

BAB II

DASAR TEORI PENELITIAN

2.1. BETON DAN BAHAN PEMBENTUKNYA

2.1.1. Pengertian Umum

Dalam aplikasi teknik sipil, beton merupakan material konstruksi yang paling umum dan sering digunakan. Beton merupakan material komposit yang tersusun dari agregat halus, agregat kasar dan terbungkus oleh matrik semen yang mengisi ruang di antara partikel-partikel sehingga membentuk satu kesatuan. Dalam bahasa Inggrisnya beton disebut “*concrete*” yang diambil dari gabungan prefiks bahasa Latin “*com*”, yang artinya bersama-sama, dan “*creocere*” yang artinya tumbuh. Maksudnya kira-kira, kekuatan yang tumbuh karena adanya campuran zat tertentu¹.

Beton adalah material komposit yang secara esensial terdiri dari medium pengikat dimana partikel atau fregmen agregat dilekatkan²

Karakteristik dan kekuatan beton dapat diperkirakan dan ditentukan dari desain atau perencanaan campuran, material penyusun, serta kontrol kualitasnya.

Secara umum, material penyusun beton adalah:

1. Semen
2. Agregat
3. Air
4. *Admixtures*

Bahan-bahan ini dicampur bersama-sama dan dicetak dalam ukuran dan bentuk yang diinginkan ketika campuran masih basah. Dalam beberapa menit, dalam semen dan air mulai terjadi reaksi kimia yang dikenal dengan hidrasi. Reaksi ini

¹ <http://id.wikipedia.org>

² ASTM C 125 – 03

berlanjut seiring dengan waktu, menghasilkan material yang keras, kuat dan tahan lama yang disebut beton³.

Dalam pengertiannya secara luas, beton dapat diartikan sebagai semua produk yang dibuat dengan medium pengikat⁴.

2.1.2. Bahan – bahan Pembentuk Beton

2.1.2.1. Semen

Semen merupakan material yang berfungsi untuk mengikat atau mempersatukan, secara esensial berfungsi seperti lem⁵. Dalam dunia konstruksi, semen atau material semen, selalu merujuk pada material campuran pada beton, mortar atau *grout*.

2.1.2.1.1. Sejarah Semen

Semen sudah sejak lama dikenal dan digunakan dalam bidang konstruksi, misalnya penggunaan zat putih telur, ketan atau lainnya sebagai perekat dalam pembangunan Candi Borobudur atau Candi Prambanan di Indonesia ataupun jembatan di China, atau menggunakan aspal alam sebagaimana peradaban di Mahenjo Daro dan Harappa di India ataupun bangunan yang dijumpai di Pulau Buton.

Sebelum mencapai bentuk seperti sekarang, perekat dan penguat bangunan ini awalnya merupakan hasil percampuran batu kapur dan abu vulkanis. Pertama kali ditemukan di zaman Kerajaan Romawi, tepatnya di Pozzuoli, dekat teluk Napoli, Italia. Bubuk itu kemudian dinamai pozzuolana. Sedangkan kata semen sendiri berasal dari "*caementum*" (bahasa Latin), yang artinya kurang lebih "memotong menjadi bagian-bagian kecil tak beraturan". Semen Napoli ini tidak bertahan lama, menyusul runtuhnya Kerajaan Romawi, sekitar abad pertengahan (tahun 1100 - 1500 M), sehingga catatan komposisi pozzuolana sempat menghilang dari peredaran. Kemudian pada abad ke-18 (ada juga sumber yang menyebut sekitar tahun 1700-an

³ Somayaji, Shan, *Civil Engineering Materials*, 2001, hal. 79

⁴ Neville, A.M. dan Brooks, J.M. *Concrete Technology*. 1987, hal 2

⁵ Somayaji, Shan, *Civil Engineering Materials*, 2001, hal. 79

M), John Smeaton - insinyur asal Inggris - menemukan kembali komposisi ini. Ia membuat adonan dengan memanfaatkan campuran batu kapur dan tanah liat saat membangun menara suar Eddystone di lepas pantai Cornwall, Inggris.

Kemudian pada tahun 1824, Joseph Aspdin, seorang insinyur berkebangsaan Inggris mengurus hak paten ramuan yang kemudian dia sebut Semen Portland. Pemberian nama tersebut karena warna hasil akhir olahannya mirip tanah liat Pulau Portland, Inggris. Hasil rekayasa Aspdin inilah yang sekarang banyak beredar di pasaran⁶

2.1.2.1.2. Jenis – jenis Semen

Semen yang digunakan dalam industri bangunan terdapat 2 jenis, yaitu semen hidrolis dan semen non-hidrolis.

1. Semen Hidrolis

Semen hidrolis adalah semen yang berubah menjadi produk yang solid setelah ditambah air, menghasilkan material yang tidak terpisah dengan air, dengan kata lain, semen hidrolis akan mengeras bila diberi air⁷. Semen Hidrolis adalah semen yang bercampur dan mengeras melalui reaksi kimia dengan air dan kapabel untuk melakukannya melalui air⁸. Semen hidrolis yang paling umum adalah semen portland. Material yang menghasilkan proses hidrasi hanya dengan reaksi kimia dengan komponen lain disebut memiliki sifat hidrolis laten. Banyak semen hidrolis yang dibuat dari campuran material hidrolis laten dengan semen portland.

2. Semen Non-Hidrolis

Semen non-hidrolis tidak membutuhkan air untuk membuatnya menjadi solid⁹. Semen non-hidrolis yang paling umum adalah kapur dan gipsum. Gipsum pernah digunakan di Mesir sekitar 3000 SM untuk membangun piramid.

⁶ <http://id.wikipedia.org>

⁷ Somayaji, Shan, *Civil Engineering Materials*, 2001, hal. 80

⁸ ASTM C 125 – 03

⁹ Somayaji, Shan, *Civil Engineering Materials*, 2001, hal. 80

Semakin baik mutu semen maka semakin lama mengeras atau membatunya jika dicampur dengan air, dengan angka-angka hidrolitas yang dapat dihitung dengan rumus :

$$\left(\frac{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3}{\% \text{CaO} + \% \text{MgO}} \right) \dots\dots\dots(2.1)$$

Angka hidrolitas ini berkisar antara <1/1,5 (lemah) hingga >1/2 (keras sekali). Namun demikian dalam industri semen angka hidrolitas ini harus dijaga secara teliti untuk mendapatkan mutu yang baik dan tetap, yaitu antara 1/1,9 dan 1/2,15.

2.1.2.1.3. Semen Portland

Semen Portland dibuat dengan memanaskan campuran kapur dan tanah liat, dengan atau tanpa material tambahan, menghasilkan *clinker* (klinker), kemudian klinker dihaluskan menjadi bubuk yang halus.

Semen Portland dibuat dari 3 buah material dasar dan dapat ditambah dengan bahan tambahan, yaitu:

1. Kapur (CaO), sekitar 60%. Didapat dari batu kapur atau kapur
2. Silika (SiO₂), sekitar 20%. Didapat dari lempung, serpih atau bauksit
3. Alumina (Al₂O₃), sekitar 10%. Didapat dari lempung, serpih atau bauksit
4. Bahan Tambahan, misalnya besi oksida, magnesia, sulfur trioksida, alkali dan karbon dioksida, sekitar 10%. Besi juga berfungsi untuk menurunkan temperatur klinker.

Semen Portland dibuat dengan salah satu dari 2 proses dasar, yaitu proses basah dan proses kering. Dalam kedua proses, bahan dasar dihomogenisasi dengan menghancurkan, menghaluskan, dan mencampurkan bahan sampai 80% bahan dasar lolos saringan 200.

Dalam proses basah, campuran (mengandung 30 – 40% air) dipanaskan pada suhu sekutar 1510 °C dalam *kiln* (wadah) horizontal yang berputar. Pada temperatur yang tinggi ini, oksidasi dari kalsium, silika, aluminium dan besi, secara kimia dikombinasi menjadi klinker semen. Perputaran dan bentuk dari wadah

memungkinkan campuran mengalir keluar dari wadah, yang kemudian suhunya akan naik secara bertahap.

Dalam proses kering, campuran dimasukan ke dalam *kiln* dan dibakar secara kering, sehingga menghemat bahan bakar dan air yang digunakan, tetapi prosesnya lebih berdebu. Walaupun sistem basah lebih efisien, namun penggunaan bahan bakarnya membuat sistem ini menjadi lebih tidak ekonomis.

Di dalam *kiln*, air dari material dasar dibuang, dan batu kapur didekomposisi menjadi kapur (CaO) dan karbon dioksida. Kemudian, silika dan alumina dari lempung bereaksi secara kimia dengan kapur membentuk kalsium aluminat, kemudian material dipindahkan menuju area yang lebih panas dimana kalsium silikat terbentuk. Hasilnya inilah yang disebut klinker semen. Klinker semen ini kemudian disimpan didalam silo, dan ketika diperlukan klinker akan dicampur dengan 2 – 5% gipsum.

Semen dapat dikemas dalam berbagai ukuran, namun kemasannya harus tetap kering dan terjaga, karena semen yang terkena udara dan mengalami kelembaban akan memiliki proses setting yang lebih lambat. Semen dalam kemasan biasanya tahan sampai 6 – 8 minggu.

Semen Portland biasanya terdiri dari sekitar 65% CaO, 21% SiO₂, 4,5% Al₂O₃ dan 3% Fe₂O₃, dan dapat mengandung kurang dari 2,5% SO₃, MgO, Na₂O dan K₂O.

Komponen kimia utama dalam semen dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Komponen Kimia Utama Semen

Komponen	Rumus Kimia	Rumus IUPAC	Persen Kandungan	Proses Hidrasi
Trikalsium Silikat	3CaO·SiO ₂	C ₃ S	35 – 65	sedang
Dikalsium Silikat	2CaO·SiO ₂	C ₂ S	15 – 40	lambat
Trikalsium Aluminat	3CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A	0 – 15	cepat
Tetrakalsium Aluminoforit	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	6 – 20	sedang

Sumber : Shan Somayaji, *Civil Engineering Materials*, 2001

Dengan memodifikasi proporsi campuran dari bahan utama semen, serta kehalusannya, semen portland dapat digolongkan ke dalam 8 jenis, yaitu:

1. Tipe I, merupakan semen yang dapat digunakan untuk kebutuhan umum, dan merupakan semen portland yang paling umum digunakan.
2. Tipe IA, merupakan semen portland biasa yang dicampur dengan *air-entraining admixture*.
3. Tipe II, adalah semen yang digunakan bila membutuhkan ketahanan terhadap sulfat atau panas hidrasi yang moderat (biasa-biasa saja).
4. Tipe IIA, adalah semen tipe II yang dicampur dengan *air-entraining admixture*.

Tipe II dan IIA cocok digunakan pada daerah yang kandungan sulfat dalam air tanahnya lebih tinggi dari normal namun tidak terlalu ekstrim. Memiliki kandungan C_3A maksimum 8% (rendah). Panas hidrasinya lebih rendah dibanding Tipe I. Biasa digunakan pada perkerasan jalan, lapisan reservoir, pondasi, bangunan pencakar langit, dermaga, dan struktur masif.

5. Tipe III, digunakan jika membutuhkan kekuatan awal yang tinggi.
6. Tipe IIIA, adalah semen tipe III yang dicampur dengan *air-entraining admixture*.

Semen Tipe III dan IIIA memiliki kandungan C_3A maksimum 15%, lebih tinggi daripada tipe lain, dan lebih halus, sehingga membuat semen lebih cepat keras dan menyatu. Semen ini dipakai bila struktur akan dipakai secepatnya. Dalam kondisi tertentu, pelat sudah mengeras dalam 3 hari, dibanding semen tipe I yang membutuhkan waktu 7 hari, sedangkan dalam beton pracetak, waktu yang dibutuhkan lebih cepat, yaitu 24 jam.

7. Tipe IV, adalah semen yang digunakan jika membutuhkan panas hidrasi yang rendah. Mengandung C_3S dan C_3A yang lebih rendah (C_3S maksimum 35%, C_2S minimum 40%, dan C_3A maksimum 7%), yaitu komponen yang menghasilkan panas terbesar pada saat proses hidrasi. Semen jenis ini cocok bila digunakan pada struktur yang membutuhkan kontrol perubahan temperatur yang sangat hati-hati, karena panas

hidrasinya rendah dan lebih lambat mengeras. Penggunaan semen tipe I misalnya dapat mengakibatkan retak pada beton. Biasanya digunakan untuk bangunan dam beton dan pondasi masif. Namun keefektifan semen jenis ini untuk mengontrol suhu, sudah disaingi oleh produk lain yang lebih ekonomis.

8. Tipe V, digunakan bila membutuhkan ketahanan terhadap sulfat yang lebih tinggi. Sulfat dari sodium, kalsium dan magnesium sering dijumpa pada tanah dan air laut. Hal ini karena kandungan C_3A dalam semen dibatasi hanya 5%, karena semen dengan kandungan C_3A yang lebih rendah memiliki ketahanan terhadap sulfat yang lebih tinggi. Serta rasio antara C_3S dan C_2S juga mempengaruhi tingkat ketahanan terhadap sulfat. Semen tipe ini biasa digunakan untuk konstruksi bawah tanah pada daerah dekat air danau atau air laut, atau sekitar tempat pengolahan sampah, karena mampu menahan aksi destruktif dari asam organik. Ketahanan terhadap sulfat juga dapat ditingkatkan dengan penambahan pozzolan seperti *flyash*, yang membuang kelebihan kalsium hidroksida dari pasta semen yang terhidrasi, sehingga memiliki tingkat kestabilan pada lingkungan yang lebih tinggi.

2.1.2.1.4. Proses Hidrasi

Hidrasi adalah proses ketika semen bereaksi dengan air yang pada akhirnya menghasilkan campuran yang terikat setelah mengeras.

Proses hidrasi dapat dibagi 2 tahap, yaitu

1. *Setting* (Pengikatan)

Ketika semen dicampur dengan air dalam jumlah yang cukup, pasta yang dihasilkan akan kehilangan plastisitasnya dan perlahan-lahan berubah menjadi keras. Pengikatan adalah proses melalui reaksi kimia, yang timbul setelah penambahan air pencampur, yang menghasilkan peningkatan rigiditas

dari campuran cementitious secara gradual¹⁰. Dalam kondisi yang mendukung, dalam waktu 1 – 2 jam, campuran sudah kehilangan cairannya (*fluidity*), setelah beberapa jam, campuran akan mengeras. Proses inilah yang disebut *setting*. Proses ini dibagi dua, yaitu

- a. Waktu ikat awal, yaitu ketika campuran mulai kaku
- b. Waktu ikat akhir, yaitu ketika campuran mulai mengeras dan mampu menahan beban

Waktu ikat adalah waktu yang dibutuhkan sejak penambahan air pencampur sampai campuran mencapai derajat kekakuan tertentu seperti yang diukur melalui prosedur spesifik¹¹.

Waktu ikat dipengaruhi oleh kehalusan semen, komposisi kimia semen, kondisi penyimpanan, jumlah air dan suhu ruangan. Semakin halus semen, maka waktu ikat dan proses hidrasi menjadi lebih cepat. Penambahan C₃A dan C₃S memperlambat waktu ikat. Waktu ikat juga dapat diukur dari waktu melepas panas hidrasi. Kadang, penggunaan air panas dalam campuran bisa menyebabkan *flash setting*, yaitu proses pengerasan semen pasta dengan sangat cepat diikuti dengan panas hidrasi yang tinggi, hal ini dapat dicegah dengan penambahan gipsum.

2. *Hardening* (Pengerasan)

Berbeda dengan pengikatan, proses pengerasan tidak berlangsung selama beberapa bulan atau tahun. Pengerasan itu sendiri adalah hasil dari proses hidrasi. Proses hidrasi tergantung dari komponen dari semen itu sendiri, ada yang cepat, sedang dan lambat mengalami hidrasi, hal tersebut sudah dibahas sebelumnya.

Proses hidrasi selalu dibarengi dengan pelepasan panas, dengan kata lain proses hidrasi adalah proses eksotermik. Panas yang dilepaskan tergantung dari komposisi kimia dari semen, kehalusan, dan suhu ruangan. Panas hidrasi ini

¹⁰ ASTM C 125 – 03

¹¹ ASTM C 125 – 03

meningkatkan suhu beton. C₃A menghasilkan panas yang paling besar, sedangkan C₂A adalah yang paling sedikit. Panas hidrasi ini harus dikontrol, karena pada kondisi tertentu dapat mengakibatkan retak pada beton.

2.1.2.2. Agregat

Agregat adalah material yang seperti batu dalam berbagai bentuk dan ukuran, dan biasa digunakan dalam pembuatan beton dengan semen Portland, beton aspal, plester, grout, balas jalan kereta api, mengisi pondasi, subgrade dan lain-lain¹².

Agregat adalah material pengisi yang relatif tidak mahal, yang didispersi melalui pasta semen untuk menghasilkan volume beton dalam jumlah besar. Diperkirakan $\pm 75\%$ dari volume beton adalah agregat¹³.

Agregat adalah material berbutir seperti pasir, kerikil, batu pecah atau ampas pembakaran besi yang digunakan dengan media pengikat untuk membentuk mortar atau beton, atau dapat digunakan untuk lapisan dasar atau balas jalan kereta api¹⁴.

Agregat terutama didapat dari berbagai jenis batu. Kebanyakan agregat didapat dari menghancurkan atau memecah batu. Batu dan batu pecah yang digunakan sebagai agregat pada berbagai proyek konstruksi, pada umumnya sangat tahan lama. Batu yang daya tahannya lemah cenderung menyebabkan kerusakan pada komponen struktur. Kerusakan yang terjadi tergantung dari tekstur butirannya, komposisi mineralnya, dan strukturnya. Tekstur butiran halus lebih mampu menahan perubahan suhu daripada tekstur butiran kasar. Batu yang padat lebih sedikit tembus air daripada batu berpori. Penyerapan pada batu, yang merupakan kemampuan untuk menyerap air, secara langsung tergantung dari porositasnya.

2.1.2.2.1. Jenis – jenis Agregat

Batu pecah, pasir dan kerikil adalah tiga jenis agregat utama yang umum digunakan pada pembuatan beton. Walaupun agregat tersedia dalam harga yang

¹² Somayaji, Shan, *Civil Engineering Materials*, 2001, hal. 35

¹³ Neville, A.M. dan Brooks, J.M. *Concrete Technology*. 1987, hal 40

¹⁴ ASTM C 125 – 03

relatif rendah, namun ketersediannya tidak sama di semua tempat, ada yang memiliki kerikil dan pasir dalam kualitas yang baik ada yang tidak. Agregat yang tidak baik digunakan adalah agregat yang kualitasnya buruk, berpotensi untuk terjadi reaksi kimia dan yang kekuatannya rendah.

Tambang terbuka dan situs penggalian adalah dua tempat yang paling umum digunakan untuk mengekstrak agregat dari batu induknya. Setelah pengeboran dan peledakan, batu yang hancur diekstrak dengan sekop, bulldoser dan lainnya, untuk kemudian dipindahkan ke tempat pengolahan, dimana batu akan dihancurkan lagi untuk kemudian agregat dikelompokkan sesuai ukuran.

Agregat dapat dikelompokkan menjadi:

1. Berdasarkan sumber dan proses pembuatan
 - a. Agregat Mineral Alam, yaitu yang langsung digunakan dari alam, misalnya pasir dan kerikil. Pasir terbentuk dari pengaruh iklim dan dekomposisi dari berbagai mineral batuan. Mineral yang paling banyak terkandung dalam pasir adalah kuarsa. Banyak digunakan dalam berbagai produk, mulai dari batu bata, kaca, beton sampai alat peledak. Kerikil adalah material dengan permukaan yang bulat dan halus dengan ukuran diameter berkisar antara 4,75 mm sampai 76 mm. Banyak terdapat cadangannya di sekitar sungai dan aliran air. Kerikil terbentuk dari erosi batuan gunung sampai karena abrasi.
 - b. Agregat Mineral Buatan, yaitu agregat yang didapat dari hasil penghancuran batu induk, misalnya pasir buatan dan batu pecah. Pasir buatan didapat dari batu pecah, kerikil, yang kemudian dikarakteristikan berdasarkan ketajaman dan sudut partikel. Batu pecah adalah istilah yang digunakan untuk menyebut agregat yang didapat dari menghancurkan batu atau bongkahan batu sehingga menghasilkan agregat yang bersudut dan permukaan yang kasar. Agregat juga dapat diperoleh dari menghancurkan beton bekas pakai dan batu bata, sehingga agregat yang dihasilkan lebih

ekonomis bila agregat dengan kualitas yang baik terlalu mahal. Agregat yang berpori dan lebih ringan dihasilkan dengan membakar material dasar seperti lempung atau batu serpih.

2. Berdasarkan ukuran
 - a. Agregat Halus, juga disebut pasir, berukuran antara 150 μm sampai 4,75 mm.
 - b. Agregat Kasar, terdiri dari kerikil sungai, batu pecah atau agregat lain yang berukuran lebih besar dari 4,75 mm.
3. Berdasarkan berat jenis
 - a. Ringan

Agregat halus dengan kepadatan rendah adalah agregat halus dengan kepadatan (*bulk density*) lebih rendah dari 1120 kg/m^3 . Agregat kasar dengan kepadatan rendah adalah agregat kasar dengan kepadatan (*bulk density*) lebih rendah dari 880 kg/m^3 .
 - b. Normal

Batu pecah, kerikil dan pasir adalah contoh agregat dengan berat normal. Agregat dengan kepadatan normal adalah agregat dengan kepadatan (*bulk density*) antara 1520 kg/m^3 – 1680 kg/m^3 .
 - c. Berat

Agregat dengan kepadatan berat adalah agregat dengan kepadatan (*bulk density*) antara 2400 kg/m^3 – 6400 kg/m^3 . Biasa digunakan untuk pembuatan beton berat yang dipakai untuk melindungi radiasi nuklir atau perlindungan bom.

2.1.2.2.2. Karakteristik Agregat

Beberapa karakteristik fisik dan mekanik beton, seperti daya tahan, kekuatan dan *performance* sangat tergantung dari agregat yang digunakan, sehingga agregat harus benar-benar terikat dengan baik dengan agen pengikat (semen) dan juga mempertahankan kekuatan, bentuk dan tekstur agregat sepanjang masa layannya.

Karakteristik agregat yang paling penting antara lain:

1. Berat Jenis

Berat jenis adalah rasio antara massa dengan volume dari material

$$\text{berat jenis} = \frac{\text{berat material}}{\text{volume material} \times \text{kepadatan air}} \dots\dots\dots(2.2)$$

2. Berat Isi

Berat isi adalah massa agregat dibagi volume agregat

3. Void (rongga udara)

Rongga udara menggambarkan jumlah udara yang terdapat pada spasi partikel agregat

$$\text{rongga udara} = \text{volume total} - \text{volume agregat} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\text{rongga udara}(\%) = \frac{\text{Berat Jenis} \times \text{kepadatan air} - \text{berat isi}}{\text{Berat Jenis} \times \text{kepadatan air}} \times 100\% \dots(2.4)$$

4. Kelembaban

Sudah dijelaskan bahwa agregat secara umum memiliki pori, sehingga dapat menyerap kelembaban.

$$\text{kelembaban} = \frac{\text{berat agregat asli} - \text{berat kering oven}}{\text{berat kering oven}} \times 100\% \dots\dots (2.5)$$

Kelembaban menunjukkan jumlah kelembaban yang ada pada saat pengukuran. Ada 2 jenis kelembaban, yaitu

a. Kelembaban yang diserap, yaitu kelembaban yang tertahan dalam pori-pori agregat

b. Kelembaban permukaan, yaitu kelembaban yang terdapat pada permukaan agregat

$$\text{kelembaban permukaan} = \text{kelembaban} - \text{kapasitas penyerapan} \dots(2.6)$$

Berdasarkan kelembabannya, agregat dibagi menjadi:

- a. Kering Oven
- b. Kering Udara
- c. Kering Permukaan
- d. Basah

5. Gradasi dan Modulus Kehalusan

Gradasi adalah proporsi dari partikel agregat yang didistribusi pada range-range ukuran tertentu. Berdasarkan gradasinya, agregat dibagi menjadi:

a. Agregat bergradasi normal

Agregat bergradasi normal adalah agregat yang gradasinya berada dalam batas gradasi yang telah ditetapkan, artinya ukuran butirannya tersebar dengan normal.

b. Agregat bergradasi padat

Agregat bergradasi padat adalah agregat yang memiliki rongga udara sangat kecil, artinya partikel agregat mampu mengisi rongga-rongga udara yang ada, atau bisa juga berarti partikel agregat sangat halus.

c. Agregat bergradasi terbuka

Agregat bergradasi terbuka adalah agregat yang memiliki rongga udara sangat besar, artinya partikel agregat tidak mampu mengisi rongga-rongga udara yang ada, atau bisa juga berarti partikel agregat sangat besar, sehingga agregat tidak mampu mengisi rongga udara yang ada.

Gradasi dapat diperoleh dengan menggunakan uji analisis saringan. Modulus Kehalusan adalah angka yang diperoleh dengan menjumlahkan persen tertahan dari setiap saringan dibagi 100. Modulus kehalusan agregat biasa berkisar antara 2,0 – 4,0. Semakin besar nilai modulus kehalusan menunjukkan bahwa butiran agregat semakin kasar, dan sebaliknya semakin kecil nilai modulus kehalusan menunjukkan bahwa butiran agregat semakin halus.

Standar Gradasi untuk agregat halus dapat dilihat pada Tabel 2.2, sedangkan untuk agregat kasar pada Tabel 2.3.

Tabel 2.2. Standar Gradasi Halus

IS Sieve Design	IS 383 - 1963				ASTM C 33 - 03
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	
9,5 mm	100	100	100	100	100
4,75 mm	90 - 100	90 - 100	90 - 100	95 - 100	95 - 100
2,36 mm	60 - 95	75 - 100	85 - 100	95 - 100	80 - 100
1,18 mm	30 - 70	55 - 90	75 - 100	90 - 100	50 - 85
600 μ m	15 - 34	35 - 59	60 - 79	80 - 100	25 - 60
300 μ m	5 - 20	8 - 30	12 - 40	15 - 50	5 - 30
150 μ m	0 - 10	0 - 10	0 - 10	0 - 15	0 - 10

(Sumber: Raju, N Khrisna. *Design of Concrete Mixes*. 1983)

Tabel 2.3. Standar Gradasi Kasar

Ukuran Nominal (mm)	Jumlah yang lebih halus dari Setiap Saringan (%)						
	37,5 mm	25 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm
25 - 12,5	100	90 - 100	20 - 55	0 - 10	0 - 5		
25 - 9,5	100	90 - 100	40 - 85	10 - 40	0 - 15	0 - 5	
25 - 4,75	100	95 - 100		25 - 60		0 - 10	0 - 5
19 - 9,5		100	90 - 100	20 - 55	0 - 15	0 - 5	
19 - 4,75		100	90 - 100		20 - 55	0 - 10	0 - 5

(Sumber : ASTM C 33 – 03)

2.1.2.3. Air

Kualitas dari air sangat penting, karena ketidakmurnian air dapat mempengaruhi pengikatan dari semen, mempengaruhi kekuatan beton atau dapat menodai permukaann, dan dapat membawa beton menuju korosi. Kualitas air pencampur yang baik secara umum adalah air yang dapat diminum¹⁵.

¹⁵ Neville, A.M. dan Brooks, J.M. *Concrete Technology*. 1987, hal 74

Air yang digunakan pada campuran beton harus bersih dan bebas dari bahan-bahan merusak yang mengandung oli, asam, alkali, garam, bahan organik, atau bahan-bahan lainnya yang merugikan terhadap beton atau tukang¹⁶.

Air yang tidak dapat diminum tidak boleh digunakan pada beton, kecuali ketentuan berikut terpenuhi:

1. Pemilihan proporsi campuran beton harus didasarkan pada campuran beton yang menggunakan air dari sumber yang sama
2. hasil pengujian pada umur 7 dan 28 hari pada kubus uji mortar yang dibuat dari adukan dengan air yang tidak dapat diminum harus mempunyai kekuatan sekurang-kurangnya sama dengan 90% dari kekuatan benda uji yang dibuat dengan air yang dapat diminum. Perbandingan uji kekuatan harus dilakukan pada adukan serupa, terkecuali pada air pencampur, yang dibuat dan telah diuji dengan metode uji kuat tekan untuk mortar semen hidrolis (ASTM C 109)

2.1.3. Karakteristik Beton

Karakteristik beton sangat dipengaruhi oleh desain, material penyusun, serta kontrol kualitasnya, namun juga dipengaruhi oleh tingkat hidrasinya. Karakteristik beton sendiri digolongkan menjadi dua macam, yaitu karakteristik beton muda, dan karakteristik beton yang sudah mengeras.

2.1.3.1. Beton Muda

Beton muda adalah campuran beton yang masih basah atau baru selesai dicampur, sehingga beton muda belum mempunyai kekuatan sama sekali walaupun hampir 75% dari volumenya terdiri dari material yang mempunyai kekuatan yang substansial¹⁷.

¹⁶ Rancangan Standar Nasional Indonesia Tata Cara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung. 2002

¹⁷ Somayaji, Shan, *Civil Engineering Materials*, 2001, hal. 98

Beton muda adalah beton yang memiliki cukup workabilitas aslinya sehingga dapat ditempatkan dan dikonsolidasi dengan metode yang diinginkan¹⁸.

Beton muda harus dapat dipindahkan, ditempatkan dan dikerjakan tanpa terjadi pemisahan atau segregasi. Campuran yang baik harus mampu mempertahankan ikatan serta kesatuan yang terjadi di dalam campuran dan tidak terjadi *bleeding*.

2.1.3.1.1. Workabilitas

Workabilitas dari beton dapat didefinisikan sebagai kemudahan bagaimana campuran beton dapat dikerjakan dari mesin pencampur ke struktur akhir yang diinginkan¹⁹. Workabilitas secara tepat diartikan sebagai jumlah kerja internal berguna yang diperlukan untuk menghasilkan pepadatan yang penuh²⁰. Workabilitas adalah properti yang menentukan usaha yang diperlukan untuk memanipulasi sejumlah beton segar yang baru dicampur dengan kehilangan homogenitas yang minimum²¹. Hal itu menunjukkan kemampuan dari beton untuk dicampur, dikerjakan, dipindahkan dan ditempatkan dengan perubahan kehomogenan beton yang paling sedikit. Tidak ada prosedur untuk mengukur secara kuantitatif workabilitas ini, namun dapat dilakukan penilaian secara subjektif.

Workabilitas secara umum dilihat dari tiga karakteristik yang independen secara mutual berikut:

1. Konsistensi
2. Mobilitas
3. Kompaktibilitas

Workabilitas tergantung dari proporsi dari material campuran; karakteristik fisik dari semen dan agregat; peralatan untuk mencampur, memindahkan, dan memadatkan; ukuran dan spasi tulangan; dan ukuran serta bentuk dari struktur. Workabilitas yang baik memerlukan proporsi semen yang tinggi, material halus

¹⁸ ASTM C 125 – 03

¹⁹ Somayaji, Shan, *Civil Engineering Materials*, 2001, hal. 100

²⁰ Neville, A.M. dan Brooks, J.M. *Concrete Technology*. 1987, hal 78

²¹ ASTM C 125 – 03

(pasir) dalam jumlah yang cukup, kandungan agregat kasar yang rendah, dan kandungan air yang tinggi.

Kandungan partikel halus yang cukup dibutuhkan untuk mendapatkan plastisitas dalam campuran. Kurangnya agregat halus menyebabkan campuran menjadi kasar, rentan terjadi segregasi dan sulit untuk dicampur. Penambahan jumlah agregat halus dan air dapat meningkatkan workabilitas dari beton.

Jumlah pecahan dalam ukuran apapun dalam jumlah yang berlebihan menghasilkan workabilitas yang rendah. Butiran bulat dari pasir alam menghasilkan workabilitas yang lebih baik daripada butiran yang angular atau elongated dari batu pecah. Namun, agregat kasar dari batu pecah dapat meningkatkan workabilitas bila digradasikan dengan baik.

Peningkatan suhu mempercepat pengerasan serta pengikatan, sehingga membutuhkan penambahan air campuran untuk mempertahankan tingkat workabilitas. Dengan kata lain, untuk jumlah kandungan semen yang sama per unit isi dari beton, maka rasio air-semen harus lebih tinggi untuk daerah yang beriklim hangat.

2.1.3.1.2. Konsistensi dan Slump

Konsistensi adalah ukuran dari kebasahan atau tingkat fluiditas dari beton, dan tergantung dari proporsi campuran dan sifat-sifat dari material pencampur²². Konsistensi merupakan mobilitas relatif atau kemampuan untuk mengalir atau tercurah²³. Campuran basah secara umum lebih mudah dikerjakan dari campuran yang kering, namun campuran dari konsistensi yang sama bisa memiliki workabilitas yang berbeda.

Konsistensi biasanya diukur dengan menggunakan tes *slump* (ASTM C-143). *Slump* juga merupakan ukuran tidak langsung dari workabilitas, walaupun yang dites hanya konsistensinya. Nilai *slump* diukur dari penurunan campuran yang terjadi,

²² Somayaji, Shan, *Civil Engineering Materials*, 2001, hal. 101

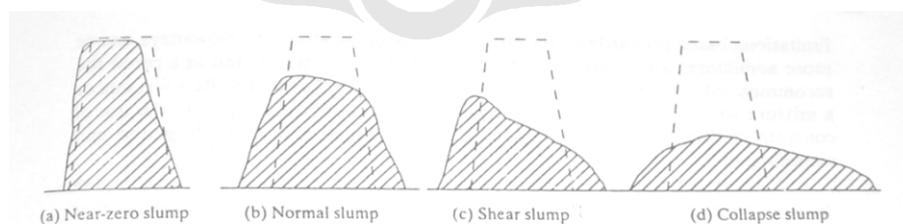
²³ ASTM C 125 – 03

sehingga semakin besar penurunannya, maka beton akan lebih mudah dikerjakan, dan nilai konsistensinya lebih tinggi, demikian sebaliknya.

Tes *slump* beton dilakukan segera setelah beton selesai dicampur, hal ini untuk mengukur *slump* beton secara akurat, karena semakin lama waktu jeda yang dipakai untuk melakukan tes *slump*, maka ikatan beton akan semakin mengeras, dan *slump* yang dihasilkan tidak akurat lagi.

Campuran yang sangat kering, yaitu yang kandungan airnya sangat kecil, akan memiliki *slump* yang mendekati nol. Agregat yang ringan akan lebih banyak menyerap air, sehingga campuran menjadi kasar dan *slump* lebih rendah.

Beton yang memiliki proporsi campuran yang baik akan turun (*slump*) secara bertahap dan mendapatkan bentuk awalnya, artinya ikatan dalam campuran tidak terlepas, dan homogenitas campuran tetap terjaga. Campuran yang buruk akan terjadi pemisahan, dan campuran akan jatuh karena ikatannya terlepas. Beton yang nilai plastisitas dan kohesinya rendah akan menghasilkan *slump* geser. Beton yang kasar atau sangat basah akan menghasilkan *collapse slump*, dimana pemisahan dari material halus dari partikel yang lebih kasar akan terlihat. Jika dalam pengetesan terjadi pemisahan massa yang besar, maka hasil uji tidak dapat digunakan, bila hal tersebut terjadi sebanyak dua kali maka beton dapat dipastikan memiliki plastisitas dan kohesi yang sangat rendah. Akibat proses hidrasi dan penguapan air, nilai *slump* akan turun seiring waktu, yang disebut kehilangan *slump*, dimana penurunannya akan meningkat juga seiring suhu udara meningkat.



Gambar 2.1. Jenis – jenis *Slump*
(Sumber : Shan Somayaji, *Civil Engineering Materials*, 2001)

Perubahan *slump* dapat juga terjadi akibat perubahan kandungan air, dan perubahan yang terus menerus dalam proporsi agregat. Perubahan jumlah kehalusan dan merk semen, serta perubahan temperatur juga mengakibatkan terjadinya perubahan *slump*. Namun *slump* sendiri tidak dapat digunakan untuk menilai kualitas atau workabilitas dari beton, dan jangan digunakan untuk membandingkan kualitas dari batching plan beton yang berbeda.

Tabel 2.4. Hubungan *Slump* dengan Workabilitas

Derajat Workabilitas	<i>Slump</i> (mm)	Faktor Pemadatan
Sangat Rendah	0 - 25	0,78
Rendah	25 - 50	0,85
Sedang	50 - 100	0,92
Tinggi	100 - 180	0,95

(Sumber: Raju, N Khrisna. *Design of Concrete Mixes*. 1983)

2.1.3.2. Beton yang sudah Mengeras

Karakteristik beton yang sudah mengeras penting untuk diketahui, karena setelah campuran beton diaplikasikan menjadi sebuah struktur, maka yang ditemui adalah karakteristik beton yang keras.

Biasanya karakteristik beton tergantung dari

1. Proporsi campuran
2. Kondisi *Curing*

Curing adalah proses mengontrol peningkatan hidrasi, proses ini perlu dilakukan untuk mempertahankan karakteristik beton yang ada, sehingga tidak terjadi penurunan kualitas maupun kekuatan. Efek jangka panjangnya bukan hanya pada kekuatan tapi juga ketahanan.

Tujuan *curing* pada temperatur normal adalah untuk menjaga beton tetap jenuh, atau sejenuh mungkin, sampai rongga yang berisi air, diisi oleh produk hidrasi semen²⁴.

²⁴ Neville, A.M. dan Brooks, J.M. *Concrete Technology*. 1987, hal 177

3. Lingkungan

Faktor lingkungan mempengaruhi peningkatan kekuatan, susut, dan karakteristik lainnya.

Tabel 2.5. Pengaruh Kekuatan Minimum terhadap Kondisi Pembuatan Benda Uji

Kondisi	Kekuatan Minimum terhadap Kekuatan Rata - rata (%)
Kontrol yang sangat baik dalam pembobotan, agregat bergradasi, pemantauan konstan, penentuan kelembaban agregat	75
Kontrol yang cukup dalam pembobotan, penggunaan 2 ukuran agregat, kandungan air tergantung pencampur, pemantauan sesekali	60
Kontrol buruk, Volume <i>batching</i> tidak akurat, Tidak ada pemantauan	40

(Sumber: Raju, N Khrisna. *Design of Concrete Mixes*. 1983)

2.1.3.2.1. Kuat Tekan

Kuat tekan dapat dikatakan sebagai karakteristik beton yang paling penting, dan umumnya sudah direncanakan pada saat perhitungan campuran. Pada umumnya kuat tekan beton untuk konstruksi berkisar antara 20,7 – 41,4 MPa.

Kuat tekan beton dipengaruhi oleh banyak variabel, termasuk lingkungan dan kondisi *curing*. Kekuatan beton yang sebenarnya tidak akan sama dengan kekuatan yang diukur saat pengujian dilakukan. Kuat tekan ini sendiri dipengaruhi oleh

1. Efek dari Jenis dan Jumlah Semen

Semakin banyak jumlah semen yang terdapat dalam campuran, maka kuat tekan beton akan semakin tinggi.

2. Efek dari Agregat

- a. Kekuatan beton meningkat seiring peningkatan dari modulus kehalusan dari agregat halus, yang menggambarkan ukuran dari agregatnya.

b. Agregat kasar dengan tekstur permukaannya yang kasar serta bersudut seperti granit dan kapur dapat meningkatkan kekuatan beton sampai 20% dibanding dengan menggunakan batu kali dengan rasio air-semen yang sama.

3. Efek dari Rasio Air-Semen

Rasio air-semen adalah perbandingan antara berat air dan semen dalam campuran beton. Kekuatan optimum dapat dicapai bila jumlah air campuran cukup untuk proses hidrasi, namun ketika kadar air meningkat, dengan jumlah semen yang tetap, maka rongga yang ada semakin besar dan kuat tekannya akan menurun.

4. Pengaruh void (rongga udara)

Peningkatan kandungan air akan meningkatkan void dalam beton, sehingga daya tahan, impermeabilitas dan kuat tekan menjadi berkurang.

5. Keuntungan dari *curing*

Beton memiliki kekuatan yang semakin besar seiring dengan waktu dan *curing* yang baik. *Curing* yang baik dapat menjaga kelembaban dan suhu, serta mengontrol hidrasi dari beton.

6. Peran *air-entrainment*

Udara yang terperangkap dalam beton akibat proses konsolidasi yang kurang baik akan mengurangi kuat tekan dari beton.

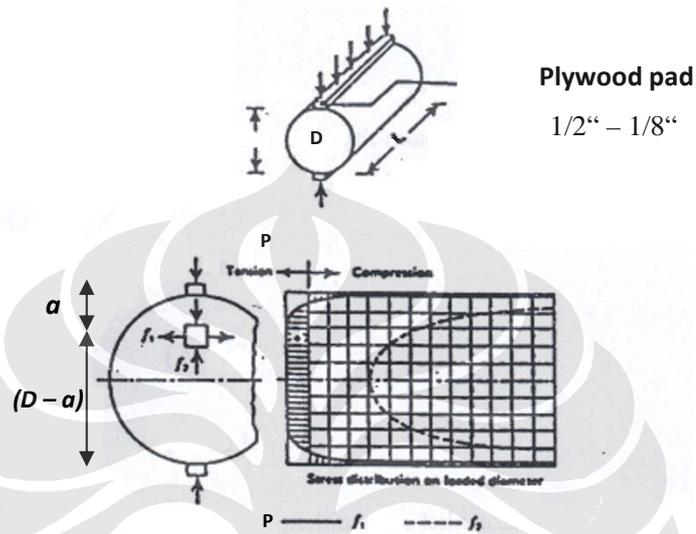
2.1.3.2.2. Kuat Tarik

Kuat tarik beton harus cukup besar untuk menahan retak akibat susut dan perubahan temperatur. Nilainya diukur dengan salah satu prosedur berikut:

1. Uji tarik langsung
2. Uji silinder belah
3. Uji Lentur

Uji tarik langsung memang menghasilkan data yang akurat, namun sangat sulit dilakukan, dan tidak biasa digunakan, sehingga lebih umum menggunakan uji

silinder belah atau uji lentur. Uji silinder belah diperkenalkan oleh Fernando Carneiro, berkebangsaan Brazilia, sehingga uji ini dikenal juga dengan "Brazilian Test" atau "Splitting Test", seperti gambar berikut:



Gambar 2.2. Uji Tarik Belah

(Sumber : Purnomo, GR. Pengaruh Pemakaian Serat Polypropylene pada Kapasitas Regangan Tarik Elastis dan Inelastis, Penyerapan Energi, Kuat Geser serta Sifat Mekanik Lainnya pada Beton. 1999)

Bila kita meninjau elemen pada sejauh a dari serat tepi atas, maka elemen tersebut akan mengalami:

Kuat tekan sebesar

$$f'_c = \frac{2P}{\pi LD} \left(\frac{D^2}{y(D-y)} - 1 \right) \dots\dots\dots(2.7)$$

, dan kuat belah sebesar

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD} \dots\dots\dots(2.8)$$

Untuk beton normal, dari pengujian yang sudah dilakukan didapat hubungan antara kuat tarik (f_t dalam psi) dengan kuat tekannya (f'_c dalam psi), sebagai berikut:

$$f_t = 6,7 \times (f'_c)^{0,5} \dots\dots\dots(2.9)$$

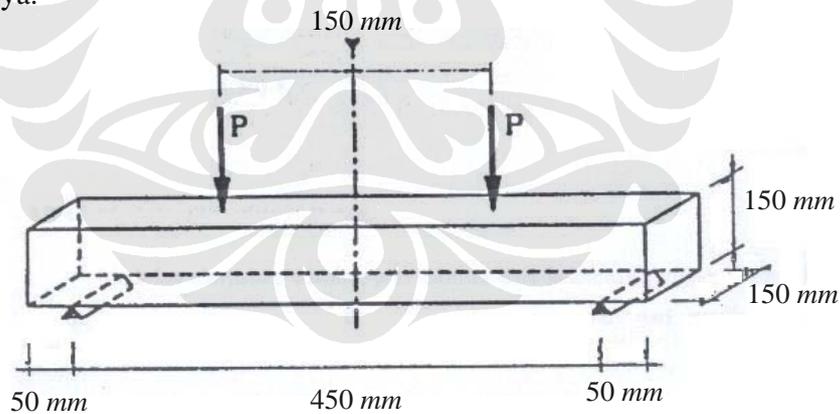
Atau dalam satuan internasional (f_c' dalam Mpa), di dapat :

$$f_t = (0,5 - 0,6) \times (f_c')^{0,5} \dots\dots\dots(2.10)$$

2.1.3.2.3. *Kuat Lentur*

Dalam desain campuran beton untuk konstruksi jalan dan perkerasan bandara, kriteria dari kuat lentur dianggap lebih penting dari kuat tekan. Nilai MOR ditentukan dari nilai tegangan tarik maksimum yang terjadi pada serat bawah balok.

Kuat Lentur sebenarnya merupakan kuat tarik beton, karena retak yang terjadi merupakan akibat tegangan tarik yang terjadi. Kuat lentur didapat dari uji lentur, dimana balok uji yang digunakan harus memiliki ukuran panjang minimum 3 kali dari tinggi balok. Uji ini dikenal dengan pembebanan dua titik. Uji ini menghasilkan tegangan tarik di bagian bawah balok dan tegangan tekan di bagian atas. Karena beton lemah terhadap tarik, maka ketika balok terbelah, disebut retak lentur. Dari uji ini dapat dihasilkan MOR (*Modulus of Rupture*), yang dipengaruhi oleh nilai momen, inersia, dan jarak dari titik berat. Nilainya tergantung dari rasio air-semen, usia uji, dan curing-nya.



Gambar 2.3. Uji Lentur

(Sumber : Purnomo, GR. Pengaruh Pemakaian Serat Polypropylene pada Kapasitas Regangan Tarik Elastis dan Inelastis, Penyerapan Energi, Kuat Geser serta Sifat Mekanik Lainnya pada Beton. 1999)

$$\text{Tegangan Lentur} = \text{kekuatan tarik} = \frac{My}{I} \dots\dots\dots(2.11)$$

Jika retak terjadi di sepertiga tengah dari bentang balok, maka nilai MOR dapat dihitung sebesar

$$MOR = \frac{PL}{bd^2} \dots\dots\dots(2.12)$$

Menurut BS 1881: Part 118: 1983, jika retak terjadi diluar sepertiga bentang tengah dari balok, maka hasil pengujian tidak dapat digunakan.

Menurut percobaan yang dilakukan Wright²⁵, mengindikasikan bahwa pengujian lentur dengan pembebanan dua titik akan mengalami leleh pada nilai MOR yang lebih rendah dari pembebanan satu titik.

Biasanya didapatkan bahwa modulus runtuh dari beton berkisar antara 11% - 23 % dari kuat tekannya.

Dari hasil percobaan, untuk beton normal, didapat nilai MOR (dalam psi)

$$MOR = 12 \times (f_c')^{0.5}, \text{ dengan } f_c' \text{ dalam psi} \dots\dots\dots(2.13)$$

atau dalam satuan internasional (f_c' dalam Mpa)

$$MOR = 0,62 \times (f_c')^{0.5} \dots\dots\dots(2.14)$$

Menurut data percobaan yang dilakukan Price²⁶, Rasio MOR terhadap kuat tekannya akan menurun seiring peningkatan kuat tekannya.

2.1.3.2.4. Modulus Elastisitas dan Rasio Poisson

Modulus elastisitas adalah perbandingan antara tegangan terhadap regangan yang terjadi dalam batas proporsinya. Dapat juga disebut kemiringan pada daerah elastis dari diagram tegangan-regangan. Material dengan modulus elastisitas yang lebih tinggi memiliki deformasi yang lebih kecil dari material dengan modulus elastisitas yang lebih rendah.

Karena beton merupakan material elastoplastis, maka pada dasarnya beban akan tidak proporsional terhadap regangan, Regangan Total beton didapat dari penjumlahan regangan elastis beton dengan regangan plastis beton

²⁵ Belaguru, Perumalsamy N., dan Shah, Surendra P. *Fiber-Reinforced Cement Composites*. 1992

²⁶ Belaguru, Perumalsamy N., dan Shah, Surendra P. *Fiber-Reinforced Cement Composites*. 1992

Menurut ACI 318 – 89 dan SNI, penetapan Modulus Elastisitas adalah berdasarkan sudut kemiringan dari beban nol sampai $0,45 f_c'$, sedangkan menurut ASTM, beban diukur sampai 40% nilai beban ultimit.

Mengacu pada ASTM C 469, maka modulus elastisitas E beton dapat dihitung

$$\text{sebagai: } E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \dots\dots\dots(2.15)$$

Menurut ACI 318 – 89

$$E = 57000\sqrt{f_c'} \text{ , dengan } f_c' \text{ dalam psi} \dots\dots\dots(2.16)$$

$$E = 4730\sqrt{f_c'} \text{ , dengan } f_c' \text{ dalam MPa} \dots\dots\dots(2.17)$$

Rasio Poisson μ , adalah rasio regangan lateral terhadap regangan aksial beton yang dibebani aksial dan berada dalam keadaan elastis. Dari percobaan yang dilakukan didapat nilai μ antara 0,15 – 0,20 untuk beton normal dan beton ringan, bila diuji dengan metode statis mengacu pada ASTM C 496. Rasio Poisson juga bisa didapat dari pengujian dinamis mengacu pada ASTM C 215. Untuk metode dinamis, nilai μ antara 0,20 – 0,24²⁷.

Mengacu pada ASTM C 469, maka nilai μ beton dapat dihitung sebagai:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_2 - 0.00005} \dots\dots\dots(2.18)$$

2.2. BETON BERSERAT POLYPROPYLENE

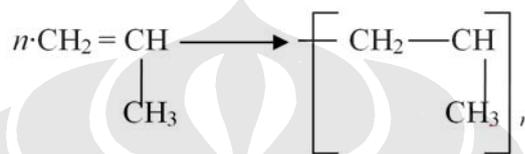
2.2.1. Polimer Polypropylene²⁸

Monomer adalah molekul organik yang mampu dikombinasikan secara kimia dengan molekul yang sama atau berbeda untuk membentuk material *high molecular weight* yang disebut polimer. Polimer tersusun dari sejumlah monomer yang terhubung dalam sebuah struktur yang menyerupai rantai, dan proses kimia yang menyebabkannya disebut polimerisasi²⁹. Ukuran polimer, dinyatakan dalam massa

²⁷ Neville, A.M. dan Brooks, J.M. *Concrete Technology*. 1987, hal 215
²⁸ Surdia, Tata dan Shinraku Saito. *Pengetahuan Bahan Teknik*.1984
²⁹ Neville, A.M. dan Brooks, J.M. *Concrete Technology*. 1987, hal 403

(massa rata-rata ukuran molekul dan jumlah rata-rata ukuran molekul) dan tingkat polimerisasi, sangat mempengaruhi sifatnya, seperti suhu cair dan viskositasnya terhadap ukuran molekul (misal seri hidrokarbon).

Bahan baku *polypropylene* didapat dengan menguraikan petroleum (naftan) dengan cara yang sama seperti pada etilen. Menurut proses yang serupa dengan metoda tekanan rendah untuk polietilen, mempergunakan katalis Zieger-Natta, *polypropylene* dengan keteraturan ruang dapat diperoleh dari propilen.



Gambar 2.4. Polimer *Polypropylene*
(Sumber: Tata Surdia dan Shinraku Saito. *Pengetahuan Bahan Teknik*.1984)

Molekul *polypropylene* mengandung atom karbon tertier dengan gugus metil rantai utama. Atom hidrogen terikat pada atom karbon tertier yang mudah bereaksi dengan oksigen dan ozon, yang menyebabkan ketahanan oksidasinya lebih kecil daripada polietilen.

Sifat-sifat *polypropylene* serupa dengan sifat-sifat polietilen, antara lain:

- Masa jenisnya rendah (0,90-0,92) kg/cm^3 .
- Dapat terbakar kalau dinyalakan. Dibandingkan dengan polietilen masa jenis tinggi titik lunaknya tinggi sekali (176⁰C, *Tm*)
- Kekuatan tarik, kekuatan lentur dan kekakuannya lebih tinggi, tetapi ketahanan impaknya rendah terutama pada temperatur rendah.
- Sifat tembus cahayanya pada pencetakan lebih baik dari pada polietilen dengan permukaan yang mengkilap, penyusutannya pada pencetakan kecil, penampilan dan ketelitian dimensinya lebih baik.
- Sifat-sifat listriknya hampir sama dengan sifat-sifat pada polietilen.
- Ketahanan kimianya kira-kira sama bahkan lebih baik daripada polietilen masa jenis tinggi.
- Ketahanan retak-tegangannya sangat baik.

Tabel 2.6. Perbandingan beberapa resin termoplastik

Sifat-sifat	Resin Polypropylen	Resin Polietilen masa jenis tinggi	Resin Polietilen masa jenis rendah
Ketelitian dimensi	Baik sekali	Tidak Baik	Tidak Baik
Kekuatan	Baik sekali	Baik sekali	Baik
Ketahanan impak	Baik sekali	Sempurna	Sempurna
Ketahanan melar	Sempurna	Baik sekali	Tidak Baik
Ketahanan panas	Sempurna	Baik sekali	Tidak Baik
Ketahanan cuaca	Baik	Baik	Baik sekali
Ketahanan retak tegangan	Sempurna	Tidak Baik	Baik
Kekerasan	Baik sekali	Baik	Tidak Baik
Berat Jenis	Sempurna	Baik sekali	Sempurna
Sifat tembus cahaya	Baik	Tidak Baik	Tidak Baik
Ketahanan Dingin	Baik sekali	Sempurna	Sempurna
Ketahanan Permeabilitas Gas	Baik sekali	Baik sekali	Baik

(Sumber: Tata Surdia dan Shinraku Saito. Pengetahuan Bahan Teknik.1984)

Tabel 2.7. Karakteristik Serat *Polypropylene*

Bentuk	Jaringan serabut tipis yang berbentuk jala
Diameter Serat	90 mikron
Panjang Serat	19 mm
Berat Jenis	0,9
Kekuatan Tarik	5600 kg/cm ²
Modulus Elastisitas	35000 kg/cm ²
Penyerapan Air	Nihil
Titik Leleh	170 °C
Ketahanan Asam dan garam	Baik
Ketahanan Alkali	Baik

(Sumber: Dimensi Teknik Sipil Vol 8, No. 1. "Penelitian Pendahuluan Hubungan Penambahan Serat Polymeric terhadap Karakteristik Beton Normal. 2006)

Polypropylene banyak dipakai sebagai bahan dalam produksi peralatan meja makan, keranjang, peralatan kamar mandi, keperluan rumah tangga, mainan, peralatan listrik, barang-barang kecil, dan komponen mobil. Penggunaan yang luas itu berkat sifat mampu cetaknya yang baik, permukaannya yang licin mengkilat dan tembus cahaya. Sedangkan seratnya sendiri didapat dari peregangan lembaran *polypropylene* sampai putus. Serat dipergunakan untuk tambang, karpet, tirai dan dicetak untuk berbagai macam botol.

Menurut Yohanes L.D. Adianto, et al³⁰, Keuntungan penggunaan serat polimerik dalam campuran beton adalah sebagai berikut :

1. Meningkatkan kekuatan beton (tekan, tarik, dan lentur), kekedapan beton, daya tahan terhadap beban kejut, daktilitas, kapasitas penyerapan energi, daya tahan beban berulang, dan daya tahan abrasi
2. mengurangi retak-retak karena susut dan terjadinya korosi tulangan baja
3. memungkinkan adanya kekuatan beton setelah terjadinya keretakan.

Sedangkan kekurangan dari serat jenis ini adalah:

1. mudah terbakar; kebakaran akan menyebabkan bertambahnya porositas pada beton sesuai dengan persentase volume dari serat yang ada pada beton.
2. lemah terhadap sinar matahari dan oksigen, sehingga untuk melindungi serat terhadap radiasi ultraviolet dan oksidasi, biasanya pabrik menambahkan bahan peningkat stabilisasi dan pigmen. Serat *polypropylene* mengalami proses pelapukan akibat radiasi ultraviolet dari sinar matahari dan oksidasi oleh oksigen dari udara.

³⁰ Yohanes L.D. Adianto, et al. “*Penelitian Pendahuluan Hubungan Penambahan Serat Polymeric terhadap Karakteristik Beton Normal*.” 2006

Secara khusus keuntungan serat *polypropylene* bila dicampur dalam beton adalah:

1. Meningkatkan kohesi campuran, meningkatkan pompabilitas untuk jarak yang jauh
2. Meningkatkan ketahanan terhadap beku
3. Meningkatkan ketahanan terhadap keruntuhan gedung pada saat terjadi kebakaran.
4. Meningkatkan ketahanan impak
5. Meningkatkan ketahanan terhadap susut plastis

2.2.2. Beton Berserat

Serat didefinisikan sebagai filamen langsing terpisah atau membentuk kesatuan dari material alami atau buatan, yang dapat didistribusikan secara seragam melalui campuran beton segar³¹. Beton berserat dapat didefinisikan sebagai beton yang terbuat dari semen Portland atau bahan pengikat hidrolis lainnya yang ditambah dengan agregat halus dan kasar, air, dan diperkuat dengan serat³². Interaksi antara serat dan matrik beton merupakan sifat dasar yang mempengaruhi kinerja dari material komposit beton serat.

Konsep penggunaan serat sebagai tulangan sebenarnya tidak baru. Serat sudah digunakan sebagai tulangan sejak lama. Dahulu, rambut kuda digunakan dalam campuran mortar dan sedotan serta batu bata. Pada awal 1900-an, serat asbes digunakan pada beton dan pada tahun 1950 konsep material komposit sudah digunakan dan beton berserat menjadi topik yang menarik. Kemudian penggunaan serat asbes tidak diijinkan lagi karena alasan resiko kesehatan. Setelah tahun 1960-an, baja, kaca dan serat sintesis seperti *polypropylene* sudah digunakan pada beton, dan penelitiannya terus berlanjut sampai sekarang.

³¹ ASTM C 125 – 03

³² Yohanes L.D. Adianti, et al. “*Penelitian Pendahuluan Hubungan Penambahan Serat Polymeric terhadap Karakteristik Beton Normal*.” 2006

Beton berserat mengandung serat-serat yang terpisah satu sama lain. Beton biasa mengandung banyak sekali retak berukuran mikro, sehingga mengakibatkan beton mempunyai kuat tarik yang rendah. Beton berserat memberikan solusi terhadap permasalahan retak ini, dengan membuat beton yang lebih tangguh dan tahan lama, dengan menambahkan tulangan serat ke dalam beton. Ketangguhan didefinisikan sebagai energi yang diperlukan untuk membuat kondisi kerusakan tertentu atau kegagalan total pada material. Hal tersebut mengukur kemampuan material untuk menahan beban bahkan setelah terjadi retak, dan hal tersebut mempengaruhi kuat tarik dari serat, bentuk geometri serat, dan kadar serat yang ditambahkan.

Beton berserat pertama dibuat dari serat baja yang dikembangkan di Amerika Serikat tahun 1969 oleh J. P. Romauldi and Batelle Development Corp., Cleveland, Ohio. Serat untuk campuran beton dapat dibedakan menjadi empat jenis, yaitu

1. Serat metal, misalnya serat besi dan serat stainless steel.
2. Serat polymeric, misalnya serat polypropylene dan serat nylon.
3. Serat mineral, misalnya fiberglass.
4. Serat alam, misalnya serabut kelapa dan serabut nanas.

Serat baja yang kuat dan panjang atau dengan deformasi leleh permukaan mempunyai ketangguhan yang lebih baik dibanding serat plastik yang pendek.

Secara umum, polimer mempunyai kuat tarik dan kuat tekan yang lebih baik dari beton, namun modulus elastisitasnya kecil, dan rangkaknya tinggi, dan dapat terdegradasi oleh agen oksidasi panas, sinar ultraviolet, mikro-organisme dan organisme kimia, juga padatan organik tertentu dapat menyebabkan retak tegangan.

Polimer biasa digunakan untuk memproduksi tiga jenis beton polimer komposit, yaitu:

1. PIC (*Polymer Impregnated Concrete*)
2. PC (*Polymer Concrete*), dan
3. PPCC (*Polymer Portland Cement Concrete*)

Tabel 2.8. Jenis dan *properties* serat

Jenis Serat	Modulus Elastisitas (MPa)	Kuat Tarik (MPa)
Polipropilen	5000	450
Poliester	10000 – 17200	550 - 1170
Polietilen	5000 – 17200	200 - 3030
Karbon	227500 - 380000	1790 – 2620
Akrilik	17900	200 – 965
Kaca	71700 - 79300	2480 – 3450
Baja	200000	345 – 1725

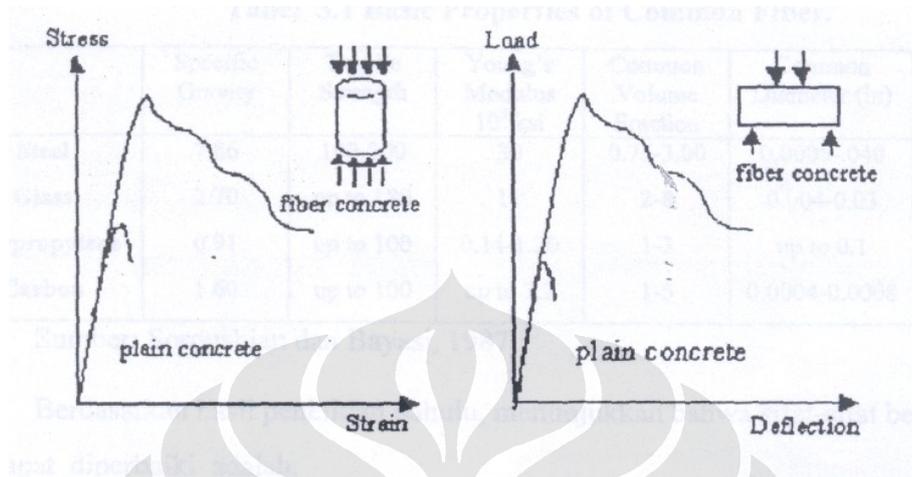
Sumber: Tata Surdia dan Shinraku Saito. *Pengetahuan Bahan Teknik*.1984

Serat *Polypropilene* dan nilon merupakan hasil penelitian dan pengembangan dari industri tekstil dan petrokimia. Kedua serat ini digolongkan “lembut“ karena secara individu seratnya memiliki kekakuan lentur yang kecil daripada serat kaca atau baja. Bila serat ini diaplikasikan dalam jumlah yang sedikit, lebih kecil dari 0,2%, maka tidak ada penambahan kekuatan yang terjadi, sedang untuk persentasi yang lebih tinggi, misalnya diatas 2%, maka semua *properties* beton akan meningkat. Serat sintetis ini juga dapat mengontrol susut plastis dan mengurangi retak susut kering. Namun penggunaannya menyebabkan kehilangan slump, juga memiliki ikatan yang lemah.

Serat kaca yang tahan alkali digunakan dalam pembuatan panel beton yang berfungsi secara arsitektur dan sirap atap. Serat ini mempunyai kuat tarik dan modulus elastisitas yang tinggi, tapi kekuatannya akan hilang bila alkali dalam semen menyerang serat kaca

Keuntungan utama menambahkan serat dalam beton adalah pengurangan retak susut. Beton berserat digunakan dalam beberapa aplikasi mosalnya shotcrete, stabilisasi kemiringan tanah, perkerasan, panel tembok dan pelat lantai. Juga dapat digunakan untuk keperluan arsitektur dan sirap atap, dek jembatan, tanki penyimpanan, lantai parkir dan elemen pracetak. Akan sangat efisien untuk aplikasi struktur yang menyerap banyak energi.

Perbaikan – perbaikan yang diperoleh dengan menambahkan serat pada beton dapat dilihat dalam gambar 2.5



Gambar 2.5. Perbaikan yang diperoleh dengan menambahkan serat pada beton
(Sumber : Purnomo, GR. Pengaruh Pemakaian Serat Polypropylene pada Kapasitas Regangan Tarik Elastis dan Inelastis, Penyerapan Energi, Kuat Geser serta Sifat Mekanik Lainnya pada Beton. 1999)

Dari penambahan serat, faktor - faktor utama yang harus diperhatikan dalam menentukan karakteristik beton berserat adalah:

1. Jenis dan fisik serat
2. Sifat-sifat fisik beton
3. Ikatan antara serat dan beton

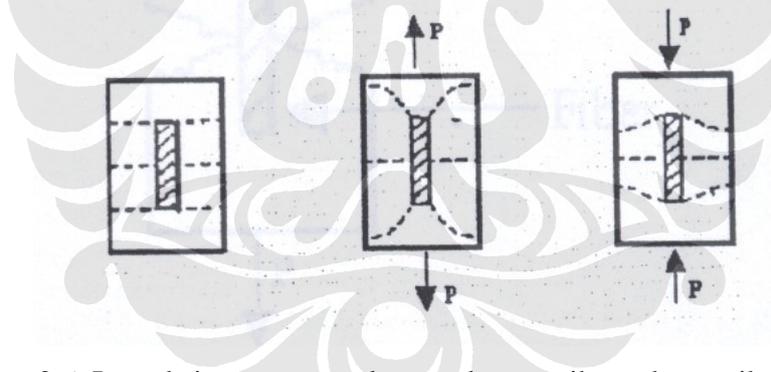
2.2.3. Interaksi antara Serat dengan Pasta Semen (Matriks)

Interaksi antara serat dan pasta semen merupakan sifat dasar yang mempengaruhi kinerja dari beton komposit. Interaksi ini diperlukan untuk memperkirakan sifat-sifat kompositnya. Parameter-parameter utama yang mempengaruhi interaksi serat dengan pasta semen antara lain :

1. Kondisi dari pasta semen, retak atau tidak retak
2. Komposisi Matriks
3. Bentuk Geometri dan Jenis serat
4. Karakteristik permukaan serat
5. Kekakuan serat dibandingkan dengan Kekakuan Matriks

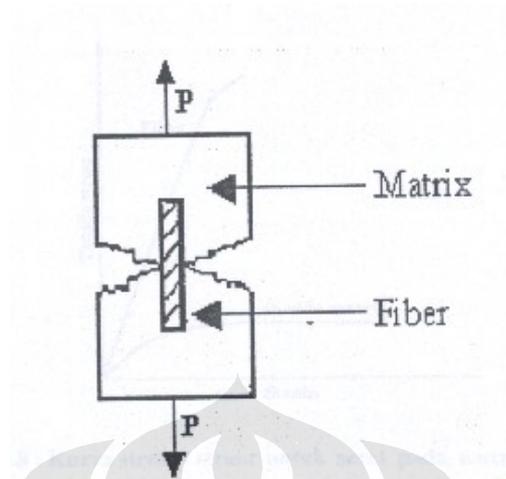
6. Orientasi serat : Terpusat atau Acak
7. Volume fraksi dari serat
8. Tingkat Pembebanan
9. Durabilitas serat dalam komposit dan efek jangka panjangnya

Interaksi antara serat dengan pasta semen tanpa retak, terjadi hampir di semua komposit selama tahap pembebanan awal. Sebelum terjadi pembebanan, beban pada matriks dan serat dianggap tidak ada. Ketika matriks diberi beban, sebagian dari beban ditransfer ke serat di sepanjang permukaannya. Karena adanya perbedaan kekakuan antara serat dengan matriks, terjadi tegangan geser disepanjang permukaan serat. Tegangan geser inilah yang membantu memindahkan gaya ke serat. Jika serat lebih kaku dan matriks (misalnya serat baja dan mineral) deformasi disekitar serat menjadi lebih kecil. Jika modulus serat lebih kecil dari modulus matriks (misalnya serat polimer dan alamiah), deformasi di sekitar serat menjadi lebih besar.



Gambar 2.6. Interaksi antara serat dengan dan matriks pada matriks tanpa retak
(Sumber : Belaguru dan Shah. *Fiber-Reinforced Cement Composites* .1992, hal 19)

Kemudian, bila suatu komposit yang mengandung serat dibebani tarik, pada tahap tertentu matriks akan retak. Ketika matriks mengalami retak, serat membawa gaya pembebanan melewati retakan, mentransfer beban dari satu sisi matriks ke sisi matriks yang lain. Serat akan berfungsi seperti jembatan, membawa beban menyeberangi retakan., retakan-retakan lain akan terbentuk di sepanjang sampel. Tahap pembebanan disebut *multiple cracking stage*, yang terjadi pada beban layan.



Gambar 2.7. Interaksi antara serat dengan dan matriks pada matriks dengan retak
(Sumber : Belaguru dan Shah. *Fiber-Reinforced Cement Composites* .1992, hal 21)

Interaksi serat dengan matriks retak, mempunyai beberapa isu penting, yaitu:

1. Variasi kemiringan beban
2. Efek Geometri dan orientasi
3. Bagaimana mengkuantifikasi ketahanan tarik terhadap beban dari sebuah serat tunggal
4. Interaksi dari serat yang terdistribusi acak

Metode untuk mengevaluasi ikatan antara serat dan matriks dapat dilakukan secara langsung maupun tak langsung. Metode tak langsungnya adalah dengan menggunakan komposit yang di uji tarik atau lentur, kemudian kontribusi serat dihitung. Model matematis dapat digunakan untuk memisahkan ketahanan dari serat dari matriks. Namun hasil analisisnya sangat tergantung dari pemodelan yang dibuat. Metode langsung dilakukan dengan melakukan uji tarik langsung serat dari matriks.

2.2.4. Karakteristik Beton Berserat

Dalam pembuatannya, nilai slump dapat berkurang, namun hal ini dapat diatasi dengan penggunaan *vibrator* dalam pemadatan, Pembuatannya sendiri biasa dibuat di *batching plant*, dimana serat langsung diaduk pada campuran basah,

minimal 10 menit. Harus diperhatikan agar campuran tidak kelebihan air agar serat tidak mengambang.

Pada tegangan tariknya, kerusakan mikro dapat membawa kepada kegagalan yang lebih cepat pada tegangan yang jauh lebih rendah dari kuat tarik normalnya. Hal ini menyebabkan kesulitan pada penggunaan serat yang lebih panjang atau tebal.

Alasan utama penggunaan serat pada matriks getas yang relatif rendah terhadap tarik adalah untuk meningkatkan daktilitas matriks. Namun dalam banyak aplikasi, fraksi volume serat dijaga tetap rendah (dibawah 1%), sehingga menghasilkan peningkatan kekuatan yang tidak signifikan. Namun penggunaan di atas 0,5% dapat terjadi reduksi kekuatan karena konsentrasi *entrapped air* yang lebih tinggi.

Untuk Tegangan Lentur, perbedaannya dengan tarik adalah keberadaan pada gradien regangan pada balok, jika jumlah serat yang menjembatani retak, kecil dan hanya mampu menahan sebagian kecil dari gaya yang diterima matriks sebelum retak, maka kapasitas bebannya akan menurun.

Sedangkan salah satu alasan utama menambahkan serat dalam beton, adalah untuk meningkatkan kapasitas penyerapan energi dari matriks. Serat polimerik, seperti PP, memiliki modulus elastisitas yang lebih rendah dari baja, sehingga balok yang ditulangi dengan serat ini dalam volume kecil, maka akan mengalami deformasi yang besar terlebih dahulu, sebelum serat menjadi efektif. Beban dapat meningkat pada defleksi yang lebih besar untuk volume fraksi yang lebih besar, namun deformasi terjadi lebih tinggi untuk serat ini, karena retak harus melebar untuk mampu menahan regangan yang cukup pada serat.