

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Beton

Beton merupakan bahan komposit buatan yang berasal dari penggabungan bahan penyusunnya yang terdiri dari atas agregat kasar, agregat halus, air dan bahan ikatnya berupa semen dan bahan tambah lainnya. Wang dan Salmon (1987) menyebutkan bahwa beton adalah suatu bahan yang di dapat dengan mencampurkan semen, agregat halus, agregat kasar, air dan kadang – kadang campuran lain. Murdock dan Brook (1991) menjelaskan bahwa beton adalah suatu bahan bangunan dan konstruksi yang sifat-sifatnya dapat ditentukan lebih dahulu dengan mengadakan perencanaan dan pengawasan yang teliti terhadap bahan-bahan yang dipilih. Bahan-bahan pilihan itu adalah, ikatan keras yang ditimbulkan oleh reaksi kimia antara semen dan air, serta agregat dimana semen yang mengeras itu beradhesi dengan baik maupun kurang baik. Agregat boleh berupa kerikil, batu pecah, sisa-sisa bahan mentah tambang, agregat ringan buatan, pasir atau bahan sejenis lainnya.

Murdock dan Brook (1991) Beton juga mempunyai segi yang kurang menguntungkan dan sepatutnya dimengerti oleh para perencana dan konstruktor, karena pengertian akan hal ini dapat mencegah kesulitan-kesulitan dalam segi pembiayaan bangunan, dan juga terhadap retak-retak maupun kelemahan konstruksi lainnya yang mengganggu pemandangan, pelayanan dan umur bangunan. Kekurangan-kekurangan beton anantara lain :

1. Kekuatan tarik yang rendah

Bagian konstruksi yang menderita gaya tarik harus diperkuat dengan batang baja atau anyaman batang baja.

2. Rambatan suhu

Selama pengikatan dan pengerasan suhu beton naik. Hal ini disebabkan oleh hidrasi dari semen, dan kemudian secara berangsur-angsur turun kembali. Perubahan suhu ini dapat mengakibatkan muai-susut akibat suhu yang cukup besar dan menimbulkan retak-retak ringan.

3. Penyusutan kering dan perubahan kadar air

Beton menyusut bilamana mengalami kekeringan dan bahkan ketika terjadi pengerasan, memuai dan menyusut bilamana basah dan kering. Perubahan-perubahan ini mengharuskan untuk disediakan ruang/siar untuk massa (volume) yang besar.

4. Rayapan

Beton mengalami perubahan bentuk secara berangsur-angsur bilamana mengalami pembebanan, perubahan bentuk yang ditimbulkan oleh rayapan beton ini tidak dapat kembali seperti semula bilamana beban ditiadakan. Rayapan ini hal yang sangat penting terutama yang berhubungan dengan beton pra-tekan. Rayapan dan penyusutan sulit dipisahkan didalam pengukuran perubahan bentuk selama pengujian.

5. Kerapatan terhadap air

Beton tidak dapat secara sempurna rapat terhadap air dan kelembaban, serta mengandung senyawa-senyawa yang mudah larut serta terbawa keluar oleh air yang jumlahnya berubah-ubah.

Beton bertulang adalah gabungan logis dari dua jenis bahan : beton polos, yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi akan tetapi kekuatan tarik yang rendah, dan batang-batang baja yang ditanamkan di dalam beton dapat memberikan kekuatan tarik yang diperlukan (Wang dan Salmon, 1987).

Beton normal memiliki berat jenis $2300 - 2400 \text{ Kg/m}^3$, nilai kekuatan, mutu, dan daya tahan (*durability*) beton tergantung dari beberapa faktor, diantaranya adalah nilai banding campuran dan mutu bahan susun, metode pelaksanaan pengecoran, pelaksanaan *finishing*, temperatur, dan kondisi perawatan pengerasannya. Beberapa hal ini dapat menghasilkan beton yang memberikan kelecakan (*workability*) dan konsistensi dalam pengerjaan beton, ketahanan terhadap kondisi lingkungan khusus (kedap air, korosif, dll), dan dapat memenuhi uji kuat yang direncanakan. (Dipohusodo, 1994)

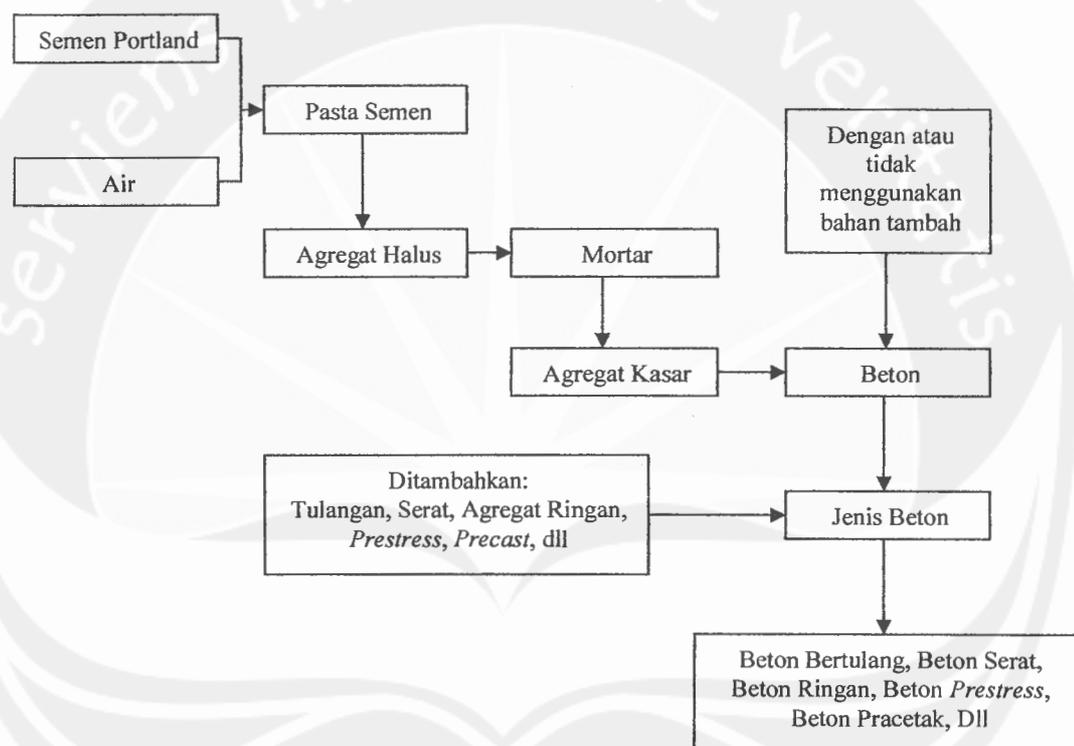
Menurut Nawy (1990) karakteristik beton yang baik dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. **Kepadatan** : Ruang yang ada dalam beton sedapat mungkin terisi oleh agregat dan pasta semen.
2. **Kekuatan** : Beton harus mempunyai kekuatan dan daya tahan internal terhadap berbagai jenis kegagalan

3. Faktor air semen : Faktor air semen harus terkontrol sehingga memenuhi persyaratan kekuatan beton yang direncanakan.

4. Parameter-parameter yang mempengaruhi kualitas beton.

Menurut Tri Mulyono (2004) penambahan berbagai material lain akan membedakan jenis beton, alur terbentuknya berbagai jenis beton dapat terlihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Alur Terjadinya Berbagai Jenis Beton

3.2 Bahan – bahan Penyusun Beton

3.2.1 Air

Air diperlukan pada pembuatan beton agar terjadi reaksi kimiawi dengan semen untuk membasahi agregat dan untuk melumas campuran agar mudah

pengerjaannya. Pada umumnya air minum dapat dipakai untuk campuran beton. Air yang mengandung senyawa-senyawa yang berbahaya, yang tercemar garam, minyak, gula, atau bahan-bahan kimia lain, bila dipakai untuk campuran beton akan sangat menurunkan kekuatannya dan dapat juga mengubah sifat-sifat semen. Selain itu air yang demikian dapat mengurangi lekatan antara agregat dengan pasta semen dan mungkin pula mempengaruhi kemudahan pengerjaan. Air yang berlebihan dalam campuran adukan beton akan menyebabkan banyaknya gelembung air setelah proses hidrasi selesai, sedangkan air yang terlalu sedikit akan menyebabkan proses hidrasi tidak seluruhnya selesai. Sebagai akibatnya beton yang dihasilkan akan kurang kekuatannya. (Nawy, 1990)

Tjokrodimuljo (1992) menuliskan bahwa air merupakan bahan dasar pembuat beton yang penting namun harganya paling murah. Air diperlukan untuk bereaksi dengan semen, serta menjadi bahan pelumas antara butir-butir agregat agar dapat mudah dikerjakan dan dipadatkan. Untuk bereaksi dengan semen air yang diperlukan hanya sekitar 30% dari berat semen. Kelebihan air dalam campuran adukan beton akan menyebabkan turunnya kekuatan beton dan akan terjadi *bleeding* yang kemudian menjadi buih dan merupakan lapisan tipis yang dikenal dengan *laitance* (selaput tipis). Selaput tipis ini akan mengurangi lekatan antara lapisan-lapisan beton dan merupakan bidang sambung yang sangat lemah. Secara umum air yang dapat dipakai untuk bahan pencampur beton ialah air yang bila dipakai akan menghasilkan beton dengan kekuatan lebih dari 90% kekuatan beton yang memakai air suling. dalam pemakaian air untuk beton itu sebaiknya air memenuhi syarat sebagai berikut :

1. tidak mengandung lumpur lebih dari 2 gram/liter.
2. tidak mengandung garam-garam yang dapat merusak beton lebih dari 15 gram/liter.
3. tidak mengandung khlorida lebih dari 0,5 gram/liter.
4. tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter.

3.2.2 Semen Portland

Semen adalah suatu jenis bahan yang memiliki sifat adhesif dan kohesif yang memungkinkan melekatnya fragmen-fragmen mineral menjadi suatu massa yang padat. Meskipun definisi ini dapat diterapkan untuk banyak jenis bahan, semen yang dimaksud untuk konstruksi beton bertulang adalah bahan yang jadi dan mengeras dengan adanya air yang dinamakan semen hidraulis. Semen semacam ini terdiri dari silikat dan lime yang terbuat dari batu kapur dan tanah liat yang digerinda, dicampur, dibakar di dalam pembakaran kapur, dan kemudian dihancurkan menjadi tepung. Semen semacam ini secara kimia dicampur dengan air untuk membentuk massa yang mengeras. Semen hidraulik yang biasa dipakai untuk beton bertulang dinamakan semen portland. Beton yang terbuat dengan semen portland umumnya membutuhkan sekitar 14 hari untuk mencapai kekuatan yang cukup agar acuan atau bekisting dapat dibongkar dan agar beban-beban mati konstruksi dapat dipikul. kekuatan rencana dari beton yang demikian dicapai dalam waktu sekitar 28 hari (Wang dan Salmon, 1987)

Semen *Portland* di Indonesia dibagi menjadi beberapa tipe menurut tujuan pemakaiannya, yaitu :

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

Bahan baku pembentuk semen (Nawy, 1990) adalah :

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

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).

Tjokodimuljo (1992) suatu semen jika diaduk dengan air akan terbentuk adukan pasta semen, sedangkan jika diaduk dengan air kemudian ditambah pasir akan menjadi mortar semen, dan jika ditambah lagi dengan kerikil

deisebut dengan beton. Fungsi semen ialah meratakan butir-butir agregat agar terjadi suatu massa yang kompak dan padat. Selain itu juga mengisi rongga diantara butiran agregat.

Sifat – sifat fisik semen antara lain :

1. Kehalusan butiran
2. waktu ikatan
3. panas hidrasi
4. berat jenis

Tabel 3.1 Kandungan Bahan Kimia dalam Semen

Oksida	%
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, SO ₃	1 – 2
Soda/potash, Na ₂ O + K ₂ O	0,5 – 1

Sumber: Tjokrodimuljo, 1992

3.2.3 Agregat

Agregat merupakan komponen beton yang paling berperan dalam menentukan besarnya. Pada beton biasanya terdapat sekitar 60% sampai 80% volume agregat. Agregat ini harus bergradasi sedemikian rupa sehingga seluruh massa beton dapat berfungsi sebagai benda yang utuh, homogen, dan rapat, dimana agregat yang berukuran kecil berfungsi sebagai pengisi celah yang ada diantara agregat berukuran besar.

Dua jenis agregat (Nawy, 1990) adalah :

1. Agregat kasar (kerikil, batu pecah, atau pecahan-pecahan dari *blast furnace*)
2. Agregat halus (pasir alami dan pasir buatan)

Dalam bukunya Wang dan Salmon (1987) agregat halus adalah bahan yang lolos ayakan no.4 sedangkan agregat kasar adalah semua bahan yang berukuran lebih besar, ukuran nominal maksimum dari agregat kasar yang diizinkan ditentukan oleh jarak bersih antar sisi dari acuan dan antara batangan baja yang bersebelahan dan tidak boleh melebihi :

1. $\frac{1}{5}$ dari dimensi yang paling sempit antara sisi dari acuan
2. $\frac{1}{3}$ tinggi dari slab, atau
3. $\frac{3}{4}$ jarak bersih antara baja tulangan.

Tjokrodimuljo (1992) menjelaskan bahwa agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau 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. Dalam penjelasan di buku teknologi beton karangan Tjokrodimuljo agregat kasar mempunyai ukuran butir-butirnya lebih besar dari 4,80 mm dan sedangkan agregat halus mempunyai ukuran butir-butirnya kurang dari 4,80 mm.

Syarat-syarat agregat untuk bahan bangunan antara lain :

1. 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 konsep Pedoman Beton 1989 dapat dibaca dalam tabel 3.2.

Tabel 3.2 Persyaratan Kekerasan Agregat untuk Beton

Kelas dan Mutu Beton	Bejana <i>Rudeloff</i> . Maksimum bagian yang hancur menembus ayakan 2 mm (%)		Mesin Los Angeles. Maksimum bagian yang hancur menembus ayakan 1,7 mm (%)
	Ukuran Butir 19 – 30 mm	Ukuran Butir 9,5 – 19 mm	
Kelas I, mutu B ₀ serta B ₁	30	32	50
Kelas II, mutu K ₁₂₅ - K ₂₂₅	22	24	40
Kelas III, Mutu beton diatas K ₂₂₅	14	16	27

Sumber: Tjokrodinuljo, 1992

2. Tidak mengandung tanah atau kotoran lain yang lewat ayakan 0,075 mm. Pada agregat halus jumlah kandungan kotoran ini harus tidak boleh lebih dari 5 persen untuk beton sampai mutu k-125, dan 2,5 persen untuk mutu beton yang lebih tinggi. Pada agregat kasar kandungan kotoran ini dibatasi sampai maksimum 1 persen. Jika agregat mengandung kotoran lebih dari batas-batas maksimum, maka harus dicuci dengan air bersih.
3. Harus tidak mengandung garam-garam yang menghisap air dari udara.
4. Harus 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 pembeding.
5. Harus mempunyai variasi besar butir (gradasi) yang baik, sehingga rongganya sedikit (untuk pasir modulus halus butirnya antara 1,50 – 3,80). Pasir yang seperti ini hanya memerlukan pasta semen yang sedikit.

6. Bersifat kekal, tidak hancur atau berubah karena cuaca. Sifat kekal tersebut diuji dengan larutan jenuh garam sulfat sebagai berikut :

- a. Jika dipakai Natrium Sulfat, bagian yang hancur maksimum 12 persen.
- b. Jika dipakai Magnesium Sulfat, bagian yang hancur maksimum 18 persen.

Untuk agregat kasar, tidak boleh mengandung butiran-butiran yang pipih dan panjang lebih dari 20 persen dari berat keseluruhan.

3.2.4 *Spent Catalyst RCC-15*

Lasino (2003) menjelaskan bahwa katalis didefinisikan sebagai zat yang dapat mempercepat laju reaksi tanpa dikonsumsi selama reaksi berlangsung. Katalis dapat memperbesar laju reaksi karena dapat menghasilkan mekanisme baru yang mempunyai energi aktivasi yang lebih rendah dibanding dengan reaksi tanpa katalis. Katalis tidak dapat merubah kesetimbangan termodinamika reaksi, tetapi hanya mempercepat terjadinya kesetimbangan reaksi. Umumnya katalis dapat digolongkan menjadi dua, yaitu katalis homogen dimana semua zat yang terlibat dalam reaksi termasuk katalis berada dalam satu fasa yang sama, dan katalis heterogen dimana reaksi terjadi pada batas dua fasa. Kebanyakan katalis heterogen adalah padatan seperti halnya katalis pada proses RFCC (*Residium Fluid Catalytic Cracking*). Katalis ini berfungsi menurunkan energi pengaktifan sehingga memudahkan terjadinya reaksi. Unit RFCC mengubah umpan (*feedstock*) pada AR (*Atmospheric Residium*) menjadi nafta (bensin), minyak

ringan (*Light cycle oil*), minyak berat (*Heavy cycle oil*) dan karbon katalis yang sudah tidak layak dipakai akan digantikan secara bertahap untuk memenuhi target proses RFCC. Penggantian katalis ini dilakukan dengan cara memasukan fresh katalis dan mengeluarkan sebagian katalis dalam kesetimbangan (*Catalyst inventory*). Dengan penggantian tersebut kadar logam dalam katalis kesetimbangan (E-CAT) akan relatif sama dari waktu ke waktu. Katalis kesetimbangan adalah katalis yang ada dalam reaktor RFCC selama proses berlangsung. Limbah katalis ini mengandung logam-logam Ni, V, dan Fe yang stabil dalam pemanasan. Limbah ini dikeluarkan dari regenerator yang bersuhu tinggi, sehingga senyawa organiknya akan teroksidasi menjadi CO₂. bahan ini tidak akan mengalami perubahan secara berarti jika dilakukan proses pengolahan secara *thermal*, karena merupakan senyawa-senyawa anorganik dengan titik leleh tinggi. Kelembabannya cukup kecil karena proses pada regenerator berlangsung pada suhu 590 °C s/d 730 °C, oleh karena itu diperlukan pengolahan katalis bekas dengan cara lain misalnya dengan mengimobilisasi dalam bentuk padatan (stabilisasi dan solidifikasi). Unsur – unsur utama yang ada dalam bahan katalis bekas ini sebagian besar adalah silika oksida dan alumina oksida. Ukuran butirnya mendekati semen portland, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan tambah dalam campuran mortar dan beton.

Hasil analisa limbah didapatkan unsur utama RCC berupa SiO₂ + Fe₂O₃ + Al₂O₃ sebesar 93,08 % lebih besar yang dipersyaratkan sebagai bahan *pozzolan*.

Tabel 3.3 Komposisi Spent Catalyst RCC-15

No	Parameter	Satuan	Komposisi Spent Catalyst RCC-15
1	SiO ₃	%	47,13
2	Al ₂ O ₃	%	45,34
3	Fe ₂ O ₃	%	0,61
4	TiO ₂	%	0,7
5	K ₂ O	%	0,15
6	Na ₂ O	%	0,45
7	CaO	%	0,16
8	MgO	%	0,26
9	As	mg/kg	0,005
10	Ba	mg/kg	tt
11	B	mg/kg	N/A
12	Cd	mg/kg	4,5
13	Cr	mg/kg	165,5
14	Cu	mg/kg	21
15	Pb	mg/kg	67,5
16	Hg ^{**}	mg/kg	tt
17	Se [*]	mg/kg	tt
18	Zn	mg/kg	105
19	Ni	mg/kg	48
20	V	mg/kg	437,5
21	Ag	mg/kg	2,5
22	Co	mg/kg	358,5
23	Mn	mg/kg	27,5
24	P ₂ O ₅	%	0,23
25	SO ₃	%	0,04
26	H ₂ O	%	0,56
27	LOI	%	4,29

Sumber: Lembaga Penelitian UNPAD Bandung, 2001

3.3 Nilai FAS (Faktor Air Semen)

Menurut Tjokrodimuljo (1992), FAS (Faktor Air Semen) adalah perbandingan antara berat air dan berat semen dalam campuran adukan beton. Pada dasarnya semen memerlukan air sekitar 30% berat semen untuk bereaksi secara sempurna, namun seandainya berat air kurang dari 40% dari berat semen maka reaksi kimia tersebut tidak bisa selesai dengan sempurna, selain itu adukan

beton sulit untuk dipadatkan. Kurangnya jumlah air ini menyebabkan kurang padatnya beton yang berakibat pada kelemahan pada beton.

Dalam bukunya Murdock dan Brook (1991) menyatakan hubungan antara perbandingan air/semen, banyaknya semen dalam campuran gradasi dari agregat, *workability* dan kekuatan beton, pertama-tama dipelajari oleh Abrams di Amerika. Pekerjaan ini disimpulkan dalam suatu hukum perbandingan air semen dari Abrams, sebagai berikut : Pada bahan-bahan dalam keadaan pengujian tertentu, jumlah air campuran yang dipakai menentukan kekuatan beton, selama campuran cukup plastis dan dapat dikerjakan.

Hukum ini memberikan arti, bahwa beton yang dipadatkan sempurna dengan agregat yang baik dan pada kadar semen tertentu, kekuatannya tergantung pada perbandingan air semen. Kenaikan faktor air/semen mempunyai pengaruh sebaliknya terhadap sifat-sifat beton, seperti permeabilitas (sifat kedap air), ketahanan terhadap gaya frost (pembekuan pada musim dingin) dan pengaruh cuaca, ketahanan terhadap abrasi, kekuatan tarik, rayapan, modulus ruptur, robek, dan penyusutan. Hal ini dapat disimpulkan bahwa hampir untuk semua tujuan, beton yang mempunyai faktor air/semen minimal dan cukup untuk memberikan *workability* tertentu yang dibutuhkan untuk pemadatan yang sempurna tanpa pekerjaan pemadatan yang berlebihan, merupakan beton yang terbaik.

3.4 Kemudahan Pengerjaan (*Workability*)

Menurut Murdock dan Brook (1991) istilah *workability* didefinisikan menjadi tiga buah sifat yang terpisah :

1. **Kompaktibilitas**, atau kemudahan di mana beton dapat dipadatkan dan rongga udara diambil.
2. **Mobilitas**, atau kemudahan dimana beton dapat mengalir kedalam cetakan di sekitar baja dan dituan kembali.
3. **Stabilitas**, atau kemampuan beton untuk tetap sebagai massa yang homogen; koheren dan stabil selama dikerjakan dan digetarkan tanpa terjadi segregasi.

Menurut Tjokrodimuljo (1992), sifat ini merupakan ukuran dari tingkat kemudahan adukan untuk diaduk, diangkut, dituang, dan dipadatkan. Unsur-unsur yang mempengaruhi sifat kemudahan dalam pengerjaan diantaranya adalah :

1. Jumlah air yang dipakai dalam campuran adukan beton, semakin banyak air dipakai, semakin mudah beton segar itu dikerjakan.
2. Penambahan semen ke dalam campuran juga memudahkan cara pengerjaan adukan betonnya, karena pasti diikuti dengan bertambahnya air campuran untuk memperoleh nilai FAS yang tetap.
3. Gradasi campuran pasir dan kerikil, bila campuran antara pasir dan kerikil mengikuti gradasi yang telah disarankan oleh peraturan, maka adukan beton akan mudah dikerjakan.
4. Pemakaian butir-butir batuan yang bulat mempermudah pengerjaan.
5. Pemakaian butir maksimum kerikil yang dipakai juga berpengaruh terhadap tingkat kemudahan dalam pengerjaan.
6. Cara pemadatan adukan beton menentukan sifat pengerjaan yang berbeda.

Tingkat kemudahan pengerjaan berkaitan erat dengan tingkat kelecakan (keenceran adukan beton), semakin cair adukan semakin mudah cara pengerjaannya. Untuk mengetahui tingkat kelecakan adukan beton, biasanya dilakukan dengan percobaan *slump test*.

3.5 Slump Test

Pengujian *slump* adalah suatu cara untuk mengukur kelecakan adukan beton, yaitu kecairan/kepadatan adukan yang berguna dalam pengerjaan beton (Tjokrodinuljo, 1992).

Pengujian slump yang dirancang di Amerika sekarang telah dipakai secara meluas sebagai alat pemeriksa konsistensi beton di lapangan. Inggris memberikan standar persyaratan bahwa slump dari contoh bahan beton di lapangan harus diukur seketika setelah pengambilan contoh bahan uji. Kadang-kadang lebih berguna untuk mengukur slump setelah pengangkutan ke tempat pencetakan. Hal ini mengingat adanya perubahan slump sesuai dengan waktu (Murdock dan Brook, 1979).

Pada umumnya nilai slump untuk berbagai jenis konstruksi berkisar antara 7,5 mm– 15,0 mm (Peraturan Beton Bertulang Indonesia, 1971 NI-2.,DPU) seperti pada Tabel 3.4 berikut :

Tabel 3.4 Nilai Maksimum dan Minimum “Slump”

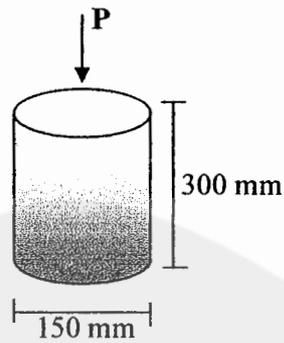
	Jenis Konstruksi	“Slump”	
		Maks (mm)	Min (mm)
1.	Dinding penahan dan fondasi	12,5	5,0
2.	Pondasi sederhana, sumuran, dan dinding sub struktur	9,0	2,5
3.	Balok dan dinding beton	15,0	7,5
4.	Kolom struktural	15,0	7,5
5.	Perkerasan dan slab	7,5	5,0
6.	Beton massa	7,5	2,5

Sumber : Peraturan Beton Bertulang Indonesia, 1971 NI-2., DPU

3.6 Pengujian Kuat Desak

Sifat utama beton adalah memiliki kuat desak yang lebih tinggi dibandingkan dengan kuat tariknya. Kuat desak beton adalah kemampuan beton menahan beban dibagi dengan luas permukaan beton sampai menyebabkan benda uji tersebut hancur apabila dibebani sebesar gaya tertentu. Kualitas beton yang tinggi dapat dilihat dari kuat desaknya, bila semakin tinggi kuat desak yang dihasilkan, maka semakin tinggi pula kualitas beton tersebut.

Untuk memperoleh nilai kuat desak beton digunakan benda uji berbentuk silinder yang berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm, hal ini sesuai dengan standar ASTM (*American Society for Testing and Material*), dengan penampang benda uji dan pembebanan seperti pada gambar 3.6 berikut :



Gambar 3.2 Gambar Benda Uji dan Pembebanan

Rumus yang dipergunakan untuk mendapatkan nilai kuat desak dari masing-masing benda uji adalah sebagai berikut :

$$f'c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(3.1)$$

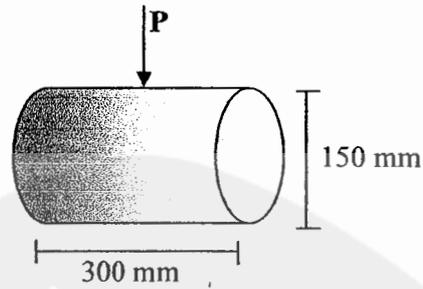
Dengan : P = Beban maksimum (kg)

A = Luas bidang desak beton atau luas permukaan (cm²)

f'c = Kuat desak beton pada umur tertentu (kg/cm²).

3.7 Pengujian Kuat Tarik Belah

Beton mempunyai kuat tarik yang relatif kecil apabila dibandingkan dengan kuat desaknya. Kekuatan beton dalam tarik merupakan sifat yang penting di dalam menahan retak-retak akibat perubahan kadar air dan suhu. Kuat tarik belah (*splitting test*) diuji dengan pembebanan seperti pada Gambar 3.6 berikut dengan ukuran benda uji berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm.



Gambar 3.3 Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Untuk mendapatkan besarnya nilai kuat tarik dari masing – masing benda uji digunakan rumus sebagai berikut :

$$f_t = \frac{2P}{\pi DL} \dots\dots\dots(3.2)$$

Dengan : P = Beban maksimum (N)

D = Diameter silinder beton (mm)

L = Tinggi silinder (mm)

f_t = Kuat tarik belah beton pada umur tertentu (N/mm²).

3.8 Perencanaan Balok Beton Bertulang

Balok seharusnya direncanakan agar runtuh terhadap tarik, yaitu kondisi dimana terjadi leleh pada tulangan tarik sebelum terjadi kehancuran beton yang tertekan. Berdasar pada jenis keruntuhan yang terjadi (apakah akan terjadi leleh tulangan tarik ataukah hancurnya beton yang tertekan), balok dapat dikelompokkan menjadi tiga kelompok sebagai berikut (Nawy, 1990) :

a) Penampang *Balanced*

Tulangan tarik mulai leleh tepat pada saat beton mencapai regangan batasnya dan akan hancur karena tekan (Gambar 3.4, garis Ac1).

b) Penampang *over-reinforced*

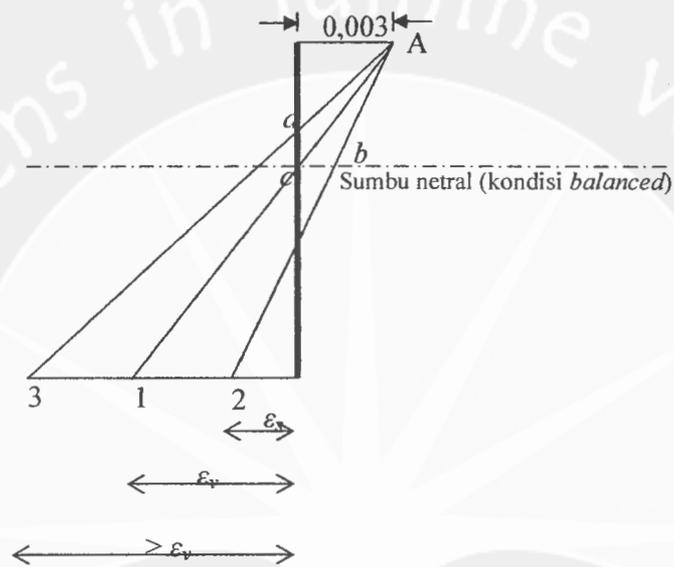
Keruntuhan ditandai dengan hancurnya beton yang tertekan (sebelum tulangan tarik mulai leleh). Kondisi ini terjadi apabila tulangan yang

digunakan lebih banyak daripada yang diperlukan dalam kondisi *balanced* (Gambar 3.4, garis Ab2)

c) Penampang *under-reinforced*

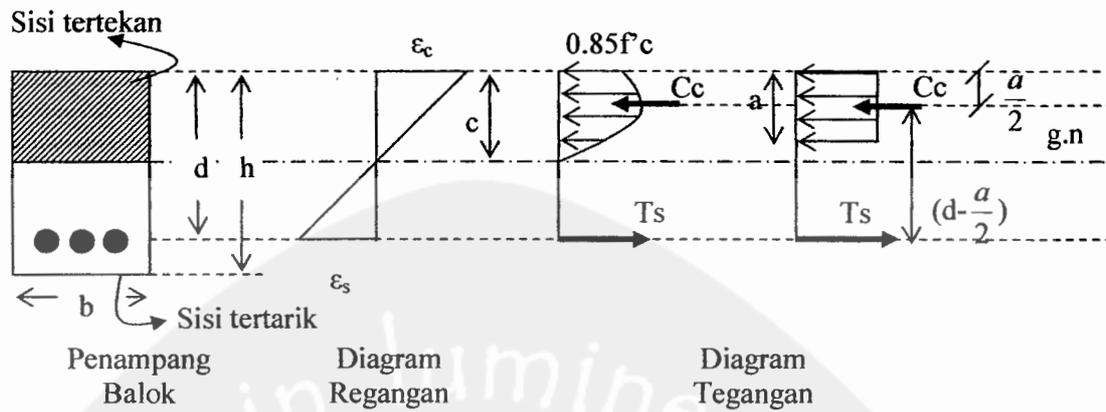
Keruntuhan ditandai dengan terjadinya leleh pada tulangan baja.

(Gambar 3.4, garis Aa3).



Gambar 3.4 Distribusi Tegangan untuk berbagai ragam keruntuhan lentur

Menurut Nawy (1990), gaya-gaya yang bekerja pada balok meliputi gaya desak beton dan gaya tarik baja. Distribusi tegangan aktual yang terjadi pada penampang mempunyai bentuk parabola seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.5. Menghitung volume blok tegangan tekan yang berbentuk parabola bukanlah hal yang mudah. Karena itu Nawy mengusulkan agar digunakan blok tegangan segiempat ekuivalen yang dapat digunakan untuk menghitung gaya tekan tanpa harus kehilangan ketelitiannya, yang berarti juga dapat untuk menghitung kekuatan lentur penampang.



Gambar 3.5 Distribusi Tegangan dan Regangan pada Penampang Balok

Dengan demikian, gaya desak C_c dan gaya tarik T_s dapat dituliskan sebagai berikut :

$$C_c = 0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b \dots\dots\dots(3.3)$$

$$T_s = A_s \cdot f_y \dots\dots\dots(3.4)$$

Kesetimbangan gaya adalah :

$$C_c = T_s \dots\dots\dots(3.5)$$

$$0,85 \cdot f'c \cdot b \cdot a = A_s \cdot f_y \dots\dots\dots(3.6)$$

Momen tahanan penampang, yaitu kekuatan nominal M_n , dapat dituliskan sebagai berikut :

$$M_n = C_c \cdot z = T_s \cdot z \dots\dots\dots 3.7)$$

$$M_n = (0,85 \cdot f'c \cdot b \cdot a) \cdot (d - \frac{a}{2}) = (A_s \cdot f_y) \cdot (d - \frac{a}{2}) \dots\dots\dots(3.8)$$

Syarat rasio penulangan untuk komponen lentur berdasarkan analisis diperlukan tulangan tarik, maka luas tulangan (A_s) yang ada tidak boleh kurang dari (SNI 03 – 2847 – 2002):

$$A_s \text{ min} = \frac{\sqrt{f'c}}{4f_y} \rho \dots\dots\dots (3.9)$$

Dan tidak lebih kecil dari:

$$A_s \text{ min} = \frac{1,4}{f_y} \rho \dots\dots\dots (3.10)$$

Dimana,

$$\rho = b.d \dots\dots\dots (3.11)$$

$$\rho_{\text{max}} = 0,75 \rho b \dots\dots\dots (3.12)$$

$$\rho b = \frac{0,85 \beta_1 f'c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \dots\dots\dots (3.13)$$

3.9 Lentur Balok

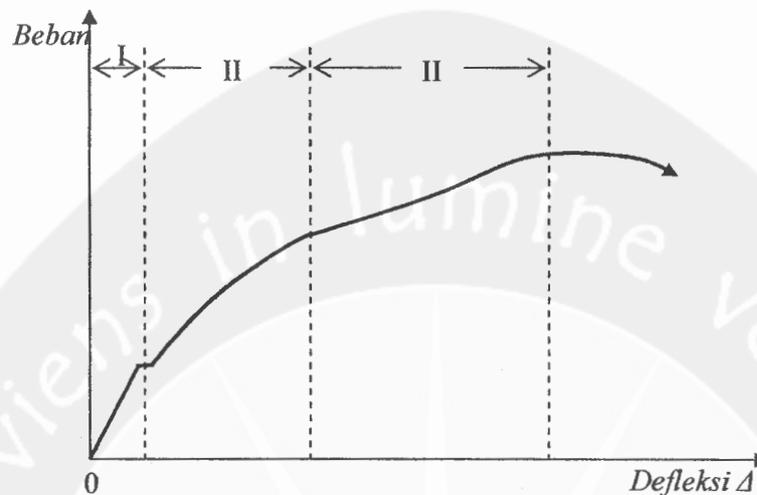
Beban-beban yang bekerja pada struktur, baik yang berupa beban grafitasi (berarah vertikal) maupun beban-beban lain, seperti beban angin (dapat berarah horizontal), atau juga beban karena susut dan beban karena perubahan temperatur Menyebabkan adanya lentur dan deformasi pada elemen struktur. Lentur pada balok merupakan akibat dari adanya regangan yang timbul karena adanya beban luar (Nawy, 1990).

Dalam hal ini bila bebannya bertambah, maka pada balok terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan timbulnya (atau bertambahnya) retak lentur disepanjang bentang balok.

3.10 Hubungan Beban dengan Defleksi

Hubungan beban-defleksi balok beton bertulang pada dasarnya dapat diidealisasikan menjadi bentuk trilineer seperti yang diperlihatkan pada Gambar

3.6. Hubungan ini terdiri atas tiga daerah sebelum terjadinya *rupture* (Nawy, 1990).



Gambar 3.6 Hubungan Antara Beban dan Defleksi Pada Balok

Keterangan : Daerah I : Taraf praretak
 Daerah II : Taraf pascaretak
 Daerah III : Taraf *postserviceability*

a. Daerah I (Tarf praretak)

Segmen praretak dari kurva beban-defleksi pada dasarnya berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh. Tegangan tarik maksimum pada balok lebih kecil daripada modulus runtuh.

b. Daerah II (Tarf pascaretak)

Daerah praretak diakhiri dengan mulainya retak pertama dan mulai bergerak menuju daerah II pada diagram beban-defleksi seperti yang diperlihatkan pada gambar 3.6. Dengan demikian, untuk suatu balok di atas tumpuan sederhana, retak akan semakin lebar dan semakin dalam pada lapangan, sedangkan pada tumpuan hanya terjadi retak minor yang tidak lebar.

Apabila sudah terjadi retak lentur, kontribusi kekuatan tarik beton sudah dapat dikatakan tidak ada lagi. Ini berarti pula kekakuan lentur penampangnya telah berkurang sehingga kurva beban-defleksi di daerah ini akan semakin landai dibandingkan dengan pada taraf praretak. Semakin besar retak yang terjadi, akan semakin berkurang kekakuannya hingga mencapai suatu harga yang berupa *lower-bound* (batas bawah) sehubungan dengan momen inersia penampang retak.

c. Daerah III (Tarf Retak *Postserviceability*)

Tegangan pada tulangan tarik sudah mencapai tegangan leleh. Pada taraf *postserviceability* grafik hubungan beban-defleksi lebih datar daripada daerah-daerah sebelumnya. Hal ini diakibatkan oleh hilangnya kekakuan penampang karena retak yang cukup banyak dan lebar di sepanjang bentang. Jika bebannya terus-menerus bertambah, maka regangan ϵ_s pada tulangan pada sisi yang tertarik akan terus bertambah melebihi regangan lelehnya ϵ_y tanpa adanya tegangan tambahan. Balok yang tulangan tariknya mulai leleh dikatakan telah runtuh secara struktural. Balok ini terus-menerus mengalami defleksi tanpa adanya tambahan beban, dan retak-retaknya semakin terbuka sehingga garis netralnya terus mendekati tepi yang tertekan. Akhirnya terjadi keruntuhan tekan sekunder yang dapat mengakibatkan kehancuran total pada beton daerah momen maksimum dan segera diikuti dengan terjadinya *rupture*.

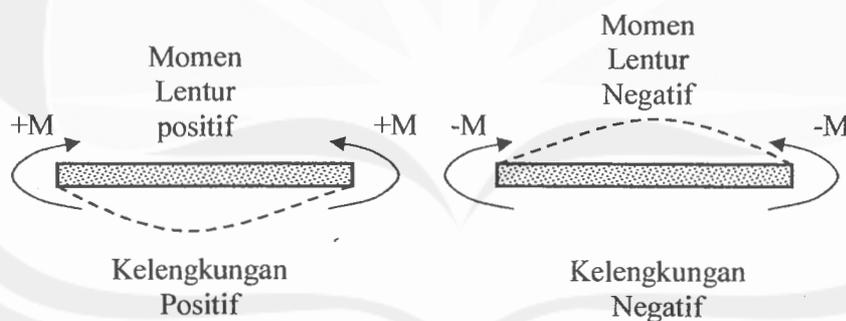
Pada model balok yang memiliki lentur murni (*pure bending*) besarnya defleksi diperoleh dari rumus berikut ini.

$$\Delta = \frac{23PL^3}{648EI} \dots\dots\dots (3.14)$$

Keterangan : Δ : defleksi balok,
 P : beban balok,
 E : modulus elastis bahan,
 L : panjang bentang balok,
 I : momen inersia penampang balok,

3.11 Hubungan antara Momen dengan Kelengkungan

Kelengkungan sebanding dengan momen lentur M dan berbanding terbalik dengan besaran EI yang disebut rigiditas lentur suatu balok. Rigiditas lentur merupakan ukuran tahanan suatu balok terhadap lentur; artinya semakin besar rigiditas lentur, akan semakin kecil kelengkungan yang terjadi akibat momen lentur. Momen lentur positif menghasilkan kelengkungan positif dan momen lentur negatif menghasilkan kelengkungan negatif (Gambar 3.7).



Gambar 3.7 Hubungan Antara Tanda Momen Lentur dan Tanda Kelengkungan

Dari pengujian kuat lentur balok dengan tumpuan sederhana, didapat defleksi pada titik-titik, misalnya y_{i-1} , y_i , y_{i+1} , maka pendekatan kemiringan garis lengkungnya dengan metoda *central differences* adalah :

$$M = EI \frac{d^2 y}{dx^2} \dots\dots\dots (3.15)$$

$$\kappa = \frac{M}{EI} \dots\dots\dots (3.16)$$

$$\kappa = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(y_{i+1} - 2 \cdot y_i + y_{i-1}))}{\Delta x^2} \dots\dots\dots (3.17)$$