripada pengetahuan tentang bahan-bahan dasarnya, mungkin karena pemakai beton lebih tertarik pada tuntutan sifat beton daripada pemilihan bahan dasarnya. Hal ini mengakibatkan munculnya banyak pabrik beton jadi (*ready mixed concrete*), dimana pemakai beton tinggal menyebutkan saja spesifikasi dari beton yang diinginkan, dan selanjutnya bahkan muncul pula pabrik beton pracetak (*precast concrete*), dimana pemesan menginginkan suatu elemen struktur yang sudah siap pakai lengkap dengan spesifikasi yang diinginkan.

Beton dapat mempunyai kuat tekan yang sangat tinggi, tetapi kuat tariknya sangat rendah. Kondisi yang demikian, yaitu rendahnya kuat tarik, pada elemen struktur yang betonnya mengalami tegangan tarik diperkuat dengan batang baja tulangan sehingga terbentuk suatu struktur komposit, yang kemudian dikenal dengan sebutan beton bertulang. Khusus beton saja yang tidak bertulang disebut be-

ton tanpa tulangan (*plain concrete*). Untuk struktur tertentu yang tidak menginginkan retak tarik pada beton misalnya, dilakukan manipulasi (strategi) dengan memberikan tegangan tekan awal sebelum struktur dibebani, yaitu pada struktur beton prategang (*prestressed concrete*).

Membuat beton sebenarnya tidaklah sesederhana hanya sekedar mencampurkan bahan-bahan dasarnya untuk membentuk campuran yang plastis sebagaimana yang sering terlihat pada pembuatan bangunan sederhana, tetapi jika ingin membuat beton yang baik, dalam arti memenuhi persyaratan yang lebih ketat karena tuntutan yang lebih tinggi, maka harus diperhitungkan dengan seksama cara-cara memperoleh adukan beton (beton segar, *fresh concrete*) yang baik dan beton (beton keras, *hardened concrete*) yang dihasilkannya juga baik. Beton segar yang baik ialah beton segar yang dapat diaduk, dapat diangkut, dapat dituang, dapat dipadatkan, tidak ada kecenderungan untuk terjadi segregasi (pemisahan kerikil dari adukan) maupun *bleeding* (pemisahan air dan semen dari adukan). Hal ini karena segregasi maupun *bleeding* mengakibatkan beton yang diperoleh akan jelek. Beton (beton keras) yang baik ialah beton yang kuat, tahan lama / awet, kedap air, tahan aus, dan sedikit mengalami perubahan volume (kembang susutnya kecil).

Dari uraian sekilas di atas maka dapatlah diketahui kebaikan dan kejelekan beton dibandingkan dengan bahan bangunan lain.

Kebaikan beton antara lain adalah :

- 1) Harganya relatif murah karena menggunakan bahan-bahan dasar dari bahan lokal, kecuali semen Portland. Hanya untuk daerah tertentu yang sulit mendapatkan pasir atau kerikil mungkin harga beton agak mahal.
- 2) Beton termasuk bahan yang berkekuatan tekan tinggi, serta mempunyai sifat tahan terhadap pengkaratan/pembusukan oleh kondisi lingkungan. Bila dibuat dengan cara yang baik, kuat tekannya dapat sama dengan batuan alami.
- 3) Beton segar dapat dengan mudah diangkut maupun dicetak dalam bentuk apapun dan ukuran sebarang tergantung keinginan. Cetakan dapat pula dipakai ulang beberapa kali sehingga secara ekonomi menjadi murah.
- 4) Kuat tekannya yang tinggi mengakibatkan jika dikombinasikan dengan baja tulangan (yang kuat tariknya tinggi) dapat dikatakan mampu dibuat untuk struktur berat. Beton dan baja boleh dikatakan mempunyai koefisien muai yang hampir sama. Saat ini beton banyak dipakai untuk fondasi, dinding, jalan raya, landasan udara, gedung, penampung air, pelabuhan, bendungan, jembatan, dan sebagainya.
- 5) Beton segar dapat disemprotkan di permukaan beton lama yang retak maupun diisikan ke dalam retakan beton dalam proses perbaikan.
- 6) Beton segar dapat dipompakan sehingga memungkinkan untuk dituang pada tempat-tempat yang posisinya sulit.
- 7) Beton termasuk tahan aus dan tahan kebakaran, sehingga biaya perawatan termasuk rendah.

Kejelekan beton antara lain :

- 1) Beton mempunyai kuat tarik yang rendah, sehingga mudah retak. Oleh karena itu perlu diberi baja tulangan, atau tulangan kasa (*meshes*).
- 2) Beton segar mengerut saat pengeringan dan beton keras mengembang jika basah, sehingga dilatasi (*contraction joint*) perlu diadakan pada beton yang panjang/lebar untuk memberi tempat bagi susut pengerasan dan pengembangan beton.
- 3) Beton keras mengembang dan menyusut bila terjadi perubahan suhu, sehingga perlu dibuat dilatasi (*expansion joint*) untuk mencegah terjadinya retak-retak akibat perubahan suhu.
- 4) Beton sulit untuk dapat kedap air secara sempurna, sehingga selalu dapat dimasuki air, dan air yang membawa kandungan garam dapat merusakkan beton.
- 5) Beton bersifat getas (tidak daktail) sehingga harus dihitung dan didetail secara seksama agar setelah dikompositkan dengan baja tulangan menjadi bersifat daktail, terutama pada struktur tahan gempa.

2 SEMEN PORTLAND

2.1. UMUM

Semen portland ialah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis dengan gips sebagai bahan tambahan [PUBI-1982].

Semen portland merupakan bahan ikat yang penting dan banyak dipakai dalam pembangunan fisik. Di dunia sebenarnya terdapat berbagai macam semen, dan tiap macamnya digunakan untuk kondisi-kondisi tertentu sesuai dengan sifat-sifatnya yang khusus.

Suatu semen jika diaduk dengan air akan terbentuk adukan pasta semen, sedangkan jika diaduk dengan air kemudian ditambah pasir menjadi mortar semen, dan jika ditambah lagi dengan kerikil/batupecah disebut beton.

Bahan-bahan tersebut dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok, yaitu : bahan aktif dan bahan pasif. Kelompok aktif yaitu semen dan air, sedangkan yang pasif yaitu pasir dan kerikil (disebut agregat, agregat halus dan agregat kasar). Kelompok yang pasif disebut bahan pengisi sedangkan yang aktif disebut perekat/pengikat. Istilah perekat tampaknya lebih cocok mengingat fungsinya seperti lem, bukan seperti tali yang biasa untuk mengikat kayu bakar atau jerami.

Fungsi semen ialah untuk merekatkan butir-butir agregat agar terjadi suatu massa yang kompak/padat. Selain itu juga untuk mengisi rongga-rongga di antara butiran agregat. Walaupun semen hanya kira-kira mengisi 10 persen saja dari volume beton, namun karena merupakan bahan yang aktif maka perlu dipelajari maupun dikontrol secara ilmiah.

2.2. SEJARAH SEMEN PORTLAND

Nama "portland cement" diusulkan oleh Joseph Aspdin pada tahun 1824. Nama itu diusulkan karena berbentuk bubuk yang dicampur dengan air, pasir dan batu-batuan yang ada di pulau Portland, Inggris. Pertama kali semen portland diproduksi (dengan pabrik) di Amerika Serikat oleh David Saylor di kota Coplay, Pennsylvania, pada tahun 1875.

2.3. PEMBUATAN SEMEN PORTLAND

Semen portland dibuat dengan melalui beberapa langkah, sehingga sangat halus dan memiliki sifat adhesif maupun kohesif. Semen diperoleh dengan membakar secara bersamaan, suatu campuran dari calcareous (yang mengandung kalsium karbonat atau batu gamping) dan argillaceous (yang mengandung alumina) dengan perbandingan tertentu. Secara mudahnya, kandungan semen portland

ialah : kapur, silika, dan alumina. Ketiga bahan dasar tadi dicampur dan dibakar dengan suhu 1550°C dan menjadi klinker. Setelah itu kemudian dikeluarkan, didinginkan dan dihaluskan sampai halus seperti bubuk. Biasanya lalu ditambahkan gips atau kalsium sulfat (CaSO_4) kira-kira 2 sampai 4 persen sebagai bahan pengontrol waktu pengikatan. Bahan tambah lain kadang-kadang ditambahkan pula untuk membentuk semen khusus, misalnya : kalsium klorida ditambahkan untuk menjadikan semen yang cepat mengeras. Kemudian dimasukkan ke dalam kantong dengan berat tiap-tiap kantong 50 kg.

2.4. SIFAT-SIFAT SEMEN PORTLAND

Perbedaan sifat jenis semen satu terhadap semen yang lain dapat terjadi karena perbedaan susunan kimia maupun kehalusan butir-butirnya.

(a) Susunan kimia

Karena bahan dasarnya terdiri dari bahan-bahan yang terutama mengandung kapur, silika, alumina, dan oksida besi, maka bahan-bahan ini menjadi unsur-unsur pokok semennya. Sebagai hasil perubahan susunan kimia yang terjadi diperoleh susunan kimia yang kompleks, namun pada semen biasa dapat dilihat sebagaimana pada Tabel 2.1. Oksida-oksida tersebut berinteraksi satu sama lain untuk membentuk serangkaian produk yang lebih kompleks selama proses peleburan.

Tabel 2.1. Susunan unsur semen biasa

Oksida	Persen
Kapur, CaO	60 - 65
Silika, SiO ₂	17 - 25
Alumina, Al ₂ O ₃	3 - 8
Besi, Fe ₂ O ₃	0.5 - 6
Magnesia, MgO	0.5 - 4
Sulfur, S ₀₃	1 - 2
Soda / potash Na ₂ O + K ₂ O	0.5 - 1

Walaupun demikian pada dasarnya dapat disebutkan 4 unsur yang paling penting. Keempat unsur itu ialah :

- Trikalsium silikat (C_3S) atau $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$
- Dikalsium silikat (C_2S) atau $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$
- Trikalsium aluminat (C_3A) atau $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$
- Tetrakalsium aluminoforit (C_4AF) atau $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$

Huruf-huruf dalam tanda kurung yang pertama hanyalah simbol dari komponen tersebut.

Dua unsur yang pertama (a dan b) biasanya merupakan 70 sampai 80 persen dari semen sehingga merupakan bagian yang paling dominan dalam memberikan sifat semen. Bila semen terkena air, C₃S segera mulai berhidrasi, dan menghasilkan panas. Selain itu juga berpengaruh besar terhadap pengerasan semen, terakannya sebelum mencapai umur 14 hari (lihat Gambar 2.1). Sebaliknya, C₂S bereaksi dengan air lebih lambat sehingga hanya berpengaruh terhadap pengerasan semen setelah berumur lebih dari 7 hari, dan memberikan kekuatan akhir. Unsur C₂S ini juga membuat semen tahan terhadap serangan kimia (*chemical attack*) dan juga mengurangi besar susutan pengeringan. Kedua unsur pertama ini membutuhkan air berturut-turut sekitar 24 dan 21 persen beratnya untuk terjadinya reaksi kimia, namun C₃S membebaskan kalsium hidroksida saat hidrasi sedinya reaksi kimia, maka dari itu, jika C₃S banyak hampir 3 kali dari yang dibebaskan oleh C₂S. Maka dari itu, jika C₃S mempunyai persentase yang lebih tinggi akan menghasilkan proses pengerasan yang cepat pada pembetulan kekuatan awalnya disertai suatu panas hidrasi yang tinggi. Sebaliknya, persentase C₂S yang lebih tinggi menghasilkan proses pengerasan yang lambat, panas hidrasi yang sedikit, dan ketahanan terhadap serangan kimia yang lebih baik.

Unsur C₃A (unsur ketiga, c) berhidrasi secara exothermic, dan bereaksi sangat cepat, memberikan kekuatan sesudah 24 jam. C₃A bereaksi dengan air sebanyak kira-kira 40 persen beratnya, namun karena jumlah unsur ini yang sedikit maka pengaruhnya pada jumlah air hanya sedikit. Unsur C₃A ini sangat berpengaruh pada panas hidrasi tertinggi, baik selama pengerasan awal maupun pengerasan berikutnya yang panjang. Semen yang mengandung unsur ini lebih dari 10 persen akan kurang tahan terhadap serangan asam sulfat. Oleh karena itu semen tahan sulfat tidak boleh mengandung unsur C₃A terlalu banyak (maksimum 5% saja). Semen yang terkena asam sulfat (SO₄) di dalam air atau tanah disebabkan karena keluarnya C₃A yang berreaksi dengan sulfat, dan mengembang, sehingga terjadi retak-retak pada betonnya.

Unsur yang keempat yaitu C₄AF kurang begitu besar pengaruhnya terhadap kekerasan semen atau beton.

Dari uraian tersebut tampak bahwa persentase yang berbeda dari unsur-unsur yang ada dalam semen membuat semen mempunyai sifat yang berbeda-beda.

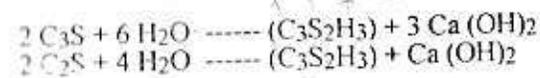
(b) Hidrasi Semen

Bilamana semen bersentuhan dengan air maka proses hidrasi berlangsung, dalam arah ke luar dan ke dalam, maksudnya hasil hidrasi mengendap di bagian luar dan inti semen yang belum terhidrasi di bagian dalam secara bertahap terhidrasi sehingga volumenya mengecil. Reaksi tersebut berlangsung lambat, antara 2 - 5 jam (yang disebut periode induksi atau tak aktif) sebelum mengalami percepatan setelah kulit permukaan pecah.

Pada tahapan hidrasi berikutnya, pasta semen terdiri dari gel (suatu butiran sangat halus hasil hidrasi, memiliki luas permukaan yang amat besar), dan sisa-

sisa semen yang tak berreaksi, kalsium hidroksida Ca(OH)₂, dan air, dan beberapa senyawa yang lain. Kristal-kristal dari berbagai senyawa yang dihasilkan membentuk suatu rangkaian tiga dimensi yang saling melekat secara random dan kemudian sedikit demi sedikit mengisi ruangan yang mula-mula ditempati air, lalu menjadi kaku dan muncullah suatu kekuatan yang selanjutnya mengeras menjadi benda yang padat dan kuat. Dengan demikian pasta semen yang telah mengeras memiliki struktur yang berpori, dengan ukuran pori bervariasi dari yang sangat kecil (4 x 10⁻⁷ mm) sampai yang lebih besar. Pori-pori ini disebut pori-pori gel. Pori-pori yang di dalam pasta semen yang sudah keras itu mungkin saling berhubungan, tapi mungkin juga tidak. Setelah hidrasi berlangsung, endapan hasil hidrasi pada permukaan butiran semen membuat difusi air ke bagian dalam yang belum berhidrasi semakin sulit, sehingga laju hidrasi semakin lambat.

Proses hidrasi pada semen portland sangat kompleks, tidak semua reaksi dapat diketahui secara rinci. Rumus proses kimia (perkiraan) untuk reaksi hidrasi dari unsur C₂S dan C₃S dapat ditulis sebagai berikut.



Hasil utama dari proses di atas ialah C₃S₂H₃ yang biasa disebut "tobermorite", yang berbentuk gel. Panas juga keluar selama proses berlangsung (panas hidrasi). Beberapa butir yang bersifat seperti kristal tampak juga di dalam "tobermorite". Proses hidrasi butir-butir semen berlangsung sangat lambat. Bila masih dimungkinkan, penambahan air masih diperlukan oleh bagian dalam dari butir-butir semen (terutama yang berbutir besar), untuk menyempurnakan proses hidrasi. Proses dapat berlangsung sampai 50 tahun. Penelitian terhadap silinder beton menunjukkan bahwa beton masih meningkat terus kekuatannya, paling tidak untuk jangka waktu 50 tahun.

(c) Kekuatan Pasta Semen dan Faktor Air-Semen

Kekuatan semen yang telah mengeras tergantung pada jumlah air yang dipakai waktu proses hidrasi berlangsung. Pada dasarnya jumlah air yang diperlukan untuk proses hidrasi hanya kira-kira 25 persen dari berat semennya, penambahan jumlah air akan mengurangi kekuatan setelah mengeras. Air kelebihan dari yang diperlukan untuk proses hidrasi pada umumnya memang diperlukan pada pembuatan beton, agar adukan beton dapat campur dengan baik, diangkut dengan mudah, dan dapat dicetak tanpa rongga-rongga yang besar (tidak keropos). Akan tetapi, hendaknya selalu diusahakan jumlah air sesedikit mungkin, agar kekuatan beton tidak terlalu rendah. Seperti telah diuraikan di depan, pasta semen yang mengeras merupakan bagian yang porous. Konsentrasi hasil-hasil hidrasi yang padat pada seluruh ruang atau volume yang tersedia (volume yang semula ditempati oleh air dan semen) merupakan suatu nilai indek porositas. Sebagaimana benda padat yang lain, kuat tekan pasta semen (juga betonnya) sangat dipengaruhi oleh besar pori-pori di antara gel-gel atau pori-pori hasil hidrasi. Kelebihan air

akan mengakibatkan pasta semen berpori lebih banyak, sehingga hasilnya kurang kuat dan juga lebih porous (berpori).

(d) Sifat Fisik Semen

Semen Portland yang dipakai untuk struktur harus mempunyai kualitas tertentu yang telah ditetapkan agar dapat berfungsi secara efektif. Pemeriksaan secara berkala perlu dilakukan, baik yang masih berbentuk bubuk kering maupun yang pasta semennya yang sudah keras, juga betonnya yang dibuat dari semen tersebut. Sifat-sifat fisik semen yang penting yaitu :

Kehalusan butir Reaksi antara semen dan air dimulai dari permukaan butir-butir semen, sehingga makin luas permukaan butir-butir semen (dari berat semen yang sama) makin cepat proses hidrasinya. Hal ini berarti bahwa, butir-butir semen yang halus akan menjadi kuat dan menghasilkan panas hidrasi yang lebih cepat dari pada semen dengan butir-butir yang lebih kasar. Secara umum, semen berbutir halus meningkatkan kohesi pada beton segar (*fresh concrete*) dan dapat pula mengurangi *bleeding*, akan tetapi menambah kecenderungan beton untuk menyusut lebih banyak dan mempermudah terjadinya retak susut. Menurut SII 0013-81, paling sedikit 90% berat semen harus dapat lewat ayakan lubang 0,09 mm. Namun perlu dicatat, bahwa jika butir-butir semen terlalu halus, sifat semen akan menjadi kebalikannya, karena terjadi hidrasi awal oleh kelembaban udara.

Waktu ikatan Semen jika dicampur dengan air membentuk bubur yang secara bertahap menjadi kurang plastis, dan akhirnya menjadi keras. Pada proses ini, tahap pertama dicapai ketika pasta semen cukup kaku untuk menahan suatu tekanan. Waktu untuk mencapai tahap ini disebut sebagai **waktu ikatan**. Waktu tersebut dihitung sejak air dicampur dengan semen. Waktu ikatan dibagi menjadi dua bagian, yaitu **waktu ikatan awal** (*initial time*) dan **waktu ikatan akhir** (*final setting time*). Waktu dari pencampuran semen dan air sampai saat kehilangan sifat keplastisannya disebut waktu ikatan awal, dan waktu sampai mencapai pastanya menjadi massa yang keras disebut waktu ikatan akhir. Pada semen Portland biasa, waktu ikatan awal tidak boleh kurang dari 60 menit, dan waktu ikatan akhir tidak boleh lebih dari 480 menit (8 jam).

Pengertian waktu ikatan awal adalah penting pada pekerjaan beton. Waktu ikatan awal yang cukup lama diperlukan untuk pekerjaan beton, yaitu waktu transportasi, penuangan, pemadatan, dan perataan permukaan. Proses ikatan ini disertai perubahan temperatur. Temperatur naik dengan cepat dari ikatan awal dan mencapai puncaknya pada waktu berakhirnya ikatan akhir. Waktu ikatan yang pendek kenaikan temperatur dapat sampai 30 derajat celsius. Dalam praktek lama waktu ikatan ini dipengaruhi oleh jumlah air campuran yang digunakan dan suhu udara di sekitarnya.

Panas Hidrasi. Silikat dan aluminat pada semen berreaksi dengan air menjadi media perekat yang memadat lalu membentuk massa yang keras. Reaksi membentuk media perekat ini disebut hidrasi. Hidrasi semen bersifat eksotermis dengan panas yang dikeluarkan kira-kira 110 kalori/gram. Pada bagian dalam pada beton massa yang besar, proses hidrasi ini dapat mengakibatkan kenaikan temperatur

yang besar. Pada saat yang sama, bagian luar beton massa kehilangan panas, sehingga terjadi perbedaan temperatur yang tajam. Pada tahap berikutnya, yaitu tahap pendinginan bagian dalam beton massa dapat terjadi retakan yang besar. Di daerah dingin panas hidrasi dapat menguntungkan karena dipakai untuk mencegah pembekuan air dalam beton.

Panas hidrasi didefinisikan sebagai kuantitas panas dalam kalori/gram pada semen yang terhidrasi. Waktu berlangsungnya dihitung sampai proses hidrasi berlangsung secara sempurna pada temperatur tertentu. Panas hidrasi untuk semen dengan panas hidrasi rendah harus tidak lebih dari 60 kalori/gram sampai pada tujuh hari pertama, dan 70 kalori/gram sampai pada 28 hari.

Panas hidrasi naik sesuai dengan ketinggian temperatur pada saat hidrasi terjadi. Untuk semen biasa panas hidrasi tersebut bervariasi antara 37 kalori/gram pada 5°C sampai dengan 80 kalori/gram pada 40°C. Untuk semua jenis semen pada umumnya kira-kira 60 persen dari panas total dibebaskan pada waktu antara 1 dan 3 hari pertama, kira-kira 80 persen sampai hari ke tujuh, dan antara 90 sampai 95 persen dalam jangka waktu 6 bulan. Laju perubahan panas tergantung pada komposisi semen. Laju hidrasi dan perubahan panas bertambah besar sejalan dengan semakin halusnya semen, walaupun kuantitas total panas yang dibebaskan tidak dipengaruhi oleh kehalusan tersebut.

Berat Jenis. Berat jenis semen berkisar pada 3,15. Berat jenis digunakan dalam hitungan perbandingan campuran.

(e) Sifat Kimia Semen

Kesegaran Semen. Pengujian kehilangan berat akibat pembakaran (*loss of ignition*) dilakukan pada semen untuk menentukan kehilangan berat jika semen dibakar sampai sekitar 900 - 1000°C. Kehilangan berat ini terjadi karena adanya kelembaban dan adanya karbon dioksida dalam bentuk kapur bebas atau magnesium yang menguap.

Adanya kelembaban udara menyebabkan proses prehidrasi semen. Kelembaban tersebut mungkin disebabkan atmosfer yang mengandung air selama atau sesudah pembuatan. Karbon dioksida juga terambil dari atmosfer. Kehilangan berat dari pembakaran ini merupakan ukuran kesegaran semen. Karena hidroksida dan karbon dari kapur dan magnesium bukan merupakan unsur perekat maka disebut unsur pengisi. Semakin sedikit kehilangan berat berarti semakin sedikit unsur pengisinya, dan ini berarti semen semakin baik.

Pemeriksaan kehilangan berat dilakukan dengan mengambil satu gram contoh semen kemudian ditempatkan pada platina dengan temperatur 900 sampai 1000°C selama minimum 15 menit. Dalam keadaan normal, kehilangan berat sekitar 2 persen, sedangkan maksimum yang diizinkan 3 persen.

Sisa Yang Tak Larut. Sisa bahan yang tidak habis berreaksi adalah bagian yang tidak aktif dari semen. Hal ini dapat diperiksa dengan mengaduk satu gram semen dalam 40 ml air dan ditambah 10 ml HCl pekat. Campuran tersebut dididihkan selama 10 menit dan volumenya dibuat tetap. Setiap gumpalan, jika ada, dipe-

cah, dan larutannya disaring dengan kertas filter. Sisa yang ada di saringan dicuci dengan larutan Na_2CO_3 , air, dan HCl. Kemudian untuk yang terakhir dicuci dengan air. Untuk memperoleh sisa yang tak larut, kertas filter dikeringkan, dibakar, dan lalu ditimbang. Semakin sedikit sisanya semakin baik semennya. Nilai maksimum yang diizinkan adalah 1,5 persen.

2.5. JENIS-JENIS SEMEN PORTLAND

Perubahan komposisi kimia semen yang dilakukan dengan cara mengubah persentase 4 komponen utama semen dapat menghasilkan beberapa jenis semen sesuai dengan tujuan pemakaiannya.

Sesuai dengan tujuan pemakaiannya, semen portland di Indonesia [SII 0013-81] dibagi menjadi 5 jenis, yaitu :

- Jenis I : Semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain.
- Jenis II : Semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat dan panas hidrasi sedang.
- Jenis III : Semen portland yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan kekuatan awal yang tinggi setelah pengikatan terjadi.
- Jenis IV : Semen portland yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan panas hidrasi yang rendah.
- Jenis V : Semen portland yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan sangat tahan terhadap sulfat.

Semen Portland Pozolan Semen Portland Pozolan dapat diproduksi dengan salah satu cara dari dua cara berikut.

Cara pertama menggiling bersama klinker semen dan pozolan dengan bahan tambah gips atau kalsium sulfat. Cara kedua dengan mencampur sampai rata gerusan semen dan pozolan halus. Penggilingan dua material secara bersamaan pada cara pertama lebih mudah daripada mencampur bubuk kering secara baik sebagaimana pada cara kedua. Pencampuran bubuk kering pada cara kedua hanya dilakukan jika cara penggilingan ternyata tidak ekonomis, serta mesin pencampur yang ada dapat menjamin keseragaman hasil pencampurannya.

Semen Portland Pozolan menghasilkan panas hidrasi lebih sedikit daripada semen biasa. Sifat ketahanan terhadap kotoran dalam air lebih baik, sehingga cocok sekali jika dipakai untuk bangunan di laut, bangunan pengairan, dan beton massa.

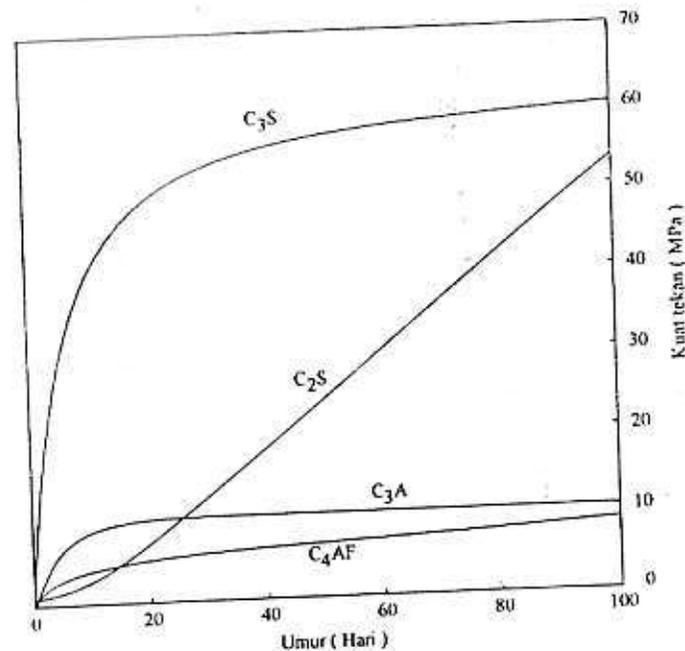
2.6. PENYIMPANAN SEMEN

Penyimpanan semen kadang-kadang diperlukan dalam jangka waktu lama, terutama jika distribusi semen tidak teratur. Walaupun semen dapat dijaga mutunya dalam jangka waktu tidak terbatas asalkan uap air dijauhkan dari tempat penyimpanan tersebut, namun butir-butir semen yang berhubungan dengan udara

akan menyerap air dengan perlahan-lahan, dan ini menyebabkan kerusakan. Penyerapan 1 sampai 2 persen air tidak cukup mempengaruhi kualitas semen, tetapi jumlah penyerapan tersebut memperlambat proses pengerasan semen dan mengurangi kekuatan. Lebih-lebih jika semen ditaruh di atas tanah, semen akan lebih reaktif lagi dan akibatnya lebih cepat semen menyerap kadar uap air dari kelembaban sekelilingnya.

Semen dalam bentuk curah dapat disimpan dalam tempat penyimpanan setinggi 2 meter atau lebih. Biasanya hanya bagian luar saja setebal 5 cm yang keras dan harus dibuang sebelum semen dipakai. Semen dalam kantong dapat juga disimpan dengan aman untuk beberapa bulan jika disimpan di atas lembaran alas yang kedap air, dengan dinding dan lantai yang tidak porous serta jendela-jendela ditutup dengan sangat rapat. Sekali semen disimpan harus tidak boleh terganggu sampai semen akan dipakai.

Akibat tidak sempurnanya penyimpanan semen dalam jangka waktu lama semen menjadi buruk. Semen yang telah disimpan lebih dari 6 bulan sejak dibuat, atau semen dalam kantong-kantong di penyimpanan lokal (di penyalur) lebih dari 3 bulan, perlu diuji sebelum digunakan, dan jika sudah kurang baik sebaiknya ditolak.



Gambar 2.1. Hubungan umur dan kuat tekan pada unsur-unsur semen (Mindess, 1981)

3 AGREGAT

3.1. UMUM

Agregat ialah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau beton. Agregat ini kira-kira menempati sebanyak 70 % volume mortar atau beton. Walaupun namanya hanya sebagai bahan pengisi, akan tetapi agregat sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat mortar/betonna. Sehingga pemilihan agregat merupakan suatu bagian penting dalam pembuatan mortar/beton.

Cara membedakan jenis agregat yang paling banyak dilakukan ialah dengan didasarkan pada ukuran butir-butirnya. Agregat yang mempunyai ukuran butir-butir besar disebut agregat kasar, sedangkan agregat yang berbutir kecil disebut agregat halus. Sebagai batas antara ukuran butir yang kasar dan yang halus tampaknya belum ada nilai yang pasti, masih berbeda antara satu disiplin ilmu dengan disiplin ilmu yang lain, dan mungkin juga dari satu daerah dengan daerah yang lain. Dalam bidang teknologi beton nilai batas tersebut umumnya ialah 4,75 mm atau 4,80 mm. Agregat yang butir-butirnya lebih besar dari 4,80 mm disebut agregat kasar, dan agregat yang butir-butirnya lebih kecil dari 4,80 mm disebut agregat halus. Secara umum, agregat kasar sering disebut sebagai kerikil, keracak, batu pahalus. Adapun agregat halus disebut pasir, baik berupa pasir alami yang diperoleh langsung dari sungai atau tanah galian, atau dari hasil pemecahan batu. Agregat yang butir-butirnya lebih kecil dari 1,20 mm kadang-kadang disebut pasir halus, sedangkan butir-butir yang lebih kecil dari 0,075 mm disebut *silt*, dan yang lebih kecil dari 0,002 mm disebut *clay*.

Dalam praktek agregat umumnya digolongkan menjadi 3 kelompok, yaitu :

- Batu, untuk besar butiran lebih dari 40 mm.
- Kerikil untuk butiran antara 5 mm dan 40 mm.
- Pasir untuk butiran antara 0,15 mm dan 5 mm.

Agregat harus mempunyai bentuk yang baik (bulat atau mendekati kubus), bersih, keras, kuat, dan gradasinya baik. Agregat harus pula mempunyai kestabilan kimiawi, dan dalam hal-hal tertentu harus tahan aus dan tahan cuaca.

3.2. AGREGAT ALAMI DAN AGREGAT BUATAN

Agregat diperoleh dari sumber daya alam yang telah mengalami pengecilan ukuran secara alamiah (misalnya kerikil) atau dapat pula diperoleh dengan cara memecah batu alam.

Pasir alam terbentuk dari pecahan batu karena beberapa sebab. Pasir dapat diperoleh dari dalam tanah, pada dasar sungai, atau dari tepi laut. Oleh karena itu pasir dapat digolongkan menjadi 3 macam :

- pasir galian
- pasir sungai, dan
- pasir laut.

(a) Pasir galian. Pasir golongan ini diperoleh langsung dari permukaan tanah atau dengan cara menggali terlebih dahulu. Pasir ini biasanya tajam, bersudut, berpori dan bebas dari kandungan garam, tetapi biasanya harus dibersihkan dari kotoran tanah dengan jalan dicuci.

(b) Pasir sungai. Pasir ini diperoleh langsung dari dasar sungai, yang pada umumnya berbutir halus, bulat-bulat akibat proses gesekan. Daya lekat antar butir-butir agak kurang karena butir yang bulat. Karena besar butir-butirnya kecil, maka baik dipakai untuk memplaster tembok. Juga dapat dipakai untuk keperluan yang lain.

(c) Pasir laut. Pasir laut ialah pasir yang diambil dari pantai. Butir-butirnya halus dan bulat karena gesekan. Pasir ini merupakan pasir yang paling jelek karena banyak mengandung garam-garaman. Garam-garaman ini menyerap kandungan air dari udara dan ini mengakibatkan pasir selalu agak basah dan juga menyebabkan pengembangan bila sudah menjadi bangunan. Oleh karena itu maka sebaiknya pasir laut jangan dipakai.

Agregat pecahan (kerikil maupun pasir) diperoleh dengan memecah batu menjadi berukuran butiran yang diinginkan dengan cara meledakkan, memecah, menyaring, dan seterusnya. Dari kronologinya, agregat alami maupun yang hasil pemecahan, dapat dibagi menjadi beberapa jenis kelompok agregat yang memiliki sifat-sifat yang khusus.

Agregat alami dapat diklasifikasikan ke dalam sejarah terbentuknya peristiwa geologi, yaitu agregat beku, agregat sedimen, dan agregat metamorf, yang kemudian dibagi lagi menjadi kelompok-kelompok yang lebih kecil.

Bila agregat alami yang baik tidak mungkin diperoleh atau jauh dari lokasi pekerjaan, maka bahan lain misalnya pecahan batu tanah liat bakar dapat dipakai untuk menggantikan agregat.

Batu pecah. Ini merupakan butir-butir hasil pemecahan batu. Butir-butirnya berbentuk tajam, sehingga sedikit lebih memperkuat betonnya.

Tanah Liat bakar. Tanah liat dengan kadar air tertentu dibuat berbutir sekitar 5 sampai 20 mm, kemudian dibakar. Hasil pembakaran berbentuk bola yang keras dan ringan serta berpori. Serapan airnya sebesar antara 8 sampai 20 persen. Beton dengan agregat ini berat jenisnya sekitar 1,9.

Lempung bekah. Agregat ini adalah hasil pembuatan dari suatu jenis lempung (shale) yang dimasukkan ke dalam tungku putar pada suhu 1100 °C selama 10 menit. Gas dalam shale mengembang dan membekah membentuk jutaan sel kecil udara dalam massa. Sel-sel kecil tersebut dikelilingi oleh selaput tipis kedap air yang kuat dan bening. Agregat ini dapat dipakai untuk menggantikan agregat

dalam pembuatan beton struktural. Agregat ini sangat ringan, berat jenisnya 1,15, tetapi kuat tekannya hampir sama (pada jumlah semen yang sama). Beton ini mempunyai ketahanan tinggi terhadap panas sehingga biasanya digunakan untuk dinding penahan panas, lapisan tahan api pada baja struktural, dan untuk struktur beton yang permukaannya terkena panas tinggi. Beton ini juga mempunyai sifat meredam suara yang baik.

Kuat tekan beton dengan agregat buatan dapat sama dengan beton biasa. Beton yang dibuat dari agregat buatan biasanya memerlukan selimut beton lebih tebal karena mudah menyerap air. Modulus elastisitas beton dengan agregat buatan biasanya lebih rendah daripada beton biasa. Kuat lentur beton ini lebih rendah daripada beton biasa, namun kuat gesernya dapat sama. Besar susutan rayapan biasanya lebih besar daripada beton biasa.

Agregat Abu Terbang (*sintered flyash aggregate*). Agregat ini ialah hasil dari pemanasan abu terbang sampai meleleh dan mengeras lagi yang membentuk butir-butir seperti kerikil.

Benda padat buangan/limbah. Kemungkinan pemakaian benda padat limbah untuk dipakai sebagai pengganti agregat dalam pembuatan beton yang pada masa-masa terakhir ini sering dibicarakan dan tampak meningkat kebutuhannya, sebenarnya bukanlah suatu konsep yang baru. Misalnya, pemakaian abu terbang (*flyash*) dan *blast-furnace slags* telah dipakai sebagai agregat, dan robekan-robekan kaleng bekas yang dipakai sebagai serat dalam beton, juga barang-barang bekas bongkaran bangunan, maupun barang-barang sampah dari kantor dan rumah, misalnya kertas, gelas, plastik, dsb.

Sebelum barang-barang bekas/buangan tersebut dipakai, maka perlu dipertimbangkan dulu hal-hal sebagai berikut :

- tinjauan ekonomi, apakah tidak lebih mahal daripada agregat aslinya,
- tinjauan sifat teknis pada betonnya.

Barang buangan/limbah, kadang-kadang memerlukan biaya yang tidak sedikit jika harus dipilih/dipisahkan dari bahan yang lain atau dari kotoran yang melekat. Pada pecahan kaca, butir-butirnya cenderung pipih dan permukaannya licin, sehingga kurang melekat dengan pastanya.

3.3. BERAT JENIS AGREGAT

Agregat dapat dibedakan berdasarkan berat jenisnya, yaitu agregat normal, agregat berat, dan agregat ringan.

Agregat normal ialah agregat yang berat jenisnya antara 2,5 sampai 2,7. Agregat ini biasanya berasal dari agregat granit, basalt, kuarsa, dan sebagainya. Beton yang dihasilkan berberat jenis sekitar 2,3 dengan kuat tekan antara 15 MPa sampai 40 MPa. Betonnyapun disebut beton normal.

Agregat berat berberat jenis lebih dari 2,8 misalnya magnetik ($Fe_3 O_4$), barytes ($BaSO_4$), atau serbuk besi. Beton yang dihasilkan juga berat jenisnya tinggi (sampai 5), yang efektif sebagai dinding pelindung sinar radiasi sinar X.

Agregat ringan mempunyai berat jenis kurang dari 2,0 yang biasanya dibuat untuk non-struktural, akan tetapi dapat pula untuk beton struktural atau blok dinding tembok. Kebaikannya ialah berat sendiri yang rendah sehingga strukturnya ringan dan fondasinya lebih kecil. Agregat ringan dapat diperoleh secara alami maupun buatan. Agregat ringan alami misalnya : diatomite, pumice, volcanic cinder, adapun agregat ringan buatan misalnya : tanah bakar (*bloated clay*), abu terbang (*sintered flyash*), busa terak tanur tinggi (*foamed blast furnace slag*). Pada umumnya beton dari agregat ringan, selain bobotnya rendah juga mempunyai sifat lebih tahan api dan sebagai bahan isolasi panas yang lebih baik.

Agregat ringan umumnya mempunyai daya serap air yang tinggi sebesar 14 persen pada lempung bakar, sehingga dalam pengadukan beton cepat keras hanya dalam beberapa menit saja setelah pencampuran, untuk itu perlu diadakan pembasahan agregat terlebih dulu sebelum pengadukan. Dalam pencampuran sebaiknya air yang dibutuhkan dan agregat dicampur dulu, kemudian baru semennya. Karena sifatnya yang mudah dilalui air (tidak rapat air) maka untuk mencegah korosi tulangan diperlukan selimut beton yang lebih tebal daripada pada beton normal. Beton dengan agregat ringan mempunyai kuat tarik rendah, modulus elastisitas rendah, serta rayapan dan susutan lebih tinggi.

3.4. BERAT SATUAN DAN KEPADATAN

Volume pasir atau kerikil terdiri atas :

- volume butiran (zat padatnya)
- volume pori tertutup
- volume pori terbuka.

Berat jenis agregat ialah rasio antara massa padat agregat dan massa air dengan volume sama pada suhu yang sama.

Karena butiran agregat umumnya mengandung pori-pori yang ada dalam butiran dan tertutup/tidak saling berhubungan, maka berat jenis agregat dibedakan menjadi dua istilah, yaitu :

- Berat jenis mutlak, jika volume benda padatnya tanpa pori
- Berat jenis semu (berat jenis tampak) jika volume benda padatnya termasuk pori-pori tertutupnya.

Catatan : Untuk agregat tertentu yang pori tertutupnya kecil, sering kedua istilah di atas disamakan, dan disebut berat jenis saja.

Berat satuan agregat ialah berat agregat dalam satu satuan volume, dinyatakan dalam kg/liter atau ton/m³. Jadi berat satuan dihitung berdasar berat agregat dalam suatu tempat tertentu, sehingga yang dihitung volumenya adalah volume padat (meliputi pori tertutup) dan volume pori terbukanya.

Dengan demikian maka secara matematika dapat ditulis :

$$V_1 = V_b + V_p$$

dengan : V_t = volume total
 V_b = volume butiran, termasuk pori tertutup
 V_p = volume pori terbuka

Beberapa istilah yang perlu diketahui akibat hal itu antara lain:

Porositas : $P = \frac{V_p}{V_t} \times 100\%$

Kepampatan (kepadatan) : $K = \frac{V_b}{V_t} \times 100\%$

Dari rumus-rumus tersebut maka didapat hubungan antara nilai kepadatan dan porositas, yaitu :

$$K = 100 - P$$

Bila suatu agregat kering beratnya W , maka diperoleh :

berat jenis $b_j = W / V_b$
 berat satuan $b_{sat} = W / V_t$

Dari hasil penelitian diperoleh bahwa :

Porositas = 35 - 40 %
 Kepampatan = 60 - 65 %
 Berat jenis = 2,50 - 2,70
 Berat satuan = 1,20 - 1,60

3.5. UKURAN BUTIR AGREGAT

Jika butiran agregat bulat sempurna maka jari-jari atau diameter merupakan ukuran yang sempurna. Untuk bentuk butir yang lainnya yang disebut dengan ukuran tidak dapat dikatakan dengan tepat dalam satu angka tanpa mendua. Misalnya, jika butiran berbentuk kubus, secara logika ukurannya dapat dinyatakan dalam panjang sisi atau panjang diagonal permukaan kubusnya atau diagonal badannya. Keadaan yang demikian akan lebih tidak jelas lagi jika bentuk butiran agregat. Dengan singkat kata, ukuran butiran agregat bukan hal yang terpisahkan dari bentuk, kecuali jika disebutkan bahwa ukuran itu adalah ukuran tertentu, misalnya volume, permukaan, dan sebagainya. Sebagai konsekuensinya maka ukuran butir agregat yang optimum, misalnya gradasi yang optimum untuk jenis beton tertentu, juga tergantung pada bentuk.

Pengukuran ukuran butir agregat didasarkan atas suatu pemeriksaan yang dilakukan dengan alat berupa ayakan dengan lubang-lubang yang telah ditetapkan. Ukuran butiran agregat, tanpa memperhatikan bentuknya, didefinisikan sebagai d_i jika butiran itu dapat lolos pada ayakan dengan besar lubang d_i . Cara ini ternyata amat baik dan juga rasional, terutama jika dipakai untuk pengukuran suatu seri

dengan bermacam-macam ukuran yang berbeda. Jika sebuah butiran lolos pada ayakan dengan lubang d_i tetapi tertahan pada ayakan dengan lubang yang lebih kecil sedikit, yaitu d_{i-1} , maka dikatakan bahwa butiran itu berukuran antara d_{i-1} dan d_i .

Secara teoritis, ukuran agregat maksimum atau ukuran butir maksimum, yang ada pada fraksi ukuran butir $d_{i-1} - d_i$ ialah agregat dengan ukuran d_i . Kadang-kadang d_i disebut juga ukuran nominal maksimum. Akan tetapi dalam praktek selalu ada butiran-butiran dalam suatu fraksi yang lebih besar daripada ukuran nominal maksimum tersebut. Butiran agregat yang lebih besar daripada ukuran nominal maksimum itu disebut kelebihan ukuran (*oversize*). Oleh karena itu, dalam praktek yang dinamakan dengan ukuran maksimum D ialah ukuran butir agregat maksimum yang ada dalam jumlah cukup untuk mempengaruhi sifat fisik beton; pada umumnya dirancang dengan ukuran ayakan tertentu dengan jumlah butir yang tertahan pada ayakan tersebut sebanyak 5 sampai 10 persen berat total. Dengan pertimbangan yang sama, maka definisi tersebut diterapkan pula untuk d_{min} , yaitu ukuran terkecil butir-butir agregat.

3.6. UKURAN LUBANG AYAKAN

Alat pengukur besar ukuran butir-butir agregat dinamakan ayakan, ialah suatu plat baja atau lembaran baja atau kawat anyaman yang mempunyai lubang-lubang sama besar dan diperkuat dengan rangka atau gelang kuat untuk menopang. Ayakan digunakan untuk memisahkan butiran-butiran sesuai dengan ukuran besarnya. Bentuk lubang ayakan dapat berupa lingkaran bulat dan dapat pula berupa bujursangkar. Jika berbentuk lingkaran bulat disebut *screen*, sedangkan jika berbentuk bujur sangkar disebut *sieve*. Di Indonesia, sampai saat ini kedua istilah tersebut belum dibedakan, keduanya disebut ayakan.

Hasil pengayakan dengan ayakan berlubang bujursangkar dan dengan lubang bulat tidak sama, hal ini karena pengaruh bentuk butiran agregat yang tidak bulat sempurna. Untuk pemakaian dalam agregat pada umumnya dipakai ayakan dengan lubang bulat, tetapi kadang-kadang dipakai juga yang bujur sangkar.

Pada saat ini ukuran lubang ayakan telah diseragamkan, dengan ukuran yang dikeluarkan oleh ISO (International Standards Organization, Geneva, Switzerland), yaitu : 37,5mm, 19 mm, 9,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,60 mm, 0,30mm, 0,15 mm, 0,075 mm. Untuk menambah ukuran yang mungkin sering dipakai maka ditambahkan pula ukuran 50mm, 25mm, dan 12,5mm.

Pengujian ukuran butir agregat biasanya dengan ayakan, dimaksudkan untuk mengetahui distribusi ukuran butir agregat. Sebagian agregat diambil contohnya, kemudian dipisahkan menjadi beberapa fraksi dengan memakai ayakan. Pemisahan dilakukan dengan ayakan yang disusun mulai dari ukuran lubang maksimum sampai minimum sambil digetarkan. Agregat umumnya dalam keadaan kering. Berat dari tiap-tiap fraksi kemudian dijumlah dan dinyatakan dalam persentase jumlah total.

Besar persentase suatu fraksi agregat tertentu menyatakan besar volume butir fraksi tersebut. Oleh karena itu nilai persentase sebaiknya dalam volume padat,

dan tidak hanya dalam teori akan tetapi dalam praktek, terutama jika berat jenis butir-butir agregatnya tidak sama (misalnya agregat halus berupa pasir normal, dan agregat kasar dari agregat ringan). Bila berat jenis butir-butirnya tidak berbeda jauh maka nilai persentase fraksi tersebut dapat dinyatakan dalam berat. Akan tetapi karena umumnya berat jenis agregat sama dan persentase dengan berat lebih mudah dilaksanakan maka banyak dilakukan persentase berat.

3.7. UKURAN MAKSIMUM BUTIR AGREGAT

Adukan beton dengan tingkat kemudahan pengerjaan yang sama, atau beton dengan kekuatan yang sama, akan membutuhkan semen yang lebih sedikit apabila dipakai butir-butir kerikil yang besar-besar. Oleh karena itu, untuk mengurangi jumlah semen (sehingga biaya pembuatan beton berkurang) dibutuhkan ukuran butir-butir maksimum agregat yang sebesar-besarnya. Pengurangan jumlah semen juga berarti pengurangan panas hidrasi, dan ini berarti mengurangi kemungkinan beton untuk retak akibat susut atau perbedaan panas yang besar. Walaupun demikian, besar butir maksimum agregat (dapat diartikan juga ukuran maksimum butir kerikil) tidak dapat terlalu besar, karena ada faktor-faktor lain yang membatasi. Faktor-faktor yang membatasi besar butir maksimum agregat ialah :

- Ukuran maksimum butir agregat tidak boleh lebih besar dari 3/4 kali jarak bersih antar baja tulangan atau antara baja tulangan dan cetakan.
- Ukuran maksimum butir agregat tidak boleh lebih besar dari 1/3 kali tebal plat.
- Ukuran maksimum butir agregat tidak boleh lebih besar dari 1/5 kali jarak terkecil antara bidang samping cetakan.

Dengan pertimbangan tersebut di atas, maka ukuran maksimum butir agregat umumnya dipakai 10 mm, 20 mm, 30 mm, atau 40 mm. Jika tidak dipakai baja tulangan, misalnya beton untuk fondasi sumuran, ukuran maksimum agregat dapat sebesar 150 mm.

3.8. GRADASI AGREGAT

Gradasi agregat ialah distribusi ukuran butiran dari agregat. Bila butir-butir agregat mempunyai ukuran yang sama (seragam) volume pori akan besar. Sebaliknya bila ukuran butir-butirnya bervariasi akan terjadi volume pori yang kecil. Hal ini karena butiran yang kecil mengisi pori di antara butiran yang lebih besar, sehingga pori-porinya menjadi sedikit, dengan kata lain keampatannya tinggi.

Sebagai pernyataan gradasi dipakai nilai persentase dari berat butiran yang tertinggal atau lewat di dalam suatu susunan ayakan. Susunan ayakan itu ialah ayakan dengan lubang : 76 mm, 38 mm, 19 mm, 9,6 mm, 4,80 mm, 2,40 mm, 1,20 mm, 0,60 mm, 0,30 mm, dan 0,15 mm.

Pada agregat untuk pembuatan mortar atau beton diingini suatu butiran yang keampatannya tinggi, karena volume porinya sedikit, dan ini berarti hanya mem-

butuhkan bahan ikat sedikit saja (bahan ikat mengisi pori antara butir-butir agregat, bila volume pori sedikit berarti bahan ikat sedikit pula).

Secara teoritis gradasi agregat yang terbaik adalah yang nilai keampatannya tinggi. Setelah beberapa kali mencoba, Fuller dan Thompson pada tahun 1907 menemukan suatu gradasi ideal (yang mempunyai rongga minimum), yang dirumuskan sebagai berikut :

$$P_t = (d/D)^{1/2}$$

dengan : P_t = total butiran agregat yang lebih kecil daripada d
 D = ukuran maksimum butiran.

Contoh :

Suatu agregat dengan besar butir maksimum $D = 40$ mm. Agar diperoleh agregat yang mampat maka berat butiran yang lebih kecil daripada $d = 20$ mm sebanyak :

$$P_t = \left(\frac{20}{40}\right)^{1/2} = 0,71$$

Berat butiran yang lebih kecil daripada $d = 10$ mm sebanyak :

$$P_t = \left(\frac{10}{40}\right)^{1/2} = 0,50$$

Berat butiran yang lebih kecil daripada $d = 5$ mm sebanyak :

$$P_t = \left(\frac{5}{40}\right)^{1/2} = 0,35$$

Jadi agar diperoleh agregat yang keampatannya tinggi, maka susunan gradasi adalah sebagai berikut :

Butir ukuran 20 mm - 40 mm = 29 persen
 Butir ukuran 10 mm - 20 mm = 21 persen
 Butir ukuran 5 mm - 10 mm = 15 persen
 Butir ukuran < 5 mm = 35 persen

Selanjutnya rumus tersebut digeneralisasikan menjadi :

$$P_t = (d/D)^q$$

dengan q berkisar antara 0 dan 1.

Dapat diperkirakan bahwa hubungan tersebut merupakan hubungan parabola, sehingga kemudian dinamakan "gradasi parabola" untuk suatu jenis gradasi yang demikian. Tampak bahwa jika semua ukuran agregat kurang dari D, kandungan pori tergantung pada q, dengan pori mendekati nol jika q mendekati nol. Dengan demikian, jika dipilih nilai q rendah suatu gradasi rapat akan diperoleh.

Di dalam praktek, gradasi parabola ini tidak dapat dipakai secara sederhana begitu saja, karena dengan pertimbangan kemudahan pengerjaan adukan beton sejumlah tertentu agregat halus diperlukan. Antara 2 sampai 10 persen agregat halus harus lolos lubang ayakan ukuran 0,15 mm dan antara 10 dan 30 persen harus lolos ayakan ukuran 0,30 mm.

Menurut peraturan di Inggris (British Standard) yang juga dipakai di Indonesia saat ini (dalam SK-SNI-T-15-1990-03) kekasaran pasir dapat dibagi menjadi empat kelompok menurut gradasi-sinya, yaitu pasir halus, agak halus, agak kasar, dan kasar, sebagaimana tampak pada Tabel 3.1 dan Gambar 3.1. Adapun gradasi kerikil yang baik sebaiknya masuk di dalam batas-batas yang tercantum dalam Tabel 3.2 dan Gambar 3.2.

Tabel 3.1. Gradasi pasir

Lubang ayakan (mm)	Persen berat butir yang lewat ayakan			
	Daerah I	Daerah II	Daerah III	Daerah IV
10	100	100	100	100
4,8	90-100	90-100	90-100	95-100
2,4	60-95	75-100	85-100	95-100
1,2	30-70	55-90	75-100	90-100
0,6	15-34	35-59	60-79	80-100
0,3	5-20	8-30	12-40	15-50
0,15	0-10	0-10	0-10	0-15

Keterangan :
 Daerah I = pasir kasar
 Daerah II = pasir agak kasar
 Daerah III = pasir agak halus
 Daerah IV = pasir halus

Tabel 3.2. Gradasi kerikil

Lubang (mm)	Persen berat butir yang lewat ayakan Besarnya butir maksimum :	
	40 mm	20 mm
40	95-100	100
20	30-70	95-100
10	10-35	25-55
4,8	0-5	0-10

Oleh peraturan tersebut (yang dibuat berdasarkan hasil-hasil penelitian sebelumnya) telah ditetapkan bahwa untuk campuran beton dengan diameter maksimum agregat sebesar 40 mm, 30 mm, 20 mm, 10 mm, gradasi agregatnya (campuran pasir dan kerikil) harus berada di dalam batas-batas yang tertera dalam tabel 3.3, 3.4, 3.5, dan 3.6. atau kurva yang tampak pada Gb. 3.3, Gb.3.4, Gb.3.5, dan 3.6. Pada gambar tersebut, bila gradasi agregat campuran masuk dalam kurva 1 dan kurva 2 akan diperoleh adukan beton yang kasar, cocok untuk faktor air semen rendah, mudah dikerjakan namun mudah terjadi pemisahan kerikil. Bila gradasi campuran masuk dalam kurva 3 dan kurva 4 akan diperoleh adukan beton yang halus, tampak lebih kohesif, lebih sulit dikerjakan sehingga perlu faktor air semen agak tinggi. Gradasi campuran yang ideal ialah yang masuk dalam kurva 2 dan kurva 3.

Tabel 3.3. Persen butiran yang lewat ayakan, (%)
 untuk agregat dengan butir maksimum 40 mm.

Lubang (mm)	Kurva 1	Kurva 2	Kurva 3	Kurva 4
38	100	100	100	100
19	50	59	67	75
9,6	36	44	52	60
4,8	24	32	40	47
2,4	18	25	31	38
1,2	12	17	24	30
0,6	7	12	17	23
0,3	3	7	11	15
0,15	0	0	2	5

Tabel 3.4. Persen butiran yang lewat ayakan, (%)
untuk agregat dengan butir maksimum 30 mm.

Lubang (mm)	Kurva 1	Kurva 2	Kurva 3
38	100	100	100
19	74	86	93
9,6	47	70	82
4,8	28	52	70
2,4	18	40	57
1,2	10	30	46
0,6	6	21	32
0,3	4	11	19
0,15	0	1	4

Tabel 3.5. Persen butiran yang lewat ayakan, (%)
untuk agregat dengan butir maksimum 20 mm.

Lubang (mm)	Kurva 1	Kurva 2	Kurva 3	Kurva 4
19	100	100	100	100
9,6	45	55	65	75
4,8	30	35	42	48
2,4	23	28	35	42
1,2	16	21	28	34
0,6	9	14	21	27
0,3	2	3	5	12
0,15	0	0	0	2

Tabel 3.6. Persen butiran yang lewat ayakan, (%)
untuk agregat dengan butir maksimum 10 mm.

Lubang (mm)	Kurva 1	Kurva 2	Kurva 3	Kurva 4
9,6	100	100	100	100
4,8	30	45	60	75
2,4	20	33	46	60
1,2	16	26	37	46
0,6	12	19	28	34
0,3	4	8	14	20
0,15	0	1	3	6

Dalam praktek diperlukan suatu campuran pasir dan kerikil dengan perbandingan tertentu agar gradasi campuran dapat masuk di dalam kurva standar di atas. Untuk mendapatkan nilai perbandingan antara berat pasir dan kerikil yang tepat dapat dilakukan dengan cara coba-coba sebagai berikut.

Pasir dan kerikil adalah seperti yang tertulis pada Tabel 3.8 dan 3.9. Langkah hitungannya adalah sebagai berikut :

- Tetapkan nilai banding antara berat pasir dan berat kerikil, pada contoh ini telah dihitung pada sub-bab 3.10 dengan hasil sebesar 36 % dan 64 %. Untuk mempermudah pelaksanaan nilai banding tersebut dibulatkan menjadi 40 % dan 60 %.
- Buatlah tabel (lihat tabel 3.7.)

Tabel 3.7. Hitungan Campuran Pasir dan Kerikil

Lubang ayakan (mm)	Berat butir yang Lewat Pasir (%)	Kerikil (%)	(2) x P	(3) x K	(4) + (5)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
40	100	100	40	60	100
20	100	50	40	30	70
10	100	25	40	15	55
4,8	95,2	1	38,08	0,6	38,68
2,4	87,8	0	35,12	0	35,12
1,2	69,4	0	27,76	0	27,76
0,6	48,4	0	19,36	0	19,36
0,3	19,6	0	7,84	0	7,84
0,15	2,4	0	0,96	0	0,96

Keterangan : Kolom 2 dan 3 diisi dari hasil pengayakan.
Kolom 4 dari kolom 2 dikalikan P, dengan P = 40%
Kolom 5 dari kolom 3 dikalikan K, dengan K = 60 %
Kolom 6 dari kolom 4 ditambah kolom 5

- Gambarkan gradasi hasil campuran (kolom 6) ke dalam salah satu kurva standar yang sesuai dengan besar butir maksimumnya, pada Gb.3.3., 3.4., 3.5., atau 3.6. Pada contoh ini karena ukuran maksimum agregatnya 40 mm maka digunakan Gb. 3.3.

Bila hasil gradasi yang diperoleh di atas itu tidak masuk di dalam kurva standar, maka nilai banding antara pasir dan kerikil diulang. dengan nilai banding yang lebih baik. Demikian berulang-ulang sehingga diperoleh diagram gradasi yang memenuhi syarat (masuk kurva standar).

3.9. GRADASI KHUSUS

Pada sub-bab ini diuraikan tentang gradasi yang lain dari yang telah di uraikan pada sub-bab.3.8.

a) Gradasi sela.

Gradasi sela didefinisikan sebagai suatu agregat dengan gradasi salah satu fraksi atau lebih yang berukuran tertentu tidak ada. Jika gradasi yang sudah diuraikan pada sub-bab 3.8. disebut gradasi menerus dengan gambar diagram yang menerus, maka pada gradasi sela ini dalam diagram gradasi ditunjukkan dengan adanya suatu garis horisontal pada suatu fraksi ukuran agregat tertentu. Beberapa tanda atau keistimewaan penting dari agregat dengan gradasi sela ini adalah sebagai berikut :

- (1) Pada suatu faktor air-semen dan rasio agregat-semen tertentu, kemudahan pengerjaan akan lebih tinggi bila kandungan pasir lebih sedikit. Hal ini berbeda dengan jika dipakai gradasi menerus.
- (2) Pada kondisi campuran adukan beton segar yang mudah dikerjakan, agregat dengan gradasi sela lebih cenderung untuk mengalami segregasi. Oleh karena itu gradasi sela disarankan dipakai pada campuran dengan tingkat kemudahan pengerjaan rendah, yang kemudian pemadatannya dilakukan dengan penggetaran.
- (3) Agregat dengan gradasi sela tidak tampak berpengaruh terhadap kuat tekan ataupun kuat tarik betonnya.

b) Gradasi Seragam

Agregat dengan gradasi seragam / ukuran tunggal adalah agregat yang terdiri dari butiran yang berada pada batas yang sempit dari ukuran fraksi, dalam diagram tampak garisnya hampir tegak/vertikal. Suatu agregat dengan ukuran tunggal 20 mm adalah agregat yang butir-butirnya lolos pada ayakan 20 mm tetapi tertahan pada ayakan 10 mm.

Agregat dengan gradasi seragam ini biasanya dipakai untuk beton ringan jenis beton tanpa pasir, atau untuk mengisi agregat dengan gradasi sela, atau untuk tambahan agregat dengan gradasi campuran yang kurang memenuhi syarat.

3.10. MODULUS HALUS BUTIR

Modulus-halus-butir ("*fineness modulus*") ialah suatu indek yang dipakai untuk menjadi ukuran kehalusan atau kekasaran butir-butir agregat.

Modulus-halus-butir (mhb) ini didefinisikan sebagai jumlah persen kumulatif dari butir-butir agregat yang tertinggal di atas suatu set ayakan dan kemudian dibagi seratus. Susunan lubang ayakan itu ialah sebagai berikut : 40 mm, 20 mm, 10 mm, 4,80 mm, 2,40 mm, 1,20 mm, 0,60 mm, 0,30 mm, dan 0,15 mm. Sebagai contoh menghitung modulus-halus-butir suatu pasir dan kerikil diberikan pada Tabel 3.8.

Makin besar nilai modulus halus menunjukkan bahwa makin besar butir-butir agregatnya. Pada umumnya pasir mempunyai modulus halus butir antara 1,5 sampai 3,8. Adapun mhb kerikil biasanya diantara 5 dan 8.

Modulus halus butir selain untuk menjadi ukuran kehalusan butir juga dapat dipakai untuk mencari nilai perbandingan berat antara pasir dan kerikil, bila kita akan membuat campuran beton. Modulus halus butir agregat dari campuran pasir dan kerikil untuk bahan pembuat beton berkisar antara 5,0 dan 6,5.

Tabel 3.8. Hitungan modulus halus butir pasir

Lubang ayakan (mm)	Berat tertinggal (gram)	Berat tertinggal (%)	Berat tertinggal kumulatif (%)
40	0	0	0
20	0	0	0
10	0	0	0
4,80	48	4,8	4,8
2,40	74	7,4	12,2
1,20	184	18,4	30,6
0,60	210	21	51,6
0,30	288	28,8	80,4
0,15	172	17,2	97,6
Sisa	24	2,4	---
Jumlah	1000 gram	100%	277,2

$$\text{Modulus-halus-butir} = \frac{277,7}{100} = 2,8$$

Hubungan antara mhb pasir, mhb kerikil, dan mhb campurannya dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut :

$$W = \frac{K - C}{C - P} \times 100\%$$

dengan : W = persentase berat pasir terhadap berat kerikil
 K = modulus halus butir kerikil
 P = modulus halus butir pasir
 C = modulus halus butir campuran.

Misalnya dari hasil pemeriksaan pasir dan kerikil yang diambil dari suatu tempat diperoleh modulus halus butir pasir 2,8 dan kerikil 7,2.

Tabel 3.9. Hitungan modulus halus butir kerikil

Lubang ayakan (mm)	Berat tertinggal (gram)	Berat tertinggal (%)	Berat tertinggal kumulatif (%)
	0	0	0
40	2500	50	50
20	1250	25	75
10	1200	24	99
4,80	50	1	100
2,40	0	0	100
1,20	0	0	100
0,60	0	0	100
0,30	0	0	100
0,15	0	0	-
sisa	0	0	-
Jumlah :	5000 gram	100 %	724

Hasil :

$$\text{Modulus - halus - butir} = \frac{724}{100} = 7,2$$

Diinginkan modulus halus butir campurannya sebesar 5,6, maka dapat dihitung :

$$W = \frac{7,2 - 5,6}{5,6 - 2,8} \times 100\% = 57\%$$

Berat pasir terhadap kerikil sebesar 57 %, atau dapat dikatakan perbandingan antara berat pasir dan kerikil sebesar 57 : 100 atau 1 : 1,75, atau berat pasir 36 % dan berat kerikil 64 %.

Cara menentukan perbandingan berat antara pasir dan kerikil dengan rumus ini dapat dipakai, akan tetapi hasilnya masih harus digambarkan dalam diagram gradasi standar, karena nilai modulus halus butir tidak menggambarkan variasi besar butir secara teliti.

Jadi, sebaiknya rumus ini hanya dipakai untuk menentukan perbandingan pasir dan kerikil secara kasar (perhitungan pendahuluan) sebelum memulai hitungan gradasi pada sub bab 3.8, yang menggunakan tabel-tabel dan diagram.

3.11. SERAPAN AIR DALAM AGREGAT

Karena adanya udara yang terjebak dalam suatu butiran agregat ketika penentukannya atau karena dekomposisi mineral pembentuk tertentu oleh perubahan cuaca, maka terbentuklah lubang, atau rongga kecil di dalam butiran agregat itu, yang umumnya disebut pori. Pori dalam butiran agregat mempunyai ukuran yang bervariasi cukup besar, dari yang besar sehingga mampu dilihat dengan mata telanjang, sampai yang hanya dapat dilihat dengan mikroskop. Pori-pori tersebar di seluruh tubuh butiran, beberapa merupakan pori-pori yang tertutup dalam materi, beberapa yang lainnya terbuka terhadap permukaan butiran. Beberapa jenis agregat yang sering dipakai mempunyai volume pori tertutup sekitar 0 sampai 20 persen dari volume butirnya.

Karena agregat menempati sampai 75 persen dari volume betonnya maka porositas agregat memberikan iuran/kontribusi pada porositas beton secara keseluruhan.

Pori-pori mungkin menjadi reservoir air bebas di dalam agregat. Persentase berat air yang mampu diserap oleh suatu agregat jika direndam dalam air disebut serapan air.

Jika agregat basah ditimbang beratnya W , kemudian dikeringkan dalam tungku (oven) pada suhu 105 derajat celsius sampai beratnya tetap W_k , maka kadar air agregat basah itu ialah :

$$K = \frac{W - W_k}{W_k} \times 100 \text{ persen}$$

Agregat yang jenuh-air (pori-porinya terisi penuh oleh air), namun permukaannya kering sehingga tidak mengganggu air bebas di permukaannya disebut agregat jenuh kering muka.

Jika agregat yang jenuh kering muka ini kemudian dimasukkan ke dalam tungku pada suhu 105 derajat celsius sampai beratnya tetap, yaitu W_k , maka kadar air agregat jenuh kering muka itu sebesar :

$$K_{jkm} = \frac{W_{jkm} - W_k}{W_k} \times 100 \text{ persen}$$

Air dalam agregat dikenal ada 2 macam, yaitu air yang meresap dan air yang ada di permukaan butiran.

Air yang meresap berada dalam pori antar butir dan mungkin tidak tampak di permukaan, dan ini dipengaruhi oleh besar pori butiran agregatnya. Pada agregat normal kemampuan menyerap air ini sekitar 1 sampai 2 persen saja, dan dihitung sebagaimana menghitung kadar air jenuh kering muka yang ada di atas. Kemampuan menyerap air ini disebut serapan air atau daya serap suatu agregat.

Adapun air yang ada dipermukaan butir tampak di permukaan, dan ini dipengaruhi oleh lingkungan agregat, basah atau kering.

3.12. KADAR AIR AGREGAT

Air yang ada pada suatu agregat (di lapangan) perlu diketahui untuk menghitung jumlah air yang perlu dipakai dalam campuran adukan beton dan pula untuk mengetahui berat-satuan agregat. Keadaan kandungan air di dalam agregat dibedakan menjadi beberapa tingkat, yaitu (lihat pula Gb.3.7.) :

- Kering tungku; Benar-benar tidak berair, dan ini berarti dapat secara penuh menyerap air.
- Kering udara; Butir-butir agregat kering permukaannya tetapi mengandung sedikit air di dalam porinya. Oleh karena itu pasir dalam tingkat ini masih dapat sedikit mengisap air.
- Jenuh kering-muka; Pada tingkat ini tidak ada air di permukaan tetapi butir-butirnya berisi air sejumlah yang dapat diserap. Dengan demikian butiran-butiran agregat pada tahap ini tidak menyerap dan juga tidak menambah jumlah air bila dipakai dalam campuran adukan beton.
- Basah; Pada tingkat ini butir-butir mengandung banyak air, baik dipermukaan maupun di dalam butiran, sehingga bila dipakai untuk campuran akan memberi air.

Dari keempat keadaan tersebut di atas, hanya dua keadaan yang sering dipakai dalam dasar hitungan, ialah kering tungku dan jenuh kering-muka, karena konstan untuk suatu agregat tertentu. Adapun kering udara dan basah yang merupakan keadaan sebenarnya di lapangan sangat bervariasi karena dipengaruhi oleh lingkungan

Keadaan jenuh kering-muka (*saturated surface-dry, SSD*) lebih disukai sebagai standar, karena :

- merupakan keadaan kebasahan agregat yang hampir sama dengan agregat dalam beton, sehingga agregat tidak akan menambah maupun mengurangi air dari pastanya.
- kadar air di lapangan lebih banyak yang mendekati keadaan SSD daripada yang kering tungku.

Dalam hal hitungan kebutuhan air pada adukan beton, biasanya agregat dianggap dalam keadaan jenuh kering muka, sehingga jika keadaan agregat di lapangan kering udara maka dalam adukan beton akan menyerap air, namun jika agregat di lapangan dalam keadaan basah maka akan menambah air.

Penyerapan dan penambahan air tersebut dapat dihitung dengan rumus :

$$A_{\text{tamb}} = \frac{K - K_{\text{jkm}}}{100} \cdot W_{\text{ag}}$$

dengan :

- A_{tamb} = air tambahan dari agregat, ltr
 K = kadar air agregat di lapangan, %
 K_{jkm} = kadar air agregat jenuh kering muka, %
 W_{ag} = berat agregat, kg

Kadar air dalam pasir dapat diukur dengan cara sebagai berikut.

Timbang pasir sebanyak minimum 500 gram. Keringkan pasir tersebut dengan memasukkannya ke dalam tungku pengering sampai tidak berkurang beratnya.

$$\text{Kadar air} = \frac{\text{berat semula} - \text{berat kering}}{\text{berat kering}} \times 100\%$$

Dalam hitungan campuran adukan beton dipakai berat-satuan pasir untuk tingkat jenuh-kering-muka, karena tidak menambah ataupun mengurangi jumlah air ke dalam campuran.

Dalam hitungan sering dipakai :

"berat jenis" pasir jenuh-kering-muka

yang diperoleh dengan rumus :

$$"b.j." = A / (A - B)$$

dengan : A = berat pasir jenuh-kering-muka di udara
 B = berat pasir tersebut di dalam air.

3.13. PENGEMBANGAN VOLUME PASIR

Volume pasir biasanya mengembang bila sedikit mengandung air. Pengembangan volume itu disebabkan karena adanya lapisan tipis (selaput permukaan) air di sekitar butir-butir pasir. Ketebalan lapisan air itu bertambah dengan bertambahnya kandungan air di dalam pasir, dan ini berarti pengembangan volume secara keseluruhan. Akan tetapi pada suatu kadar air tertentu, volume pasir mulai berkurang dengan bertambahnya kadar air. Pada suatu kadar air tertentu pula, besar penambahan volume pasir itu menjadi nol, berarti volume pasir menjadi sama dengan volume pasir kering, lihat Gb.3.7.

Pasir yang halus mengembang lebih banyak daripada pasir yang kasar. Besar pengembangan volume pasir itu dapat sampai 25 atau 40 persen, pada kadar air sekitar 5 dan 8 persen (kadar air = berat air dibagi berat butir pasir).

Untuk mengetahui besar pengembangan volume pasir tersebut percobaan sederhana berikut ini dapat dilakukan.

Mula-mula pasir yang sedikit mengandung air dimasukkan ke dalam gelas ukur (lihat Gb.3.8.). Catatlah tinggi pasir tersebut, misalnya h_1 . Keluarkanlah pasir itu dari gelas ukur dan usahakan tidak ada pasir yang tumpah. Isilah gelas ukur tadi dengan air sampai kira-kira lebih dari setengah tinggi h_1 . Masukkan dengan hati-hati pasir yang tadi ke dalam gelas ukur dan aduklah/putar sebentar. Setelah tenang akan tampak pasir mengendap, lalu ukurlah tinggi pasir endapan di bawah muka air itu, misalnya h_2 . Tinggi pasir endapan ini sama dengan jika pasir itu ke-

ring. Kemudian besar pengembangan volume pasir dapat dihitung sebesar $= (h_1 - h_2)/h_2$.

Untuk menghindari kesalahan hitung (perbedaan antara perhitungan dan pelaksanaan) pada pencampuran pasir dalam adukan mortar/beton akibat pengaruh pengembangan pasir tersebut, maka perlu diadakan sedikit koreksi bila mencampur pasir untuk mortar atau beton dengan meninjau kandungan air dalam pasirmya.

Jika pasir diukur menurut volume dan tidak diberikan koreksi terhadap adanya pengembangan volume, maka campuran adukan beton akan kekurangan pasir daripada yang ditetapkan karena pasir yang basah menempati volume yang lebih besar daripada pasir kering. Dalam kasus semacam ini penambahan volume pasir diperlukan sebesar persentase pengembangan volumenya, agar jumlah pasir yang dimasukkan ke dalam adukan sama dengan yang direncanakan. Jika tidak demikian, maka perbandingan volume yang seharusnya 1 : 2 : 3 dalam prakteknya menjadi 1 : 1,6 : 3 jika pengembangan volume pasir 20 persen. Alasan inilah sebenarnya yang menjadikan campuran adukan beton dengan perbandingan volume tidak boleh dipakai untuk beton mutu lebih dari 20 MPa.

3.14. KEKUATAN DAN KEULETAN AGREGAT

Kekuatan beton tidak lebih tinggi daripada kekuatan agregatnya. Oleh karena itu sepanjang kuat tekan agregat lebih tinggi daripada beton yang dibuat dari agregat tersebut maka agregat tersebut masih dianggap cukup kuat. Namun dalam kasus-kasus beton kuat tekan tinggi yang mengalami konsentrasi tegangan lokal cenderung mempunyai tegangan lebih tinggi daripada kekuatan seluruh beton, dalam hal ini maka kekuatan agregat menjadi kritis.

Kekuatan dan sifat lain dari agregat dapat sangat bervariasi dalam batas-batas yang besar. Butir-butir agregat dapat bersifat kurang kuat karena dua sebab, yaitu karena terdiri dari bahan yang lemah atau terdiri dari partikel-partikel yang kuat tetapi tidak terikat dengan kuat, jadi bahan ikatnya yang kurang kuat. Misalnya granit, terdiri dari bahan yang keras dan kuat, yaitu kristal quartz dan feldspar tetapi bersifat kurang kuat dan modulus elastisitasnya lebih rendah daripada gabbros dan diabases, hal ini karena butir-butir dalam granit tidak terikat satu sama lain dengan baik.

Porositas atau kepadatan juga berpengaruh sekali terhadap kekuatan agregatnya. Pengaruh yang lain ialah terhadap keuletannya, yang merupakan ketahanan terhadap beban kejut.

Kekerasan dari butir-butir tergantung pada kekerasan dari bahannya, jadi tidak dipengaruhi oleh kekuatan lekatannya antara butir satu terhadap yang lain.

Sifat elastisitas agregat, yaitu suatu sifat yang dalam pengujian beban uniaxial disebut sebagai modulus elastisitas, sama seperti bahan getas yang lain. Agregat yang lebih kuat umumnya mempunyai modulus elastisitas lebih tinggi.

Butir-butir agregat yang lemah, yaitu butir-butir yang kekuatannya lebih rendah daripada pasta semen yang telah mengeras, tidak dapat menghasilkan befon

yang kekuatannya dapat diandalkan. Akan tetapi, untuk butir-butir agregat yang kekuatannya sedang atau cukup, mungkin malahan dapat menguntungkan, karena dapat mengurangi konsentrasi tegangan yang terjadi pada pasta beton selama pembebanan, atau pembasahan dan pengeringan, atau pemanasan dan pendinginan, dengan demikian membantu mengurangi bahaya akibat terjadinya retakan dalam beton. Hasil-hasil eksperimen terdahulu tampaknya menunjukkan, walaupun dalam batas-batas tertentu, bahwa makin tinggi modulus elastisitas dari agregat yang dipakai makin rendah kuat lentur betonnya.

Kedua sifat, yaitu butir-butir yang lemah dan lunak, perlu dibatasi nilai minimumnya jika ketahanan terhadap abrasi yang kuat dari betonnya diperlukan. Juga, modulus elastisitas dari agregat merupakan sifat yang penting yang memberikan uran dalam mempengaruhi besar nilai modulus elastisitas betonnya.

Kekuatan agregat dapat diperiksa dengan cara pengujian yang sesuai untuk bahan-bahan lain yang getas.

Sebagai contoh, di Jerman benda uji berbentuk kubus untuk pengujian kuat tekan dan benda uji berbentuk prisma untuk uji kuat lentur. Akan tetapi karena cara pengujian tersebut memerlukan bentuk agregat yang relatif besar, maka biasanya tidak cocok untuk dilakukan terhadap butir-butir agregat yang kecil.

Keadaan umum dari butir-butir agregat yang heterogen menghendaki cara pengujian yang cocok untuk benda berbutir lepas. Di Amerika Serikat belum ada suatu standar pengujian untuk mengetahui secara langsung kekuatan agregat, yang ada hanyalah suatu cara tidak langsung yaitu pengujian dengan menekan butiran agregat dengan jari tangan sehingga bagian yang lunak dapat terlepas.

Cara lain untuk menguji kekuatan agregat kasar ialah dengan alat uji derak Los Angeles. Pada cara uji ini contoh butir-butir agregat dimasukkan ke dalam silinder logam, dengan bola-bola baja untuk memukul, kemudian silinder diputar sehingga butir-butir agregat tersebut terpukul-pukul dan terabrasi. Persentase jumlah berat agregat yang hancur selama pengujian merupakan ukuran dari sifat-sifat agregat, yaitu keuletan, kekerasan, dan ketahanan aus, yang diharapkan merupakan sifat langsung yang berhubungan dengan kekuatan. Pengujian cara derak Los Angeles ini tampak memuaskan jika dipakai untuk menguji agregat normal dan agregat berat. Cara uji derak ini juga dapat digunakan untuk memeriksa adanya bagian butir-butir yang lunak dalam agregat. Caranya dengan mengukur banyaknya butiran yang pecah pada akhir putaran ke-100 kali yang pertama dibandingkan dengan pada akhir putaran ke-500. Umumnya jika butiran yang pecah pada akhir ke-100 sudah lebih dari 20 persen dari pada akhir ke-500 dianggap bagian butir yang lunak sudah terlalu banyak.

Di Inggris, untuk memeriksa kekuatan butiran yang agak kasar dilakukan dengan alat yang berupa silinder baja (bejana Rudeloff) dan sebuah stempel baja. Butiran agregat dimasukkan ke dalam silinder baja tersebut kemudian ditekan di atasnya dengan stempel dengan gaya tekan 20 ton selama 2 menit. Kemudian bagian agregat yang hancur dan menjadi butir-butir yang lebih kecil dari 2 mm ditimbang. Banyaknya butiran yang hancur merupakan ukuran dari kekuatan agregat. Makin banyak bagian yang hancur ini berarti makin rendah kekuatan agregat tersebut.

Cara pengujian tersebut (bejana Rudeloff) ternyata agak kurang tepat jika dipakai untuk menguji butir-butir agregat yang lemah. Hal ini diperkirakan karena selama penekanan tersebut terjadi gesekan kuat antara butir-butir dan dinding samping silinder baja. Keadaan ini mengakibatkan beban yang ditahan butir-butir berkurang, sehingga nilai yang diperoleh dari pengujian tampak lebih tinggi dari sebenarnya.

Cara lain untuk mengukur keuletan (*toughness*) agregat kasar ialah dengan cara diberi beban dengan menggunakan sebuah mesin uji kejut. Nilai pecah (*crushing value*) umumnya berhubungan langsung dengan nilai kejut.

Uji kejut dilaksanakan dengan benda uji berupa silinder dengan diameter dan tebal 25 mm, yang dijatuhkan dengan hammer seberat 2 kg dengan tinggi jatuh mulai dari 1 cm, dengan meningkat 1 cm tiap kalinya. Ujung bawah hammer harus tumpul (seperti ujung peluru), dan nilai kejut adalah jumlah penjatuhan hammer yang memecahkan agregatnya. Agregat yang baik ialah yang mempunyai nilai kejut 19 atau lebih, adapun yang sedang adalah antara 13 dan 19, sedangkan yang kurang dari 13 dianggap jelek.

Pengujian kuat tekan langsung dilakukan dengan membuat agregat (jenis batuan) berbentuk kubus ukuran antara 50 mm sampai 200 mm kemudian di tekan sampai pecah dengan mesin uji tekan beton.

Suatu agregat dengan nilai modulus elastisitas yang lebih tinggi pada umumnya menghasilkan beton dengan modulus elastisitas tinggi pula. Modulus elastisitas juga mempengaruhi besar rayapan (*creep*) dan penyusutan beton. Kemampuan memampat agregat akan menurunkan tegangan yang merusakkan pada beton akibat perubahan volume beton, sementara pada agregat yang kuat dan kaku mungkin menyebabkan retakan pada pasta semen di sekelilingnya. Dengan demikian pemakaian agregat dengan kekuatan serta modulus elastisitas sedang atau rendah dapat lebih bermanfaat untuk mencegah retak-retak dan menambah keawetan beton.

3.15. KETAHANAN CUACA (KEKEKALAN)

Sifat ketahanan agregat terhadap perubahan cuaca disebut ketahanan cuaca atau kekekalan. Sifat ini merupakan petunjuk kemampuan agregat untuk menahan perubahan volume yang berlebihan yang diakibatkan oleh perubahan-perubahan pada kondisi lingkungan, misalnya: pembekuan dan pencairan (pada daerah cuaca dingin), perubahan suhu, musim kering dan hujan yang berganti-ganti. Suatu agregat dikatakan tidak bersifat kekal apabila terjadi perubahan volume yang mengakibatkan membaurukinya sifat beton. Ini mungkin muncul dalam bentuk perubahan setempat-setempat hingga terjadi retakan permukaan atau disintegrasi pada suatu kedalaman yang cukup besar, jadi kerusakannya bervariasi dari kenampakan yang berubah sampai keadaan yang secara struktural (kekuatan) membahayakan.

Uji ketahanan cuaca dilakukan dengan merendamnya dalam larutan natrium sulfat (Na_2SO_4) atau magnesium sulfat (MgSO_4), kemudian dikeringkan dalam

tungku. Berat yang berkurang setelah beberapa kali pengujian dihitung. Jika digunakan natrium sulfat biasanya batasnya adalah 12 persen, adapun jika dengan magnesium sulfat 18 persen.

3.16. REAKSI ALKALI-SILIKA

Reaksi alkali-silika (terkenal dengan nama reaksi alkali-agregat/ *alkali-aggregate reaction*) merupakan reaksi antara kandungan silika aktif dalam agregat dan alkali dalam semen. Bentuk-bentuk silika yang reaktif ada dalam *opaline*, *chalcodonic cherts*, *phylites*, *rhyolites*, *tuff rhyolites*, andesit, tuff andesit, batu pamping silika, dan sebagainya. Reaksi dimulai dengan serangan terhadap mineral-mineral silika dalam agregat oleh alkalin hidroksida yang ada dalam semen. Reaksi ini membentuk suatu gel alkali-silika yang menyelimuti butiran-butiran agregat. Gel tersebut dikelilingi oleh pasta semen dan karena terjadi pemuaiannya maka terjadilah tegangan internal, yang dapat mengakibatkan retakan atau pecahnya pasta semen. Pemuaiannya ini disebabkan oleh hasil reaksi alkali-silika itu sendiri dan ditambah dengan tekanan hidrolik melalui proses osmosis.

Reaktivitas agregat tergantung pada ukuran butir dan porositasnya, karena kedua hal tersebut mempengaruhi luas permukaannya, yang mana reaksi itu berlangsung. Selain itu juga tergantung pada kadar/kandungan alkali dalam semen dan tingkat kehalusan butir-butir semennya.

Laju reaksi alkali-silika juga dipengaruhi oleh adanya air yang tidak menguap dalam pasta, serta kondisi lingkungan yang basah-kering berganti-ganti. Reaksi ini mudah terjadi pada suhu antara 10 dan 40 derajat celsius. Reaksi ini berlangsung sangat lambat, sehingga pengaruh reaksi ini tidak tampak pada beberapa tahun, namun akan segera tampak setelah timbul retak-retak yang tidak terkendali.

Pemuaiannya akibat reaksi alkali-silika ini dapat dikurangi dengan menambah bubuk halus silika reaktif ke dalam campuran adukan betonnya. Adanya bubuk silika reaktif akan menambah luas permukaan agregat, dan terbentuk silika-kalsium-alkali yang tidak memuai. Pada umumnya, sebagai pedoman dapat dipakai silika reaktif sebanyak 20 gram untuk tiap gram alkali yang melebihi 0,5 persen berat semen.

3.17. SIFAT TERMAL AGREGAT

Sifat termal agregat mempengaruhi keawetan dan kualitas lain dari betonnya. Sifat-sifat utama sifat termal agregat ini yaitu: (1) koefisien muai (2) panas jenis (3) penghantaran panas.

Koefisien muai beton bertambah dengan bertambahnya sifat muai agregat yang dipakai. Jika koefisien muai agregat dan pasta semen berbeda terlalu besar, maka jika terjadi perubahan suhu dapat mengakibatkan perbedaan gerakan sehingga dapat melepaskan lekatan antara agregat dan pasta. Jika koefisien muai kedua bahan tersebut berbeda lebih dari $5,4 \times 10^{-6}$ per $^{\circ}\text{C}$, maka beton akan mudah retak jika mengalami proses panas-dingin, atau jika terjadi kebakaran.

Koefisien muai agregat tergantung pada jenis bahan agregatnya. Sebagian besar agregat mempunyai koefisien muai antara $5,4 \times 10^{-6}$ dan $12,6 \times 10^{-6}$ per $^{\circ}\text{C}$, adapun koefisien muai pasta semen berkisar antara $10,8 \times 10^{-6}$ dan $16,2 \times 10^{-6}$ per $^{\circ}\text{C}$.

Panas jenis agregat perlu diperhitungkan jika beton dipakai sebagai beton massa, dan sifat penghantaran panas perlu diperhitungkan jika beton dipakai sebagai bahan isolasi.

3.18. ZAT-ZAT YANG BERPENGARUH BURUK PADA BETON

Bahan-bahan yang keberadaannya mungkin memberikan pengaruh yang merugikan terhadap kekuatan, kemudahan pengerjaan, dan kenampakan jangka panjang disebut zat-zat pengganggu. Bahan-bahan ini dianggap tidak diperlukan sebagai bahan-tambah karena lemah, lunak, lembut, atau sifat fisik atau sifat kimiawi yang merusak sifat-sifat beton.

Ditinjau dari aksi zat-zat yang berpengaruh buruk tersebut, maka dapat dibedakan menjadi 3 macam, yaitu :

- 1) zat yang mengganggu proses hidrasi semen
- 2) zat yang melapisi agregat sehingga mengganggu terbentuknya lekatan yang baik antara agregat dan pasta semen.
- 3) butiran-butiran yang kurang tahan cuaca, yang bersifat lemah dan menimbulkan reaksi kimia antara agregat dan pastanya.

Kandungan organik berinterferensi dengan reaksi-reaksi kimia hidrasi. Zat-zat ini pada umumnya terdiri dari bahan tanaman yang telah busuk dan muncul dalam bentuk humus. Umumnya lebih banyak terdapat dalam agregat halus daripada dalam agregat kasar.

Lempung atau bahan-bahan halus lainnya, misalnya silt atau debu pecahan batu mungkin terdapat dalam lapis permukaan yang berinterferensi dengan lekatan antara agregat dan pasta semen. Karena lekatan ini penting, maka pengaruhnya pada kekuatan dan daya tahan beton penting pula. Lapisan yang lunak dan longgar dapat dihilangkan dengan pencucian, adapun yang bersifat stabil secara kimiawi dan melekat kuat tidak berpengaruh yang membahayakan, kecuali mungkin adanya susutan yang lebih besar. Namun demikian suatu agregat dengan lapisan permukaan yang bersifat reaktif dapat menimbulkan masalah yang sulit. Silt atau debu halus, jika terdapat dalam jumlah yang berlebihan, menambah permukaan agregat sehingga jumlah air yang diperlukan untuk membasahi semua butiran dalam campuran itu juga meningkat, akibatnya menurunkan kekuatan dan daya tahan beton.

Pasir yang diperoleh dari pantai atau muara sungai banyak mengandung garam dan terkadang kandungannya sampai 6 persen dari massa pasir. Garam dapat diambil dari pasir dengan mencucinya dengan air tawar sebelum pemakaian. Jika garam tidak diambil akan menyerap air dari udara dan mungkin menyebabkan pengembangan, dan mungkin juga menyebabkan korosi pada tulangnya.

Shale dan butiran-butiran lain dengan berat jenis rendah, misalnya lempung, kayu, arang, tidak diperbolehkan lebih dari 5 persen pada pasir dan 1 persen pada kerikil, karena dapat memberikan pengaruh buruk pada betonnya.

Adanya mika dalam agregat halus ternyata juga mengurangi kekuatan tekan beton.

Pyrites (tanah tambang yang mengandung belerang) dan marcasite merupakan bahan penyebab pemuaian yang sering terjadi dalam agregat. Sulfida ini bereaksi dengan air dan oksida di udara menghasilkan perubahan warna permukaan beton, retak, kemudian lepas. Pengaruh ini akan semakin nyata pada kondisi udara panas dan udara lembab.

3.19. BENTUK AGREGAT

Sifat bentuk (dan tekstur permukaan) dari butir-butir agregat sebenarnya belum terdefinisikan dengan jelas, sehingga sifat-sifat tersebut sulit diukur dengan baik dan pengaruhnya terhadap beton juga sulit diperiksa dengan teliti. Sejumlah peneliti yang berkecimpung di bidang masalah ini telah banyak membicarakan masalah ini.

Kebulatan, atau ketajaman sudut, ialah sifat yang dimiliki butir yang tergantung pada ketajaman relatif dari sudut dan ujung butir. Kebulatan dapat didefinisikan secara numerik sebagai rasio antara jari-jari rata-rata dari sudut lengkung ujung atau sudut butir dan jari-jari maksimum lengkung salah satu ujung/sudutnya.

Sperikal ialah sifat yang tergantung pada rasio antara luas bidang permukaan butir dan volume butir. Nilai rasio ini berhubungan dengan panjang ketiga sumbu pokok butiran agregat.

Jika panjang dua sumbu pokok amat pendek dibandingkan dengan panjang sumbu pokok yang ketiga, butiran disebut berbentuk panjang, adapun jika panjang dua sumbu pokok amat panjang dibandingkan dengan panjang sumbu pokok yang ketiga, butiran disebut pipih.

Suatu cara numerik untuk mengukur bentuk sperikal ini ialah dengan mengukur panjang ketiga sumbu pokok tersebut, atau kombinasi ketiganya, dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{Angka sperikal} = \frac{d}{a}$$

atau

$$\text{Angka Sperikal} = \sqrt[3]{\frac{bc}{a^2}}$$

dengan a, b, dan c ialah berturut-turut panjang sumbu pokok terpanjang, panjang sumbu pokok tengahan, dan panjang sumbu pokok terpendek, sedangkan d ialah diameter ekivalen bulatan yang bervolume sama dengan butiran.

Agregat dengan butir-butir bulat (yang mempunyai panjang ketiga sumbu pokoknya hampir sama) umumnya lebih baik daripada agregat dengan butir-butir yang berbentuk pipih atau panjang jika dipakai untuk membuat beton, karena butir-butir bulat tersebut menghasilkan tumpukan butir yang erat jika dikonsolidasikan, sehingga hanya membutuhkan pasta semen sedikit, untuk membuat derajat kemudahan pengerjaan yang sama.

Hal ini karena butir-butir yang bulat lebih mudah menumpuknya karena lebih mudah memindahkan butir satu terhadap yang lain dalam beton segar, daripada butir-butir yang pipih atau panjang. Butir-butir yang bulat juga diharapkan dapat mengurangi kebutuhan air dan pasta semen pada tingkat kemudahan pengerjaan yang sama, dibandingkan dengan butir-butir yang berbentuk tajam/bersudut walaupun mempunyai sferikal dan tekstur permukaan sama.

Bentuk butiran agregat lebih berpengaruh pada beton segar daripada setelah beton mengeras. Berdasarkan bentuk butiran agregat dapat dibedakan menjadi :

- 1) agregat bulat,
- 2) bulat sebagian,
- 3) bersudut,
- 4) panjang, dan
- 5) pipih.

Agregat bulat (dari sungai atau pantai) mempunyai rongga udara minimum 33 persen. Hal ini berarti mempunyai rasio luas permukaan-volume kecil, sehingga hanya memerlukan pasta semen yang sedikit untuk menghasilkan beton yang baik, namun ikatan antar butir-butirnya kurang kuat sehingga lekatannya lemah, sehingga tidak cocok untuk beton mutu tinggi maupun perkerasan jalan raya.

Agregat bulat sebagian mempunyai rongga lebih tinggi, yaitu berkisar antara 35 sampai 38 persen. Dengan demikian membutuhkan lebih banyak pasta semen untuk mendapatkan beton segar yang dapat dikerjakan. Ikatan antar butir-butir lebih baik daripada agregat bulat, namun belum cukup untuk dibuat beton mutu tinggi.

Agregat bersudut mempunyai rongga berkisar antara 38 sampai 40 persen. Ikatan antar butir-butirnya baik sehingga membentuk daya lekat yang baik (ingat batu pecah yang dipakai untuk balast jalan kereta api). Pasta semen yang diperlukan lebih banyak untuk membuat adukan beton dapat dikerjakan, namun baik untuk beton mutu tinggi maupun lapis perkerasan jalan.

Agregat pipih ialah agregat yang ukuran terkecil butirannya kurang dari 3/5 ukuran rata-ratanya. Ukuran rata-rata agregat ialah rata-rata ukuran ayakan yang meloloskan dan yang menahan butiran agregat. Jadi, agregat mempunyai ukuran rata-rata 15 mm jika lolos pada lubang ayakan 20 mm dan tertahan pada lubang ayakan 10 mm. Agregat akan dinamakan pipih jika ukuran terkecil butirannya lebih kecil dari $3/5 \times 15 \text{ mm} = 9 \text{ mm}$.

Butir agregat disebut memanjang bila ukuran terbesar (yang paling panjang) lebih dari 9/5 dari ukuran rata-rata. Jadi pada agregat di atas, jika ukuran terbesar butirnya lebih dari 27 mm.

Kepipihan atau kepanjangan butir agregat berpengaruh jelek terhadap daya tahan/keawetan beton, karena agregat ini cenderung berkedudukan pada bidang rata air (horisontal), sehingga terdapat rongga udara di bawahnya.

Umumnya butiran agregat yang pipih/panjang tidak boleh lebih dari 15 persen. Hal ini biasanya perlu diperhatikan pada agregat buatan, karena ada jenis mesin pemecah batu yang hasilnya cenderung berbentuk panjang atau pipih.

3.20. TEKSTUR PERMUKAAN BUTIRAN

Tekstur permukaan ialah suatu sifat permukaan yang tergantung pada ukuran apakah permukaan butir termasuk halus atau kasar, mengkilap atau kusam, dan macam dari bentuk kekasaran permukaan. Pada umumnya permukaan butiran hanya disebut sebagai kasar, agak kasar, agak licin, dan licin. Tetapi berdasarkan pada pemeriksaan visual butiran agregat, tekstur permukaan butiran agregat dapat dibedakan menjadi : sangat halus (*glassy*), halus, granuler, kasar, berkristal (*crystalline*), berpori, dan berlubang-lubang. Ukuran tekstur permukaan secara numerik, misalnya seperti yang dipakai dalam logam, belum dipakai dalam agregat.

Tekstur permukaan tergantung pada kekerasan, ukuran molekul, tekstur batuan, dan juga tergantung pada besar gaya yang bekerja pada permukaan butiran yang telah membuat licin atau kasar permukaan tersebut. Bahan agregat yang keras, padat, berbutir kecil-kecil umumnya menjadikan permukaan butiran agregat bertekstur halus.

Butir-butir dengan tekstur permukaan yang licin membutuhkan air lebih sedikit daripada butir-butir yang tektur permukaannya kasar. Dilain pihak, hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis tertentu dari agregat kasar, kekasaran menambah kekuatan tarik maupun kekuatan lentur beton, oleh karena menambah gesekan antara pasta semen dan permukaan butir-butir agregat.

Sifat-sifat fisik agregat, misalnya bentuk dan tekstur permukaan secara nyata mempengaruhi mobilitas (yaitu mudah dikerjakan) dari beton segarnya, maupun daya lekat antara agregat dan pastanya. Kuat rekatan antara agregat dan pasta semen tergantung pada tekstur permukaan tersebut. Rekatan tersebut merupakan pengembangan dari ikatan mekanis antar butiran. Suatu agregat dengan permukaan yang berpori dan kasar lebih disukai daripada agregat dengan permukaan yang halus, karena agregat dengan tekstur kasar dapat meningkatkan rekatan agregat-semen sampai 1.75 kali, adapun kuat tekan betonya dapat meningkat sekitar 20 persen.

3.21. PERSYARATAN AGREGAT

Agregat untuk bahan bangunan sebaiknya dipilih yang memenuhi persyaratan sebagai berikut.

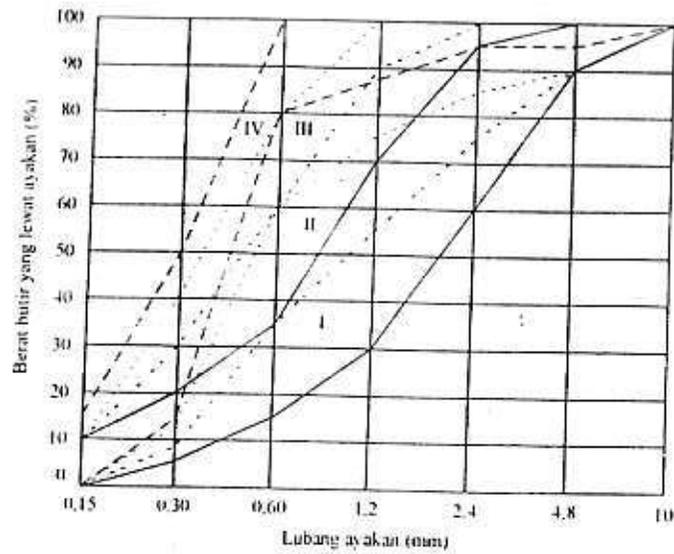
- a. Butir-butirnya tajam, kuat, dan bersudut. Ukuran kekuatan agregat dapat dilakukan dengan pengujian ketahanan aus dengan mesin uji Los Angeles, atau dengan bejana Rudeloff. Persyaratan menurut Standar Bidang Pekerjaan Umum dapat dibaca dalam Tabel.3.9.
- b. Tidak mengandung tanah atau kotoran lain yang lewat ayakan 0,075 mm. Pada agregat halus jumlah kandungan kotoran ini harus tidak lebih dari 5 persen untuk beton sampai 10 MPa, dan 2,5 persen untuk beton mutu yang lebih tinggi. Pada agregat kasar kandungan kotoran ini dibatasi sampai maksimum 1 persen. Jika agregat mengandung kotoran lebih dari batas-batas maksimum tersebut maka harus dicuci dengan air bersih.
- c. Harus tidak mengandung garam yang menghisap air dari udara.

Tabel 3.9. Persyaratan kekerasan agregat kasar untuk beton

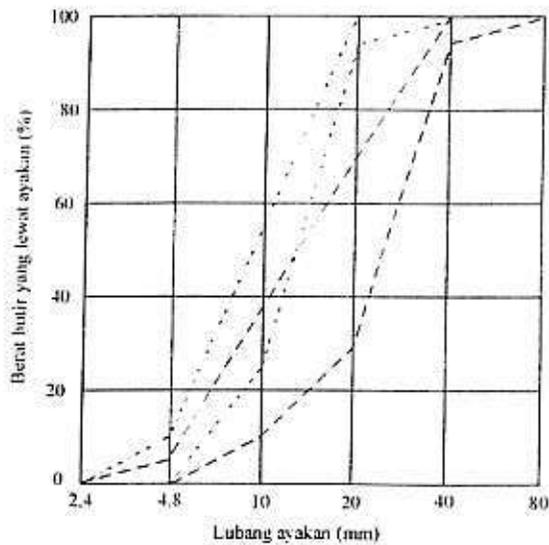
Kekuatan beton	Bejana Rudeloff Maksimum bagian yang hancur, menembus ayakan 2 mm (persen) Ukuran butir		Mesin Los Angeles Maksimum bagian yang hancur, menembus ayakan 1,7 mm (persen)
	19 - 30 mm	9,5 - 19 mm	
Kelas I (sampai 10 MPa)	30	32	50
Kelas II (10 MPa - 20 MPa)	22	24	40
Kelas III (di atas 20 MPa)	14	16	27

- d. Harus yang benar-benar tidak mengandung zat organis. Kandungan zat organis dapat mengurangi mutu beton. Bila direndam dalam larutan 3% NaOH, cairan di atas endapan tidak boleh lebih gelap dari warna pembanding. Agregat yang tidak diperiksa dengan percobaan warna dapat juga dipakai jika kuat tekan adukan dengan agregat tersebut pada umur 7 dan 28 hari tidak kurang dari 95 persen daripada kuat tekan adukan dengan agregat yang sama tetapi telah dicuci dalam larutan 3 persen NaOH dan kemudian dicuci dengan air bersih, pada umur yang sama.

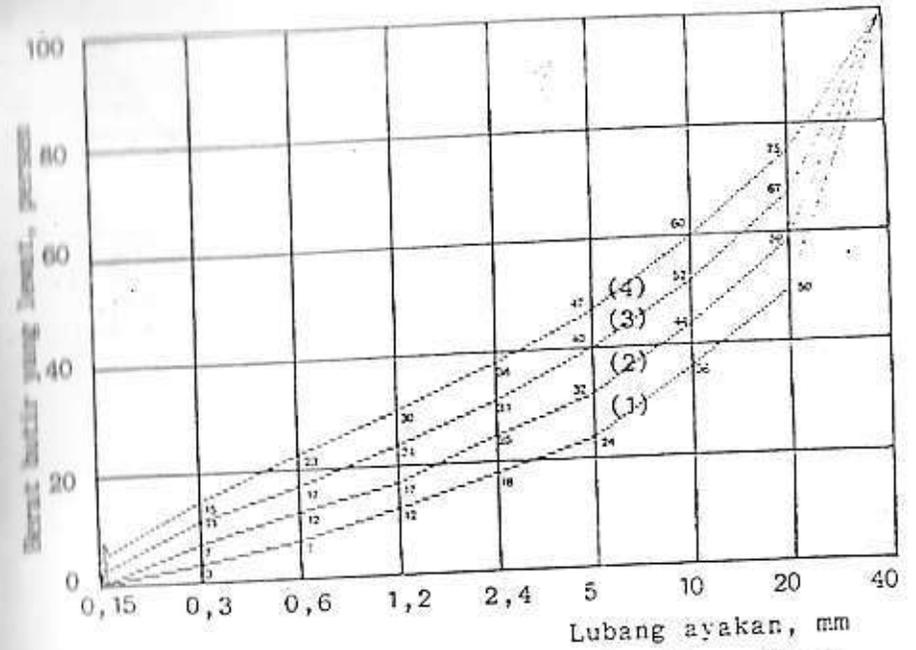
- e. Harus mempunyai variasi besar butir (gradasi) yang baik sehingga rongganya sedikit (untuk pasir modulus halus butirnya antara 2,50 - 3,80). Pasir yang seperti ini hanya memerlukan pasta semen sedikit.
- f. Bersifat kekal, tidak hancur atau berubah karena cuaca. Sifat kekal tersebut jika diuji dengan larutan jenuh garam sulfat sebagai berikut :
 - a) Jika dipakai Natrium Sulfat, bagian yang hancur maksimum 12 persen untuk kerikil dan 10 persen untuk pasir
 - b) Jika dipakai Magnesium Sulfat, bagian yang hancur maksimum 18 persen untuk kerikil dan 15 persen untuk pasir.
- g. Untuk beton dengan tingkat keawetan yang tinggi, agregat harus mempunyai tingkat reaktif yang negatif terhadap alkali. Menurut ASTM C227 untuk memeriksa agregat terhadap sifat reaktif ini dilakukan dengan percobaan batang mortar, yaitu agregat dipecah menjadi butiran kecil-kecil kemudian dicampur dengan semen dan air sesuai dengan yang akan digunakan di lapangan, lalu dicetak menjadi batang mortar dengan ukuran 25 mm x 25 mm x 285 mm. Batang mortar ini kemudian disimpan dalam ruangan lembab dengan suhu 38°C untuk mempercepat reaksi alkali-agregat. Dalam 3 bulan kemudian, batang mortar ini tidak boleh bertambah panjang lebih dari 0,05 persen atau dalam 6 bulan 0,1 persen. Namun percobaan ini tampaknya masih dianggap kurang memuaskan karena pengembangan dapat terjadi sesudah umur 6 bulan. Oleh karena itu, percobaan dapat dilakukan lebih lama lagi, tetapi hasil yang diharapkan tampaknya juga tetap mempunyai kekurangan.
- h. Untuk agregat kasar, tidak boleh mengandung butiran-butiran yang pipih dan panjang lebih dari 20 persen dari berat keseluruhan.



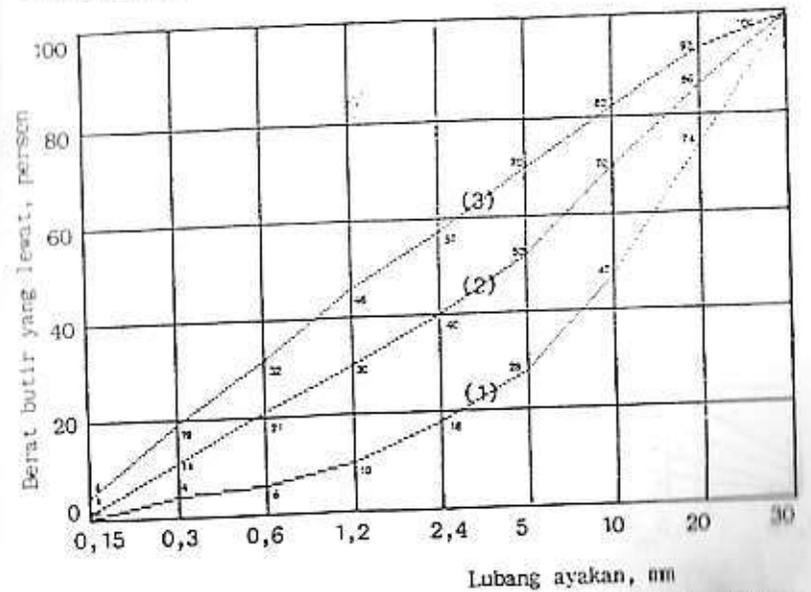
Gambar 3.1. Gradasi pasir



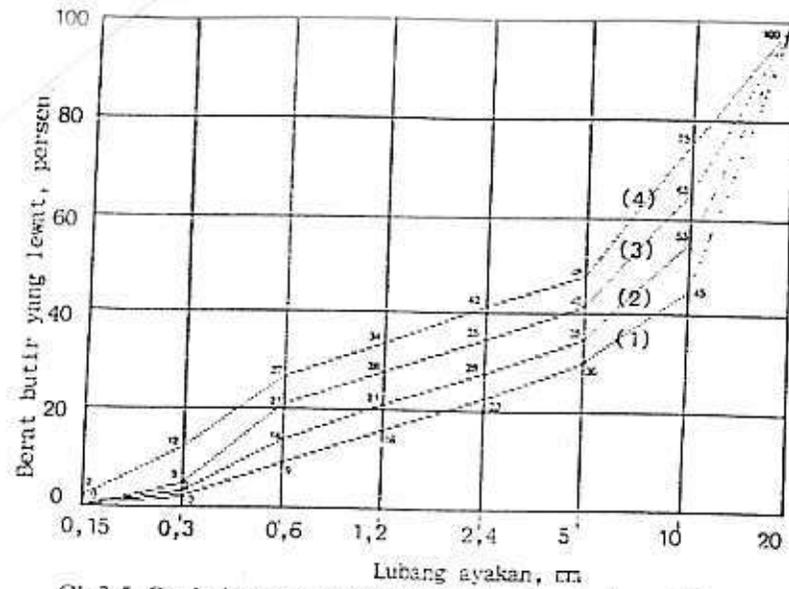
Gambar 3.2. Gradasi kerikil



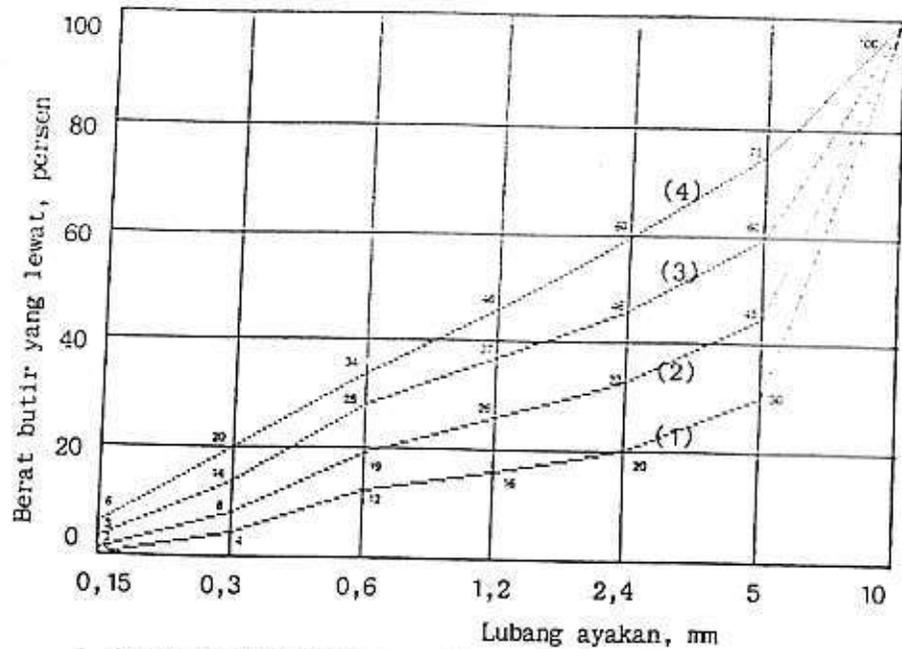
Gambar.3.3. Gradasi standar agregat dengan butir maksimum 40 mm



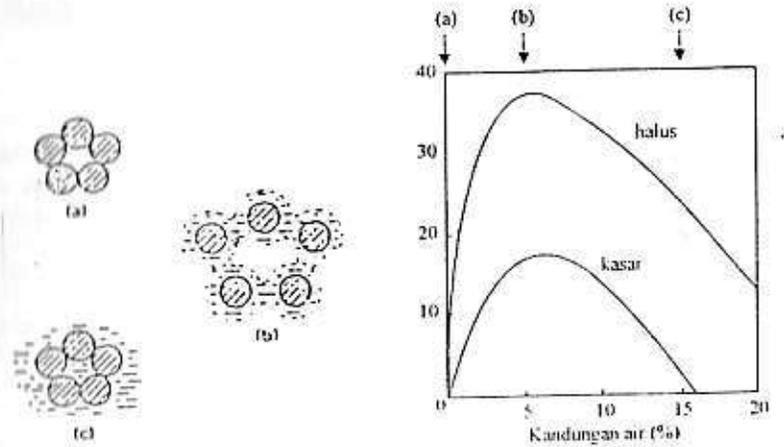
Gambar 3.4. Gradasi standar agregat dengan butir maksimum 30 mm



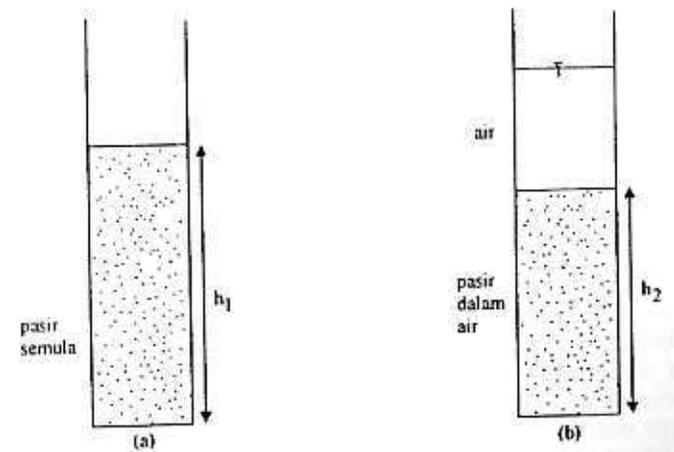
Gb.3.5. Gradasi standar agregat dengan butir maksimum 20 mm



Gb.3.6. Gradasi standar agregat dengan butir maksimum 10 mm



Gambar 3.7. Pengembangan volume pasir akibat kandungan air



Gambar 3.8. Pemeriksaan volume pasir kering

4 AIR

Air merupakan bahan dasar pembuat beton yang penting namun harganya paling murah. Air diperlukan untuk berreaksi dengan semen, serta untuk menjadi bahan pelumas antara butir-butir agregat agar dapat mudah dikerjakan dan dipadatkan. Untuk berreaksi dengan semen, air yang diperlukan hanya sekitar 25 persen berat semen saja, namun dalam kenyataannya nilai faktor air-semen yang dipakai sulit kurang dari 0,35. Kelebihan air ini yang dipakai sebagai pelumas. Tetapi perlu dicatat bahwa tambahan air untuk pelumas ini tidak boleh terlalu banyak karena kekuatan beton akan rendah serta betonnya porous. Selain itu, kelebihan air akan bersama-sama dengan semen bergerak ke permukaan adukan beton segar yang baru saja dituang (*bleeding*) yang kemudian menjadi buih dan merupakan suatu lapisan tipis yang dikenal dengan *laitance* (selaput tipis). Selaput tipis ini akan mengurangi lekatan antara lapis-lapis beton dan merupakan bidang sambung yang lemah. Apabila ada kebocoran cetakan, air bersama-sama semen juga dapat keluar, sehingga terjadilah sarang-sarang kerikil.

Air yang memenuhi persyaratan sebagai air minum memenuhi syarat pula untuk bahan campuran beton (tetapi tidak berarti air pencampur beton harus memenuhi standar persyaratan air minum).

Secara umum, air yang dapat dipakai untuk bahan pencampur beton ialah air yang bila dipakai akan dapat menghasilkan beton dengan kekuatan lebih dari 90 % kekuatan beton yang memakai air suling.

Dalam hal terdapat kesulitan air di daerah terpencil misalnya yang tidak terdapat air minum atau air untuk penggunaan umum, dan kualitas air yang ada di khawatirkan, maka perlu dilakukan pengujian kualitas air.

Kekuatan beton dan daya tahannya berkurang jika air mengandung kotoran. Pengaruh pada beton diantaranya pada lamanya waktu ikatan awal adukan beton, serta kekuatan betonnya setelah mengeras. Adanya butiran melayang (lumpur) dalam air di atas 2 gram/liter dapat mengurangi kekuatan beton. Air yang berlumpur terlalu banyak dapat diendapkan dulu sebelum dipakai, dalam kolam pengendap. Adanya garam-garam mangaan, timah, seng, tembaga, dan timah hitam dengan jumlah cukup besar pada air adukan akan menyebabkan pengurangan kekuatan beton. Seng klorida misalnya, memperlambat ikatan awal beton sedemikian sehingga beton belum memiliki kekuatan dalam umur 2 - 3 hari. Pengaruh timbal nitrat ($Pb\ NO_3$) yang tinggi akan sangat merusak beton. Beberapa garam seperti sodium iodate, sodium phosphate, sodium arsenat, dan sodium borat mengurangi kuat awal beton menjadi sangat rendah. Sodium karbonat dan potasium dapat menyebabkan ikatan sangat cepat dan dalam konsentrasi yang besar

akan mengurangi kekuatan beton. Adanya kalsium klorida mempercepat ikatan dan pengerasan.

Air laut umumnya mengandung 3,5 persen larutan garam, sekitar 78 persennya adalah sodium klorida dan 15 persennya adalah magnesium sulfat. Adanya garam-garam dalam air laut ini dapat mengurangi kekuatan beton sampai 20 persen. Air laut tidak boleh digunakan untuk campuran beton pada beton bertulang ataupun beton prategang, karena risiko terhadap korosi tulangan lebih besar.

Air buangan industri yang mengandung asam atau alkali biasanya tidak memenuhi syarat untuk struktur beton.

Ganggang yang mungkin terdapat dalam air atau pada permukaan butir-butir agregat, bila tercampur dalam adukan akan mengurangi lekatan antara batuan dan pastanya. Hal ini memperburuk beton.

Kandungan gula mungkin juga terdapat dalam air. Bila kandungan itu kurang dari 0,05 persen berat air tampaknya tidak berpengaruh terhadap kekuatan beton. Namun dalam jumlah yang lebih banyak dapat memperlambat ikatan awal, dan kekuatan beton dapat berkurang.

Dalam pemakaian air untuk beton itu sebaiknya air memenuhi syarat sebagai berikut:

- tidak mengandung lumpur (benda melayang lainnya) lebih dari 2 gram/liter.
- tidak mengandung garam-garam yang dapat merusak beton (asam, zat organik, dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter.
- tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/liter.
- tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter.

Untuk air perawatan, dapat dipakai juga air yang dipakai untuk pengadukan, tetapi harus yang tidak menimbulkan noda atau endapan yang merusak warna permukaan hingga tidak sedap dipandang. Besi dan zat organik dalam air umumnya sebagai penyebab utama pengotoran atau perubahan warna, terutama jika perawatan cukup lama.

5 BAHAN TAMBAH

Bahan tambah ialah bahan selain unsur pokok beton (air, semen, dan agregat) yang ditambahkan pada adukan beton, sebelum, segera, atau selama pengadukan beton. Tujuannya ialah untuk mengubah satu atau lebih sifat-sifat beton sewaktu masih dalam keadaan segar atau setelah mengeras, misalnya: mempercepat pengerasan, menambah encer adukan, menambah kuat tekan, menambah daktilitas (mengurangi sifat getas), mengurangi retak-retak pengerasan, dan sebagainya.

Bahan tambah seharusnya hanya berguna kalau sudah ada evaluasi yang teliti tentang pengaruhnya pada beton, khususnya dalam kondisi dimana beton diharapkan akan digunakan. Dalam hal-hal yang meragukan terutama untuk pekerjaan-pekerjaan khusus, perlu diadakan pemeriksaan pada contoh-contoh yang mewakili, agar diperoleh informasi yang dapat dipercaya.

Bahan tambah biasanya diberikan dalam jumlah yang relatif sedikit, dan harus dengan pengawasan yang ketat agar tidak berlebihan yang justru akan dapat memperburuk sifat beton.

5.1. BAHAN KIMIA TAMBAHAN

Bahan kimia tambahan (*chemical admixture*) ialah bahan kimia (berupa bubuk atau cairan) yang dicampurkan pada adukan beton selama pengadukan dalam jumlah tertentu untuk mengubah beberapa sifatnya (SK SNI S-18-1990-03, Spesifikasi Bahan Tambah untuk Beton).

Bahan kimia tambahan dapat dibedakan menjadi 5 jenis:

- (a) Bahan kimia tambahan untuk mengurangi jumlah air yang dipakai. Dengan pemakaian bahan ini diperoleh adukan dengan faktor air semen lebih rendah pada nilai kekentalan adukan yang sama, atau diperoleh kekentalan adukan lebih encer pada faktor air semen sama.

Penjelasan:

- (1) Dengan memakai bahan kimia tambahan ini, kekentalan adukan dapat dibuat sama, dengan nilai f.a.s. lebih rendah, sehingga kuat tekan beton lebih tinggi.
- (2) Dengan memakai bahan kimia tambahan ini, nilai f.a.s.nya dibuat sama, berarti kuat tekannya sama, namun kekentalan adukan beton menjadi lebih encer.

- (b) Bahan kimia tambahan untuk memperlambat proses ikatan beton. Bahan ini digunakan misalnya pada suatu kasus dimana jarak antara tempat pengadukan beton dan tempat penuangan adukan cukup jauh, sehingga selisih waktu antara mulai pencampuran dan pemadatan lebih dari 1 jam.
- (c) Bahan kimia tambahan untuk mempercepat proses ikatan dan pengerasan beton. Bahan ini digunakan jika penuangan adukan dilakukan di bawah permukaan air, atau pada struktur beton yang memerlukan waktu penyelesaian segera, misalnya perbaikan landasan pacu pesawat udara, balok prategang jembatan, dan sebagainya.
- (d) Bahan kimia tambahan berfungsi ganda, yaitu untuk mengurangi air dan memperlambat proses ikatan.
- (e) Bahan kimia tambahan berfungsi ganda, yaitu untuk mengurangi air dan mempercepat proses ikatan dan pengerasan beton.

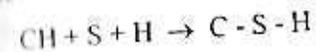
Selain 5 jenis di atas, ada 2 jenis lain yang lebih khusus, yaitu:

- (a) Bahan kimia tambahan yang digunakan untuk mengurangi jumlah air campuran sampai sebesar 12 persen atau bahkan lebih, untuk menghasilkan adukan beton dengan kekentalan sama (air dikurangi sampai 12% lebih namun adukan beton tidak bertambah kental).
- (b) Bahan kimia tambahan dengan fungsi ganda, yaitu mengurangi air sampai 12% atau lebih dan memperlambat waktu pengikatan awal.

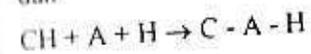
5.2. POZOLAN

Pozolan adalah bahan alam atau buatan yang sebagian besar terdiri dari unsur-unsur silikat dan atau aluminat yang reaktif (Persyaratan Umum Bahan Bangunan di Indonesia, PUBL-1982). Pozolan sendiri tidak mempunyai sifat semen, tetapi dalam keadaan halus (lolos ayakan 0,21 mm) bereaksi dengan air dan kapur padam pada suhu normal (24 - 27°C) menjadi suatu massa padat yang tidak larut dalam air.

Unsur silikat dan aluminat yang reaktif akan berreaksi dengan kapur bebas yang merupakan hasil sampingan proses hidrasi antara semen dan air (lihat Bab.2.4.b.) menjadi kalsium silikat hidrat ("tobermorite"). Secara sederhana proses kimianya dapat ditulis sebagai berikut:



dan



Keterangan:

- CH = kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$)
S = silikon dioksida (SiO_2)
A = aluminium oksida (Al_2O_3)
C-S-H = kalsium silikat hidrat ($C_3S_2H_3$)

Tampak bahwa bahan tambah pozolan ini mengikat kapur bebas dalam beton dan membentuk kalsium silikat hidrat yang sama dengan hasil hidrasi semen.

Berikutnya tetap, yaitu :

Termasuk dalam kelompok pozolan antara lain:

- (a) Tras alam
- (b) Gilingan terak dapur tinggi
- (c) Abu terbang (abuter. fly ash).

Dalam SK SNI S-15-1990-F Spesifikasi Abu Terbang sebagai Bahan Tambahan untuk Campuran Beton disebutkan ada 3 jenis abu terbang, yaitu :

- (1) Abu terbang kelas F, ialah abu terbang yang dihasilkan dari pembakaran batubara jenis antrasit, pada suhu 1560°C
- (2) Abu terbang kelas N, ialah hasil kalsinasi dari pozolan alam, misalnya tanah diatomice, shale, tuft, dan batu apung
- (3) Abu terbang kelas C, adalah hasil dari pembakaran lignit atau batubara dengan kadar karbon sekitar 60 persen; abu terbang ini mempunyai sifat seperti semen dengan kadar kapur di atas 10 persen.

Pozolan dapat dipakai sebagai bahan tambahan atau sebagai pengganti sebagian semen Portland. Bila dipakai sebagai pengganti sebagian semen Portland, umumnya berkisar antara 10 sampai 35 persen berat semen. Bahan tambahan ini dapat membuat beton lebih tahan terhadap garam, sulfat, dan air asam. Laju kenaikan kekuatannya lebih lambat daripada beton normal (lihat Gb.5.1. dan Gb.5.2.) Pada umur 28 hari kuat tekannya lebih rendah daripada beton normal, namun sesudah 3 bulan (90 hari) kuat tekannya dapat sedikit lebih tinggi.

Bila pozolan dipakai sebagai bahan tambah akan menjadikan beton lebih mudah diaduk, lebih rapat air, dan lebih tahan terhadap serangan kimia. Beberapa pozolan dapat mengurangi pemuaian beton yang terjadi akibat proses reaksi alkali-agregat (reaksi alkali dalam semen dengan silika dalam agregat). Dengan demikian mengurangi retak-retak beton akibat reaksi tersebut.

Pada pembuatan beton massa (mass concrete) misalnya dam, pemakaian pozolan sangat menguntungkan karena menghemat semen, dan mengurangi panas hidrasi. Panas hidrasi pada beton massa dapat mengakibatkan retakan yang serius.

5.3. SERAT

Salah satu bahan tambah beton ialah serat (fibre). Beton yang diberi bahan tambah serat disebut beton-serat (fibre reinforced concrete). Karena ditambah serat, maka menjadi suatu bahan komposit, yaitu beton dan serat. Serat dapat berupa asbestos, gelas/kaca, plastik, baja, atau serat tumbuh-tumbuhan (rami, ijuk).

Maksud utama penambahan serat ke dalam beton adalah untuk menambah kuat tarik beton, mengingat kuat tarik beton sangat rendah. Kuat tarik yang sangat rendah berakibat beton mudah retak, yang pada akhirnya mengurangi keawetan beton. Dengan adanya serat, ternyata beton menjadi lebih tahan retak dan tahan benturan jika masalah penyerapan energi diperlukan. Perlu diperhatikan bahwa pemberian serat tidak banyak menambah kuat tekan beton, namun hanya menambah daktilitas (lihat Gb.5.3.).

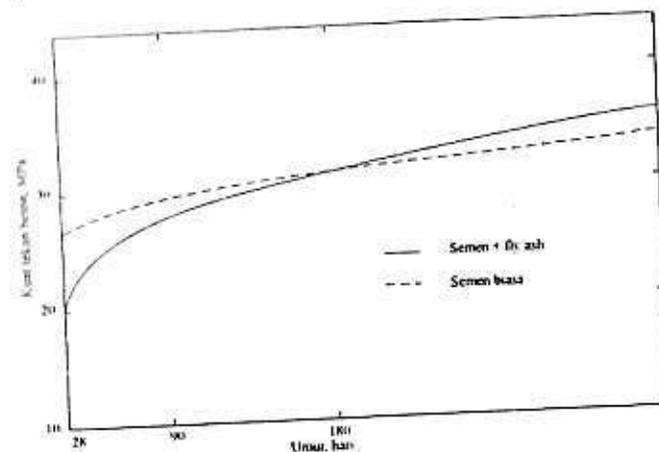
Serat baja dapat berupa potongan-potongan kawat, atau dibuat khusus dengan permukaan halus/rata atau deform, lurus atau bengkok untuk memperbesar lekatan dengan betonnya. Serat baja akan berkarat di permukaan beton, namun akan sangat awet jika di dalam beton. Diameter serat baja bervariasi dari 5 sampai 500 mikrometer (1 mikro meter = 1/juta meter) dan panjang sekitar 50 mm. Jumlah pemakaian serat baja sekitar 50 - 200 kg per meter kubik beton.

Dalam pemakaiannya, hal yang menjadi pembatas adalah masalah harga, karena sampai saat ini harga serat masih mahal. Namun demikian karena kebutuhan, maka beton serat sudah sering dipakai pada:

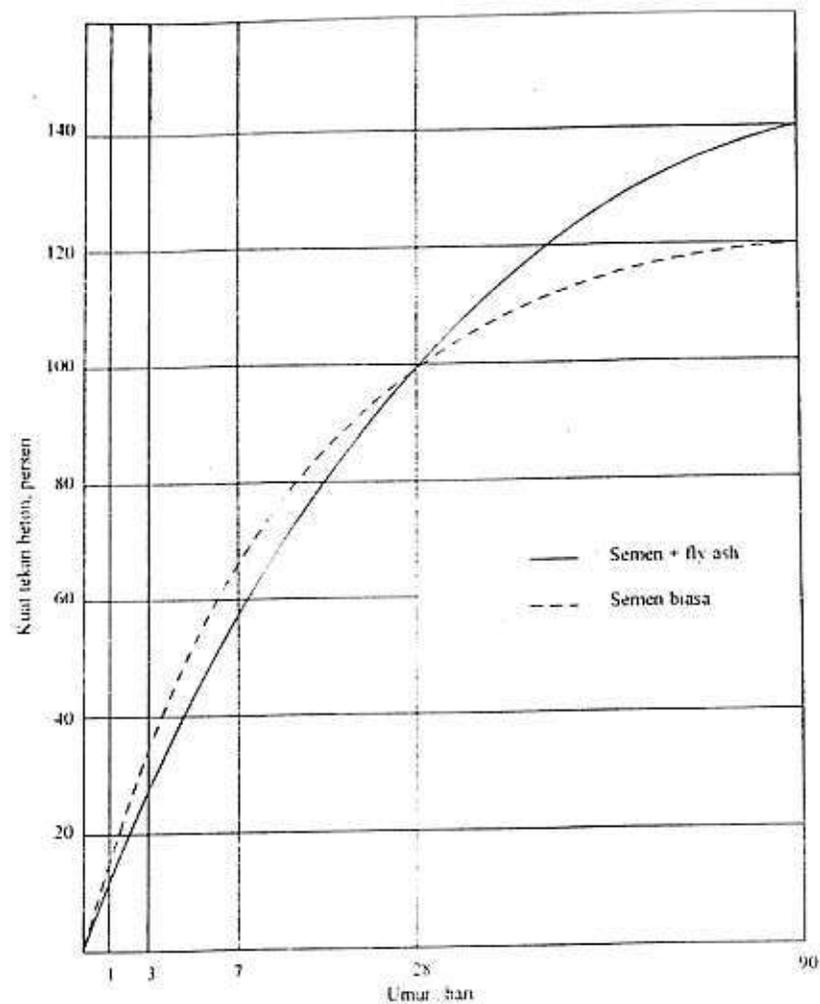
- (a) lapisan perkerasan jalan dan lapangan udara, untuk mengurangi retak dan mengurangi ketebalannya
- (b) *spillway* pada dam untuk mengurangi kerusakan akibat adanya *cavitas*
- (c) bagian beton yang tipis agar tidak mudah retak.

Serat yang dibuat dari polypropylene, nylon, atau tumbuhan, karena modulus elastisnya yang rendah maka tampaknya kurang efektif dalam mengurangi retak, namun dapat menambah ketahanan terhadap benturan.

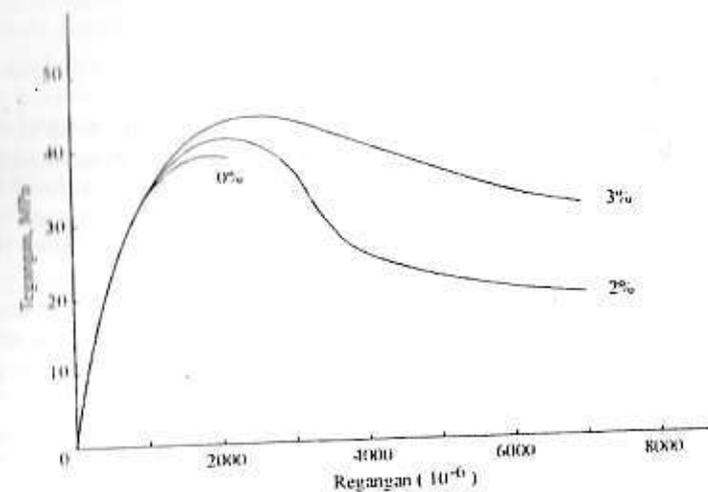
Semen asbes sudah banyak dipakai untuk membuat pipa beton, papan tahan-
api, dan papan-asbes.



Gambar 5.1. Diagram umur dan kuat tekan beton



Gambar 5.2. Diagram laju kenaikan kuat tekan beton



Gambar 5.3. Diagram regangan-tegangan silinder beton, tanpa serat dan dengan serat 2% dan 3% (Mindess, 1981)

6 PENGOLAHAN BETON

6.1. PENGADUKAN BETON

Proses pencampuran antara bahan-bahan dasar beton, yaitu semen, air, pasir dan kerikil, dalam perbandingan yang baik disebut proses pengadukan beton. Pengadukan ini dilakukan sampai warna adukan tampak rata, kelecakan yang cukup (tidak cair tidak padat), dan tampak campurannya juga homogen. Pemisahan butir-butir seharusnya tidak boleh terjadi selama proses pengadukan ini. Cara pengadukan dapat dilakukan dengan mesin atau tangan.

(a) Pengadukan dengan tangan. Pengadukan dengan tangan biasanya dilakukan apabila jumlah beton yang dibuat hanya sedikit. Cara ini juga dilakukan apabila tidak ada mesin aduk beton, atau tidak diinginkan suara berisik yang ditimbulkan oleh mesin.

Mula-mula semen dan pasir dicampur secara kering di atas tempat yang rata, bersih, keras dan tidak menyerap air. Pencampuran secara kering ini dilakukan sampai warnanya sama. Campuran yang kering ini kemudian dicampur dengan kerikil dan diaduk kembali sampai merata. Alat pencampur dapat berupa cangkul, sekop, atau cetok.

Kemudian ditengah adukan tersebut dibuat lubang dan ditambahkan air sebanyak 75% dari jumlah air yang diperlukan, lalu adukan diulangi dan ditambahkan sisa air sampai adukan tampak merata.

(b) Pengadukan dengan mesin. Untuk pekerjaan-pekerjaan besar yang menggunakan beton dalam jumlah banyak, pengadukan dengan mesin dapat lebih murah dan memuaskan. Beton yang dibuat dengan mesin lebih homogen dan dapat dilakukan dengan faktor air semen yang lebih sedikit daripada bila diaduk dengan tangan.

6.2. PENGANGKUTAN ADUKAN BETON

Adukan beton yang dibuat dengan tangan maupun dengan mesin harus diangkut ke tempat penuangan sebelum semen mulai berhidrasi (bereaksi dengan air). Selama pengangkutan harus selalu dijaga agar tidak ada bahan-bahan yang tumpah/keluar atau yang memisahkan diri dari campuran. Cara pengangkutan adukan beton itu tergantung jumlah adukan yang dibuat dan keadaan tempat penuangan. Pengangkutan adukan beton dapat dilakukan dengan menempatkan di dalam ember, gerobak dorong, truk-aduk-beton, ban berjalan atau pompa.

Umumnya pada proyek-proyek kecil pengadukan beton dilakukan di dekat lokasi penuangan, dan pengangkutan dikerjakan dengan ember atau gerobak dorong.

Bila tempat pengadukan beton cukup jauh dari tempat penuangannya, pengangkutan dilakukan dengan truk-aduk-beton (*truck molen*). Biasanya karena waktu angkut cukup lama maka diperlukan bahan kimia tambahan untuk mempercepat proses ikatan awal dari semen.

Pengangkutan dengan pompa dan selang dilakukan bila antara tempat pengadukan beton dan tempat penuangan "cukup ramai" sehingga tidak dapat diangkut dengan ember atau gerobak dorong. Pada cara ini adukan beton harus encer.

Pengangkutan adukan beton dilakukan dengan ban-berjalan sangat baik bila pengangkutan berlangsung secara terus-menerus dan ditujukan ke tempat yang jauh lebih tinggi. Biasanya adukan beton diperlukan agak kental.

6.3. PENUANGAN ADUKAN BETON

Di tempat penuangan beton harus segera dipadatkan sebelum semen dan air mulai bereaksi (pada umumnya semen mulai bereaksi dengan air satu jam setelah semen dicampur dengan air).

Hal-hal berikut harus diperhatikan selama penuangan dan pemadatan berlangsung.

- (a) Adukan beton harus dituang secara terus-menerus (tidak terputus) agar diperoleh beton yang seragam dan tidak terjadi garis batas.
- (b) Permukaan cetakan yang berhadapan dengan adukan beton harus diolesi minyak agar beton yang terjadi tidak melekat dengan cetakannya.
- (c) Selama penuangan dan pemadatan harus dijaga agar posisi cetakan maupun tulangan tidak berubah.
- (d) Adukan beton jangan dijatuhkan dengan tinggi jatuh lebih dari satu meter agar tidak terjadi pemisahan bahan-bahan pencampurnya.
- (e) Pencoran tidak boleh dilakukan pada waktu turun hujan.
- (f) Sebaiknya tebal lapisan beton untuk setiap kali penuangan tidak lebih dari 45 cm pada beton massa, dan 30 cm pada beton bertulang.
- (g) Harus dijaga agar beton yang masih segar tidak diinjak.

6.4. PEMADATAN ADUKAN BETON

Pada prinsipnya pemadatan adukan beton di sini ialah usaha agar sesedikit mungkin pori/rongga yang terjadi di dalam betonnya. Pemadatan adukan beton dapat dilakukan secara manual atau dengan mesin.

Pemadatan secara manual dilakukan dengan alat berupa tongkat baja atau tongkat kayu. Adukan beton yang baru saja dituang harus segera dipadatkan dengan cara ditusuk-tusuk dengan tongkat baja/kayu. Sebaiknya tebal beton yang ditusuk tidak lebih dari 15 cm. Penusukan dengan tongkat itu dilakukan beberapa waktu sampai tampak suatu lapisan mortar di atas permukaan beton yang dipadatkan itu. Pemadatan yang kurang mengakibatkan kurang baiknya mutu beton karena berrongga.

Pemadatan dengan bantuan mesin dilakukan dengan alat getar (*vibrator*). Alat getar itu mengakibatkan getaran pada beton segar yang baru saja dituang, sehingga mengalir dan menjadi padat. Penggetaran yang terlalu lama harus dicegah untuk menghindari mengumpulnya kerikil di bagian bawah dan hanya mortar yang ada di bagian atas.

Alat getar yang biasa dipakai ada 2 macam, yaitu :

- (a) alat getar intern (*internal vibrator*), ialah alat getar yang berupa "seperti tongkat". Alat getar ini digetarkan dengan mesin dan dimasukkan ke dalam beton segar yang baru saja dituang.
- (b) alat getar cetakan (*form vibrator; external vibrator*), ialah alat getar yang ditempelkan di bagian luar cetakan sehingga cetakan bergetar dan membuat beton segar ikut bergetar pula sehingga dapat padat.

6.5. PEKERJAAN PERATAAN

Pekerjaan perataan di sini yang dimaksud ialah pekerjaan sesudah adukan beton selesai dipadatkan, yaitu berupa perataan permukaan dari beton segar yang telah dipadatkan. Alat yang dipakai ialah cetok dan papan perata.

6.6. PERAWATAN BETON

Perawatan beton ialah suatu pekerjaan menjaga agar permukaan beton segar selalu lembab, sejak adukan beton dipadatkan sampai beton dianggap cukup keras. Kelembaban permukaan beton itu harus dijaga untuk menjamin proses hidrasi semen (reaksi semen dan pasir) berlangsung dengan sempurna. Bila hal ini tidak dilakukan, akan terjadi beton yang kurang kuat, dan juga timbul retak-retak. Selain itu, kelembaban permukaan tadi juga menambah beton lebih tahan cuaca, dan lebih kedap air.

Beberapa cara perawatan beton yang biasa dilakukan ialah :

- (a) menaruh beton segar di dalam ruangan yang lembab,
- (b) menaruh beton segar di atas genangan air,
- (c) menaruh beton segar di dalam air,
- (d) menyelimuti permukaan beton dengan karung basah,
- (e) menggenangi permukaan beton dengan air,
- (f) menyirami permukaan beton setiap saat secara terus-menerus.

Cara a,b, dan c dilakukan terhadap contoh beton yang berbentuk kubus atau silinder, adapun cara d,e, dan f dilakukan untuk beton segar yang dituang di lapangan/di proyek.

6.7. SIFAT BETON SEGAR

Tiga hal sifat penting yang perlu diketahui dari sifat-sifat beton segar, yaitu :

- (a) Kemudahan dikerjakan

- (b) Pemisahan kerikil
- (c) Pemisahan air.

6.7.1. Kemudahan pengerjaan (*workability*)

Sifat ini merupakan ukuran dari tingkat kemudahan adukan untuk di aduk, diangkut, dituang dan dipadatkan. Perbandingan bahan-bahan maupun sifat bahan-bahan itu secara bersama-sama mempengaruhi sifat kemudahan pengerjaan beton segar. Unsur-unsur yang mempengaruhi sifat kemudahan dikerjakan antara lain :

- (a) Jumlah air yang dipakai dalam campuran adukan beton. Makin banyak air dipakai makin mudah beton segar itu dikerjakan.
- (b) Penambahan semen ke dalam campuran juga memudahkan cara pengerjaan adukan betonnya, karena pasti diikuti dengan bertambahnya air campuran untuk memperoleh nilai fas tetap.
- (c) Gradasi campuran pasir dan kerikil. Bila campuran pasir dan kerikil mengikuti gradasi yang telah disarankan oleh peraturan maka adukan beton akan mudah dikerjakan.
- (d) Pemakaian butir-butir batuan yang bulat mempermudah cara pengerjaan beton.
- (e) Pemakaian butir maksimum kerikil yang dipakai juga berpengaruh terhadap tingkat kemudahan dikerjakan.
- (f) Cara pemadatan adukan beton menentukan sifat pengerjaan yang berbeda. Bila cara pemadatan dilakukan dengan alat getar maka diperlukan tingkat kelecakan yang berbeda, sehingga diperlukan jumlah air yang lebih sedikit daripada jika dipadatkan dengan tangan.

Tingkat kemudahan pengerjaan berkaitan erat dengan tingkat kelecakan (keenceran) adukan beton. Makin cair adukan makin mudah cara pengerjaannya. Untuk mengetahui tingkat kelecakan adukan beton biasanya dilakukan dengan percobaan slam (*slump*). Makin besar nilai slam berarti adukan beton semakin encer dan ini berarti semakin mudah dikerjakan. Pada umumnya nilai slam berkisar antara 5 dan 12,5 cm.

Percobaan slam. Percobaan slam (*slump test*) ialah suatu cara untuk mengukur kelecakan adukan beton, yaitu kecairan/kepadatan adukan yang berguna dalam pengerjaan beton. Percobaan ini menggunakan alat-alat sebagai berikut ini:

- (a) Corong baja yang berbentuk konus berlubang pada kedua ujungnya. Bagian bawah berdiameter 20 cm, adapun bagian atas berdiameter 10 cm, dan tinggi 30 cm (lihat Gb.6.1.)
- (b) Tongkat baja dengan diameter 16 mm dan panjang 60 cm. Bagian ujung baja ini dibulatkan.

Mula-mula corong baja ditaruh di atas tempat yang rata dan tidak menghisap air, dengan diameter yang besar di bawah dan diameter yang kecil di atas. Adukan beton dimasukkan ke dalam corong tersebut dengan hati-hati dan corong dipegang erat-erat agar tidak bergerak. Jumlah adukan yang dimasukkan kira-kira sebanyak sepertiga volume corong. Setelah adukan telah masuk ke dalam corong lalu adukan ditusuk-tusuk sebanyak 25 kali dengan tongkat baja. Kemudian adukan

kedua yang kira-kira volumenya sama dengan yang pertama tadi dimasukkan, dan ditusuk-tusuk pula. Penusukan jangan sampai menusuk lapisan pertama. Bila lapisan kedua sudah ditusuk, lalu adukan ketiga dimasukkan dan ditusuk pula. Bila adukan ketiga telah selesai ditusuk, lalu permukaan adukan beton diratakan sama dengan permukaan corong. Setelah itu, tunggu 60 detik, dan kemudian tarik corong lurus ke atas. Ukurlah penurunan permukaan atas adukan beton setelah corong ditarik. Besar penurunan adukan beton tersebut disebut nilai slam. Dari cara percobaan ini dapat diketahui bahwa lebih cair adukan akan diperoleh nilai slam lebih besar.

6.7.2. Pemisahan kerikil

Kecenderungan butir-butir kerikil untuk memisahkan diri dari campuran adukan beton disebut "segregation". Kecenderungan pemisahan kerikil ini diperbesar dengan :

- campuran yang kurus (kurang semen)
- terlalu banyak air
- semakin besar butir kerikil
- semakin kasar permukaan kerikil

Pemisahan kerikil dari adukan beton berakibat kurang baik terhadap betonnya setelah mengeras. Untuk mengurangi kecenderungan pemisahan kerikil tersebut maka diusahakan hal-hal sebagai berikut.

- Air yang diberikan sesedikit mungkin.
- Adukan beton jangan dijatuhkan dengan ketinggian terlalu besar.
- Cara pengangkutan, penuangan maupun pemadatan harus mengikuti cara-cara yang betul.

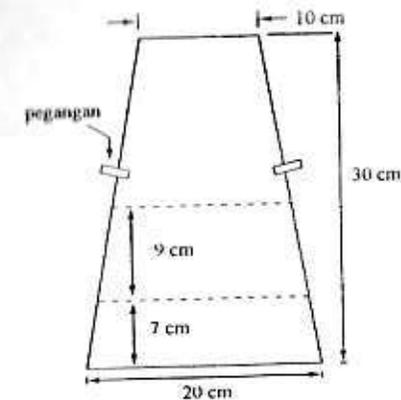
6.7.3. Pemisahan air

Kecenderungan air campuran untuk naik ke atas (memisahkan diri) pada beton segar yang baru saja dipadatkan disebut "bleeding".

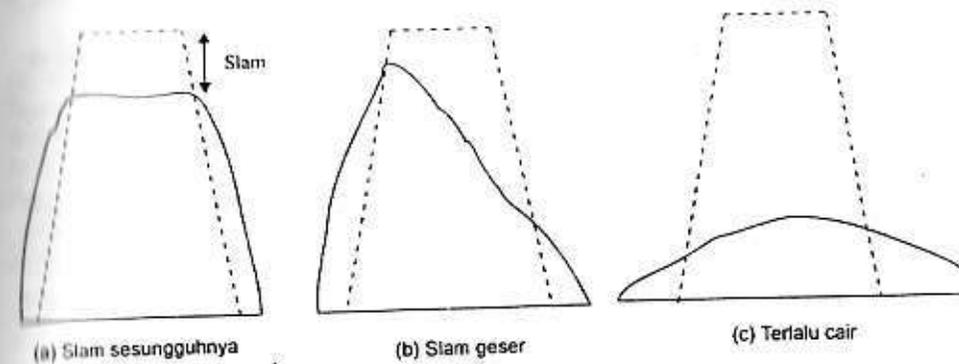
Air naik ke atas sambil membawa semen dan butir-butir halus pasir, yang pada akhirnya setelah beton mengeras akan tampak sebagai lapisan selaput. Lapisan ini dikenal sebagai "laitance".

Pemisahan air ini dapat dikurangi dengan cara-cara berikut.

- Memberi lebih banyak semen.
- Menggunakan air sesedikit mungkin.
- Menggunakan pasir lebih banyak.



Gambar 6.1. Corong konus



Gambar 6.2. Pengukuran slam
(a) Slam sesungguhnya
(b) Slam geser
(c) Terlalu cair

7

PERANCANGAN CAMPURAN ADUKAN BETON

7.1. PENDAHULUAN

Pada saat ini dalam bidang pembuatan bangunan banyak digunakan beton mutu tinggi, sehingga kita dituntut untuk dapat merancang perbandingan campuran lebih tepat sesuai dengan teori perancangan proporsi campuran adukan beton. Pembuatan beton dengan perbandingan volume 1 semen : 2 pasir : 3 kerikil untuk beton biasa dan 1 semen : 1,5 pasir : 2,5 kerikil untuk beton kepadatan sudah kurang memuaskan lagi karena menghasilkan kuat tekan beton yang sangat beragam. Dalam Konsep Pedoman Beton 1989, perbandingan campuran volume di atas hanya boleh dilakukan untuk beton mutu kurang dari 10 MPa, dan dengan slam yang tidak boleh lebih dari 100 mm.

Perencanaan adukan beton dimaksudkan untuk mendapatkan beton yang sebaik-baiknya, yang antara lain dapat diuraikan sebagai berikut :

- Kuat tekannya tinggi.
- Mudah dikerjakan.
- Tahan lama (awet).
- Murah.
- Tahan aus.

Pada bab berikut ini diuraikan tentang kuat tekan beton dan tata cara perancangan adukan beton.

7.2. KUAT TEKAN BETON

Telah diketahui bersama bahwa sifat beton pada umumnya lebih baik jika kuat tekannya lebih tinggi. Dengan demikian untuk meninjau mutu beton biasanya secara kasar hanya ditinjau kuat tekannya saja.

Dalam teori teknologi beton dijelaskan bahwa faktor-faktor yang sangat mempengaruhi kekuatan beton ialah :

- faktor air-semen dan kepadatan
- umur beton
- jenis semen
- jumlah semen
- sifat agregat.

a. Faktor air-semen.

Hubungan antara faktor air-semen (fas) dan kuat tekan beton secara umum dapat ditulis dengan rumus yang diusulkan Duff Abrams (1919) sebagai berikut :

$$f_c = \frac{A}{B \cdot f_a^x}$$

dengan

- f_c = kuat tekan beton
 f_a = fas (yang semula dalam proporsi volume)
 A, B = konstanta.

Dari rumus di atas tampak bahwa semakin rendah nilai faktor air-semen semakin tinggi kuat tekan betonnya, namun kenyataannya pada suatu nilai faktor air-semen tertentu semakin rendah nilai faktor air-semen kuat tekan betonnya semakin rendah pula (lihat Gb.7.1.a). hal ini karena jika faktor air-semen terlalu rendah adukan beton sulit dipadatkan. Dengan demikian ada suatu nilai faktor air-semen tertentu yang optimum yang menghasilkan kuat tekan beton maksimum.

Kepadatan adukan beton sangat mempengaruhi kuat tekan beton setelah mengeras. Adanya pori udara sebanyak 5 persen dapat mengurangi kuat tekan beton sampai 35 persen, dan pori sebanyak 10 persen mengurangi kuat tekan beton sampai 60 persen, sebagaimana tampak pada Gb.7.1.b.

Untuk mengatasi kesulitan pemadatan adukan beton dapat dilakukan dengan cara pemadatan dengan alat getar (*vibrator*), yang hasilnya dapat dilihat pada Gb.7.1.a, atau dengan memberi bahan kimia tambahan (*chemical admixture*) yang bersifat mengencerkan adukan beton sehingga lebih mudah dipadatkan.

b. Umur beton.

Kuat tekan beton bertambah sesuai dengan bertambahnya umur beton itu. Kecepatan bertambahnya kekuatan beton tersebut sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain : faktor air semen dan suhu perawatan. Semakin tinggi f.a.s semakin lambat kenaikan kekuatan betonnya, dan semakin tinggi suhu perawatan semakin cepat kenaikan kekuatan betonnya, sebagaimana tampak pada Gb.7.2. dan Gb.7.3.

c. Jenis semen.

Menurut SII 0031-81 semen Portland dibagi menjadi lima jenis sebagai berikut :

- Jenis I : Semen untuk penggunaan umum, tidak memerlukan persyaratan khusus.
- Jenis II : Semen untuk beton tahan sulfat dan mempunyai panas hidrasi sedang.
- Jenis III : Semen untuk beton dengan kekuatan awal tinggi (cepat mengeras).
- Jenis IV : Semen untuk beton yang memerlukan panas hidrasi rendah.

Jenis V : Semen untuk beton yang sangat tahan terhadap sulfat.

Jenis-jenis semen tersebut mempunyai laju kenaikan kekuatan yang berbeda, sebagaimana tampak pada Gb.7.4.

d. Jumlah semen

Jumlah kandungan semen berpengaruh terhadap kuat tekan beton sebagaimana diuraikan sebagai berikut ini.

Jika faktor air-semen sama, (nilai slam berubah) beton dengan jumlah kandungan semen tertentu mempunyai kuat tekan tertinggi, sebagaimana tampak pada Gb.7.5.). Pada jumlah semen yang terlalu sedikit berarti jumlah air juga sedikit sehingga adukan beton sulit dipadatkan sehingga kuat tekan beton rendah. Namun jika jumlah semen berlebihan berarti jumlah air juga berlebihan sehingga beton mengandung banyak pori dan akibatnya kuat tekan beton rendah.

Jika nilai slam sama, (nilai faktor air-semen berubah) beton dengan kandungan semen lebih banyak mempunyai kuat tekan lebih tinggi. Hal ini karena pada nilai slam sama jumlah air hampir sama, sehingga penambahan semen berarti pengurangan nilai faktor air-semen, yang berakibat penambahan kuat tekan beton (lihat Gb.7.6.)

c. Sifat agregat

Pengaruh kekuatan agregat terhadap kekuatan beton sebenarnya tidak begitu besar karena umumnya kekuatan agregat lebih tinggi daripada pastanya. Meskipun demikian bila dikehendaki kekuatan beton yang tinggi, diperlukan juga agregat yang kuat agar kekuatannya tidak lebih rendah daripada pastanya.

Sifat agregat yang paling berpengaruh terhadap kekuatan beton ialah kekasaran permukaan dan ukuran maksimumnya.

Permukaan yang halus pada kerikil dan kasar pada batu pecah berpengaruh pada lekatan dan besar tegangan saat retak-retak beton mulai terbentuk. Oleh karena itu kekasaran permukaan ini berpengaruh terhadap bentuk kurve tegangan-regangan tekan beton, dan terhadap kekuatan betonnya, sebagaimana tampak pada gb.7.7. Akan tetapi bila adukan beton didasarkan pada nilai slam yang sama besar, pengaruh tersebut tidak tampak karena agregat yang permukaannya halus memerlukan air yang lebih sedikit, berarti faktor air semennya rendah yang menghasilkan kuat tekan beton lebih tinggi.

Besar ukuran maksimum agregat mempengaruhi kuat tekan betonnya. Pada pemakaian ukuran butir agregat maksimum lebih besar memerlukan jumlah pasta lebih sedikit untuk mengisi rongga-rongga antar butirnya, berarti sedikit pula pori-pori betonnya (karena pori-pori beton sebagian besar berada dalam pasta, tidak dalam agregat) sehingga kuat tekannya lebih tinggi. Namun sebaliknya, karena butir-butir agregatnya besar maka luas permukaannya menjadi lebih sempit sehingga lekatan antara permukaan agregat dan pastanya kurang kuat. Lagi pula karena butirannya besar menyebabkan sangat menghalangi susutan pastanya, sehingga retakan-retakan kecil pasta di sekitar agregat lebih mudah terjadi. Kedua

hal terakhir ini mengakibatkan kuat tekan beton rendah. Dengan alasan terakhir inilah maka pada beton kuat tekan tinggi dianjurkan memakai agregat dengan ukuran besar butir maksimum 20 mm.

7.3. PERANCANGAN MENURUT "ROAD NOTE NO.4"

Cara perancangan adukan beton menurut "Road Note No.4." disimpulkan atas penelitian Glanville dkk. yang ditekankan pada pengaruh gradasi agregat terhadap kemudahan pengerjaan adukan beton.

Secara berurutan langkah-langkah perancangan menurut cara "Road Note No.4" ini ialah sebagai berikut :

- (1) Dihitung kuat tekan rata-rata beton yang akan dibuat, berdasarkan kuat tekan yang disyaratkan dalam buku Rencana Kerja dan Syarat (Bestek), f_c (dalam PBI-1971 disebut kuat tekan karakteristik, misalnya K-175, K-225, K-350) dan nilai banding antara kuat tekan yang disyaratkan dan kuat tekan rata-rata, yang tergantung pada cara pelaksanaan pengukuran bahan, tingkat kesempurnaan gradasi agregat, cara pengukuran kandungan air pada agregat-nya, dan tingkat pengawasannya. Nilai banding tersebut dapat dilihat pada Tabel 7.1.

Tabel 7.1. Perkiraan nilai banding antara kuat tekan beton yang disyaratkan dan kuat tekan beton rata-rata.

Keadaan Pelaksanaan Pencampuran	Nilai banding
Bahan-bahan ditimbang dan diperiksa dengan cermat, gradasi agregat dibuat baik dengan mencampurkan agregat fraksi demi fraksi, kandungan air dalam agregat selalu diperiksa, pengawasan dilakukan terus-menerus.	0,75
Bahan-bahan ditimbang dan diperiksa secukupnya, gradasi agregat dibuat berdasarkan kerikil dan pasir yang tersedia, kandungan air dalam agregat diperiksa secara kasar, pengawasan dilakukan secara berkala.	0,60
Bahan-bahan dicampurkan dengan perbandingan volume dan gradasi agregat seadanya, tidak dilakukan pengawasan.	0,40

- (2) Ditetapkan faktor air-semen berdasarkan kuat tekan rata-rata beton yang akan dibuat pada umur yang dikehendaki dan jenis semen yang dipakai (lihat Gb.7.8.).
- (3) Dibuat proporsi agregat dari masing-masing fraksi (perbandingan pasir dan kerikil dengan cara yang diuraikan dalam sub-bab 3.8.) sehingga berimpit dengan salah satu kurva yang terdapat dalam Gb.3.3. sampai dengan Gb.3.6.

- (4) Tetapkan proporsi berat antara agregat dan semen, berdasarkan ukuran maksimum agregat, nilai slam, gradasi agregat, bentuk agregat, dan faktor air-semen, dengan Tabel 7.2. atau Tabel 7.3.

Tabel 7.2. Proporsi berat agregat-semen untuk agregat kasar berupa kerikil

Ukuran maksimum (mm)	Faktor air-semen	Slam 50-100 mm				Slam 100-180 mm			
		Nomor kurva gradasi campuran							
		1	2	3	4	1	2	3	4
40	0.35	3,4	3,1	2,9	2,7	---	---	---	---
	0.40	4,7	4,6	4,3	3,8	4,1	4,0	3,9	3,5
	0.45	6,0	6,1	5,7	5,0	5,2	5,3	5,0	4,6
	0.50	7,5	7,6	7,1	6,3	6,3	6,5	6,2	5,7
	0.55	---	8,9	8,1	7,3	---	7,7	7,4	6,7
20	0.35	3,1	3,0	2,8	2,7	2,8	2,8	2,6	2,5
	0.40	4,2	4,2	3,9	3,7	3,6	3,7	3,5	3,3
	0.45	5,3	5,3	5,0	4,5	4,6	4,8	4,5	4,1
	0.50	6,3	6,3	5,9	5,4	5,5	5,7	5,3	4,8
	0.55	7,3	7,3	7,4	6,4	6,3	6,5	6,1	5,5
0.60	---	---	8,0	7,2	---	7,2	6,8	6,1	

Tabel 7.3. Proporsi berat agregat-semen untuk agregat kasar berupa batu pecah

Ukuran maksimum (mm)	Faktor air-semen	Slam 50-100 mm				Slam 100-180 mm			
		Nomor kurva gradasi campuran							
		1	2	3	4	1	2	3	4
40	0,40	3,3	3,3	3,2	3,0	3,1	3,1	2,9	2,7
	0,45	4,1	4,1	3,9	3,8	3,9	3,8	3,7	3,4
	0,50	4,8	4,8	4,7	4,6	4,6	4,5	4,5	4,2
	0,55	5,5	5,5	5,4	5,3	---	5,2	5,2	4,8
	0,60	6,2	6,2	6,1	6,0	---	---	5,9	5,6
	0,65	---	6,9	6,8	6,6	---	---	6,5	6,2
20	0,35	2,4	2,4	2,3	2,2	2,2	2,3	2,1	2,1
	0,40	3,1	3,0	2,9	2,7	2,9	2,9	2,8	2,6
	0,45	3,7	3,5	3,4	3,3	3,5	3,5	3,2	3,1
	0,50	4,2	4,1	3,9	3,8	---	3,9	3,8	3,5
	0,55	4,7	4,6	4,5	4,3	---	---	4,3	4,0
	0,60	---	5,2	4,9	4,8	---	---	4,7	4,4
	0,65	---	5,7	5,4	5,2	---	---	5,1	4,9
0,70	---	6,2	5,8	5,7	---	---	5,5	5,3	

- (5) Dihitung proporsi berat antara semen, air, dan agregat dengan dasar faktor air-semen dan proporsi antara agregat-semen yang diperoleh masing-masing dari langkah (2) dan (4).

- (6) Kebutuhan bahan dasar tiap meter kubik beton dihitung berdasarkan volume absolut, yaitu dengan berat jenis butir semen dan berat jenis agregat. Prinsip dari hitungan ini ialah bahwa volume beton padat adalah sama dengan jumlah dari absolut volume bahan-bahan dasarnya. Rumus yang dipakai ialah :

$$\frac{S}{Y_s \cdot Y_{air}} + \frac{P_{psr} \cdot S}{Y_{psr} \cdot Y_{air}} + \frac{P_{krk} \cdot S}{Y_{krk} \cdot Y_{air}} + \frac{A \cdot S}{Y_{air}} + 0.01 \cdot v = 1m^3$$

dengan :

- Y_s = berat jenis semen
 - Y_{psr} = berat jenis pasir
 - Y_{krk} = berat jenis kerikil
 - v = persentase udara dalam beton
 - Y_{air} = berat jenis air
 - S = berat semen diperlukan untuk 1 m³ beton, ton.
- dan perbandingan berat dari bahannya adalah :
- Semen : pasir : kerikil : air = 1 : P_{psr} : P_{krk} : A

Perhitungan dimulai dengan mengisikan semua faktor-faktor ke dalam rumus tersebut sampai hanya tinggal faktor S saja yang tersisa, sehingga nilai S dapat dihitung. Selanjutnya, jumlah air, pasir, dan kerikil kemudian dihitung berdasarkan jumlah berat semen yang diperlukan. Sebagai kontrol, maka berat keempat bahan tersebut dijumlahkan menjadi berat beton per meter kubik, dan hasilnya jika hitungannya betul sekitar 2300 kg sampai 2400 kg.

CONTOH :

Hitunglah perbandingan berat bahan-bahan betonnya, serta kebutuhan pemadatan per meter kubik beton jika ditetapkan ketentuan sebagai berikut :

- Tegak tekan yang disyaratkan $f'_c = 20$ MPa.
- Jenis semen adalah semen biasa, jenis I
- Agregat kasar berupa kerikil, ukuran maksimum 40 mm.
- Perbandingan berat pasir : kerikil = 40 % : 60 %
- Gradasi campuran yang diperoleh sesuai dengan kurva 2
- Batu pekerjaan cukup.
- Slam yang diinginkan sekitar 100 mm.
- berat jenis semen = 3,15
- berat jenis pasir = 2,6
- berat jenis kerikil = 2,6
- Volume pori = 1 %

Penyelesaian :

- (1) Nilai banding antara kuat tekan yang disyaratkan dan kuat tekan rata-rata (dari Tabel 7.1.) adalah 0,60.
Kuat tekan beton rata-rata :
 $f'_{c,r} = 20 / 0,60$
 $= 33,3 \text{ MPa}$
- (2) Dari Gb. 7.8. dengan data $f'_{c,r} = 33,3 \text{ MPa}$ pada umur 28 hari dan semen biasa, diperoleh nilai faktor air-semen :
 $f.a.s. = 0,47$
- (3) Proporsi berat pasir dan kerikil (diketahui) sebesar 40 % dan 60 % serta gradasinya sesuai dengan kurva nomor 2.
- (4) Berdasarkan ukuran maksimum agregat 40 mm, nilai slam 100 mm, gradasi agregat nomor 2, agregat kasar berupa kerikil, dan faktor air semen 0.47 maka dengan Tabel 7.2. diperoleh proporsi berat agregat-semen (A/C).
Dalam hal ini, karena slamnya ditetapkan 100 mm maka diambil dari dua kolom dalam Tabel 7.2.
Kolom slam 50-100 mm diperoleh A/C = 6,7
Kolom slam 100-180 mm diperoleh A/C = 5,78
Diperkirakan nilai A/C = $(6,7 + 5,78) : 2 = 6,24$
- (5) Dihitung proporsi berat bahan dengan dasar berat semen = 1.0
 $A = 0,47$
 $S = 1,0$
 $P_{psr} = 0,40 \times 6,24 = 2,5$
 $P_{krk} = 0,60 \times 6,24 = 3,74$
- (6) Kebutuhan berat bahan-bahan untuk tiap meter kubik beton dihitung dengan rumus :

$$\frac{S}{Y_s \cdot Y_{air}} + \frac{P_{psr} \cdot S}{Y_{psr} \cdot Y_{air}} + \frac{P_{krk} \cdot S}{Y_{krk} \cdot Y_{air}} + \frac{A \cdot S}{Y_{air}} + 0,01 \cdot v = 1 \text{ m}^3$$

$$\frac{S}{3,15 \cdot 1} + \frac{2,5 \cdot S}{2,6 \cdot 1} + \frac{3,74 \cdot S}{2,6 \cdot 1} + \frac{0,47 \cdot S}{1} + 0,01 \cdot 1 = 1 \text{ m}^3$$

$S = 0,310 \text{ ton}$

Kebutuhan semen = 311 kg

Kebutuhan air = $0,47 \times 311 = 146 \text{ liter}$

Kebutuhan pasir = $2,5 \times 311 = 777 \text{ kg}$

Kebutuhan kerikil = $3,74 \times 311 = 1163 \text{ kg}$

Kontrol : Berat beton = $311 + 146 + 777 + 1163 = 2397 \text{ kg/m}^3$

Cara "Road Note No.4." ini memiliki kekurangan, antara lain :

- (1) Gradasi agregat yang tersedia pada langkah (3) ada empat kurva, pada kenyataannya di lapangan amat sulit menepatkan antara gradasi agregat yang dipakai dengan salah satu dari kurva yang tersedia tersebut.
- (2) Agregat yang dipakai untuk membuat Tabel 7.2. dan Tabel 7.3. terdiri dari agregat dengan berat jenis yang berbeda-beda, dari 2,5 sampai 2,7 sehingga mungkin perlu sedikit koreksi jika berat jenisnya tidak sama.

7.4. PERANCANGAN MENURUT "AMERICAN CONCRETE INSTITUTE"

The American Concrete Institute (ACI) menyarankan suatu cara perancangan campuran yang memperhatikan nilai ekonomi, bahan yang tersedia, kemudahan pengerjaan, keawetan, serta kekuatan yang diinginkan. Cara ACI ini melihat kenyataan bahwa pada ukuran maksimum agregat tertentu, jumlah air per meter kubik adukan menentukan tingkat konsistensi/kekentalan (slump) adukan itu.

Secara garis besar, urutan langkah perancangan menurut ACI ialah sebagai berikut :

- (1) Hitung kuat tekan rata-rata beton, berdasarkan kuat tekan yang disyaratkan (dulu disebut kuat tekan karakteristik) dan nilai margin yang tergantung tingkat pengawasan mutunya. Nilai margin ialah :

$$m = 1,64 \cdot s_d$$

dengan s_d ialah nilai deviasi standar yang diambilkan dari Tabel 7.4. Kuat tekan rata-rata dihitung dari kuat tekan yang disyaratkan ditambah margin :

$$f'_{c,r} = f'_c + m$$

dengan : $f'_{c,r}$ = kuat tekan rata-rata, MPa

f'_c = kuat tekan yang disyaratkan, MPa

m = nilai margin, MPa

Tabel 7.4. Nilai deviasi standar (kg/cm^2)

Volume Pekerjaan	Mutu pelaksanaan			
	m3	baik sekali	baik	cukup
kecil	< 1000	$45 < s \leq 55$	$55 < s \leq 65$	$65 < s \leq 85$
sedang	1000 - 3000	$35 < s \leq 45$	$45 < s \leq 55$	$55 < s \leq 75$
besar	> 3000	$25 < s \leq 35$	$35 < s \leq 45$	$45 < s \leq 65$

- (2) Tetapkan faktor air-semen berdasarkan kuat tekan rata-rata pada umur yang dikehendaki (lihat Tabel 7.5.) dan keawetannya (berdasarkan jenis struktur dan kondisi lingkungan ; lihat Tabel 7.6.). Dari dua hasil dipilih yang paling rendah.
- (3) Berdasarkan jenis strukturnya, tetapkan nilai slam dan ukuran maksimum agregatnya (dari Tabel 7.7. dan 7.8.).

Penyelesaian :

- (1) Nilai banding antara kuat tekan yang disyaratkan dan kuat tekan rata-rata (dari Tabel 7.1.) adalah 0,60.
Kuat tekan beton rata-rata :
 $f'_{cr} = 20 / 0,60 = 33,3 \text{ MPa}$
- (2) Dari Gb.7.8. dengan data $f'_{cr} = 33,3 \text{ MPa}$ pada umur 28 hari dan semen biasa, diperoleh nilai faktor air-semen :
 $f.a.s. = 0,47$
- (3) Proporsi berat pasir dan kerikil (diketahui) sebesar 40 % dan 60 % serta gradasinya sesuai dengan kurva nomor 2.
- (4) Berdasarkan ukuran maksimum agregat 40 mm, nilai slam 100 mm, gradasi agregat nomor 2, agregat kasar berupa kerikil, dan faktor air semen 0,47 maka dengan Tabel 7.2. diperoleh proporsi berat agregat-semen (A/C).
Dalam hal ini, karena slamnya ditetapkan 100 mm maka diambil dari dua kolom dalam Tabel 7.2.
Kolom slam 50-100 mm diperoleh A/C = 6,7
Kolom salm 100-180 mm diperoleh A/C = 5,78
Diperkirakan nilai A/C = $(6,7 + 5,78) : 2 = 6,24$
- (5) Dihitung proporsi berat bahan dengan dasar berat semen = 1,0
 $A = 0,47$
 $S = 1,0$
 $P_{psr} = 0,40 \times 6,24 = 2,5$
 $P_{krk} = 0,60 \times 6,24 = 3,74$
- (6) Kebutuhan berat bahan-bahan untuk tiap meter kubik beton dihitung dengan rumus :

$$\frac{S}{Y_s \cdot Y_{air}} + \frac{P_{psr} \cdot S}{Y_{psr} \cdot Y_{air}} + \frac{P_{krk} \cdot S}{Y_{krk} \cdot Y_{air}} + \frac{A \cdot S}{Y_{air}} + 0,01 \cdot v = 1 \text{ m}^3$$

$$\frac{S}{3,15 \cdot 1} + \frac{2,5 \cdot S}{2,6 \cdot 1} + \frac{3,74 \cdot S}{2,6 \cdot 1} + \frac{0,47 \cdot S}{1} + 0,01 \cdot 1 = 1 \text{ m}^3$$

$S = 0,310 \text{ ton}$
Kebutuhan semen = 311 kg
Kebutuhan air = $0,47 \times 311 = 146 \text{ liter}$
Kebutuhan pasir = $2,5 \times 311 = 777 \text{ kg}$
Kebutuhan kerikil = $3,74 \times 311 = 1163 \text{ kg}$
Kontrol : Berat beton = $311 + 146 + 777 + 1163 = 2397 \text{ kg/m}^3$.

Cara "Road Note No.4." ini memiliki kekurangan, antara lain :

- (1) Gradasi agregat yang tersedia pada langkah (3) ada empat kurva, pada kenyataannya di lapangan amat sulit menepatkan antara gradasi agregat yang dipakai dengan salah satu dari kurva yang tersedia tersebut.
- (2) Agregat yang dipakai untuk membuat Tabel 7.2. dan Tabel 7.3. terdiri dari agregat dengan berat jenis yang berbeda-beda, dari 2,5 sampai 2,7 sehingga mungkin perlu sedikit koreksi jika berat jenisnya tidak sama.

7.4. PERANCANGAN MENURUT "AMERICAN CONCRETE INSTITUTE"

The American Concrete Institute (ACI) menyarankan suatu cara perancangan campuran yang memperhatikan nilai ekonomi, bahan yang tersedia, kemudahan pengerjaan, keawetan, serta kekuatan yang diinginkan. Cara ACI ini melihat kenyataan bahwa pada ukuran maksimum agregat tertentu, jumlah air per meter kubik adukan menentukan tingkat konsistensi/kekentalan (slump) adukan itu.

Secara garis besar, urutan langkah perancangan menurut ACI ialah sebagai berikut :

- (1) Hitung kuat tekan rata-rata beton, berdasarkan kuat tekan yang disyaratkan (dulu disebut kuat tekan karakteristik) dan nilai margin yang tergantung tingkat pengawasan mutunya. Nilai margin ialah :

$$m = 1,64 \cdot s_d$$

dengan s_d ialah nilai deviasi standar yang diambilkan dari Tabel 7.4. Kuat tekan rata-rata dihitung dari kuat tekan yang disyaratkan ditambah margin :

$$f'_{cr} = f'_c + m$$

dengan : f'_{cr} = kuat tekan rata-rata, MPa
 f'_c = kuat tekan yang disyaratkan, MPa
 m = nilai margin, MPa

Tabel 7.4. Nilai deviasi standar (kg/cm^2)

Volume Pekerjaan	m ³	Mutu pelaksanaan		
		baik sekali	baik	cukup
kecil	< 1000	45 < s <= 55	55 < s <= 65	65 < s <= 85
sedang	1000 - 3000	35 < s <= 45	45 < s <= 55	55 < s <= 75
besar	> 3000	25 < s <= 35	35 < s <= 45	45 < s <= 65

- (2) Tetapkan faktor air-semen berdasarkan kuat tekan rata-rata pada umur yang dikehendaki (lihat Tabel 7.5.) dan keawetannya (berdasarkan jenis struktur dan kondisi lingkungan ; lihat Tabel 7.6.). Dari dua hasil dipilih yang paling rendah.
- (3) Berdasarkan jenis strukturnya, tetapkan nilai slam dan ukuran maksimum agregatnya (dari Tabel 7.7. dan 7.8.).

Tabel 7.5. Hubungan faktor air-semen dan kuat tekan rata-rata silinder beton pada umur 28 hari.

Faktor air-semen	Perkiraan kuat tekan rata-rata (MPa)
0,35	42
0,44	35
0,53	28
0,62	22,4
0,71	17,5
0,80	14

Tabel 7.6. Faktor Air Semen Maksimum

Beton di dalam ruang bangunan :	
a. Keadaan keliling non-korosif	0,60
b. Keadaan keliling korosif, disebabkan oleh kondensasi atau uap korosif	0,52
Beton di luar ruang bangunan :	
a. Tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	0,60
b. Terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	0,60
Beton yang masuk ke dalam tanah :	
a. Mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti	0,55
b. Mendapat pengaruh sulfat alkali dari tanah atau air tanah	0,52
Beton yang kontinu berhubungan dengan air :	
a. air tawar	0,57
b. air laut	0,52

Tabel 7.7. Nilai slam (cm)

	Maks	Min
Pemakaian beton		
Dinding, plat fondasi dan fondasi telapak bertulang	12,5	5,0
Fondasi telapak tidak bertulang, laison, dan struktur di bawah tanah	9,0	2,5
Pelat, balok, kolom dan dinding	15,0	7,5
Pengerasan jalan	7,5	5,0
Pembetonan masal	7,5	2,5

Tabel 7.8. Ukuran maksimum agregat, (mm)

Dimensi minimum, mm	Balok/kolom	Plat
62,5	12,5	20
150	40	40
300	40	80
750	80	80

Tabel 7.9. Perkiraan kebutuhan air berdasarkan nilai slam dan ukuran maksimum agregat, (liter)

Slam, mm	Ukuran maksimum agregat, mm		
	10	20	40
25 - 50	206	182	162
75 - 100	226	203	177
150 - 175	240	212	188
Udara terperangkap	3%	2%	1%

- (4) Tetapkan jumlah air yang diperlukan, berdasarkan ukuran maksimum agregat dan nilai slam yang diinginkan (lihat Tabel 7.9.).
- (5) Hitung semen yang diperlukan, berdasarkan hasil langkah (2) dan (4) di atas.
- (6) Tetapkan volume agregat kasar yang diperlukan per meter kubik beton, berdasarkan ukuran maksimum agregat dan nilai modulus kehalusan agregat halus (lihat Tabel 7.10.).
- (7) Hitung volume agregat halus yang diperlukan, berdasarkan jumlah air, semen, dan agregat kasar yang diperlukan, serta udara yang terperangkap dalam adukan (dari Tabel 7.9.), dengan cara hitungan volume absolut.

Tabel 7.10. Perkiraan kebutuhan agregat kasar per meter kubik beton, berdasarkan ukuran maksimum agregat dan modulus halus pasirnya, dalam m³

Ukuran maksimum agregat, mm	Modulus halus butir pasir			
	2,4	2,6	2,8	3,0
10	0,46	0,44	0,42	0,40
20	0,65	0,63	0,61	0,59
40	0,76	0,74	0,72	0,70
80	0,84	0,82	0,80	0,78
150	0,90	0,88	0,86	0,84

CONTOH :

Rencanakanlah campuran adukan beton dengan cara ACI jika diketahui sebagai berikut.

- Kuat tekan beton yang disyaratkan $f'_c = 20$ MPa
- Volume pekerjaan sedang dan mutu pekerjaan cukup.
- Beton di dalam ruangan dengan keadaan sekeliling non-korosif
- Jenis struktur adalah balok dan kolom gedung.
- Ukuran maksimum kerikil 40 mm.
- Berat satuan kerikil = 1,60
- Berat jenis kerikil = 2,6
- Berat jenis pasir = 2,6
- Modulus halus butir pasir (mhb) = 2,80

PENYELESAIAN :

- (1) Dihitung deviasi standar dari Tabel 7.4. Dengan data volume pekerjaan sedang dan mutu pekerjaan cukup diperoleh :
 - $S_d = 6,5$ MPa
 - $m = 1,64 S_d$
 - $= 10,7$ MPa
 - $f'_{c,r} = f'_c + 1,64 S_d$
 - $= 20 + 10,7$
 - $= 30,7$ MPa
- (2) Dihitung nilai faktor air-semen dengan Tabel 7.5. Dari interpolasi diperoleh :
 - $fas = 0,495$
 - Dari Tabel 7.6. diperoleh fas maksimum 0,60 sehingga nilai faktor air-semen tetap :
 - $fas = 0,495$
- (3) Nilai slam diperoleh dari Tabel 7.7. Pada tabel tersebut untuk jenis struktur balok dan kolom disarankan nilai slamnya adalah :
 - $slam = 75$ mm - 150 mm
 - Ukuran maksimum kerikil sudah ditetapkan 40 mm, sehingga tidak perlu melihat Tabel 7.8. Namun perlu diperhatikan bahwa dimensi kolom/balok berdasarkan tabel tersebut tidak boleh kurang dari 150 mm.

- (4) Ditetapkan jumlah air yang diperlukan per meter kubik beton dengan Tabel 7.9. Berdasarkan nilai slam 75 - 150 mm dan ukuran maksimum kerikil 40 mm maka diperoleh kebutuhan air per meter kubik beton sebesar 177 liter atau 0,177 m³.
- (5) Dihitung jumlah semen yang diperlukan per meter kubik beton dengan rumus

$$W_s = A / fas$$

$$= 0,177 / 0,495$$

$$= 0,358 \text{ ton}$$

- (6) Dihitung volume kerikil dengan Tabel 7.10. Berdasarkan ukuran maksimum kerikil 40 mm dan modulus halus butir pasir 2,80 maka diperoleh kebutuhan volume kerikil 0,72 m³.

Dengan berat satuan kerikil 1,60 maka :

$$\text{Berat kerikil } W_k = 1,60 \times 0,72 = 1,152 \text{ ton.}$$

- (7) Jumlah volume absolut air, semen, kerikil, dan udara adalah:
 - $V_a + V_s + V_k + V_u = 0,177 + (0,358/3,15) + (1,152/2,6) + 0,01$
 - $= 0,177 + 0,11365 + 0,44308 + 0,01$
 - $= 0,74373 \text{ m}^3$

Volume absolut pasir :

$$V_p = 1 - 0,74373$$

$$= 0,25627 \text{ m}^3$$

$$\text{Berat pasir} = 0,25627 \times 2,6$$

$$= 0,6663 \text{ ton}$$

- (8) Kontrol hitungan, dengan cara menghitung berat 1 m³ beton, yaitu berat total air, semen, kerikil, dan pasir :

$$\text{Berat beton} = W_a + W_s + W_k + W_p$$

$$= 0,177 + 0,358 + 1,152 + 0,6663$$

$$= 2,3533 \text{ ton.}$$

Diperkirakan betul, karena berat beton sekitar 2300 kg/m³.

Cara ACI ini memiliki keterbatasan/kekurangan, antara lain:

- (1) Cara ACI ini didasarkan atas penelitian eksperimental untuk memperoleh proporsi bahan yang akan menghasilkan berbagai konsistensi. Agregat yang dipakai mempunyai bentuk dan gradasi yang memenuhi spesifikasi, sehingga bila agregat yang dipakai tidak sesuai akan diperoleh konsistensi yang berbeda.
- (2) Nilai modulus kehalusan agregat halus sebenarnya kurang menggambarkan gradasi agregat yang tepat, sehingga jumlah volume agregat kasar yang diperoleh pada langkah (6) kurang tepat.
- (3) Langkah (6) tersebut juga berdasarkan berat jenis butir agregat 2,68 sehingga perlu koreksi bila dipakai berat jenis butir agregat yang lain.

7.5. PERANCANGAN MENURUT CARA INGGRIS

Perancangan adukan beton cara Inggris ("The British Mix Design Method") ini tercantum dalam "Design of Normal Concrete Mixes" telah menggantikan cara "Road Note No.4." sejak tahun 1975. Di Indonesia cara ini dikenal dengan cara DOE ("Department of Environment). Perencanaan dengan cara DOE ini dipakai sebagai standar perencanaan oleh Departemen Pekerjaan Umum di Indonesia, dan

dimuat dalam buku Standar No.SK.SNI.T-15-1990-03 dengan judul bukunya : "Tata cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal". Dalam perencanaan cara ini digunakan tabel-tabel dan grafik-grafik.

Langkah-langkah pokok cara ini ialah :

(1). Penetapan kuat tekan beton yang disyaratkan (f_c') pada umur tertentu.
Kuat tekan beton yang disyaratkan ditetapkan sesuai dengan persyaratan perencanaan strukturnya dan kondisi setempat. Di Indonesia, yang dimaksudkan dengan kuat tekan beton yang disyaratkan ialah kuat tekan beton dengan kemungkinan lebih rendah dari nilai itu hanya sebesar 5% saja.

(2). Penetapan nilai deviasi standar (s).
Deviasi standar ditetapkan berdasarkan tingkat mutu pengendalian pelaksanaan pencampuran betonnya. Makin baik mutu pelaksanaan makin kecil nilai deviasi standarnya. Penetapan nilai deviasi standar s ini berdasarkan pada hasil pengalaman praktek pelaksana pada waktu yang lalu, untuk pembuatan beton mutu yang sama dan menggunakan bahan dasar yang sama pula.

(a) Jika pelaksana mempunyai catatan data hasil pembuatan beton serupa pada masa yang lalu, maka persyaratannya (selain yang tersebut di atas) jumlah data hasil uji minimum 30 buah. (Satu data hasil uji kuat tekan adalah hasil rata-rata dari uji tekan dua silinder yang dibuat dari contoh beton yang sama dan diuji pada umur 28 hari atau umur pengujian lain yang ditetapkan). Jika jumlah data hasil uji kurang dari 30 buah maka dilakukan koreksi terhadap nilai deviasi standar dengan suatu faktor pengali, seperti tampak pada tabel berikut.

Faktor pengali deviasi standar

Jumlah data	: 30	25	20	15	< 15
Faktor pengali	: 1,0	1,03	1,08	1,16	tidak boleh

*) Untuk nilai antara dipakai interpolasi.

(b) Jika pelaksana tidak mempunyai catatan/pengalaman hasil pengujian beton pada masa lalu yang memenuhi persyaratan tersebut (termasuk data hasil uji kurang dari 15 buah), maka nilai margin langsung diambil sebesar 12 MPa. (lihat langkah (3)).

Untuk memberikan gambaran bagaimana cara menilai tingkat pengendalian mutu pekerjaan beton, di sini diberikan pedoman dengan melihat tabel berikut.

Nilai deviasi standar untuk berbagai tingkat pengendalian mutu pekerjaan

Tingkat pengendalian mutu pekerjaan	s_d (MPa)
Memuaskan	2,8
Sangat baik	3,5
Baik	4,2
Cukup	5,6
Jelek	7,0
Tanpa kendali	8,4

(3). Penghitungan nilai tambah ("margin"), (M).
Jika nilai tambah ini sudah ditetapkan sebesar 12 MPa maka langsung ke langkah (4).
Jika nilai tambah dihitung berdasarkan nilai deviasi standar s_d maka dilakukan dengan rumus berikut :

$$M = k \cdot s_d$$

dengan : M = nilai tambah, MPa
 $k = 1,64$
 s_d = deviasi standar, MPa

(4). Menetapkan kuat tekan rata-rata yang direncanakan.
Kuat tekan beton rata-rata yang direncanakan diperoleh dengan rumus :

$$f_{cr}' = f_c' + M$$

dengan : f_{cr}' = kuat tekan rata-rata, MPa
 f_c' = kuat tekan yang disyaratkan, MPa
 M = nilai tambah, MPa

(5). Penetapan jenis semen Portland.
Menurut PUI 1982 di Indonesia semen Portland dibedakan menjadi 5 jenis, yaitu jenis I, II, III, IV dan V. Jenis I merupakan jenis semen biasa, adapun jenis III merupakan jenis semen yang dipakai untuk struktur yang menuntut persyaratan kekuatan awal yang tinggi, atau dengan kata lain sering disebut semen cepat mengeras.

Pada langkah ini ditetapkan apakah dipakai semen biasa ataukah semen yang cepat mengeras.

(6). Penetapan jenis agregat
Jenis kerikil dan pasir ditetapkan, apakah berupa agregat alami (tak dipecahkan) ataukah agregat jenis batu pecah (crushed aggregate).

(7). Tetapkan faktor air-semen dengan salah satu dari dua cara berikut :
(a) Cara pertama Berdasarkan jenis semen yang dipakai dan kuat tekan rata-rata silinder beton yang direncanakan pada umur tertentu, ditetapkan nilai faktor air-semen dengan melihat Gb.7.8.,

(b) Cara kedua Berdasarkan jenis semen yang dipakai, jenis agregat kasar, dan kuat tekan rata-rata yang direncanakan pada umur tertentu, ditetapkan nilai faktor air-semen dengan Tabel 7.11. dan Gb.7.9. Langkah penetapannya dilakukan dengan cara sebagai berikut ini.

1. Lihat tabel 7.11. Dengan data jenis semen, jenis agregat kasar, dan umur beton yang dikehendaki, dibaca perkiraan kuat tekan silinder beton yang akan diperoleh jika dipakai faktor air-semen 0,50. jenis kerikil maupun umur beton yang direncanakan, maka dapat diperoleh kuat tekan beton seandainya dipakai fas 0,50.
2. Lihat Gb.7.9. Lukislah titik A pada Gb.7.9. dengan nilai fas 0,50 (sebagai absis) dan kuat tekan beton yang diperoleh dari Tabel 7.11. (sebagai ordinat). Pada titik A tersebut kemudian dibuat grafik baru yang bentuknya sama dengan 2 grafik yang sudah ada di dekatnya. Selanjutnya ditarik garis mendatar dari sumbu tegak di kiri pada kuat tekan rata-rata yang dikehendaki sampai memotong grafik baru tersebut. Dari titik potong itu kemudian ditarik garis ke bawah sampai memotong sumbu mendatar dan dapatlah dibaca nilai faktor air-semen yang dicari.

(8) Penetapan faktor air-semen maksimum.

Agar beton yang diperoleh tidak cepat rusak misalnya, maka perlu ditetapkan nilai faktor air-semen maksimum. Penetapan nilai faktor air-semen maksimum dilakukan dengan Tabel 7.12.

Jika nilai fas maksimum ini lebih rendah daripada nilai fas dari langkah (7), maka nilai fas maksimum ini yang dipakai untuk perhitungan selanjutnya.

Tabel 7.11. Perkiraan Kuat tekan Beton (MPa) dengan Faktor Air Semen 0,50

Jenis semen	Jenis agregat kasar	Umur (hari)			
		3	7	28	91
I, II, III	Alami	17	23	33	40
	Batu pecah	19	27	37	45
III	Alami	21	28	38	44
	Batu pecah	25	33	44	48

Tabel 7.12. Persyaratan faktor air-semen maksimum untuk berbagai pembeconan dan lingkungan khusus

Jenis pembeconan	Fas maksimum
Beton di dalam ruang bangunan :	
a. keadaan keliling non-korosif	0,60
b. keadaan keliling korosif, disebabkan oleh kondensasi atau uap korosi	0,52
Beton di luar ruang bangunan :	
a. Tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	0,55
b. terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	0,60
Beton yang masuk ke dalam tanah :	
a. mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti	0,55
b. mendapat pengaruh sulfat dan alkali dari tanah	lihat tabel 7.12.a.
Beton yang selalu berhubungan dengan air tawar / payau / laut	lihat tabel 7.12.b.

Tabel 7.12.a. Faktor air-semen maksimum untuk beton yang berhubungan dengan air tanah yang mengandung sulfat

Konsentrasi sulfat (SO ₃) Dalam tanah		SO ₃ dalam air tanah (gr/ltr)	Jenis semen	fas maks
Total SO ₃ %	SO ₃ dalam campuran air : tanah = 2 : 1 (gr/ltr)			
< 0,2	< 1,0	< 0,3	Tipe I dengan atau tanpa Pozolan (15 - 40 %)	0,50
0,2 - 0,5	1,0 - 1,9	0,3 - 1,2	Tipe I tanpa Pozolan	0,50
			Tipe I dengan Pozolan (15 - 40 %) atau Semen portland pozolan	0,55
0,5 - 1,0	1,9 - 3,1	1,2 - 2,5	Tipe II atau V	0,55
			Tipe I dengan Pozolan (15 - 40%) atau Semen port- land pozolon	0,45
1,0 - 2,0	3,1 - 5,6	2,5 - 5,0	Tipe II atau V	0,45
> 2,0	> 5,6	> 5,0	Tipe II atau V dan lapisan pelindung	0,45

Tabel 7.12.b. Faktor air-semen untuk beton bertulang dalam air

Berhubungan dengan :	Tipe semen	Faktor air-semen
air tawar	Semua tipe I - V	0,50
air payau	Tipe I + Pozolan (15 - 40 %) atau S.P. Pozolan	0,45
	Tipe II atau V	0,50
air laut	Tipe II atau V	0,45

- 9) Penetapan nilai slam.
 Penetapan nilai slam dilakukan dengan memperhatikan pelaksanaan pembuatan, pengangkutan, penuangan, pemadatan maupun jenis strukturnya. Cara pengangkutan adukan beton dengan aliran dalam pipa yang dipompa dengan tekanan membutuhkan nilai slam yang besar, adapun pemadatan adukan dengan alat getar (*triller*) dapat dilakukan dengan nilai slam yang agak kecil. Nilai slam yang diinginkan dapat diperoleh dari Tabel 7.13.

Tabel 7.13. Penetapan nilai slam (cm)

Pemakaian beton	Maks	Min
Dinding, plat fondasi dan fondasi telapak bertulang	12,5	5,0
Fondasi telapak tidak bertulang, kaison, dan struktur di bawah tanah	9,0	2,5
Pelat, balok, kolom dan dinding	15,0	7,5
Pengerasan jalan	7,5	5,0
Pembetonan masal	7,5	2,5

- (10) Penetapan besar butir agregat maksimum.
 Penetapan besar butir agregat maksimum dilakukan berdasarkan nilai terkecil dari ketentuan-ketentuan berikut :
- Tiga per empat kali jarak bersih minimum antar baja tulangan, atau berkas baja tulangan, atau tendon prategang atau selongsong.
 - Sepertiga kali tebal plat.
 - Sepertima jarak terkecil antara bidang samping dari cetakan.

(11) Tetapkan jumlah air yang diperlukan per meter kubik beton, berdasarkan ukuran maksimum agregat, jenis agregat, dan slam yang diinginkan, lihat Tabel 7.14.

Tabel 7.14. Perkiraan Kebutuhan Air Per Meter Kubik Beton (liter)

Besarnya ukuran maks. kerikil (mm)	Jenis batuan	Slam (mm)			
		0 - 10	10 - 30	30 - 60	60 - 180
10	Alami	150	180	205	225
	Batu pecah	180	205	230	250
20	Alami	135	160	180	195
	Batu pecah	170	190	210	225
40	Alami	115	140	160	175
	Batu pecah	155	175	190	205

Dalam Tabel 7.14., apabila agregat halus dan agregat kasar yang dipakai dari jenis yang berbeda (alami dan pecahan), maka jumlah air yang diperkirakan diperbaiki dengan rumus :

$$A = 0,67 A_h + 0,33 A_k$$

dengan : A = jumlah air yang dibutuhkan, liter/m³

A_h = jumlah air yang dibutuhkan menurut jenis agregat halus

A_k = jumlah air yang dibutuhkan menurut jenis agregat kasarnya

(12) Hitung berat semen yang diperlukan.

Berat semen per meter kubik beton dihitung dengan membagi jumlah air (dari langkah (11)) dengan faktor air-semen yang diperoleh pada langkah (7) dan (8).

(13) Kebutuhan semen minimum.

Kebutuhan semen minimum ditetapkan dengan Tabel 7.15.

Kebutuhan semen minimum ini ditetapkan untuk menghindari beton dari kerusakan akibat lingkungan khusus, misalnya lingkungan korosif, air payau, air laut.

Tabel 7.15. Kebutuhan semen minimum untuk berbagai pembetonan dan lingkungan khusus

Jenis pembetonan	Semen minimum (kg/m ³ beton)
Beton di dalam ruang bangunan :	
a. keadaan keliling non-korosif	275
b. keadaan keliling korosif, disebabkan oleh kondensasi atau uap korosif	325
Beton di luar ruang bangunan :	
a. tidak terlindung dari hujanan terik matahari langsung	325
b. terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	275
Beton yang masuk ke dalam tanah :	
a. mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti	325
b. mendapat pengaruh sulfat dan alkali dari tanah	lihat tabel 7.15.a.
Beton yang selalu berhubungan dengan air tawar / payau / laut	lihat tabel 7.15.b.

Tabel 7.15.a. Kandungan semen minimum untuk beton yang berhubungan dengan air tanah yang mengandung sulfat

Konsentrasi sulfat (SO ₃)		SO ₃ dalam air tanah (gr/ltr)	Jenis semen	Kandungan semen minimum (kg/m ³)		
Dalam tanah				Ukuran maks. agregat (mm)		
Total SO ₃ %	SO ₃ dalam campuran air : tanah = 2 : 1 (gr/ltr)			40	20	10
< 0,2	< 1,0	< 0,3	Tipe I dengan atau tanpa Pozolan (15 - 40 %)	280	300	350
0,2 - 0,5	1,0 - 1,9	0,3 - 1,2	Tipe I tanpa Pozolan	290	330	380
			Tipe I dengan Pozolan (15 - 40 %) atau Semen portland pozolan			
			Tipe II atau V	250	290	430
0,5 - 1,0	1,9 - 3,1	1,2 - 2,5	Tipe I dengan Pozolan (15 - 40%) atau Semen portland pozolan	340	380	430
			Tipe II atau V	290	330	380
1,0 - 2,0	3,1 - 5,6	2,5 - 5,0	Tipe II atau V	330	370	420
> 2,0	> 5,6	> 5,0	Tipe II atau V dan lapisan pelindung	330	370	420

Tabel 7.15.b. Kandungan semen minimum untuk beton bertulang dalam air

Berhubungan dengan :	Tipe semen	Kandungan semen minimum	
		Ukuran maksimum agregat (mm)	
		40	20
air tawar	Semua tipe I - V	280	300
air payau	Tipe I + Pozolan (15 - 40 %) atau S.P. Pozolan	340	380
	Tipe II atau V	290	330
air laut	Tipe II atau V	330	370

- (14) Penyesuaian kebutuhan semen. Apabila kebutuhan semen yang diperoleh dari (12) ternyata lebih sedikit daripada kebutuhan semen minimum (13) maka kebutuhan semen harus dipakai yang minimum (Yang nilainya lebih besar).
- (15) Penyesuaian jumlah air atau faktor air-semen. Jika jumlah semen ada perubahan akibat langkah (14) maka nilai faktor air-semen berubah. Dalam hal ini, dapat dilakukan dua cara berikut :
- Cara pertama, faktor air-semen dihitung kembali dengan cara membagi jumlah air dengan jumlah semen minimum.
 - Cara kedua, jumlah air disesuaikan dengan mengalikan jumlah semen minimum dengan faktor air-semen.
- Catatan : Cara pertama akan menurunkan faktor air-semen, sedangkan cara kedua akan menaikkan jumlah air yang diperlukan.
- (16) Penentuan daerah gradasi agregat halus. Berdasarkan gradasinya (hasil analisis ayakan) agregat halus yang akan dipakai dapat diklasifikasikan menjadi 4 daerah. Penentuan daerah gradasi itu didasarkan atas grafik gradasi yang diberikan dalam Tabel 7.16. Dengan Tabel 7.16. tersebut agregat halus dapat dimasukkan menjadi salah satu dari 4 daerah, yaitu daerah 1, 2, 3, dan 4.

Tabel 7.16 Batas Gradasi Pasir

Lubang ayakan (mm)	Persen berat butir yang lewat ayakan			
	1	2	3	3
10	100	100	100	100
4,8	90-100	90-100	90-100	95-100
2,4	60-95	75-100	85-100	95-100
1,2	30-70	55-90	75-100	90-100
0,6	15-34	35-59	60-79	80-100
0,3	5-20	8-30	12-40	15-50
0,15	0-10	0-10	0-10	0-15

(17) Perbandingan agregat halus dan agregat kasar. Nilai banding antara berat agregat halus dan agregat kasar diperlukan untuk memperoleh gradasi agregat campuran yang baik. Pada langkah ini dicari nilai banding antara berat agregat halus dan berat agregat campuran. Penetapan dilakukan dengan memperhatikan besar butir maksimum agregat kasar, nilai slam, faktor air-semen, dan daerah gradasi agregat halus. Berdasarkan data tersebut dan grafik pada Gb.7.10.a. atau Gb.7.10.b. atau Gb.7.10.c. dapat diperoleh persentase berat agregat halus terhadap berat agregat campuran.

(18) Berat jenis agregat campuran. Berat jenis agregat campuran dihitung dengan rumus :

$$B_j \text{ camp} = \frac{P}{100} \times b_j \text{ ag.hls} + \frac{K}{100} \times b_j \text{ ag.kar}$$

dengan :

- B_j camp = berat jenis agregat campuran
 - b_j ag.hls = berat jenis agregat halus
 - b_j ag.ksr = berat jenis agregat kasar
 - P = persentase agregat halus terhadap agregat campuran
 - K = persentase agregat kasar terhadap agregat campuran
- Berat jenis agregat halus dan agregat kasar diperoleh dari hasil pemeriksaan laboratorium, namun jika tidak ada dapat diambil sebesar 2,60 untuk agregat tak dipecah/alami dan 2,70 untuk agregat pecahan

(19) Penentuan berat jenis beton. Dengan data berat jenis agregat campuran dari langkah (18) dan kebutuhan air tiap meter kubik betonnya maka dengan grafik pada Gb.7.11. dapat diperkirakan berat jenis betonnya.

Caranya adalah sebagai berikut :

- a. Dari berat jenis agregat campuran pada langkah 17 dibuat garis kurva berat jenis gabungan yang sesuai dengan garis kurva yang paling dekat dengan garis kurva pada gambar 7.11.
- b. Kebutuhan air yang diperoleh pada langkah (11) dimasukkan dalam gambar 7.11. Kemudian dari nilai ini ditarik garis vertikal ke atas sampai mencapai garis kurva yang dibuat pada a. di atas.
- c. Dari titik potong ini kemudian ditarik garis horisontal ke kiri sehingga diperoleh nilai berat jenis beton.

(20) Kebutuhan agregat campuran. Kebutuhan agregat campuran dihitung dengan cara mengurangi berat beton per-meter kubik dikurangi kebutuhan air dan semen.

(21) Hitung berat agregat halus yang diperlukan, berdasarkan hasil langkah (17) dan (20). Kebutuhan agregat halus dihitung dengan cara mengalikan kebutuhan agregat campuran dengan persentase berat agregat halus.

(22) Hitung berat agregat kasar yang diperlukan, berdasarkan hasil langkah (20) dan (21). Kebutuhan agregat kasar dihitung dengan cara mengurangi kebutuhan agregat campuran dengan kebutuhan agregat halus.

Untuk mempermudah pelaksanaan, maka pada halaman berikut ini diberikan formulir isian.

Dalam perhitungan di atas, agregat halus dan agregat kasar dianggap dalam keadaan jenuh kering-muka, sehingga di lapangan yang pada umumnya keadaan agregatnya tidak jenuh kering-muka maka harus dilakukan koreksi terhadap kebutuhan bahannya. Koreksi harus selalu dilakukan minimum satu kali per hari.

Hitungan koreksi dilakukan dengan rumus sebagai berikut :

- 1) Air = $A - [(Ah-A1)/100] \times B - [(Ak-A2)/100] \times C$
- 2) Agregat halus = $B + [(Ah - A1)/100] \times B$
- 3) Agregat kasar = $C + [(Ak - A2)/100] \times C$

dengan :

- A = jumlah kebutuhan air (liter/m³)
- B = jumlah kebutuhan agregat halus (kg/m³)
- C = jumlah kebutuhan agregat kasar (kg/m³)
- Ah = kadar air sesungguhnya dalam agregat halus (%)
- Ak = kadar air sesungguhnya dalam agregat kasar (%)
- A1 = kadar air pada agregat halus jenuh kering-muka (%)
- A2 = kadar air pada agregat kasar jenuh kering-muka (%).

FORMULIR PERANCANGAN ADUKAN BETON
(Menurut Standar Pekerjaan Umum)

No	Uraian	
1	Kuat tekan yang disyaratkan, pada umur ....hari	.....MPa
2	Deviasi standar (s )	.....MPa
3	Nilai tambah (m )	.....MPa
4	Kuat tekan rata-rata yang direncanakan (f'_{cr})	.....MPa
5	Jenis semen (biasa/cepat keras)	.....
6	Jenis agregat kasar (alami/batu pecah)	.....
	Jenis agregat halus (alami/pecahan)	.....
7	Faktor air-semen (gb.7.8.atau tab 7.11.dan gb.7.9.)	.....
8	Faktor air-semen maksimum (tabel 7.12.)	.....
	-----> > dipakai faktor air-semen yang rendah	
9	Nilai slam (tabel 7.13.)	..... cm
10	Ukuran maksimum agregat kasar	..... mm
11	Kebutuhan air (tabel 7.14.)	.....ltr
12	Kebutuhan semen Portland (dari butir 8 & 11)	.....kg
13	Kebutuhan semen Portland minimum (tabel 7.15.)	.....kg
14	-----> > dipakai kebutuhan semen Portland	.....kg
15	Penyesuaian jumlah air atau f.a.s	.....
16	Daerah gradasi agregat halus (tabel 7.16.)	1, 2, 3, 4
17	Persen berat ag.halus thd. campuran (gb.7.10.)%
18	Berat jenis agregat campuran (dihitung)	.....t/m ³
19	Berat jenis beton (gb.7.11.)	.....kg/m ³
20	Kebutuhan agregat (langkah 19 - 11 - 14 )	.....kg/m ³
21	Kebutuhan agregat halus (langkah 17 x 20 )	.....kg/m ³
22	Kebutuhan agregat kasar (langkah 20 - 21 )	.....kg/m ³
Kesimpulan :		
Volume	Berat total	Air Semen Ag.halus Ag.kasar
1 m ³	.....kg	.....kg kg kg kg
1 adukan	.....kg	.....kg kg kg kg

CONTOH :

Diketahui :

- Beton untuk balok dan kolom bangunan gedung.
- Kuat tekan beton yang disyaratkan $f'_c = 20$ MPa.
- Jenis semen : biasa
- Jenis kerikil : alami
- Ukuran maksimum kerikil : 40 mm
- Nilai slam : 100 mm
- Jenis pasir : agak kasar (gol.2.)

Pertanyaan :

Berapakah kebutuhan air, semen Portland, pasir, dan kerikil tiap 1 meter kubik betonnya ?

Penyelesaian :

Perhitungan disesuaikan dengan urutan yang ada dalam Formulir Perancangan Adukan Beton.

1. Kuat tekan beton yang disyaratkan pada 28 hari : 20 MPa
2. Deviasi standar $s = 7$ MPa, karena tidak mempunyai data pengalaman sebelumnya.
3. Nilai-tambah = 12 MPa, karena tidak mempunyai data.
4. Kuat tekan rata-rata yang direncanakan, $f'_{cr} : 20+12 = 32$ MPa.
5. Jenis semen : biasa
6. Jenis kerikil : alami
7. Faktor air-semen (dari Gb.7.8.) : 0,48
8. Faktor air-semen maksimum (Tabel.7.12.) : 0,60 (beton di dalam ruang bangunan dengan keadaan keliling non-korosif).
→ dipakai f.a.s. yang rendah : 0,48
9. Nilai slam (Tabel.7.13.) : 100 mm (sudah ditentukan)
10. Ukuran maksimum butiran kerikil : 40 mm (sudah ditentukan)
11. Kebutuhan air (Tabel.7.14.) : 175 liter
12. Kebutuhan semen : $175 / 0,48 = 365$ kg (dari butir 8 dan 11).
13. Kebutuhan semen minimum (Tabel.7.15.) : 275 kg
14. → dipakai semen (diambil yang besar) : 365 kg.
15. Penyesuaian jumlah air atau faktor air semen.
Karena pada langkah 14 tidak merubah jumlah kebutuhan semen yang dihitung pada langkah 12 maka tidak perlu ada penyesuaian jumlah air maupun faktor air-semen.
Jadi air tetap 175 liter dan faktor air-semen tetap 0,48.
16. Golongan pasir (telah diketahui dari soal) : gol.2.
17. Persentase pasir terhadap campuran (Gb.7.10.c.) : 35 persen
18. Berat jenis campuran pasir dan kerikil (karena tidak ada data, maka diambil sebesar : 2,60
19. Berat beton (Gb.7.11.) : 2380 kg/m^3 .
20. Kebutuhan berat pasir dan kerikil dihitung dengan rumus :

$$W_{psr+krk} = W_{bm} - A - S$$

$$= 2380 - 175 - 365$$

$$= 1840 \text{ kg}$$

21. Kebutuhan pasir dihitung dengan rumus :

$$W_{psr} = (P/100) \cdot W_{psr+krk}$$

$$= (35/100) \cdot 1840$$

$$= 644 \text{ kg}$$

22. Kebutuhan kerikil dihitung dengan rumus :

$$W_{krk} = W_{psr+krk} - W_{psr}$$

$$= 1840 - 644$$

$$= 1196 \text{ kg.}$$

Kesimpulan :

Untuk 1 m³ beton (berat betonnya 2380 kg) dibutuhkan :

- a. Air : 175 liter
- b. Semen : 365 kg (9,125 kantong)
- c. Pasir : 644 kg
- d. Kerikil : 1196 kg

Untuk 1 adukan (misalnya 1 kantong semen) maka dibutuhkan :

- a. Air : (1/9,125).175 = 19,178 liter
- b. Semen : 1 kantong semen = 40 kg
- c. Pasir : (1/9,125).644 = 70,575 kg
- d. Kerikil : (1/9,125).1196 = 131,068 kg

Berat satu adukan = 260,821 kg.

Contoh mengisinya ke dalam formulir dapat dilihat pada tabel berikut.

FORMULIR PERANCANGAN ADUKAN BETON NORMAL.

No	Uraian	
1	Kuat tekan yang disyaratkan, pada umur 28 hari	: 20 MPa
2	Deviasi standar (s)	: 7 MPa
3	Nilai tambah (m)	: 12 MPa
4	Kuat tekan rata-rata yang direncanakan (f_{cr})	: 32 MPa
5	Jenis semen (coret yang tidak perlu)	biasa/cepat-keras
6	Jenis kerikil (coret yang tidak perlu)	alami/batu-pecah
7	Faktor air-semen (Gb.7.8.)	: 0,48
8	Faktor air-semen maksimum (Tabel 7.12.)	: 0,60
	----> > dipakai faktor air-semen yang rendah	: 0,48
9	Nilai slam (Tabel 7.13.)	: 100 mm
10	Ukuran maksimum butiran kerikil	: 40 mm
11	Kebutuhan air (Tabel 7.14.)	: 175 ltr
12	Kebutuhan semen Portland (dari butir 8 & 11)	: 365 kg
13	Kebutuhan semen Portland minimum (Tabel 7.15.)	: 275 kg
14	----> > dipakai kebutuhan semen Portland	: 365 kg
15	Penyesuaian jumlah air atau f.a.s	: tetap 175 ltr dan 0,48
16	Golongan pasir (Tabel 7.16.), lingkari yang cocok	: 1, 2, 3, 4
17	Persentase pasir thdp. campuran (Gb.7.10.)	: 35 persen
18	Berat jenis campuran (dihitung atau 2,60)	: 2,60
19	Berat beton (Gb.7.11.)	: 2380 kg/m ³
20	Kebutuhan campuran pasir dan kerikil (dihitung)	: 1840 kg/m ³
21	Kebutuhan pasir (dihitung)	: 644 kg/m ³
22	Kebutuhan kerikil (dihitung)	: 1196 kg/m ³
Kesimpulan :		
Volume	Berat beton	Air
1 m ³	2380 kg	175 ltr
1 adukan	260,821kg	19,178ltr
	Semen	Ag.halus
	365 kg	644 kg
	40 kg	131,068kg
	Ag.kasar	
		1196 kg

Cara Inggris/Standar Departemen Pekerjaan Umum ini memiliki kekurangan, antara lain :

- (1) Jenis agregat yang hanya ditetapkan sebagai batu-pecah dan alami saja tampaknya sulit, karena sering walaupun agregat alami tetapi bentuk dan permukaannya tidak bulat atau halus. Kekasaran permukaan butir merupakan hal yang sulit diukur, dan ini berpengaruh terhadap jumlah air yang diperoleh pada langkah (11).
- (2) Diagram proporsi agregat halus terhadap agregat total yang dipakai pada langkah (16) sulit mendapatkan hasil yang tepat. Hal ini selain karena diagram itu merupakan daerah, juga karena gradasi agregat halus yang tersedia kadang-kadang tidak berimpit dengan salah satu kurve dari 4 kurve gradasi yang disediakan.
- (3) Diagram hubungan antara faktor air-semen dan kuat tekan rata-rata silinder beton tidak sama untuk berbagai jenis agregat yang dipakai untuk beton, sehingga sebaiknya dipakai diagram yang sesuai untuk tiap agregat yang dipakai.

7.6. CAMPURAN CARA COBA-COBA

Selain ketiga cara tersebut di atas (yaitu : Road Note No.4., ACI, dan Inggris/Departemen PU), ada pula suatu cara lain untuk memperoleh proporsi adukan beton yaitu cara coba-coba (*Trial and error method of mix design*). Cara coba-coba ini didasarkan pada percobaan untuk memperoleh campuran dengan pori-pori yang minimum atau kepadatan maksimum. Agregat halus dalam jumlah tertentu ditaburkan untuk mengisi rongga-rongga di antara butir-butir agregat kasar, dan sejumlah tertentu pasta semen dipakai untuk mengisi rongga-rongga antara butir-butir campuran agregat tersebut. Proporsi antara agregat halus terhadap agregat kasar ditetapkan dengan coba-coba, yaitu sampai diperoleh campuran yang mempunyai berat satuan tertinggi (lihat Gb.7.12.).

Campuran agregat dengan cara ini menghasilkan proporsi agregat halus yang optimum sehingga membutuhkan semen minimum per meter kubik beton, dan juga mendapatkan harga beton termurah pada faktor air-semen dan slam yang sama. Bila agregat halus lebih banyak mengakibatkan diperlukan semen lebih banyak untuk mencapai kecacakan/konsistensi adukan yang sama. Sebaliknya bila agregat halus lebih sedikit adukan menjadi kasar dan memerlukan semen lebih banyak untuk menghaluskannya.

Langkah-langkah cara coba-coba ini ialah sebagai berikut :

- (1) Tetapkan faktor air-semen, misalnya dengan berdasarkan kuat tekan rata-rata yang ingin diperoleh, misalnya dengan Gb.7.8.
- (2) Carilah proporsi antara agregat halus dan agregat kasar dengan cara coba-coba, sehingga diperoleh berat satuan campuran yang maksimum, dengan percobaan.

Caranya ialah :

Mula-mula agregat kasar dimasukkan ke dalam bejana dalam lapisan yang tipis, kemudian ditaburkan agregat halus di atasnya, lalu diketuk-ketuk dengan pelan agar agregat halus masuk ke dalam rongga agregat kasar. Demikian diteruskan untuk lapisan-lapisan berikutnya. Proporsi agregat halus dan agregat kasar dikatakan mencapai optimum jika berat satuan campurannya maksimum.

- (3) Carilah proporsi antara pasta semen dan agregat campuran sehingga diperoleh kelecakan (diukur dengan percobaan slam) yang diinginkan, dengan percobaan. Percobaan dilakukan dengan memasukkan sedikit demi sedikit pasta semen yang dibuat dengan faktor air-semen yang sesuai dengan langkah (1) ke dalam campuran agregat yang diperoleh dari langkah (2).
- (4) Hitung berat masing-masing bahan yang masuk ke dalam adukan beton, kemudian dihitung pula proporsi antara bahan-bahan tersebut, yaitu : semen, air, agregat halus, dan agregat kasar.
- (5) Benda uji diuji setelah mencapai usia tertentu, misalnya 28 hari, untuk mengetahui hasil kuat tekannya.
- (6) Proporsi adukan beton diatur kembali bila hasilnya kurang memuaskan, misalnya dengan mengubah faktor air-semen atau proporsi antara agregat dan semennya.

Cara coba-coba ini memiliki kekurangan, antara lain pada pelaksanaan langkah (2). Pelaksanaan ini mengandung risiko, karena apabila mengetuknya terlalu keras agregat kasar akan "lari mengambang" ke atas dan agregat halus turun menyusup ke bawah sehingga tidak jadi mengisi rongga-rongga sebagaimana yang diharapkan.

7.7. CARA PERENCANAAN CAMPURAN DI LABORATORIUM

Setelah mempelajari beberapa cara perencanaan campuran adukan beton di depan dan melihat kekurangan-kekurangan dari masing-masing cara tersebut, serta banyaknya faktor yang mempengaruhi kelecakan adukan beton segar maupun kekuatan beton kerasnya tetapi sulit mengukurnya, maka tampak bahwa cara campuran coba-coba merupakan cara yang paling sederhana untuk dilakukan di laboratorium maupun di lapangan bila alatnya tersedia, misalnya timbangan, tungku pengering dan sebagainya. Cara ini merupakan kombinasi antara cara "Road Note No.4" dan cara coba-coba (Tjokrodinuljo, 1989).

Pada cara ini untuk memperoleh proporsi berat antara agregat kasar dan agregat halus yang optimum (yang pada cara coba-coba dilakukan dengan menaburkan pasir ke dalam kerikil) dilakukan dengan analisis gradasi. Dengan analisis gradasi diperoleh gradasi agregat campuran yang sesuai dengan persyaratan "Road Note No.4", sehingga diperoleh gradasi agregat campuran yang lebih teliti. Cara analisis gradasi ini mempunyai kelebihan, misalnya :

- a) gradasi masing-masing (yaitu pasir maupun kerikil) tidak harus memenuhi gradasi standar, karena yang penting adalah gradasi campurannya

- b) tidak terjadi kesalahan akibat terlalu kerasnya mengetuk-ketuk bejana sewaktu pencampuran agregat halus dan agregat kasar dilakukan.

Langkah-langkah yang diusulkan untuk cara perencanaan campuran di laboratorium ini adalah sebagai berikut :

- (1) Dihitung kuat tekan rata-rata silinder beton yang direncanakan, dengan rumus :
 $f'_{c,r} = f'_{c} + m$
- (2) Dihitung nilai faktor air-semen (fas) berdasarkan kuat tekan rata-rata silinder beton $f'_{c,r}$ dengan Gb.7.8. dan keadaan keliling yang diharapkan dengan Tabel 7.12., kemudian diambil yang terkecil.
- (3) Tetapkan berat semen minimum per meter kubik beton (W_s), berdasarkan keadaan sekeliling (Tabel 7.15.)
- (4) Dihitung berat air minimum per meter kubik beton, dari hasil langkah (2) dan (3), dengan rumus :
 $W_a = fas \times W_s$
- (5) Tetapkan dengan cara analitis (seperti Tabel 3.7.), proporsi berat antara agregat halus dan agregat kasar sehingga masuk ke dalam diagram gradasi, yaitu Gb.3.3., Gb.3.4., Gb.3.5. atau Gb.3.6. yang sesuai dengan ukuran maksimum agregat yang dipakai.
- (6) Dihitung kebutuhan agregat campuran per meter kubik beton $W_{ag,camp}$ dengan cara mengurangi berat beton tiap meter kubik W_{btn} dengan berat semen W_s dan berat air W_a dari langkah (3) dan (4), yaitu dengan rumus :
 $W_{ag,camp} = W_{btn} - W_s - W_a$
Berat beton W_{btn} dapat diambil sekitar 2300-2400 kg/m³.
- (7) Dihitung kebutuhan berat agregat halus W_{psr} dan agregat kasar W_{krk} per meter kubik beton, dari langkah (5) dan (6), dengan rumus :
 $W_{psr} = P/(P+K) \times W_{ag,camp}$
 $W_{krk} = K/(P+K) \times W_{ag,camp}$
dengan : P = proporsi berat agregat halus terhadap agregat campuran, %
K = proporsi berat agregat kasar terhadap agregat campuran, %
- (8) Dihitung proporsi berat antara semen, air, agregat halus, dan agregat kasar, dari langkah (3), (4), dan (7), yaitu :
 $W_s : W_a : W_{psr} : W_{krk}$
- (9) Dihitung kebutuhan semen, air, agregat halus, dan agregat kasar sesuai dengan proporsi berat pada langkah (8) untuk satu adukan (misalnya untuk 3 atau 6 silinder).
- (10)(a) Masukkan air, agregat halus, agregat kasar, dan semen sebanyak yang telah dihitung pada langkah (9), ke dalam bejana pengaduk beton.
(b) Sementara itu dibuat pula pasta semen (semen dan air), dengan faktor air-semen yang diperoleh dari langkah (2), sebanyak secukupnya, dalam tempat lain. Pasta semen ini digunakan sebagai cadangan jika campuran adukan beton segar yang diperoleh mempunyai nilai slam yang kurang dari yang diharapkan.

(11) Pemeriksaan slam.

Bila slam adukan beton segar sama atau lebih besar daripada slam yang diharapkan maka campuran sudah baik dan berarti proporsi berat pada langkah (8) tidak berubah.

Bila slam adukan beton segar ini kurang daripada yang diharapkan, tambahkan pasta semen cadangan ke dalam bejana pengaduk beton sedikit demi sedikit, sampai mencapai slam yang diinginkan. Kemudian hitunglah proporsi berat yang baru, dengan menambahkan berat semen dan air yang ditambahkan ke dalam bejana, yaitu :

$$(W_s + W_{s,tamb}) : (W_a + W_{a,tamb}) : W_{psr} : W_{krk}$$

(12) Masukkan adukan beton segar ke dalam cetakan silinder beton.

Bila diinginkan berat jenis beton segar yang lebih teliti (yang pada langkah (6) baru diperkirakan), berat jenis beton segar dapat diperoleh dengan menimbang berat dan mengukur volume adukan yang berada dalam cetakan silinder beton.

(13) Silinder beton diuji setelah mencapai usia tertentu, misalnya 3 hari, 7 hari, 14 hari, atau 28 hari, untuk mengetahui hasil kuat tekan silinder betonnya.

CONTOH :

Diketahui :

Beton dengan kuat tekan yang disyaratkan 20 MPa.

Beton untuk balok dan kolom gedung.

Jenis semen : biasa

Jenis kerikil : alami

Ukuran maksimum kerikil : 40 mm

Nilai slam yang diminta : 100 mm

Jenis pasir : agak kasar (gol.2.)

Pertanyaan :

Berapakah kebutuhan air, semen Portland, pasir, dan kerikil tiap 1 meter kubik betonnya ?

Penyelesaian :

Urutan hitungan disesuaikan dengan langkah-langkah di atas :

(1) Kuat tekan rata-rata silinder beton yang direncanakan, dengan rumus :

$$f'_{c,r} = 20 + 12 = 32 \text{ MPa}$$

Nilai m diambil 12 MPa karena tidak ada data hasil pengalaman sebelumnya oleh pelaksana di lapangan.

(2) Nilai faktor air-semen (fas) berdasarkan kuat tekan rata-rata silinder beton $f'_{c,r} = 32 \text{ MPa}$ dengan Gb.7.8. diperoleh $fas = 0,48$ dan keadaan keliling non-korosif dengan Tabel 7.12. diperoleh $fas_{maks} = 0,60$ jadi diambil : $fas = 48$.

(3) Berat semen minimum per meter kubik beton (W_s), berdasarkan keadaan sekeliling non-korosif (Tabel 7.15.), diperoleh :

$$W_s = 275 \text{ kg}$$

(4) Berat air minimum per meter kubik beton :

$$W_a = fas \times W_s = 0,48 \times 275 \text{ kg} = 132 \text{ liter.}$$

(5) Dengan cara analitis (seperti Tabel 3.7.), proporsi berat antara agregat halus dan agregat kasar sehingga masuk ke dalam diagram gradasi, yaitu Gb.3.3., yang sesuai dengan ukuran maksimum agregat 40 mm, misalnya diperoleh :

$$\text{Berat pasir} : P = 40 \%$$

$$\text{Berat kerikil} : K = 60 \%$$

Dalam contoh ini hitungan proporsi berat pasir dan kerikil tidak dilakukan hitungan secara detail, karena sudah diuraikan pada sub-bab 3.8. secara detail.

(6) Kebutuhan agregat campuran per meter kubik beton :

$$W_{ag \text{ camp}} = W_{bin} - W_s - W_a = 2400 - 275 - 132 = 1993 \text{ kg}$$

Berat beton W_{bin} diambil 2400 kg/m^3 .

(7) Kebutuhan berat agregat halus dan agregat kasar per meter kubik beton :

$$W_{psr} = P/(P+K) \times W_{ag \text{ camp}} = 40 / (40 + 60) \times 1993 \text{ kg} = 797 \text{ kg}$$

$$W_{krk} = K/(P+K) \times W_{ag \text{ camp}} = 60 / (40 + 60) \times 1993 \text{ kg} = 1196 \text{ kg}$$

(8) Proporsi berat antara semen, air, agregat halus, dan agregat kasar yaitu :

$$W_s : W_a : W_{psr} : W_{krk} = 275 : 132 : 797 : 1196 = 1 : 0,48 : 2,9 : 4,35$$

(9) Kebutuhan semen, air, agregat halus, dan agregat kasar untuk satu adukan (6 silinder).

Berat 6 silinder beton = $6 \times 12,73 \text{ kg} = 76,38 \text{ kg}$ sehingga dibulatkan 80 kg, jadi sama dengan $80/2400 = 0,0333 \text{ m}^3$ beton.

Untuk satu adukan dibutuhkan :

$$\text{Semen} = 0,0333 \times 275 \text{ kg} = 9,1575 \text{ kg, dibulatkan } 9,2 \text{ kg}$$

$$\text{Air} = 0,48 \times 9,2 \text{ ltr} = 4,416 \text{ ltr}$$

$$\text{Pasir} = 2,9 \times 9,2 \text{ kg} = 26,68 \text{ kg}$$

$$\text{Kerikil} = 4,35 \times 9,2 \text{ kg} = 40,02 \text{ kg}$$

(10)(a) Masukkan air, agregat halus, agregat kasar, dan semen sebanyak yang telah dihitung pada langkah (9), ke dalam bejana pengaduk beton.

(b) Sementara itu dibuat pula pasta semen (semen dan air), dengan faktor air-semen = 0,48 sebanyak secukupnya, dalam hal ini misalnya air 2,88 liter dan semen 6kg dalam tempat lain. Pasta semen ini digunakan sebagai cadangan.

(11) Pemeriksaan slam.

Pada contoh ini misalnya setelah bahan-bahan diaduk kemudian diperiksa slamnya diperoleh slam = 60 mm, maka perlu ditambahkan pasta semen dari pasta semen cadangan.

Setelah ditambahkan pasta semen cadangan secara sedikit demi sedikit sambil diperiksa slamnya, maka diperoleh nilai slam 100 mm setelah ditambahkan pasta seberat 6,4 kg.

Dengan demikian semen dan air yang ditambahkan sebanyak :

$$\text{Berat semen tambahan } W_{s,tamb} = (1/(1+0,48)) \times 6,4 = 4,324 \text{ kg}$$

$$\text{Berat air tambahan } W_{a,tamb} = (0,48/(1+0,48)) \times 6,4 = 2,076 \text{ kg}$$

Proporsi berat yang baru, dengan menambahkan berat semen dan air yang ditambahkan ke dalam bejana, yaitu :

$$(W_s + W_{s,tamb}) : (W_a + W_{a,tamb}) : W_{psr} : W_{krk} = (9,2 + 4,324) : (4,416 + 2,076) : 26,68 : 40,02 =$$

13,524 : 6,492 : 26,68 : 40,02

Berat satu adukan yang terjadi = 86,716 kg

- (12) Masukkan adukan beton segar ke dalam cetakan silinder beton.

Setelah adukan dicetak menjadi silinder, kemudian periksa volume dan beratnya, maka misalnya diperoleh berat beton = 2320 kg, maka dapat dihitung kebutuhan bahan-bahannya, yaitu

Berat semen = $13,524 \times (2320 / 86,716) = 361,8 \text{ kg}$

Berat air = $6,492 \times (2320 / 86,716) = 173,7 \text{ liter}$

Berat pasir = $26,68 \times (2320 / 86,716) = 713,8 \text{ kg}$

Berat kerikil = $40,02 \times (2320 / 86,716) = 1070,7 \text{ kg}$

- (13) Silinder beton diuji setelah mencapai usia tertentu, misalnya 28 hari, diperoleh kuat tekan rata-rata 34 MPa.

Hasil uji kuat tekan ini jarang sekali tepat sesuai rencana, oleh karena itu selalu dibuat 3 adukan dengan 3 nilai faktor air-semen, yaitu satu sama dengan 0,48 dan dua lainnya masing-masing di bawah dan di atas nilai faktor air-semen tersebut, misalnya 0,45 dan 0,51. Nilai faktor-air-semen yang diperoleh dapat dihitung dengan interpolasi.

7.8. CAMPURAN COBA

Perlu ditatat bahwa setiap hasil hitungan perencanaan adukan beton harus dikontrol dengan uji coba berupa campuran percobaan (*trial mixes*) untuk memastikan hasilnya. Hal ini karena bahan-bahan dasar beton sangat variabel dan banyak dari sifat bahan tersebut tidak dapat diukur secara benar. Jadi sebenarnya, hitungan perencanaan adukan tersebut hanyalah perhitungan awal yang berguna untuk membuat campuran percobaan, agar hasil yang diperoleh dari campuran percobaan tidak menyimpang terlalu jauh.

Dalam Draft Pedoman Beton 1989 pasal 4.3.3.2. dicantumkan bahwa campuran coba yang mempunyai proporsi dan konsistensi yang diperlukan untuk pekerjaan yang diusulkan harus dibuat paling sedikit sebanyak tiga nilai faktor air-semen yang berbeda atau tiga kandungan semen yang berbeda. Setiap nilai faktor air-semen atau kandungan semen, harus dibuat minimal tiga silinder uji. Silinder-silinder uji tersebut kemudian diuji pada umur uji 28 hari atau umur uji lain yang ditetapkan untuk memperoleh kuat tekan rata-rata. Dari hasil uji silinder tersebut kemudian dibuat suatu grafik yang menunjukkan hubungan antara nilai faktor air-semen atau kandungan semen dan kuat tekan silinder betonnya sehingga dapat dicari secara interpolasi nilai faktor air-semen yang tepat.

CONTOH :

Misal dari hasil hitungan perencanaan adukan diperoleh sebagai berikut :

(a) Kuat tekan rata-rata yang direncanakan : $f'_c = 32 \text{ MPa}$

(b) Faktor air semen : 0,48

(c) Jumlah semen per meter kubik beton : 365 kg

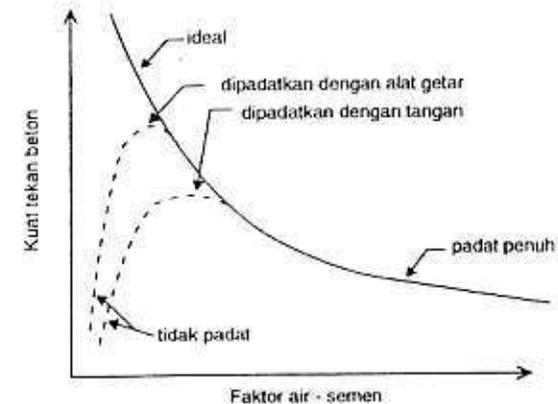
Dengan dasar hasil hitungan tersebut maka dibuat 3 adukan beton dengan faktor air-semen masing-masing ialah 0,44 ; 0,48 ; dan 0,52. Masing-masing adukan dibuat 3 silinder beton yang diuji pada umur 28 hari. Hasil uji tekan silinder digambarkan seperti pada Gb.7.13. Dari Gb.7.13. tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa nilai faktor air-semen yang tepat adalah 0,47. Dengan

demikian maka kebutuhan bahan maupun perbandingan bahannya dihitung kembali dengan nilai faktor air-semen 0,47.

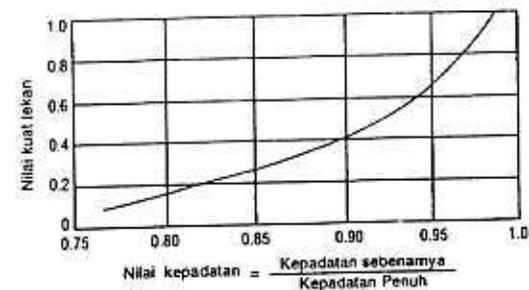
7.9. KESIMPULAN

Dari uraian dalam Bab 7 di atas, terutama tentang uraian faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan beton, tampak bahwa banyak sekali faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan beton (maupun kelecakan adukan beton) yang bersifat "individual" dari bahan yang dipakai. Oleh karena itu, walaupun banyak teori Perencanaan campuran yang dapat dipakai, yang tampaknya akan menghasilkan sebagaimana yang diharapkan, tetapi sebenarnya hanyalah suatu pedoman saja untuk melakukan campuran coba.

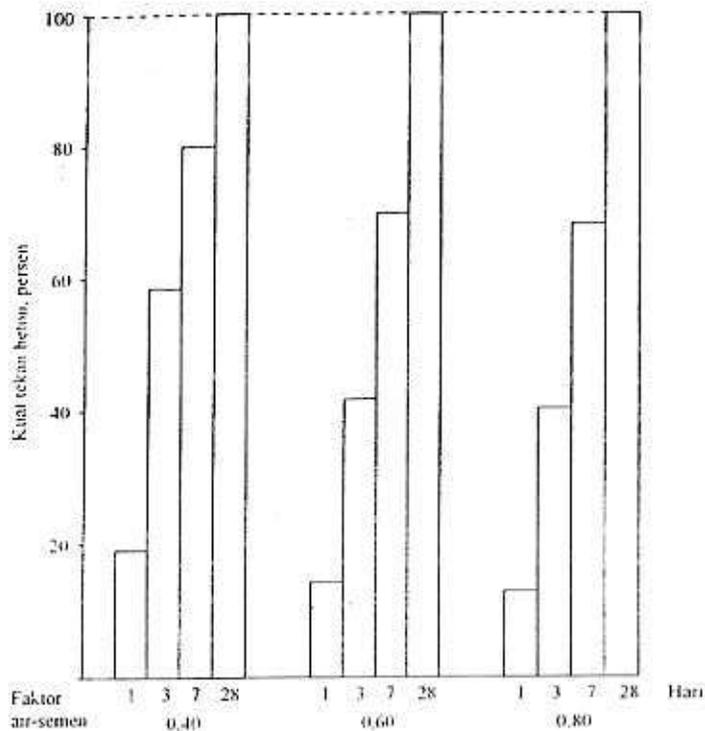
Oleh karena itu, campuran coba masih tetap perlu dilakukan. Dengan mencoba-coba sebanyak tiga macam campuran dengan faktor air-semen berbeda, yang tentunya di sekitar kuat tekan rata-rata yang diharapkan, maka akan diperoleh suatu gambaran campuran adukan beton yang cukup memuaskan.



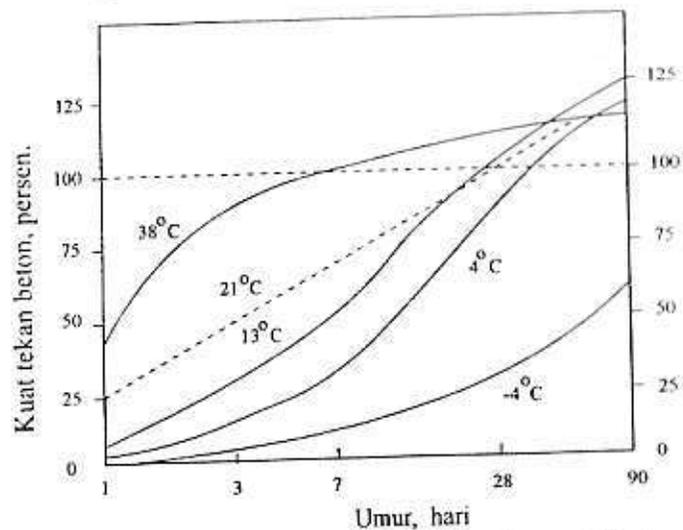
Gambar 7.1.a. Hubungan faktor air-semen dan kuat tekan silinder beton



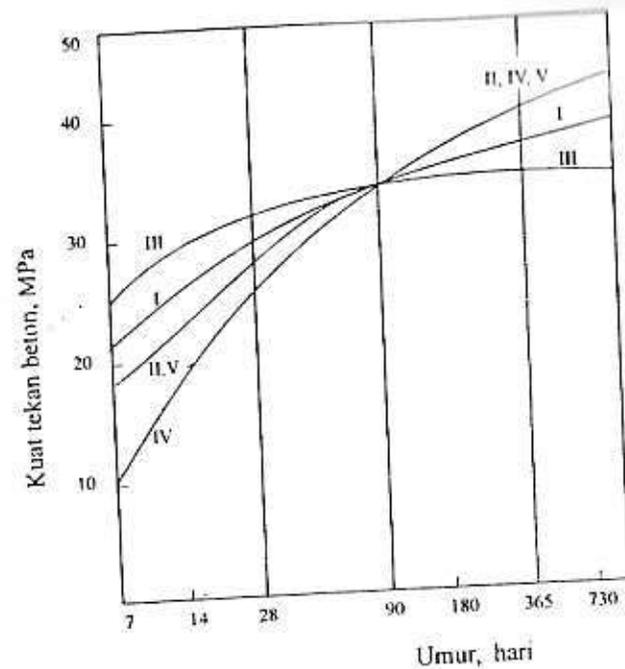
Gambar 7.1.b. Pengaruh kepadatan pada kuat tekan beton (Gambhir, 1986)



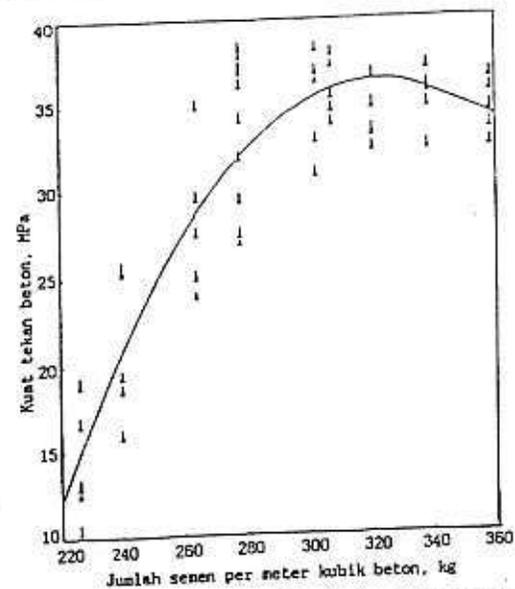
Gambar.7.2. Pengaruh faktor air-semen terhadap laju kenaikan kuat tekan beton



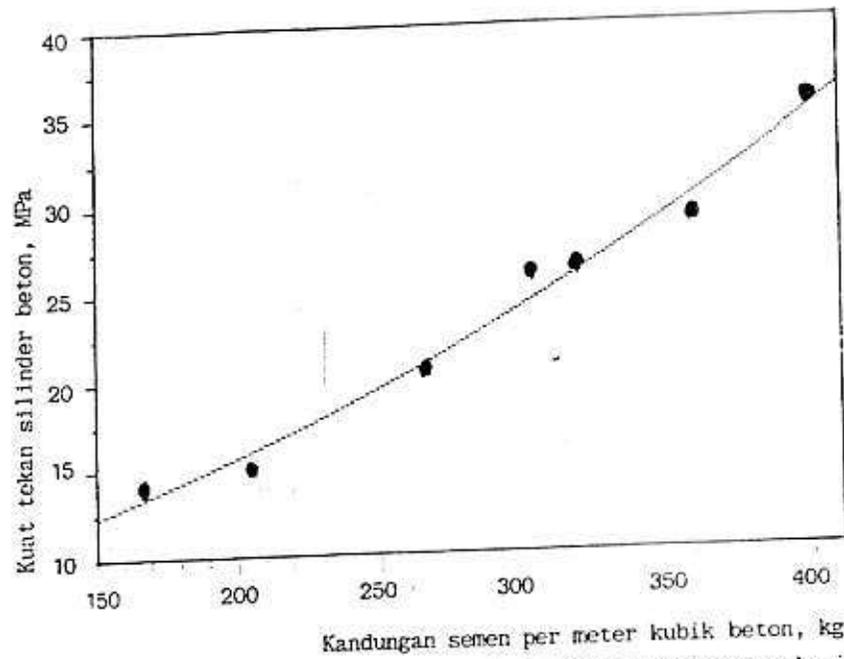
Gambar.7.3. Pengaruh suhu pada laju kuat tekan beton (Mindess, 1981)



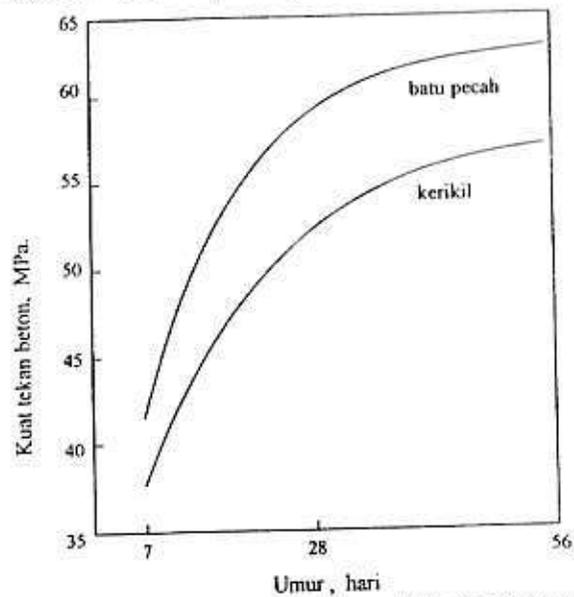
Gambar.7.4. Kuat tekan beton untuk berbagai jenis semen



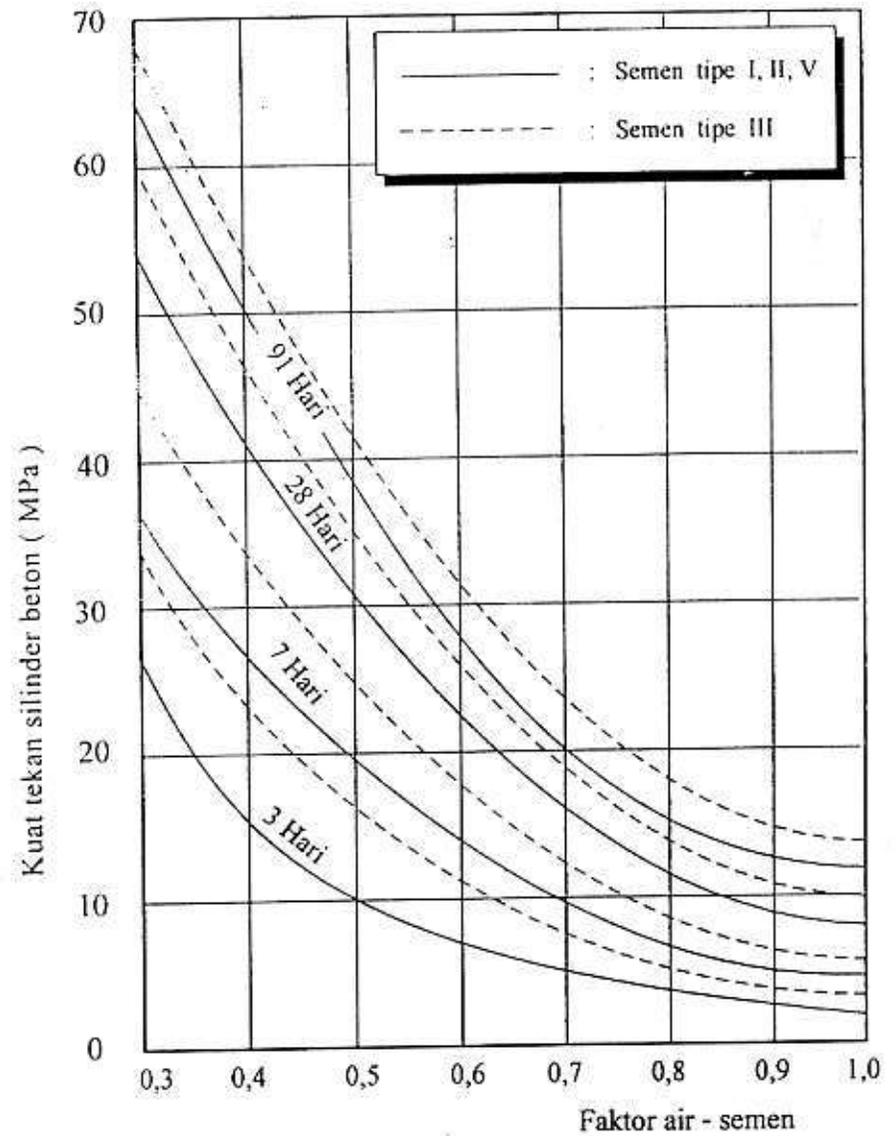
Gambar 7.5. Pengaruh jumlah semen terhadap kuat tekan beton pada faktor air-semen sama (Tjokrodinuljo, 1993)



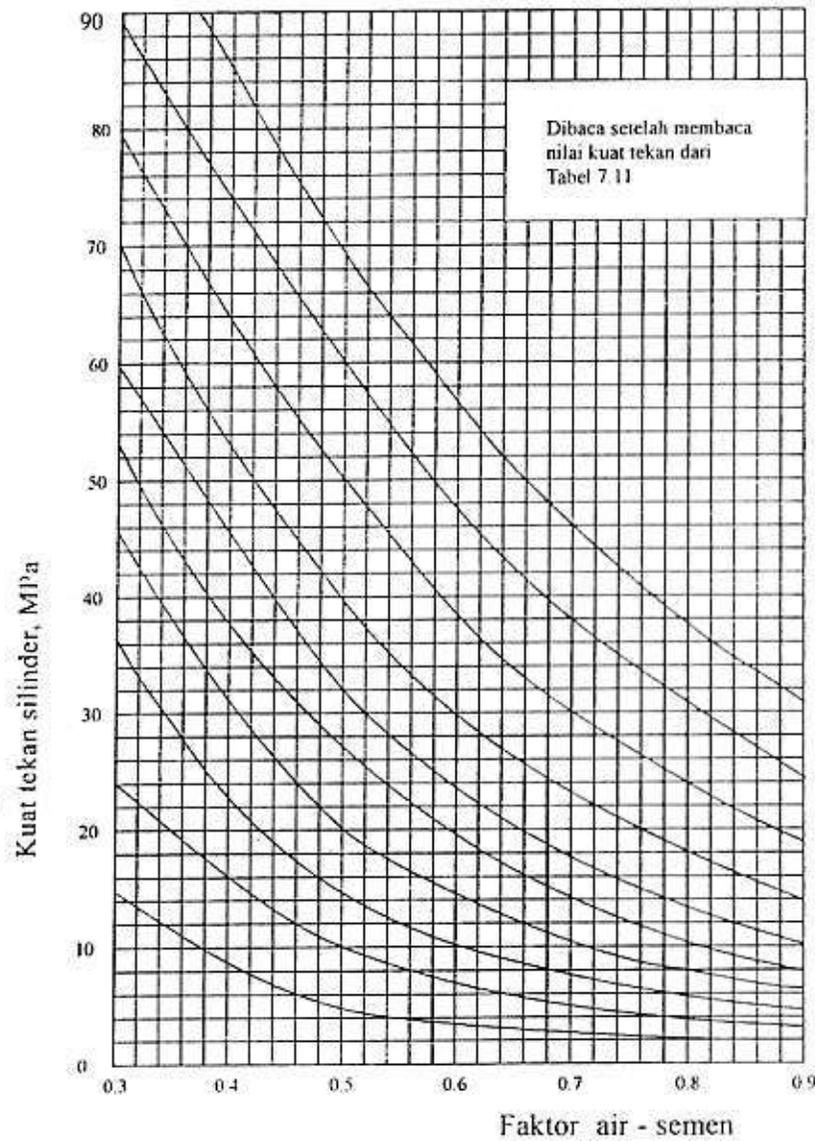
Gambar 7.6. Pengaruh kandungan semen terhadap kuat tekan beton pada nilai slam 75 - 100 mm (Kardiyono. 1994)



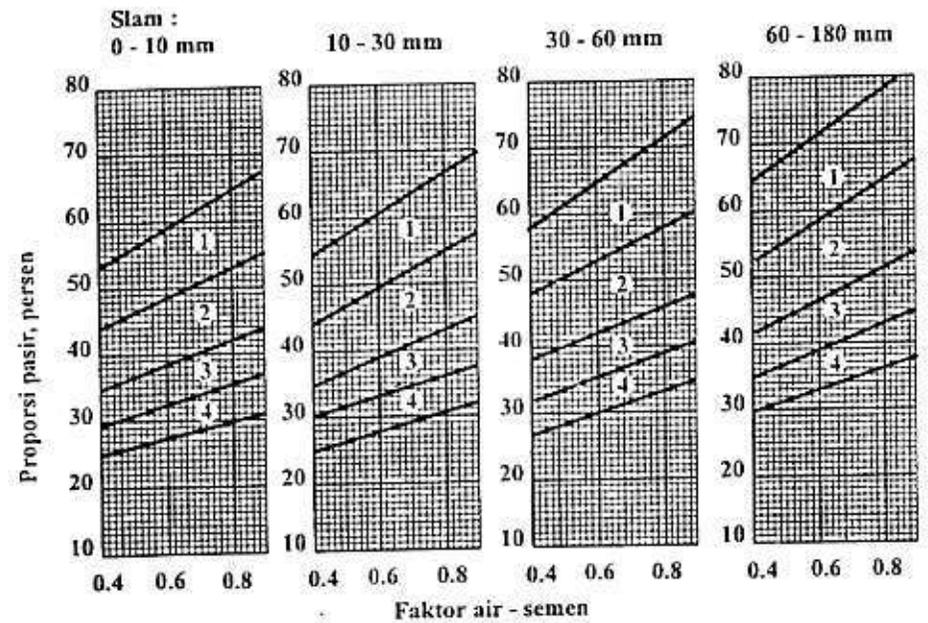
Gambar 7.7. Pengaruh jenis agregat terhadap kuat tekan beton (Mindess. 1981)



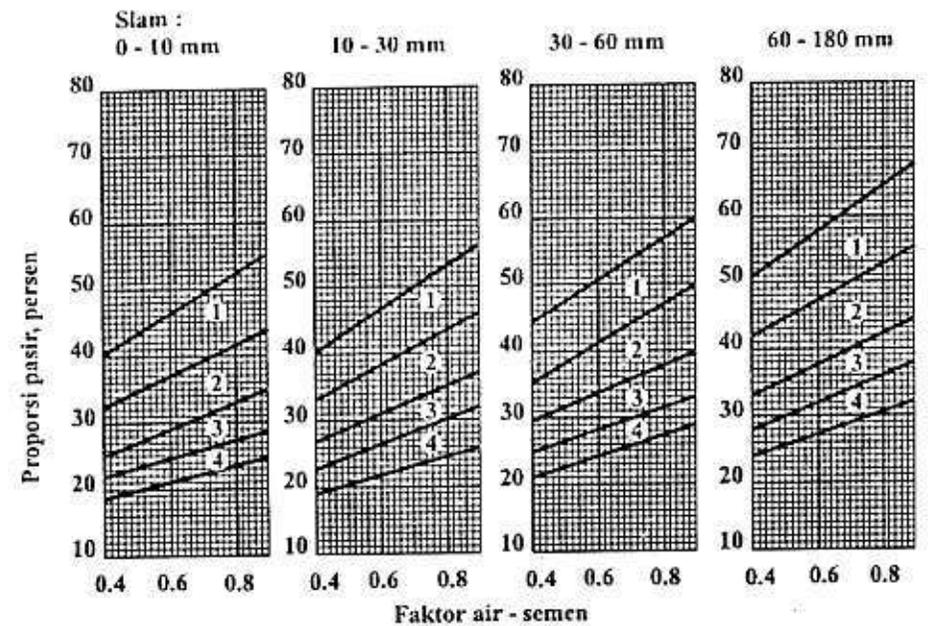
Gambar 7.8. Hubungan faktor air-semen dan kuat tekan rata-rata silinder beton (sebagai perkiraan nilai fas)



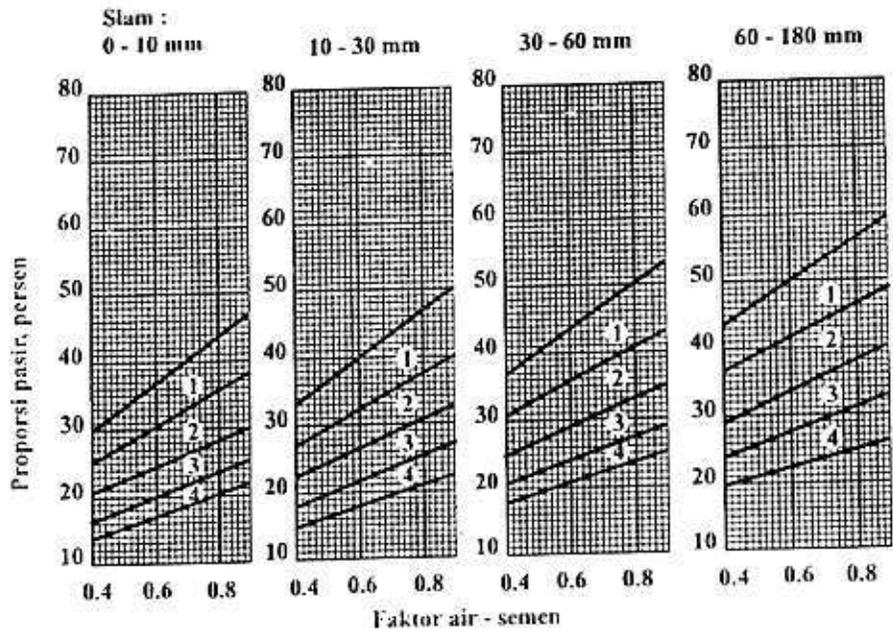
Gambar.7.9. Grafik mencari faktor air-semen.



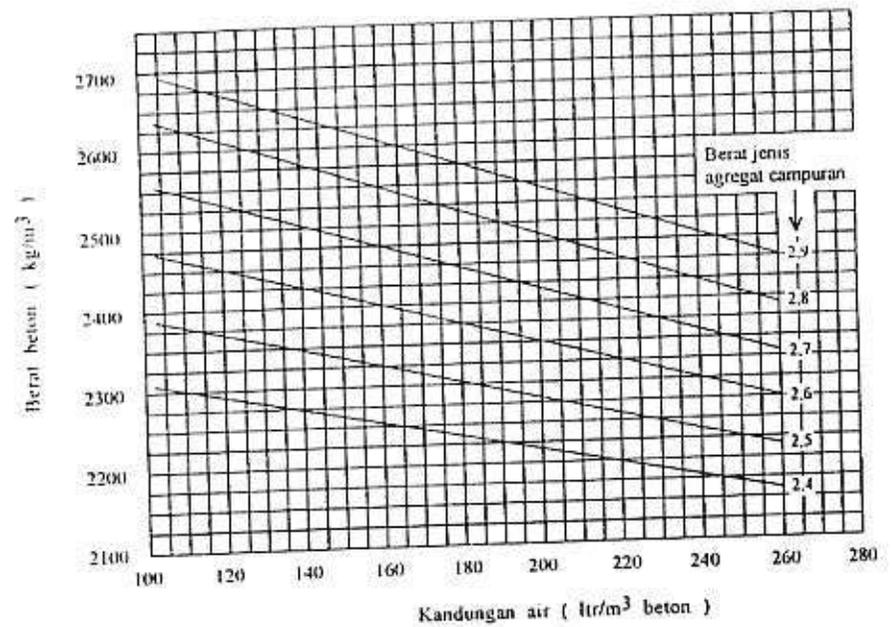
Gambar.7.10.a. Grafik persentase agregat halus terhadap agregat keseluruhan untuk ukuran butir maksimum 10 mm



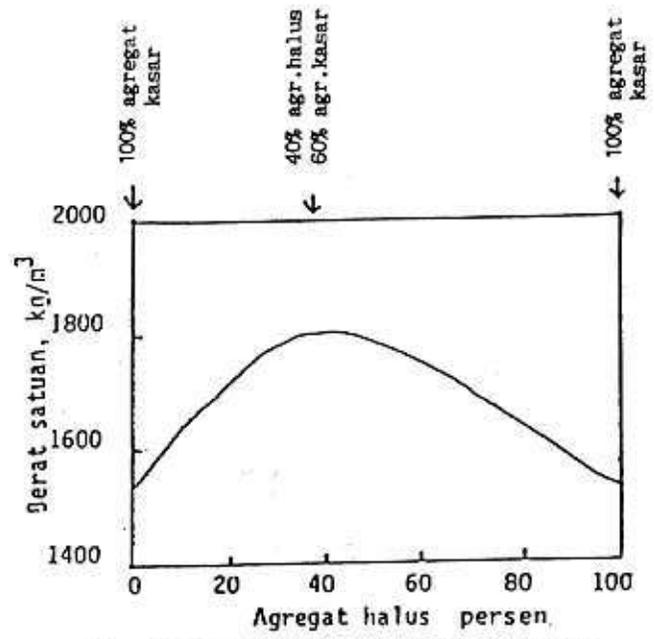
Gambar.7.10.b. Grafik persentase agregat halus terhadap agregat keseluruhan untuk ukuran butir maksimum 20 mm



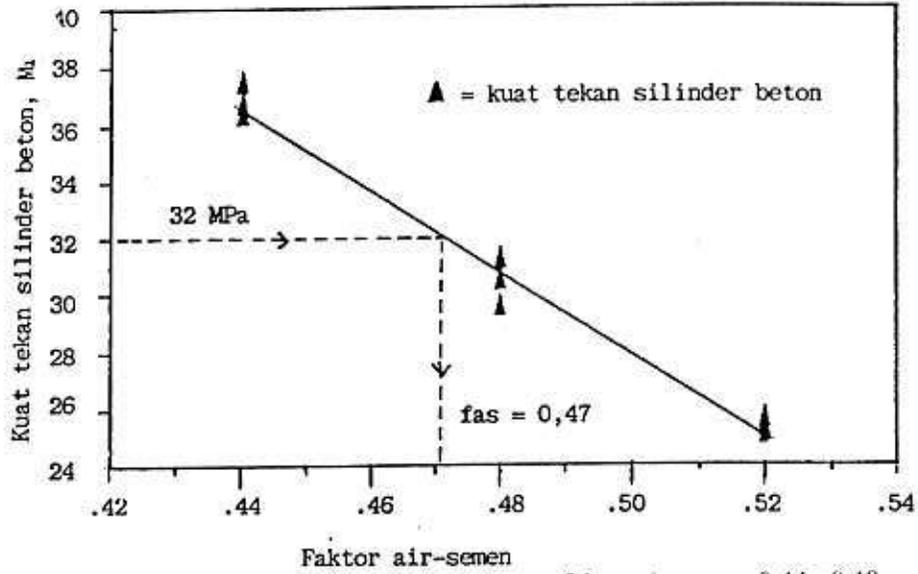
Gambar.7.10.c. Grafik persentase agregat halus terhadap agregat keseluruhan untuk ukuran butir maksimum 40 mm



Gambar.7.11. Grafik hubungan kandungan air, berat jenis agregat campuran, dan berat beton.



Gambar 7.12. Berat satuan agregat campuran.



Gambar 7.13. Hasil percobaan adukan dengan faktor air-semen 0.44 : 0.48 dan 0.52.

8.1. PENDAHULUAN

Kekuatan beton yang diproduksi di lapangan mempunyai kecenderungan untuk bervariasi dari adukan ke adukan. Besar variasi itu tergantung pada berbagai faktor, antara lain :

- (1) variasi mutu bahan (agregat) dari satu adukan ke adukan berikutnya,
- (2) variasi cara pengadukan,
- (3) stabilitas pekerja.

Atas adanya variasi kekuatan beton itu maka diperlukan pengawasan terhadap mutu (*quality control*) agar diperoleh kuat tekan beton yang hampir seragam dan memenuhi kuat tekan yang disyaratkan dalam Rencana Kerja dan Syarat (*bestek*).

Cara pengawasan mutu dilakukan dengan mengambil contoh adukan secara acak yang kemudian dibuat benda uji silinder dari beberapa adukan yang dibuat sehingga mencerminkan variasi mutu beton selama proses pembuatan beton berlangsung.

8.2. EVALUASI PEKERJAAN BETON

Setelah proporsi campuran bahan adukan beton ditetapkan, maka pekerjaan pembuatan beton di lapangan dapat dimulai. Pengawasan yang selanjutnya dilakukan ialah pengendalian mutu beton, yaitu menjaga agar beton yang dibuat di lapangan mempunyai kuat tekan sesuai dengan yang diharapkan sebelumnya, yaitu mempunyai kuat tekan yang tidak kurang dari kuat tekan yang disyaratkan dalam Rencana Kerja dan Syarat.

Pengawasan terhadap mutu beton yang dibuat di lapangan, dilakukan dengan cara membuat diagram hasil uji kuat tekan beton dari benda-benda uji yang diambil selama pelaksanaan, sebagaimana tampak pada Gambar 8.1. dan Gambar 8.2.

Diagram hasil uji itu sebaiknya dibuat untuk membantu pengawasan terhadap mutu beton yang sedang dibuat selama pembangunan berlangsung. Pengawasan mutu secara *terus-menerus* selama pembuatan beton perlu dilakukan untuk mengetahui kuat tekan rata-rata dan besar variasi kuat tekan beton yang dibuat di lapangan secara lebih dini.

Dalam Gambar 8.1. itu dilukiskan :

- (1) kuat tekan beton rata-rata yang direncanakan, $f_{c,R}$
- (2) kuat tekan beton yang disyaratkan, f_c'
- (3) delapan puluh lima persen kuat tekan beton yang disyaratkan, $0,85 \cdot f_c'$

Hasil uji (rata-rata dari dua silinder yang dibuat dari satu kali pengambilan contoh adukan) kuat tekan beton dari beton yang telah dibuat di lapangan kemudian diplotkan.

Dalam Gambar 8.2. itu dilukiskan :

- (1) kuat tekan beton yang disyaratkan ditambah 0,82 deviasi standar, $f_c' + 0,82 \cdot S_d$
- (2) kuat tekan beton yang disyaratkan, f_c'

Nilai rata-rata dari 4 hasil uji kuat tekan beton kemudian diplotkan.

Untuk memudahkan perhitungannya maka dapat dibuat tabel seperti Tabel 8.1.

Dengan mengamati dan mencermati hasil penggambaran diagram tersebut kemudian dapat diambil suatu perubahan proporsi campuran apabila hasilnya dianggap terlalu rendah atau terlalu tinggi daripada kuat tekan yang diharapkan.

Dalam buku "Perencanaan Campuran dan Pengendalian Mutu Beton" (1994) tercantum bahwa beton yang dibuat dapat dinyatakan memenuhi syarat (mutunya tercapai) jika kedua persyaratan berikut terpenuhi :

- (1) Nilai rata-rata dari semua pasangan hasil uji (yang masing-masing pasangan terdiri dari empat hasil uji kuat tekan) tidak kurang dari ($f_c' + 0,82 S_d$)
- (2) Tidak satupun dari hasil uji tekan (rata-rata dari dua silinder) kurang dari $0,85 f_c'$.

Jika salah satu dari dua persyaratan tersebut di atas tidak terpenuhi, maka untuk adukan berikutnya harus diambil langkah-langkah untuk meningkatkan kuat tekan rata-rata betonnya.

Khusus jika persyaratan kedua yang tidak dipenuhi maka selain memperbaiki adukan beton berikutnya, harus pula diambil langkah-langkah untuk memastikan bahwa daya dukung struktur beton yang sudah dibuat masih tidak membahayakan terhadap beban yang akan ditahan. Langkah-langkah itu antara lain :

- (1) analisis ulang struktur berdasarkan kuat tekan beton sesungguhnya (aktual) atau
- (2) uji tidak merusak (*non-destructive tests*), misalnya dengan Schmidt Rebound Hammer (*Hammer Test*), Pull-out Test, Ultrasonic Pulse Velocity Test, atau *semi destructive test* yaitu uji bor inti, dan sebagainya.

Tabel 8.1. Hasil uji kuat tekan silinder beton selama pelaksanaan pembetonan pada proyek X di Yogyakarta.
(dari RKS ditetapkan $f'_c = 25$ MPa ; direncanakan $S = 4$ MPa)

No.	Waktu pembuatan silinder beton		Kode	Kuat tekan silinder beton (MPa)			
	Tanggal	Pukul		Sil.A	Sil.B	Hasil uji	Rerata dari 4 hasil uji
1	21-6-1992	08.00	F-1	29	33	31	---
2	21-6-1992	09.00	F-2	30	24	27	---
3	22-6-1992	11.00	F-3	27	25	26	---
4	23-6-1992	10.00	F-4	24	30	27	27,75
5	23-6-1992	12.00	F-5	24	31	27,5	26,875
6	23-6-1992	08.00	A-1	28	26	27	26,875
7	23-6-1992	09.00	A-2	31	29	30	27,875
8	24-6-1992	11.00	A-3	26	24	25	27,375
9	24-6-1992	10.00	A-4	25	29	27	27,25
10	24-6-1992	12.00	A-5	29	31	30	28,0
11	24-6-1992	08.00	D-1	26	27	26,5	27,125
12	25-6-1992	09.00	D-2	30	26	28	27,875
13	25-6-1992	11.00	D-3	28	32	30	28,675
14	26-6-1992	10.00	E-1	30	32	31	28,875
15	26-6-1992	12.00	E-2	22	26	24	28,25
16	26-6-1992	08.00	O-1	24	27	25,5	27,625
17	26-6-1992	09.00	O-2	29	25	27	26,875
18	26-6-1992	11.00	O-3	26	31	28,5	26,25
19	27-6-1992	10.00	O-4	32	30	31	28,00
20	28-6-1992	12.00	O-5	24	26	25	27,875
21	28-6-1992	08.00	O-6	32	28	30	28,625
22	28-6-1992	09.00	O-7	26	30	28	28,5
23	28-6-1992	11.00	N-1	26	28	27	27,5
24	28-6-1992	10.00	N-2	25	28	26,5	27,875
25	28-6-1992	12.00	N-3	27	23	25	26,625
26	29-6-1992	08.00	B-1	26	28	27	26,375
27	29-6-1992	09.00	B-2	31	26	28,5	26,75
28	29-6-1992	11.00	B-3	27	23	25	26,375
29	29-6-1992	10.00	B-4	22	26	24	26,125
30	29-6-1992	12.00	B-5	24	26	25	25,625
31	29-6-1992	08.00	S-1	32	30	31	26,25
32	29-6-1992	09.00	S-2	27	29	28	27,00
33	30-6-1992	11.00	S-3	27	28	27,5	27,875
34	30-6-1992	10.00	S-4	26	29	27,5	28,50

Nilai deviasi standar yang direncanakan : 4 MPa
Dari hasil pengujian tersebut di atas maka dapat dilihat bahwa :

- (a) Tidak satupun dari hasil uji (yaitu rata-rata dari dua silinder yang dibuat dari satu kali pengambilan adukan beton) yang kurang dari $0,85 f'_c = 0,85 \cdot 25 = 21,25$ MPa, jadi memenuhi $f'_c = 25$ MPa
(b) Nilai rata-rata dari empat hasil uji yang berurutan ada yang kurang dari $(f'_c + 0,82 s) = (25 + 0,82 \cdot 4) = 28,28$ MPa
Maka beton yang dibuat berikutnya harus ditingkatkan kuat tekannya.

8.3. EVALUASI MUTU PERAWATAN BETON DI LAPANGAN

Benda uji yang diambil untuk contoh harus dibuat dan dirawat sesuai dengan cara perawatan di laboratorium, misalnya disimpan dalam udara lembab, dalam pasir basah atau direndam dalam air. Hasil dari benda uji ini merupakan gambaran dari hasil pembuatan adukan beton, akan tetapi belum dapat memeriksa mutu perawatan dan perlindungan beton pada struktur sebenarnya di lapangan.

Untuk memeriksa mutu pelaksanaan perawatan dan perlindungan dari beton yang dibuat di lapangan, dilakukan dengan membuat benda uji silinder beton yang dirawat di lapangan yang dicetak pada saat yang sama dan diambil dari contoh yang sama dengan benda uji yang dirawat di laboratorium. Perawatan benda uji di lapangan harus sama dengan kondisi perawatan beton yang sebenarnya di lapangan.

Cara perawatan di lapangan harus di tingkatkan apabila kuat tekan benda uji yang dirawat di lapangan kurang dari 85 % daripada kuat tekan benda uji yang dirawat di laboratorium, kecuali jika kuat tekan benda uji yang dirawat di lapangan masih lebih tinggi dari $f'_c + 4$ (MPa).

8.4. LANGKAH-LANGKAH YANG HARUS DIAMBIL JIKA HASIL UJI BETON KURANG MEMUASKAN

Apabila hasil pemeriksaan benda uji yang dirawat di laboratorium menunjukkan bahwa ada salah satu hasil uji (rata-rata dari dua benda uji yang diambil dari beton pada saat yang sama) yang kuat tekannya kurang dari 85 persen kuat tekan yang disyaratkan, atau apabila hasil uji kuat tekan pasangan benda uji yang dirawat di lapangan menunjukkan kurang dari 85 persen dari hasil uji benda uji yang dirawat di laboratorium, maka harus diambil langkah untuk memastikan bahwa struktur beton masih mempunyai daya dukung beban rencana yang cukup, artinya tidak membahayakan.

Langkah pertama yang dapat diambil antara lain melakukan analisis ulang struktur berdasarkan kuat tekan beton yang aktual.

Jika langkah pertama telah menunjukkan bahwa struktur tidak akan mampu menahan beban yang bekerja maka langkah kedua ialah uji tidak merusak (*non-destructive tests*) misalnya *Hammer Test* atau *semi destructive test* yaitu uji bor inti (*core drill*) pada daerah yang diperkirakan kurang memenuhi syarat.

Alat uji Schmidt Rebound Hammer (*Hammer Test*) ditemukan pada tahun 1948 dan sangat populer digunakan karena sederhana (Mindess, 1981). Alat ini

mengukur besar pantulan dari massa baja keras yang dibenturkan pada permukaan beton dengan suatu per. Rumus secara teoretis yang menghubungkan antara besar pantulan dan kuat tekan beton tampaknya belum ada, jadi hanya hubungan empiris saja yang dipakai. Karena sebenarnya yang terukur adalah kekerasan permukaan beton maka hal-hal berikut perlu diperhatikan :

- (1) lapisan permukaan yang sudah dilapis plaster harus dikupas dan permukaan beton perlu dihaluskan
- (2) permukaan beton harus kering
- (3) bagian beton yang diuji harus kaku (tidak bergetar).

Uji hammer ini sangat peka terhadap keadaan lokal permukaan beton (Neville, 1975), misalnya adanya butiran besar kerikil di bawah permukaan akan memperbesar nilai pantulan, sebaliknya adanya pori udara di bawah permukaan tersebut akan menurunkan nilai pantulan. Pemukiman pada tempat yang sama akan memperbesar nilai pantulan juga karena permukaan menjadi lebih padat. Untuk menghindari kesalahan pengukuran maka pada setiap titik yang diperiksa sebaiknya dilakukan pukulan sebanyak 10 kali pada titik pukulan yang berbeda dengan daerah permukaan yang kira-kira seluas 100 mm x 100 mm. Nilai rata-rata dari 10 pukulan tersebut diambil sebagai hasil uji pada titik tersebut. Nilai deviasi (penyimpangan) standar dari hasil uji hammer ini lebih besar daripada hasil uji tekan langsung, namun karena cara uji ini sangat sederhana (menghemat waktu dan tenaga) maka sangat populer dilakukan.

Jika uji bor inti dipilih maka beberapa hal penting berikut perlu diperhatikan (SK SNI M-61-1990-03) :

- (1) umur beton yang dibor minimum 14 hari
- (2) diameter benda uji bor inti minimum sebesar tiga kali ukuran maksimum kerikil yang ada dalam betonnya
- (3) pengeboran harus tegak lurus pada elemen struktur
- (4) titik bor harus dipilih pada tempat yang tidak membahayakan struktur, misalnya jangan dekat sambungan atau momen maksimum
- (5) lubang bor jangan memotong tulangan utama
- (6) lubang bor harus segera ditutup dengan beton yang mutunya tidak kurang dari beton semula.

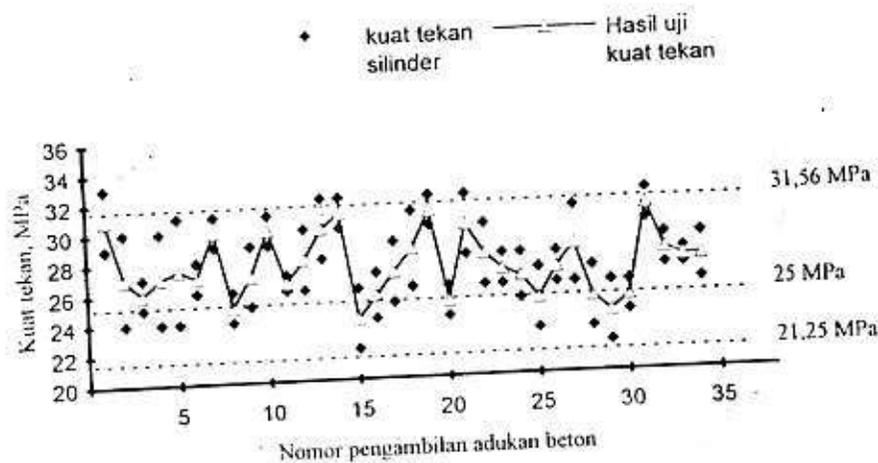
Pengambilan benda uji bor inti dilakukan di daerah yang kuat tekannya diragukan dan minimum diambil tiga buah benda uji bor inti.

Selanjutnya kuat tekan beton dapat dianggap tidak membahayakan jika hasil uji bor inti memenuhi dua syarat berikut :

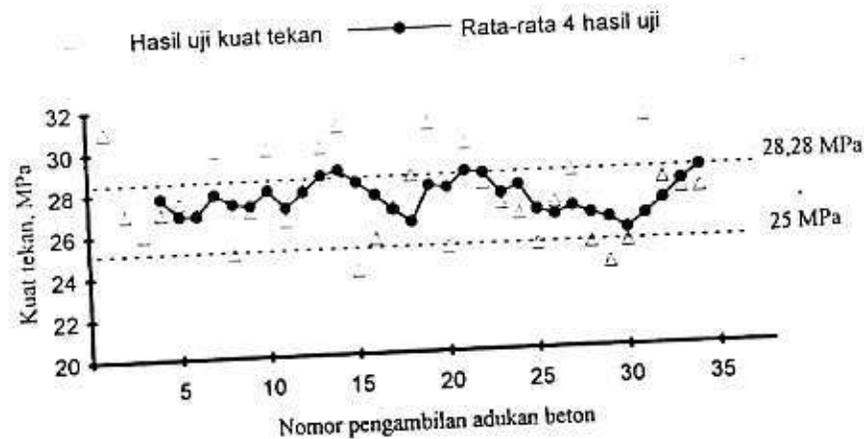
- (a) kuat tekan rata-rata dari tiga benda uji hasil bor inti (satu titik bor diambil 3 benda uji) mempunyai kuat tekan tidak kurang dari $0,85 f_c'$,
- (b) kuat tekan masing-masing benda uji hasil bor inti tidak ada satupun yang kurang dari $0,75 f_c'$.

Jika hasil uji bor inti ternyata menunjukkan bahwa beton tidak memenuhi syarat maka langkah berikutnya dapat berupa uji beban untuk menguji bagian struktur

yang diragukan atau langkah-langkah lain yang dianggap tepat oleh Penanggung Jawab proyek.



Gb.8.1. Hasil uji kuat tekan silinder beton.



Gb.8.2. Nilai rata-rata dari empat hasil uji.

9 PENGAMBILAN CONTOH

9.1. PENDAHULUAN

Usaha untuk memperoleh contoh yang benar-benar mewakili agregat, beton segar atau beton keras yang diinginkan, merupakan hal yang sulit dan kompleks. Pada bab ini diuraikan cara-cara pengambilan contoh agregat, beton segar, dan beton keras.

9.2. PENGAMBILAN CONTOH AGREGAT

(a) Pengambilan contoh agregat dari tanah galian

Karena pemisahan dapat terjadi selama pengambilan contoh agregat maupun selama pengangkutan maka usaha menghindari pemisahan tersebut diuraikan dalam bagian berikut ini.

Langkah pertama apabila tempat pengambilan agregat (*deposit*) merupakan tempat langsung yang ada di lapangan ialah menentukan tempat-tempat di area itu yang akan diambil contohnya. Langkah ini agak sulit dijelaskan karena membutuhkan pengalaman tersendiri.

Langkah kedua ialah cara pengambilan contoh itu sendiri. Pada tempat pengambilan itu yang menjadi persoalan ialah bagaimana agar perbedaan yang terjadi dari lapisan paling atas ke lapisan terbawah dapat diwakili.

Untuk pasir sebaiknya pengambilan dilakukan dengan pipa, dan bila mungkin untuk kerikil dapat dipakai pipa pula. Diameter pipa tersebut sekitar 50 mm dan panjang 2 meter, ujung bawah dipotong miring sehingga tajam (seperti bambu runcing) dan di bagian atas diberi pegangan. Di bagian satu sisi pipa tersebut diberi semacam "*daun telinga*" yang dipasang berderet lurus sepanjang pipa, sehingga ketika pipa tersebut ditekan masuk ke dalam pasir sambil diputar akan memasukkan pasir ke dalam pipa.

Apabila lapisan agregat tidak mudah runtuh, maka cara pengambilan dapat dilakukan secara mengambil langsung agregat dari sisi luar tumpukan agregat pada selang jarak tertentu dari atas ke bawah. Pengambilan dapat dilakukan dengan alat cangkul/sekop. Pada tiap tempat dimasukkan ke dalam ember/kotak yang berbeda dan diberi label yang jelas, tentang lokasi pengambilan dan kedalamannya. Pada tempat pengambilan itu apabila terdapat kelainan khusus harus dicatat, antara lain bila ada batu yang agak besar, bekas aliran air, perubahan lapisan pasir/kerikil, perubahan warna agregat, dan sebagainya. Apabila pengambilan dilakukan dengan membuat lubang (seperti lubang sumur) maka agregat yang diambil sebaiknya dari dinding yang berlawanan arah pula.

Pada keadaan agregat yang tidak dapat ditumpuk vertikal, maka pengambilan contoh agak lebih sulit. Biasanya timbunan pasir atau kerikil tidak tegak dalam ketinggian sekitar 50 cm. Oleh karena itu maka perlu papan kayu untuk menahan agregat itu setinggi 50 cm. Pengambilan dengan papan itu dimaksudkan agar tempat pengambilan contoh agregat itu dapat secara vertikal. Keuntungan pada agregat yang lepas ini ialah biasanya pada arah vertikal perbedaan agregatnya tidak besar, atau boleh dikatakan seragam. Dengan demikian pengambilan diambil dari macam-macam tempat saja, bukan variasi kedalamannya.

(b) Pengambilan contoh dari timbunan

Bila pengambilan contoh dilakukan terhadap agregat yang ditimbun di lapangan maka titik pengambilan harus seragam dari lapisan atas sampai lapisan bawah. Pengambilan contoh dimulai dari bagian bawah ke atas dengan selang jarak yang sama. Apabila hanya sebagian saja timbunan itu yang dipakai, maka pada bagian itu harus diambil contohnya secara khusus. Pengambilan dilakukan dengan alat berupa pipa, kecuali apabila kerikil yang mungkin sulit dimasuki pipa. Bila pipa sulit, maka dapat dilakukan dengan sekop asalkan diambil dari beberapa titik dan kedalaman yang bervariasi. Dengan cara memberi papan di sekitar pengalihan, dapat dihindari masuknya agregat yang tidak diinginkan dari samping.

(c) Pengambilan contoh dari ban berjalan

Apabila contoh agregat yang akan diambil berasal dari ban berjalan (*conveyor belt*) maka pengambilan contoh harus dilakukan dengan mengambil secara penuh satu potongan lintang ban dan dalam selang waktu yang pendek. Cara pengambilan yang keliru ialah bila pengambilan hanya dilakukan dari suatu bagian tertentu saja dan pada selang waktu yang terlalu lama.

Banyak sedikitnya pengambilan tergantung homogenitas keseragaman agregat itu, bila agregat itu ternyata kurang seragam dari satu waktu dan waktu yang lain maka jumlah pengambilan dapat lebih banyak daripada apabila ternyata agregat itu tampak seragam.

(d) Pengambilan contoh dari gerbong kereta api

Contoh agregat yang diambil dari gerbong/bak kereta api akan lebih baik apabila diambil dari tempat-tempat yang berselang jarak tetap di dalam garis lurus yang berada di tengah-tengah dan di kedua tepi kanan dan kiri sumbu kereta api. Ukuran volume contoh yang diambil tergantung besar kecilnya ukuran gerbong/bak kereta, banyak sedikitnya titik pengambilan dan besar kecil ukuran butir maksimum agregat yang diperiksa. Pada setiap titik pengambilan contoh agregat harus diambil dari bagian yang sedikit agak bawah dari permukaan.

Apabila pengambilan contoh dengan penusukan pipa sulit dilaksanakan, terutama bila besar butirannya besar-besar, maka pengambilan contoh dapat dilakukan pada waktu kereta diisi atau waktu ditumpahkan. Sewaktu kereta di-kosongkan is-

inya pengambilan dilakukan dengan sekop pada selang waktu yang sama, dengan perhatian perlu dilakukan agar tidak ada butiran agregat besar yang "lari" dari sekop.

(e) Pengurangan jumlah contoh

Bila volume agregat yang diambil dari tiap-tiap titik terlalu banyak, maka untuk pemeriksaan dapat dikurangi dengan cara dibagi empat atau dibelah.

(1) Cara dibagi empat. Pada cara dibagi empat (*quartering method*) ini agregat ditaruh ditempat yang rata, keras dan bersih, agar tidak terjadi kehilangan butiran atau penambahan butiran dari alas. Contoh itu kemudian diaduk sampai rata dengan cangkul atau sekop. Bila agregat tampak rata lalu ditimbun dengan cangkul/sekop pada suatu sisi sedemikian rupa sehingga bentuk timbunan berupa kerucut. Hal ini dilakukan dengan menjatuhkan agregat dengan cangkul/sekop pada titik yang sama (selalu pada puncak dari timbunan sebelumnya).

Timbunan contoh tadi kemudian diratakan menjadi mempunyai tebal sama dan berbentuk lingkaran, dan dijaga jangan sampai ada butiran yang pindah dari satu bagian seperempat lingkaran yang satu ke bagian seperempat lingkaran yang lain. Timbunan yang sekarang telah berbentuk lingkaran dan tingginya sama tersebut lalu dibagi menjadi empat sama besar dengan membuat dua garis yang bersilang tegaklurus di tengah-tengah lingkaran tadi. Langkah berikutnya ialah membuang dua bagian seperempat yang berlawanan arah, membersihkan tempatnya, kemudian mencampurkan dua bagian seperempat yang masih tinggal.

Cara dibagi empat di atas dilakukan apabila volume contoh yang di ambil terlalu besar. Bila contoh tersebut tidak banyak, cara yang dipakai ialah dengan menggunakan alat pembagi.

(2) Dengan alat pembagi. Contoh agregat dimasukkan ke dalam alat pembagi (*sample splitter*). Di dalam alat pembagi tersebut agregat terbagi dua sama banyak. Bagian yang satu keluar/berhenti, bagian yang satunya terbagi lagi menjadi dua sama banyak, begitu seterusnya sampai jumlah agregat menjadi sedikit dan sesuai dengan sejumlah yang diinginkan.

9.3. PENGAMBILAN CONTOH BETON SEGAR

Pengambilan contoh beton segar (adukan beton) perlu diuraikan di sini untuk mempelajari cara-cara mengambil contoh beton segar yang dapat mewakili beton segar dari tempat beton itu diambil. Adukan yang diambil seharusnya merupakan sebuah dari sekumpulan adukan yang seragam, dan bila mungkin, pasir maupun kerikil yang masuk adukan diambil contohnya pula untuk diperiksa kadar air dan gradasinya.

Demikian pula jumlah air yang masuk adukan perlu dicatat pula secara teliti. Jumlah air ini bersama dengan air yang dikandung oleh pasir dan kerikil akan dihitung sebagai air pencampur semen (faktor air-semen).

Pengambilan contoh beton segar dari talang atau ban berjalan biasanya kurang memuaskan, akan tetapi kalau hal itu dianggap diperlukan, maka pengambilan harus hati-hati dan diambil dari seluruh potongan lintang secara penuh dari aliran. Pengambilan contoh dari bejana aduk yang berjalan juga kurang baik, karena beton biasanya mengalami pemisahan kerikil. Bila adukan beton dijauhkan dari mesin aduk ke bejana angkut, maka pengambilan yang baik dilakukan dari lubang / pintu geser yang ada di tengah-tengah tinggi bejana.

Pengambilan contoh beton segar dapat dilakukan dengan mengambil langsung dari mesin aduk setelah pengadukan selesai. Pengambilan dilakukan dengan memakai sekop ke dalam bejana aduk. Dengan cara ini sebaiknya pengambilan dilakukan dengan mengambil beberapa beton segar dari beberapa titik di dalam bejana aduk, lalu dicampurkan.

Bila pengambilan dilakukan dari truk-aduk, beton contoh diambil sebanyak 3 kali atau lebih, dalam selang waktu ketika penumpahan beton segar dari dalam bejana truk-aduk.

Sesuai dengan ketentuan SK SNI M-26-1990-F (Standar Metode Pengambilan Contoh untuk Campuran Beton Segar), maka contoh-contoh beton segar tersebut harus segera dibawa ketempat pengujian slam atau pembuatan silinder. Contoh-contoh tersebut digabungkan dan diaduk rata dengan sekop atau cangkul. Selisih waktu antara pengambilan pertama adukan dan selesainya pengadukan contoh-contoh adukan tidak boleh lebih dari 15 menit.

Pengujian slam paling lambat 5 menit setelah selesainya pengadukan contoh, adapun pembuatan silinder contoh paling lambat 15 menit sejak selesainya pengadukan contoh.

Volume beton segar yang diambil tergantung pada keperluan, sebagaimana tercantum dalam Tabel 9.1.

Tabel 9.1. Jumlah pengambilan contoh beton segar (SK SNI M - 26 - 1990 - F)

No.	Macam pengujian	Volume contoh (liter)
1.	Slump	8
2.	Berat jenis	6
3.	Kadar udara	9
4.	Uji kuat tekan	20

Pemisahan contoh harus dilakukan, misalnya untuk pemeriksaan slam, berat jenis, dan untuk dicetak menjadi silinder.

Khusus untuk beton dengan besar butir maksimum sampai dengan 40 mm, dapat dilakukan langsung untuk memeriksa nilai slam dan pembuatan silinder diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Khusus untuk beton massa, yang menggunakan ukuran kerikil lebih dari 40 mm (yaitu 75 mm atau 150 mm) maka contoh adukan beton harus diayak dulu dengan cara pengayakan adukan basah (wet)

screening), dengan ayakan lubang 40 mm. Besar butir maksimum di dalam contoh tidak boleh lebih dari 1/4 (seperempat) ukuran terkecil benda uji silinder. Pengayakan adukan beton basah dilakukan dengan peralatan ayakan basah serta mesin penggetar yang dapat bergoyang secara cepat, secara manual maupun mekanis.

9.4. PENGAMBILAN CONTOH BETON KERAS

Pengujian terhadap contoh silinder beton yang dilakukan selama pembetonan di atas bukan merupakan cara langsung dari pemeriksaan mutu beton, melainkan hanya pengontrolan kualitas adukan beton. Data yang lebih tepat dan teliti ialah bila diambil contoh dari bagian beton yang sudah keras di tempat penuangan beton setelah pekerjaan selesai. Cara pemadatan yang tidak berakibat terjadinya sarang-sarang kerikil atau bentuk lain dari pemisahan batuan, dapat diperiksa dengan cara pemeriksaan bor inti (*core drill*). Pemeriksaan ini dapat menjawab keragu-raguan mengenai variasi kekuatan dan pengaruh dari keadaan permukaan yang berupa cara perawatan dan keadaan sekitar, yaitu variasi kekuatan beton pada perbedaan kedalaman dari permukaan. Hal yang perlu diperiksa juga variasi kekuatan beton pada beberapa titik pada kemiringan saluran akibat pemadatan yang berbeda, juga pada titik-titik di lubang terowongan. Pada setiap titik diambil minimum 3 (tiga) buah silinder.

Benda uji yang diambil dengan mesin bor beton dapat berdiameter dari 5 cm sampai 25 cm dan dalam beberapa macam panjang. Untuk benda uji silinder dengan diameter kurang dari 40 cm biasanya dilengkapi dengan intan di bagian depannya. Mesin dengan bahan bakar bensin atau motor listrik banyak digunakan. Sebuah pompa air sebaiknya disertakan juga bila alat itu tidak disertai mesin pompa air pendingin. Untuk mesin pengambil contoh beton keras dengan diameter 40 cm atau lebih pada bagian ujungnya diberi pisau, sebagai alat pemotongnya. Walaupun alat ini lebih lambat, tetapi lebih murah.

Beton yang diambil contohnya harus sudah cukup keras (minimum sudah berumur 14 hari) agar tidak rusak selama pengeboran, terutama lekatan antara mortar dan batuan di dalam silinder contohnya. Untuk pengujian tekan, benda uji silinder itu sebaiknya mempunyai panjang sekitar 2 kali diameternya, dan tidak boleh kurang dari 3 kali diameter butiran yang terbesar, dan juga tidak boleh ada retakan. Apabila terpaksa, misalnya karena tebal beton terlalu tipis, diperbolehkan panjang silinder sama dengan diameternya. Untuk silinder beton dengan panjang kurang dari 2 kali diameter, hasil uji kuat tekannya harus dilakukan koreksi sesuai dengan Tabel 9.2.

Tabel 9.2. Faktor koreksi kuat tekan silinder beton

Perbandingan tinggi dan diameter	Faktor koreksi kuat tekan
2,00	1,00
1,75	0,99
1,50	0,97
1,25	0,94
1,00	0,91

Tempat pengambilan contoh beton yang berasal pada dinding vertikal harus dipilih dan dicatat secara hati-hati, karena umumnya pada bagian bawah dinding mempunyai kepadatan yang lebih daripada bagian atasnya.

Bila contoh beton akan diambil dari dalam titik buhul atau untuk mengetahui keefektifan cara pemadatan (karena banyaknya tulangan yang bersilangan pada titikbuhul atau pada penghentian air (*water stop*), lubang itu harus dibor secara hati-hati tanpa tekanan keras, untuk mengurangi kerusakan silinder.

Membawa benda uji (silinder beton) dari tempat pengambilan ke laboratorium pengujian harus dijaga jangan sampai rusak, harus dibungkus rapat dengan kertas "*waterproof*" yang dilem rapat, untuk mencegah pengeringan selama perjalanan dan penyimpanan.

9.5. JUMLAH CONTOH

Dalam buku "Perencanaan Campuran dan Pengendalian Mutu Beton" (1994), setiap kali pengambilan contoh beton segar harus dibuat 2 silinder beton, yang kemudian dari kedua silinder itu kuat tekannya diambil rata-ratanya menjadi satu data hasil uji kuat tekan beton dari satu kali pengambilan.

Jumlah pengambilan contoh beton segar ditetapkan sebagai berikut.

- (1) Untuk satu mutu beton paling sedikit diambil satu contoh per hari. Setiap satu contoh dibuat dua silinder.
- (2) Untuk pekerjaan besar, dilakukan seperti Tabel 9.3., dengan memperhatikan ayat (1) di atas.

Tabel 9.3. Frekuensi pengambilan contoh

Kelas beton	Volume (diambil yang terkecil)
Beton kelas 1	10 m ³ atau 10 adukan
Beton kelas 2	20 m ³ atau 20 adukan
Beton kelas 3	50 m ³ atau 50 adukan

Keterangan :

1. Beton kelas 1 ialah beton yang digunakan dalam komponen struktur dan beton prategang
2. Beton kelas 2 ialah beton yang tidak termasuk dalam kelas 1 dan kelas 3
3. Beton kelas 3 ialah beton massa, yang tidak mengutamakan faktor kekuatan.

9.6. BENTUK BENDA UJI

Benda uji beton digunakan untuk berbagai macam keperluan, misalnya untuk mengetahui kuat tekan, modulus elastis, kuat tarik belah, dan lain-lain. Berhubung dengan berbagai keadaan maka ukuran maupun bentuk benda uji dapat dibuat bermacam-macam, misalnya berupa silinder, kubus, atau prisma.

Ukuran benda uji tidak boleh kurang dari 3 kali ukuran maksimum agregat kasar yang dipakai. Hal ini untuk menghindari pengaruh ketidakseragaman bahan beton dalam benda uji. Demikian pula ukuran terkecil benda uji tersebut juga tidak boleh kurang dari 50 mm (Metoda Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium, SK SNI M-62-1990-03). Pada pekerjaan pembuatan beton massa yang memakai kerikil besar-besar (sampai 150 mm) contoh beton segar diayak dulu secara "basah" agar kerikil dengan ukuran di atas 40 mm terpisah, kemudian dibuat silinder beton ukuran 150 mm kali 300 mm. Hasil uji silinder beton dengan cara ayakan basah ini hasilnya tidak jauh berbeda jika dibandingkan dengan hasil uji silinder dari hasil bor inti (*core drill*) terhadap beton massanya dengan diameter 150 mm, 200 mm, dan 250 mm dan tinggi 2 kali diameternya.

Benda uji berbentuk silinder umumnya disyaratkan panjang 2 kali diameter. Karena beton merupakan bahan komposit dari bahan-bahan yang kekuatannya tidak sama maka ada kecenderungan semakin besar benda uji kekuatannya semakin mendekati bahan yang kekuatannya terendah. Dengan demikian semakin besar benda uji semakin kurang kuat tekannya. Tabel 9.4. memberikan gambaran mengenai perbandingan kuat tekan dari berbagai ukuran silinder beton.

Tabel 9.4. Perbandingan kuat tekan silinder beton pada berbagai ukuran

Ukuran silinder		Kuat tekan (%)
D (mm)	L (mm)	
50	100	109
75	150	106
150	300	100
200	400	96

Pada uji bor inti dianjurkan agar tinggi silinder 2 kali diameter, namun jika terpaksa, boleh digunakan tinggi kurang dari 2 kali diameter namun hasil kuat tekannya sebaiknya dikalikan faktor koreksi sebagaimana pada Tabel 9.5. Hal ini karena semakin pendek benda uji, hasil uji tekannya semakin besar.

Tabel 9.5. Perbandingan kuat tekan silinder beton pada berbagai perbandingan tinggi-diameter.

Perbandingan panjang-diameter	Koreksi
2,00	1,00
1,75	0,98
1,50	0,97
1,00	0,91

Bentuk standar benda uji menurut Standar Nasional Indonesia Tata Cara Penghitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SNI-03-2847-1992 atau SKSNI T-15-1991-03) Bab.I pasal 1.3. ayat 14 adalah silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm, namun apabila karena alasan tertentu tidak dapat membuat silinder, boleh digunakan kubus sisi 150 mm. Apabila digunakan kubus sisi 150 mm maka hasil uji kuat tekannya perlu dikalikan faktor koreksi sebesar 0,83 (SK SNI T-15-1990-03 Standar Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal).

10 BETON JENIS LAIN

10.1. BETON RINGAN

Beton biasa merupakan bahan yang cukup berat, dengan berat 2400 kg/m^3 dan menghantarkan panas. Untuk mengurangi beban mati suatu struktur beton atau mengurangi sifat penghantaran panasnya maka telah banyak dipakai beton ringan. Beton disebut sebagai beton ringan jika beratnya kurang dari 1800 kg per meter kubik. Pada dasarnya, beton ringan diperoleh dengan cara pemberian gelembung udara ke dalam campuran betonnya. Oleh karena itu pembuatan beton ringan dapat dilakukan dengan cara-cara berikut :

- (c) Dengan membuat gelembung-gelembung gas/udara dalam adukan semen. Dengan demikian akan terjadi banyak pori-pori udara di dalam betonnya. Bubuk aluminium ditambahkan ke dalam semen dan akan timbul gelembung-gelembung udara.
- (b) Dengan menggunakan agregat ringan, misalnya tanah liat bakar, batu apung. Dengan demikian beton yang terjadipun akan lebih ringan daripada beton biasa.
- (c) Pembuatan beton dengan tanpa butir-butir agregat halus. Dengan demikian beton ini disebut "beton non-pasir" dan hanya dibuat dari semen dan agregat kasar saja (dengan butir maksimum agregat kasar sebesar 20 mm atau 10 mm). Beton demikian mempunyai pori-pori yang hampir seragam. Sebagai bahan batuan kasar yang dipakai antara lain : kerikil alami (batu apung), "terak tungku tinggi", tanah liat bakar.

10.2. BETON MASSA

Beton massa ialah beton yang dituang dalam volume besar, yaitu perbandingan antara volume dan luas permukaannya besar. Biasanya dianggap beton massa jika dimensinya lebih dari 60 cm . Beton massa biasanya dibuat untuk fondasi besar, pilar, bendungan dan sebagainya. Pada bendungan, biasanya dibedakan antara beton massa dalam dan beton massa luar. Beton massa dalam tidak terpengaruh cuaca, adapun beton massa luar yang tebalnya sekitar 2 meter terpengaruh cuaca sehingga ada persyaratan nilai faktor air-semen maksimum, agar lebih tahan cuaca.

Pada pembuatan beton massa, salah satu faktor yang amat penting untuk diperhatikan adalah perbedaan temperatur yang terjadi akibat adanya panas hidrasi. Pada saat penguangan adukan beton hal ini memang tidak nampak, namun dalam beberapa waktu berikutnya panas mulai timbul di dalam betonnya. Panas yang timbul ini apabila tidak dihilangkan akan membuat beton mengembang dan terjadilah kecenderungan timbul retak-retak. Proses retak-retak ini berlangsung bersamaan dengan proses pengerasan beton.

Pada tahap proses pengerasan tersebut, beton massa berlaku sama seperti logam besar yang dituang (dicor) dalam temperatur dingin. Lapisan luar mendingin dan menyusut dahulu, sedangkan lapisan dalam masih sedikit panas yang berarti belum susut, maka terjadilah perbedaan volume, yang menimbulkan kecenderungan untuk retak. Tahap berikutnya, lapisan bagian dalam mendingin, dan menyusut, sehingga menarik lapisan luar yang sudah berhenti menyusut.

Beberapa usaha yang dapat dilakukan untuk mengurangi timbulnya retak-retak akibat pengaruh temperatur tersebut pada beton massa, yaitu :

- (1) Digunakan semen (karena semen adalah sumbernya panas) sesedikit-sedikitnya dengan cara :
 - a). ukuran butir agregat kasar (kerikil) yang sebesar-besarnya (sebatas yang diizinkan, yaitu 75 mm atau 150 mm), karena makin besar ukuran agregat maksimum yang dipakai makin sedikit semen yang diperlukan. Bila digunakan diameter agregat kasar 75 atau 150 mm maka gradasi agregat kasarnya harus memenuhi Tabel 10.1., dan gradasi agregat halus (pasir) seperti Tabel 10.2.

Tabel 10.1. Batas-batas gradasi agregat kasar untuk beton massa.

Lubang ayakan	Lolos ayakan (% berat)	
	Butir maks. 75 mm	Butir maks. 150 mm
150	100	100
75	100	65 - 80
40	60 - 80	33 - 60
20	30 - 40	20 - 35
10	10 - 15	8 - 15
4,8	0	0

Tabel 10.2. Batas-batas gradasi agregat halus untuk beton massa.

Lubang ayakan	Lolos ayakan (% berat)
10	100
4,8	92 - 100
2,4	75 - 90
1,2	50 - 70
0,6	35 - 50
0,3	17 - 30
0,15	3 - 10

- b) memakai perbandingan berat agregat halus dan agregat kasar yang paling tepat, agar hanya diperlukan semen yang minimum walaupun kuat tekan betonnya sama.

Jika digunakan ukuran maksimum agregat kasar 75 mm maka berat pasir antara 24 sampai 36 persen dari keseluruhan berat pasir dan agregat kasarnya.

Jika digunakan ukuran maksimum agregat kasar 150 mm maka berat pasirnya antara 25 sampai 30 persen dari keseluruhan berat pasir dan agregat kasarnya.

- c) gunakan air sesedikit-sedikitnya (sebatas yang memungkinkan, hanya untuk keenceran adukan saja dalam proses pemadatan), karena untuk memperoleh mutu beton yang sama diperlukan faktor air-semen sama, berarti akan dipakai semen sedikit jika airnya sedikit. Pemakaian air yang sedikit mempunyai konsekuensi adukan beton lebih kental, sehingga sering hanya mempunyai slam 25 mm saja sehingga pemadatannya dilakukan dengan *compacted roller*.

Perbandingan antara berat air dan berat semen antara 0,50 sampai 0,70.

Jika digunakan ukuran maksimum agregat kasar 75 mm, maka :

$$\frac{W_{p+k}}{W_{smn}} = \text{antara 6 sampai 9}$$

Jika digunakan ukuran maksimum agregat kasar 150 mm, maka :

$$\frac{W_{p+k}}{W_{smn}} = \text{antara 8 sampai 15}$$

dengan : W_{p+k} : berat pasir dan agregat kasar
 W_{smn} : berat semen Portland

- (2) Digunakan semen khusus yang mempunyai panas hidrasi rendah, misalnya :
- semen Portland tipe IV
 - semen Portland tipe II
 - semen Portland yang dicampur dengan pozolan, misalnya trass, abu terbang (*fly ash*).
- (3) Tuang beton dalam blok-blok dengan ukuran terbatas :
- tebal tiap lapis antara 40 - 60 cm
 - tiap lapis harus masih lunak ketika lapisan berikutnya diletakkan.
- (4) Berikan aliran air dingin melalui pipa-pipa yang terpendam, agar panas hidrasi selalu terdistribusi secara merata di dalam betonnya. Perbedaan temperatur terbesar dapat dijaga agar sesuai dengan keinginan kita dengan cara menentukan jarak pipa, lama pengaliran air, temperatur air yang dimasukkan, dan debit air yang dialirkan. Ukuran arah horisontal ditetapkan sedemikian rupa sehingga retak susutan dengan blok lain di sebelahnya akan cukup lebar

untuk dimasuki dengan bahan grouting, agar antar blok menjadi satu kesatuan yang utuh. Antara 6 sampai 20 meter tampaknya cukup membuat celah susutan tersebut.

Sebagai contoh, misalnya pada waktu pembuatan Dam Hoover (Gilkey, 1962), digunakan untuk satu penuangan beton setinggi 1,50 meter dengan ukuran horisontal berkisar antara 8 meter dan 20 meter. Digunakan pipa dengan diameter 25 mm, yang dipasang berkelok-kelok seperti huruf "S" dengan jarak as-as sekitar 1,50 meter arah horisontal. Pipa-pipa tersebut diletakkan horisontal di atas hamparan adukan setelah adukan mencapai tebal 1,50 meter. Air dingin (pada temperatur air sungai) dialirkan ke dalam pipa tersebut segera setelah selesai penuangan beton. Panas beton akan berradiasi sampai lapisan berikutnya setelah lapisan berikutnya dituang. Lapisan berikutnya baru boleh dituang setelah lapisan tersebut berumur 72 jam (3 x 24 jam). Tebal seluruh lapisan beton tidak boleh dituang lebih dari 10,5 meter dalam 30 hari.

Meskipun dipakai semen jenis panas hidrasi rendah dan campurannya juga dengan jumlah air dan semen sedikit (*lean mixture*), beton yang dibiarkan dulu berhubungan dengan udara terbuka serta selalu disemprot air selama 3 hari pertama, suhu beton tetap masih naik sekitar 25°C selama 6 sampai 12 bulan. Kenaikan suhu tersebut akan lebih besar jika digunakan semen Portland biasa.

Jika permukaan beton dibiarkan berhubungan dengan udara terbuka selama 10 hari pertama, maka selama 6 sampai 12 bulan kenaikan suhunya sekitar 15°C.

Penelitian lanjutan dari pembuatan Dam Hoover mendapatkan kenaikan suhu beton massa dengan berbagai jenis semen tertentu, sebagaimana tampak pada Gb.10.1.

10.3. FEROSEMEN

Ferosemen (*ferrocement*) ialah suatu bahan gabungan yang diperoleh dengan cara memberikan kepada mortar semen suatu tulangan yang berupa anyaman kawat baja. Mortar semen berfungsi sebagai massa dan kawat baja sebagai pemberi kekuatan tarik dan daktilitas. Secara lebih teliti, ferosemen dapat diartikan sebagai beton bertulang dengan bentuk khusus, yaitu dengan tulangan lebih rapat daripada beton bertulang. Walaupun demikian ferosemen mempunyai sifat yang berbeda dengan beton bertulang, terutama pada tingkat tegangan yang sedang. Karena distribusi dari tulangan yang kecil-kecil tapi lebih merata maka memperkecil kemungkinan mortar untuk retak-retak. Selain itu beberapa sifat lainnya ketahanan terhadap pecah, ketahanan terhadap patah leleh, ketahanan terhadap kelolosan air (kedap air) lebih baik.

Ferosemen merupakan mortar semen yang banyak menggunakan semen, dengan tebal di antara 10 mm sampai 60 mm dengan volume tulangan sekitar 6 sampai 8 persen, dengan bentuk tulangan satu lapis atau lebih. Tulangan itu dapat berupa kawat silang yang dilas atau batang-batang baja tulangan dengan diameter yang kecil. Perbandingan volume antara semen dan pasir antara 1 : 1 1/2 dan 1 : 2. Kadang-kadang dipakai pula dengan perbandingan semen : pasir sebesar 1 : 3.

Pemakaian bahan kimia tambahan untuk membuat adukan mortar lebih encer dapat dipakai juga.

Jumlah air yang dipakai, yang sangat berpengaruh terhadap kekuatan dan kelecakan mortar, pertama-tama tergantung pada ukuran butir maksimum, modulus halus butir dan variasi besar butiran pasirnya. Air yang dipakai harus bebas dari kotoran, misalnya tanah liat, asam, garam-garaman, zat organik.

Batuan yang dipakai, yaitu pasir halus, yang berfungsi sebagai bahan pengisi merupakan sekitar 60 sampai 75 persen volume mortarnya. Pasir itu juga seperti airnya harus bersih, tidak mengandung kotoran, misalnya tanah liat, asam, garam-garaman, zat organik. Besar butir pasir yang lebih besar daripada 2,40 mm sebaiknya tidak dipakai, karena akan mengakibatkan mortar berpori. Akan tetapi, pemakaian butir-butir yang terlalu halus mengakibatkan membutuhkan air yang lebih banyak untuk mencapai tingkat kelecakan yang sama, jadi mengurangi kekuatan. Oleh karena itu sebaiknya besar butir pasir dibuat antara 0,20 mm dan 2,40 mm.

Sebagai tulangan ferosemen ini dipakai baja diameter sekitar 3 sampai 8 mm untuk skeleton (rangka) dan kawat ayam dengan diameter kawat sekitar 0,5 mm sampai 1,5 mm.

Baja skeleton merupakan rangka yang berfungsi untuk membentuk secara tepat bentuk ferosemen yang akan dibuat, dan skeleton ini dipakai untuk pegangan kawat ayam. Jarak pusat ke pusat antara dua baja skeleton sekitar 70 sampai 100 mm. Untuk menempelkan antara batang vertikal dan horisontal dapat dipakai kawat ikat atau las. Untuk membuat skeleton ini dapat pula dipakai kawat ayam yang berdiameter antara 3 sampai 4 mm yang dijadikan satu dengan las, dan mempunyai jarak antar batang kawat sekitar 80 sampai 100 mm. Kawat skeleton semacam ini memudahkan pelaksanaan karena umumnya buatan pabrik, akan tetapi harganya sedikit lebih mahal jika dibandingkan dengan baja beton yang diikat.

Kawat ayam dengan diameter sekitar 0,5 mm dan 1,5 mm yang disambung dengan sambungan las, atau dipuntir, dengan jarak antara batang-batang sekitar 6 sampai 20 mm.

Akibat besarnya persentasi tulangan terhadap mortarnya, dan distribusi tulangan yang lebih merata dan lebih menerus dibandingkan dengan beton bertulang, maka ferosemen dapat bersifat seperti plat baja. Oleh karena itu ketahanan terhadap retakan, daktilitas, fleksibilitas, benturan dan kelelahan dipunyai ferosemen dengan lebih baik daripada beton bertulang. Selain itu ferosemen lebih kedap air daripada beton biasa.

Kebaikan-kebaikan ferosemen ialah :

- (1) Struktur yang dibuat dari ferosemen dapat tipis dan ringan. Oleh karena itu dapat terjadi penghematan pada tiang pen dukungnya maupun pada fondasinya. Pengalaman menunjukkan bahwa pengurangan berat sendiri struktur sekitar 30 persen, pemakaian baja berkurang sekitar 15 persen, dan biaya

pembuatan atap berkurang sebesar 10 persen dibandingkan dengan struktur beton biasa.

- (2) Karena berat sendiri yang lebih ringan, maka amat memungkinkan untuk dibuat pabrikasi (dicetak di pabrik).
- (3) Cara pengerjaannya sederhana sehingga tidak memerlukan pekerja yang terlatih baik. Dapat dikerjakan oleh pekerja yang belum terlatih baik.
- (4) Penghematan bahan cetakan dapat dilakukan.

10.4. BETON SERAT

Beton serat (*fibre concrete*) ialah bagan komposit yang terdiri dari beton biasa dan bahan lain yang berupa serat. Serat pada umumnya berupa batang-batang dengan diameter antara 5 dan 500 um (mikro meter), dan panjang sekitar 25 mm sampai 100 mm. Bahan serat dapat berupa : serat asbestos, serat tumbuh-tumbuhan (rami, bambu, ijuk), serat plastik (*polypropylene*), atau potongan kawat baja.

Dalam hal ini serat dapat dianggap sebagai agregat yang bentuknya sangat tidak bulat. Adanya serat mengakibatkan berkurangnya sifat kemudahan dikerjakan dan mempersulit terjadinya segregasi. Serat dalam beton itu berguna untuk mencegah adanya retak-retak, sehingga menjadikan beton serat lebih daktil daripada beton biasa (lihat Gb.5.3.)

Jika serat yang dipakai mempunyai modulus elastisitas lebih tinggi daripada beton, misalnya kawat baja, maka beton serat akan mempunyai kuat tekan, kuat tarik, maupun modulus elastis yang sedikit lebih tinggi daripada beton biasa. Hasil penelitian oleh Sudarmoko (1993) yang menggunakan kawat bendrat dengan panjang 60 mm, 80 mm, dan 100 mm menunjukkan bahwa tambahan 1 % volume beton mampu menaikkan kuat tekan beton sekitar 25 %, kuat tarik sekitar 47 %, dan modulus elastis sekitar 10 % sebagaimana tampak pada Tabel 10.3. Selain itu beton serat juga bersifat lebih tahan benturan dan lenturan. Jika modulus elastisitas serat rendah, misalnya rami atau plastik, hanya membuat beton lebih tahan benturan saja. Karena sifatnya yang lebih tahan benturan daripada beton biasa maka sering dipakai pada bangunan hidrolik, landasan pesawat udara, jalan raya, lantai jembatan.

Tabel 10.3. Kuat tekan, kuat tarik, dan modulus elastis beton serat dengan serat dari bendrat (Sudarmoko, 1993)

No.	Volume serat (%)	Panjang serat (mm)	Kuat tekan		Kuat tarik		Modulus elastis (10^4 MPa)
			(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	
1	0	0	34,22	100	3,34	100	3,978
2	1	60	41,66	121,7	4,72	141,3	4,463
3	1	80	42,85	125,2	4,93	147,6	4,563
4	1	100	42,79	125,0	4,91	147,2	4,625

10.5. BETON NON-PASIR

Beton non-pasir (*no-fines concrete*) ialah suatu bentuk sederhana dari jenis beton ringan yang diperoleh dengan cara menghilangkan bagian halus agregat pada pembuatan beton. Tidak adanya agregat halus dalam campuran menghasilkan suatu sistem berupa keseragaman rongga yang terdistribusi di dalam massa beton, serta berkurangnya berat jenis beton. Rongga di dalam beton tersebut mencapai sekitar 20 sampai 25 persen. Kelebihan utama dari pemakaian beton non-pasir ini adalah :

- kebaikannya sebagai bahan isolasi panas,
- pembuatan beton yang lebih cepat dan sederhana,
- bobotnya yang ringan,
- serta susutnya yang hanya sedikit,
- tidak ada kecenderungan untuk bersegregasi sehingga dapat dijatuhkan dengan tinggi jatuh yang lebih tinggi,
- kebutuhan semen sedikit (karena tidak ada pasir maka luas permukaan butir agregat berkurang sehingga kebutuhan pasta semen yang dipakai untuk menyelimuti butir pasir tidak diperlukan lagi, sehingga kebutuhan semen hanya sedikit) sehingga harganya lebih murah.

Pada umumnya agregat kasar yang dipakai berukuran 10 sampai 20 mm, walaupun ukuran yang lain dapat pula dipakai. Pemakaian agregat dengan gradasi rapat dan bersudut tajam (batu pecah) akan menghasilkan beton non-pasir yang kuat tekan dan berat jenisnya sedikit lebih tinggi daripada yang memakai agregat seragam dan bulat (kerikil). Pengaruh agregat tersebut tampak pada Gb.10.2.

Berat jenis beton non-pasir tergantung pada berat jenis dan gradasi agregat kasar yang dipakai, dan pada umumnya berkisar antara 60 - 75 persen dari beton biasa. Hasil penelitian Kardiyono (1994) yang menggunakan kerikil alami dari Sungai Progo dengan butiran seragam (ukuran 10 - 20 mm) menghasilkan beton non-pasir dengan berat jenis sekitar 1.87.

Beton non-pasir ini akan mempunyai berat jenis yang lebih ringan lagi jika agregat kasar yang dipakai dari jenis agregat ringan. Misalnya, beton non-pasir yang menggunakan agregat pecahan genteng (yang berat jenisnya 1,80) berat jenisnya sekitar 1,60. Jika digunakan agregat yang lebih ringan, misalnya lempung

bekah (hasil pembakaran *shale*, yang berat jenisnya 1,20) diperoleh beton non-pasir yang berat jenisnya sekitar 1,20.

Beton non-pasir terbuat dari air, semen, dan agregat kasar. Perbandingan volume antara agregat-semen berkisar antara 6 sampai 10, dan faktor air-semen berkisar antara 0,35 dan 0,45. Perkisaran faktor air-semen tidak dapat terlalu besar karena jika faktor air-semen terlalu rendah maka pasta semennya tidak cukup menyelimuti butir-butir agregat kasarnya, dan jika faktor air-semen terlalu tinggi maka pasta semen akan terlalu encer sehingga pada waktu pemadatan pasta semen mengalir ke bawah (tidak lagi menyelimuti butir-butir semen). Dengan demikian ada suatu nilai faktor air-semen optimum yang menghasilkan kuat tekan maksimum untuk suatu nilai perbandingan agregat-semen tertentu. Hasil penelitian Kardiyono (1992) yang membuat beton non-pasir dari pecahan genteng keramik diperoleh nilai faktor air-semen sekitar 0,40 dengan kuat tekan antara 5 MPa sampai 10 MPa untuk perbandingan volume agregat-semen 10 sampai 6 sebagaimana tampak pada Tabel 10.4.

Tabel 10.4. Faktor air-semen optimal, kebutuhan semen, dan kuat tekan beton non-pasir dengan agregat pecahan genteng keramik (Kardiyono, 1992)

Perbandingan volume agregat-semen	Faktor air-semen optimal	Kebutuhan semen Portland per m ³ beton (kg)	Kuat tekan beton non-pasir (MPa)
6	0,38	211	10,3
7	0,40	185	8,3
8	0,38	170	7,2
9	0,42	140	6,3
10	0,44	127	5,8

Karena kuat tekannya yang relatif rendah maka sampai saat ini beton non-pasir hanya dipakai untuk bagian non struktur, misalnya tembok atau dibentuk bata beton, namun kadang-kadang dipakai pula untuk bagian struktur. Jika dipakai untuk struktur maka diberi baja tulangan, dan untuk mencegah terjadinya karat pada bajanya maka baja dapat dilapisi dengan pasta semen terlebih dahulu atau bahan pelapis lain. Agar balok beton yang dibuat dari beton non-pasir ini bersifat daktail maka digunakan tulangan tekan sama banyak dengan tulangan tarik (Tjokrodinuljo, 1995).

10.6. BETON SIKLOP

Beton jenis ini sama dengan beton normal/biasa, perbedaannya ialah pada beton ini digunakan ukuran agregat yang relatif besar-besar. Ukuran agregat kasar dapat sampai sebesar 20 cm, namun proporsi agregat yang lebih besar dari biasanya ini sebaiknya tidak lebih dari 20 persen agregat seluruhnya. Beton ini digunakan pada pembuatan bendungan, pangkal jembatan, dan sebagainya.

10.7. BETON HAMPA (*VACUUM CONCRETE*)

Seperti telah diuraikan di depan bahwa hanya kira-kira se-paruh air yang dicampurkan saja yang dipakai untuk beraksi dengan semen, adapun separuh sisanya untuk mengencerkan adukan. Beton jenis ini diaduk dan dituang serta dipadatkan sebagaimana beton biasa, namun setelah beton tercetak padat kemudian air sisa reaksi disedot dengan cara khusus, disebut cara vakum (*vacuum method*). Dengan demikian air yang tinggal hanya air yang dipakai untuk reaksi dengan semen sehingga beton yang diperoleh sangat kuat.

10.8. MORTAR

10.8.1. Pengertian

Pasta ialah adukan yang terdiri dari bahan perekat dan air. Mortar (sering disebut juga mortel, atau spesi) ialah adukan yang terdiri dari pasir, bahan perekat dan air. Beton (*concrete*) ialah adukan yang terbuat dari kerikil, pasir, semen portland, dan air.

Bahan perekat dapat berupa tanah liat, kapur, maupun semen portland. Bila tanah liat yang dipakai disebut mortar lumpur (*mud mortar*), bila dari kapur disebut mortar kapur, dan begitu pula bila semen portland yang dipakai sebagai bahan perekat disebut mortar semen. Pasir dan kerikil berfungsi sebagai bahan pengisi (bahan yang direkat).

10.8.2. Macam-macam Mortar

Mortar dapat dibedakan menjadi 3 macam, yaitu : mortar lumpur (*mud mortar*), mortar kapur, dan mortar semen.

- Mortar lumpur dibuat dari campuran pasir, tanah liat/lumpur dan air. Pasir, tanah liat dan air tersebut dicampur sampai rata dan mempunyai kelecakan (konsistensi; tingkat kepadatan/kecairan) yang cukup baik. Jumlah pasir harus diberikan secara tepat untuk memperoleh adukan yang baik. Terlalu sedikit pasir menghasilkan mortar yang retak-retak setelah mengeras sebagai akibat besarnya susutan pengeringan. Terlalu banyak pasir menyebabkan adukan kurang dapat melekat. Mortar ini biasa dipakai sebagai bahan tembok atau bahan tungku api di desa.
- Mortar kapur dibuat dari campuran pasir, kapur dan air. Kapur dan pasir mula-mula dicampur dalam keadaan kering, kemudian ditambahkan air. Air diberikan secukupnya agar diperoleh adukan yang cukup baik (mempunyai kelecakan baik). Selama proses pengerasan kapur mengalami susutan, sehingga jumlah pasir umumnya dipakai 2 atau 3 kali volume kapur. Mortar ini biasa dipakai untuk pembuatan tembok bata.
- Mortar semen dibuat dari campuran pasir, semen portland, dan air dalam perbandingan campuran yang tepat. Perbandingan antara volume semen dan vo-

lume pasir berkisar antara 1 : 2 dan 1 : 6 atau lebih besar. Mortar ini kekuatannya lebih besar daripada kedua mortar terdahulu, oleh karena itu biasa dipakai untuk tembok, pilar, kolom atau bagian lain yang menahan beban. Karena mortar ini rapat air maka juga dipakai untuk bagian luar dan yang berada di bawah tanah.

Pasir dan semen mula-mula dicampur secara kering sampai merata di atas suatu tempat yang rata dan rapat air. Kemudian sebagian air yang diperlukan ditambahkan kemudian diaduk lagi. Begitu seterusnya sampai air yang diperlukan tercampur semua.

- Mortar khusus dibuat dengan menambahkan bahan khusus pada mortar (b) dan (c) di atas dengan tujuan tertentu.

Mortar ringan, diperoleh dengan menambahkan *asbestos fibers*, *jute fibres* (serat rami), butir-butir kayu, serbuk gergajian kayu, dan sebagainya. Mortar ini digunakan untuk bahan isolasi panas atau peredam suara.

Mortar tahan api, diperoleh dengan menambahkan bubuk bata-api dengan *aluminous cement*, dengan perbandingan volume satu *aluminous cement* dan dua bubuk bata-api. Mortar ini biasa dipakai untuk tungku api dan sebagainya.

10.8.3. Sifat-sifat Mortar

Mortar yang baik harus mempunyai sifat-sifat sebagai berikut.

- Murah
- Tahan lama (awet)
- Mudah dikerjakan (diaduk, diangkut, dipasang, diratakan)
- Melekat dengan baik dengan bata, batu, dan sebagainya
- Cepat kering/keras
- Tahan terhadap rembesan air
- Tidak timbul retak-retak setelah dipasang.

10.8.4. Pengujian Mortar

Untuk mengetahui mutu mortar biasanya dilakukan pengujian. Macam pengujian yang umum dilakukan ialah : uji kuat tarik, uji kuat tekan, dan uji lekat.

Uji kuat tarik dilakukan dengan membuat mortar dalam bentuk seperti angka delapan (lihat Gb.10.3.). Benda uji ini setelah keras kemudian ditarik dengan alat uji *cement briquettes* (lihat Gb.10.4.). Nilai kuat tarik yang diperoleh dihitung dari besar beban tarik maksimum (N) dibagi dengan luas penampang yang terkecil (mm^2).

Uji kuat tekan dilakukan dengan membuat kubus mortar ukuran sisi antara 50 sampai 100 mm yang setelah keras ditekan dengan mesin uji tekan. Nilai kuat tekan diperoleh dengan membagi besar beban tekan maksimum (N) dengan luas penampang (mm^2).

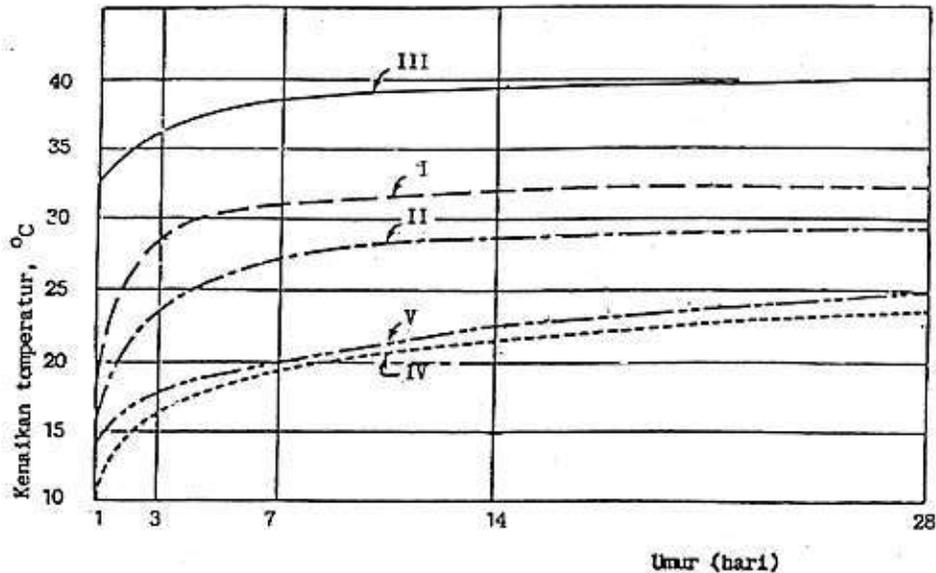
Uji lekat dilakukan dengan bantuan dua buah bata. Bata pertama ditaruh di bawah bata kedua, dengan arah sumbu saling tegak lurus sedemikian rupa sehingga luas bidang lekat sebesar $b \times b \text{ mm}^2$ (b ialah lebar bata). Kedua bata tersebut dilekatkan dengan mortar. Setelah mortar keras kemudian kedua bata dibelah

dibelah dengan gaya tarik yang secara pelan-pelan dinaikkan sampai kedua bata terpisah (lihat Gb.10.5.). Kuat lekat diperoleh dengan membagi beban tarik maksimum (N) dengan luas bidang lekat (mm^2).

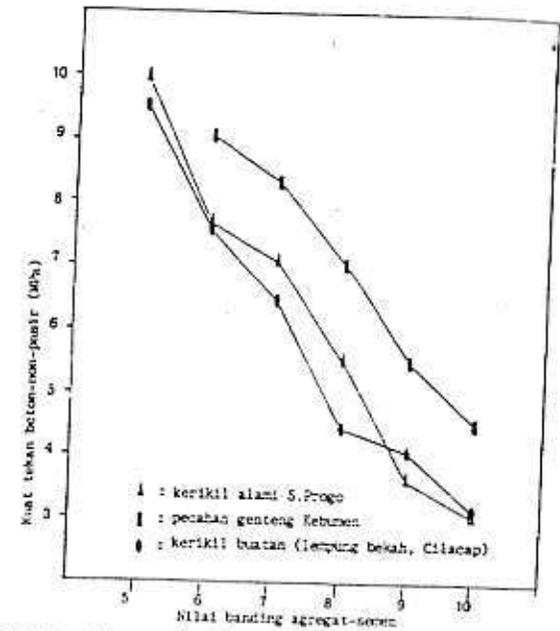
10.8.5. Pemasangan Mortar

Hal-hal yang perlu diperhatikan pada waktu pemasangan mortar ialah sebagai berikut.

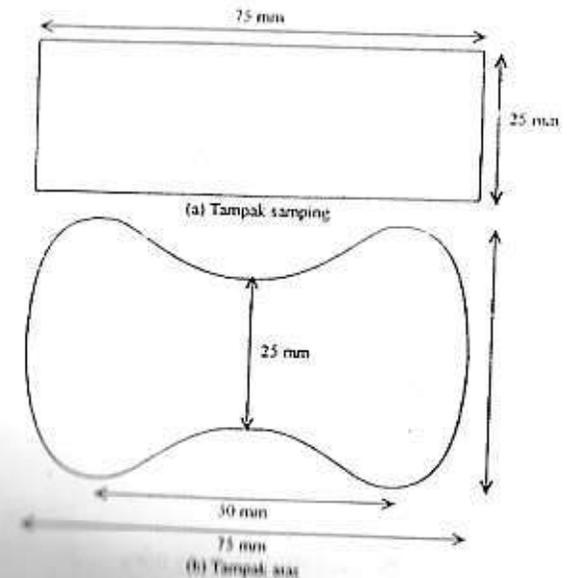
- Bata atau batu yang dilekatkan dengan mortar harus di rendam dalam air sampai jenuh sebelum dikerjakan. Hal ini untuk menghindari penghisapan air oleh bata/batu dari mortar, yang mengakibatkan jumlah air dalam mortar berkurang.
- Mortar harus segera dipasang ditempat yang diinginkan setelah diaduk. Mortar semen harus dipasang dalam waktu kurang dari 30 menit setelah semen dan air tercampur, adapun mortar kapur dalam waktu 36 jam. Setelah terpasang mortar harus selalu dalam keadaan lembab.
- Adukan mortar harus diusahakan yang sekenyal-kentalnya (lawan dari encer/lunak), tetapi yang masih dapat dikerjakan.
- Bangunan yang dibuat dengan mortar harus selalu dibasahi atau dilembabkan selama kurang lebih satu minggu. Untuk bagian yang terkena angin atau sinar matahari harus ditutup.
- Bangunan yang dibuat dari mortar tidak boleh dibebani sebelum mortarnya keras.



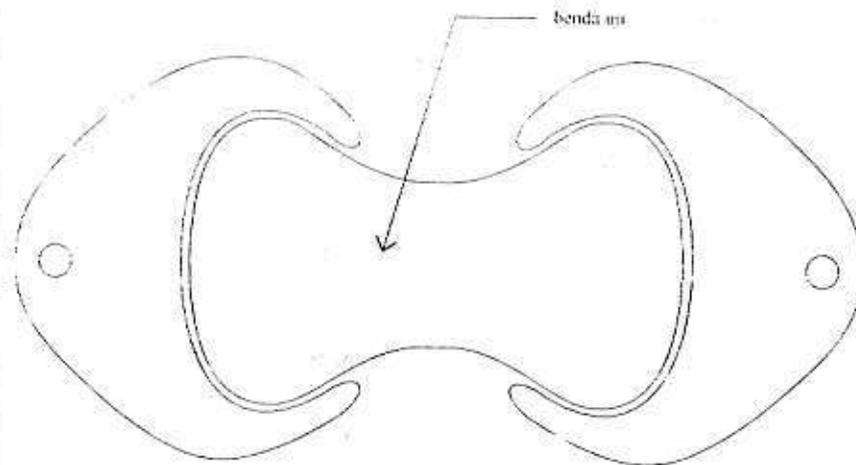
Gb.10.1. Kenaikan temperatur beton massa untuk berbagai jenis semen Portland (Gilkey, 1962)



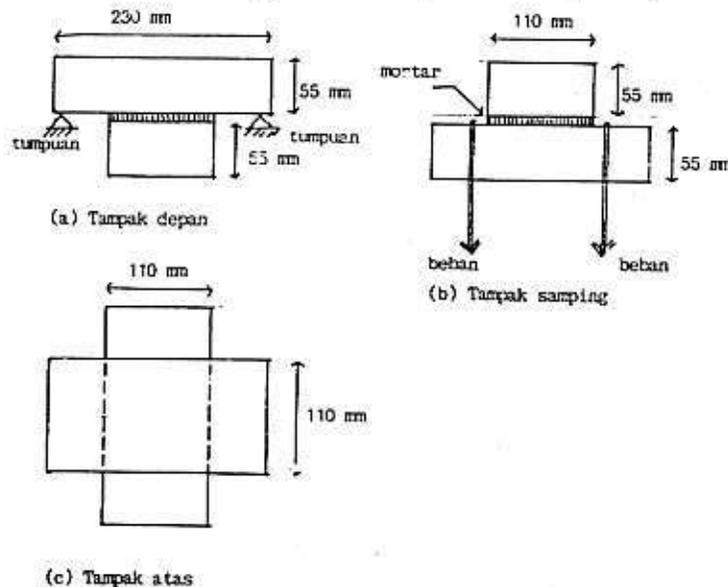
Gb.10.2. Hubungan antara nilai banding agregat-semen dan kuat tekan beton non-pasir pada nilai faktor air-semen 0,40 dengan agregat kerikil alami Sungai Progo, pecahan genteng Kebumen, dan kerikil lempung bekah Cilacap (Kardiyono, 1994)



Gb.10.3. Benda uji tarik mortar.



Gb.10.4. Alat uji tarik mortar (*Cement Briquettes*)



Gb.10.5. Cara uji lekat mortar pada bata

- Anonim. 1982. *Persyaratan Umum Bahan Bangunan di Indonesia (PUBI-1982)*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Pemukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan P.U., Bandung.
- Gambhir.M.L.. 1986. *Concrete Technology*. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. New Delhi.
- Gilkey.H.J.. 1962. Cement and Concrete. *Civil Engineering Handbook*. Fourth Edition. McGraw-Hill Book Company, London.
- Kardiyono. 1992. *Beton Non-Pasir dengan Agregat dari Pecahan Genteng Keramik*. Laporan Penelitian. Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Januari 1992. Yogyakarta
- Kardiyono. 1994. Pengaruh Jenis Agregat pada Berat Jenis dan Kuat Tekan Beton Non-Pasir. *Media Teknik*. Majalah Catur Wulan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. No. 2 Tahun XVI Agustus 1994, Yogyakarta.
- Mindess.S. dan Young.J.F.. 1981. *Concrete*. Prentice-Hall. Inc., Englewood Cliffs. New Jersey.
- Murdock, L.J., dan Brook, K.M. (diterjemahkan oleh Ir. Stephanus Hendarko), 1986. *Bahan dan Praktek Beton*. Edisi Keempat. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Neville.A.M.. 1975. *Properties of Concrete*. Second Edition. The English Language Book Society and Pitman Publishing, London.
- Popovics.S., 1979. *Concrete Making Materials*. Hemisphere Publishing Corporation. Washington.
- Raju.K.N.. 1983. *Design of Concrete Mixes*. College Book Store, Srinivasnagar. Delhi.
- Randing dan Lasino, 1994. *Perencanaan Campuran dan Pengerdaian Mutu Beton*. Lokakarya Penyebar-luasan Standar dan Teknologi Bidang Ke-P.U.-an. Pusat Penelitian dan Pengembangan Pemukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan P.U., Departemen Pckerjaan Umum. Bandung.
- Sudarmoko. 1993. Pengaruh Panjang Serat pada Sifat Struktural Beton Serat. *Media Teknik*. No. 1 Tahun XV April 1993. Majalah Catur Wulan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Teychenne, D.C., Franklin, R.E., dan Erntroy, H.C.. 1982. *Design of Normal Concrete Mixes*. Department of the Environment, Building Research Establishment, and Transport and Road Research Laboratory, and the Cement Concrete Association. London.

- Tjokrodinuljo, K., 1989. *Perancangan Campuran Adukan Beton Dalam Rangka Menyongsong Pedoman Beton 1989*. Prosiding Semmar Mekanika Bahan untuk Menunjang Pembangunan di Indonesia. Pusat Antar Universitas Ilmu Teknik, Universitas Gadjah Mada, 6-7 Februari 1989. Yogyakarta.
- Tjokrodinuljo, K., 1993. Pengaruh Jumlah Semen pada Kuat Tekan Beton dengan Pasir Sungai Krasak dan Kerikil Sungai Progo. *Forum Teknik*, Jilid 17, No. Gabungan, Majalah Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Tjokrodinuljo, K., 1995. Kekuatan dan Daktilitas Balok Beton Bertulang dari Beton non-pasir dengan Kerikil Lempung Bekah. *Media Teknik*, No. 1, tahun XVIII, Edisi April 1995, No. ISSN 0216-3012, Majalah Catur Wulan Fakultas teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Troxell, G.E., Davis, H.E., dan Kelly, J. W., 1968. *Composition and Properties of Concrete*. Second Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.

RU	Pertimbangan Luas tahanan
Kubus 15 x 15 x 15	1,01
Kubus 20 x 20 x 20	0,95
Gilinder 11 x 30	0,83