

BAB II

KAJIAN TEORITIS

2.1 BETON

Beton sudah digunakan sejak masa Romawi dan Mesir kuno. Beton umumnya didefinisikan sebagai batu buatan yang terdiri dari campuran bahan perekat (semen Portland), bahan pengisi (agregat kasar dan halus baik buatan ataupun alam) dan air dengan komposisi tertentu, yang setelah mengalami proses hidrasi akan membentuk bahan yang mempunyai struktur padat dan keras. Ditinjau secara mikro struktur, agregat berfungsi sebagai fragmen sedangkan pasta semen berfungsi sebagai matriks. Fragmen terikat dengan kuat oleh matriks sehingga bahan beton bekerja secara komposit.

Agar fragmen dan matriks dapat bekerja secara komposit dengan sempurna, maka komponen bahan harus memenuhi kriteria tertentu yaitu:

- Ukuran butiran agregat dan gradasi agregat dapat memungkinkan terjadinya interaksi antar butir dalam kondisi maksimum.
- Jumlah pasta semen cukup untuk menyelimuti seluruh permukaan butir agregat serta dapat mengisi seluruh rongga antar butir.
- Tekstur permukaan agregat memungkinkan terjadinya ikatan yang baik dengan matriks.
- Agregat dan air yang digunakan tidak mengandung bahan yang bersifat reaktif yang dapat mengurangi kekuatan, keawetan dan ketahanan beton.
- Agregat yang digunakan mempunyai kekerasan tertentu.
- Komposisi komponen bahan memungkinkan campuran beton yang homogen dapat dikerjakan dengan mudah.

Beton dikatakan berkualitas baik bila memenuhi dua kriteria keadaan, baik dalam keadaan sudah mengeras maupun pada saat masih merupakan campuran segar. Keadaan beton mengeras berkaitan dengan sifat-sifat mekanisnya seperti kuat tekan, kuat lentur, kuat tarik, impermeabilitas, ketahanan terhadap sulfat, ketahanan terhadap abrasi, durabilitas dan sebagainya. Sedangkan keadaan beton

segar berkaitan dengan masalah workabilitas, waktu ikat yang berpengaruh pada saat pengangkutan dan homogenitas dari beton [3].

Untuk menjaga agar tidak terjadi kegagalan konstruksi beton yang disebabkan rendahnya mutu beton, selain dipenuhi kriteria tersebut di atas juga harus diperhatikan faktor-faktor sebagai berikut:

- Cara pengerjaan
- Kemampuan dan keterampilan pekerja
- Pengawasan dan pengendalian mutu yang ketat
- Iklim dan cuaca
- Kondisi cetakan

2.2 BETON AGREGAT DAUR ULANG

Beton agregat daur ulang adalah suatu rancangan campuran beton dengan menggunakan bahan hasil dari penghancuran beton jadi yang kemudian digunakan sebagai bahan agregat. Tentunya dalam pembentukan agregat hasil daur ulang ini mempunyai karakteristik yang berbeda dengan agregat aslinya. Hal ini disebabkan sudah adanya bahan pencampur lain yang terkandung pada butiran agregat tersebut, yaitu lapisan mortar yang melekat pada agregat. Lapisan mortar itu sendiri terdiri dari agregat dan pasta semen yang digunakan dalam campuran beton sebelumnya. Oleh karena itu perlu diteliti terlebih dahulu mengenai karakteristik agregat daur ulang itu sendiri. Adapun penelitian dari karakteristik agregat daur ulang tersebut dimaksudkan untuk memudahkan dalam perencanaan campuran beton.

Agregat daur ulang ini berasal dari beton *ready mix* dari PT Pioner Beton. Bentuk agregat yang dihasilkan akan berbeda dari agregat aslinya, perbedaan tersebut dapat dilihat dari campurannya sehingga mempengaruhi kualitas (mutu) beton dan kelecakan (*workability*) dari beton itu sendiri.

2.3 MATERIAL PEMBENTUK

Mutu beton secara umum akan sangat bergantung pada jenis dan karakteristik dari material yang digunakan. Pada umumnya beton terdiri dari semen, agregat, dan air.

Beton secara garis besar terdiri dari tiga klasifikasi bahan, yaitu:

- Bahan pengikat, dalam hal ini adalah air dan semen yang bereaksi membentuk pasta semen.
- Bahan pengisi atau agregat, yang terdiri dari agregat halus, umumnya pasir, dan agregat kasar, umumnya kerikil atau batu pecah.
- Bahan tambahan, yang bersifat *additional* seperti *super-plasticizer*, *air entrained*, *retarder*, *pozzolan* dan sebagainya.

2.3.1 Semen

Semen merupakan istilah yang umum digunakan untuk menggambarkan campuran bahan organik dan anorganik yang menyusunnya. Secara umum semen adalah material yang mempunyai sifat adhesive dan kohesif yang dapat mengikat butiran-butiran mineral menjadi satu kesatuan yang kompak. Dalam pengertian sehari-hari semen yang dikenal merupakan *Hydraulic Cement* atau Semen Hidrolis karena kemampuannya bereaksi dengan air dan mengeras dalam kondisi tanpa udara. Kemampuan mengeras dalam kondisi tanpa udara membedakannya dengan semen lainnya yang dapat bereaksi dengan air akan tetapi proses reaksinya masih tergantung kepada karbondioksida untuk mendapatkan peningkatan tegangan dalam proses pengerasannya.

Semen hidrolis terbagi atas 3 (tiga) yaitu:

1. Semen Portland
2. Semen Alumina
3. Semen Alamiah

Berdasarkan Standar Industri Indonesia (SII) 0031-1981, semen Portland adalah semen hidraulic yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidraulic, bersama bahan tambahan yang biasanya digunakan adalah *gypsum*. Nama semen Portland diberikan berdasarkan usul dari Joseph Aspdin, pada tahun 1824, nama tersebut dipakai karena kesamaan warna dan kualitas yang diberikan oleh semen tersebut, pada saat ditemukan, dengan batu Portland, di suatu daerah *quarry* batu gamping (*limestone*) di Dorset, Inggris. Sedangkan *prototype* dari semen Portland modern dibuat oleh Isaac Johnson pada tahun 1854. Penemuan semen Portland modern

menandai dimulainya fabrikasi semen secara massal, yang dilakukan pertama kali oleh David Saylor di Coplay, Pennsylvania, Amerika Serikat, pada tahun 1875 [2]. Semen Portland yang diproduksi di Indonesia dibedakan atas lima jenis, yaitu tipe I, II, III, IV, V. Adapun perbedaan dari kelima jenis semen tersebut adalah untuk mencapai tujuan/target bangunan tertentu (bangunan yang spesifik). Beberapa tipe semen yang diproduksi di Indonesia, antara lain:

1. Semen Tipe I dapat dikatakan yang paling banyak dimanfaatkan untuk bangunan, dan tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus sebagaimana jenis yang lainnya.
2. Semen Tipe II merupakan modifikasi semen tipe I dengan maksud untuk meningkatkan ketahanan terhadap sulfat dan menghasilkan panas hidrasi yang lebih rendah. Semen jenis ini terutama dimanfaatkan untuk bangunan yang terletak di daerah dengan tanah berkadar sulfat rendah (kandungan C_3A rendah).
3. Semen Tipe III merupakan semen yang cepat mengeras. Beton yang dibuat dengan semen tipe III akan mengeras cukup cepat, dan kekuatan yang dicapainya dalam 24 jam akan sama dengan kekuatan beton dari semen biasa dalam 7 hari. Hanya sekitar 3 hari kekuatan tekannya setara dengan kekuatan tekan 28 hari beton dengan semen biasa. Dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi (kandungan C_3A tinggi).
4. Semen Tipe IV merupakan semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah (kandungan C_3S dan C_3A rendah).
5. Semen tipe V terutama ditujukan untuk memberikan perlindungan terhadap bahaya korosi akibat pengaruh air laut, air danau, air tambang, maupun pengaruh garam sulfat yang terdapat dalam air tanah. Semen tipe V ini memiliki daya resistansi terhadap sulfat yang lebih baik dibandingkan semen tipe II.

Semen yang digunakan pada penelitian ini adalah semen Portland Composite yang diproduksi oleh PT Indocement dan biasa digunakan secara umum serta tidak memerlukan persyaratan khusus. Tabel berikut ini merupakan komposisi kimia semen tipe I menurut ASTM C 114 pengujian November 1998.

Tabel II.1 Komposisi Kimia Semen Tipe I

Komposisi Kimia	Persentase
Silikon Dioksida, SiO ₂	20.4
Ferri Oksida, Fe ₂ O ₃	3.49
Aluminium Oksida, Al ₂ O ₃	5.50
Kalsium Oksida, CaO	65.4
Magnesium Oksida, MgO	1.24
Sulfur Trioksida, SO ₃	2.28
Hilang Pijar (LO)	0.92

Bahan pembentuk semen Portland adalah:

- Kapur (CaO), dari batu kapur
- Silika (SiO₂), dari lempung
- Aluminium (Al₂O₃), dari lempung.

Sedangkan bahan utama campuran semen Portland adalah:

- Trikalsium Silikat (3CaO.SiO₂) atau C₃S
- Dikalsium Silikat (2CaO.SiO₂) atau C₂S
- Trikalsium Aluminat (3CaO.Al₂O₃) atau C₃A
- Tetrakalsium Alumino Ferrid (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃) atau C₄AF
- Gypsum (CaSO₄.2H₂O)

Senyawa C₃S dan C₂S berpengaruh besar terhadap kekakuan semen, di mana C₃S berpengaruh pada kekuatan awal, sedangkan C₂S berpengaruh terhadap kekuatan semen pada tahap selanjutnya. Waktu yang diperlukan oleh semen dari keadaan cair menjadi mengeras disebut waktu pengikatan (*setting time*).

2.3.2 Agregat

Berdasarkan Standar Industri Indonesia (SII 002-80), agregat adalah bahan yang dipakai sebagai pengisi, dipakai bersama-sama dengan bahan perekat, membentuk satu massa yang padat bersatu, keras dan disebut beton. Dalam SK SNI 03-2847-2002, agregat didefinisikan sebagai material granular, misalnya pasir, kerikil, batu pecah, dan kerak tungku besi yang dipakai bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk beton atau adukan semen hidrolik.

Kualitas agregat adalah hal yang perlu diperhatikan, mengingat agregat secara umum menempati 70%-75% dari total volume beton¹. Agregat tidak saja berpengaruh pada kekuatan beton, tetapi sifat –sifat agregat juga berpengaruh pada daya tahan dan kekompakan strukturnya. Sifat-sifat agregat yang penting dalam pembuatan beton pada umumnya adalah bentuk, gradasi, kekuatan, modulus elastisitas serta interaksi kimia dan fisiknya dengan semen yang mempengaruhi retakan antara agregat dan mortar. Selain itu, kekuatan beton dipengaruhi oleh proporsi campuran, kebersihan air dan agregatnya. Oleh karena itu, selain harus memiliki kekuatan dan daya tahan baik, butir agregat disyaratkan harus bersih dari lumpur atau material organis lainnya yang dapat mengurangi kekuatan beton. Diameter lumpur atau material organis ini adalah kurang dari 0.063 mm. bila banyaknya lumpur atau material organis yang dikandung dalam agregat lebih dari 1% berat kering, agregat tersebut harus dicuci.

Agregat pada beton mempunyai tiga fungsi utama yaitu :

1. Sebagai material pengisi yang relatif lebih murah dari semen.
2. Sebagai material padat yang tahan terhadap beban yang bekerja, abrasi, perkolasi air dan pengaruh cuaca.
3. Mengurangi kembang-susut dari pasta semen [1].

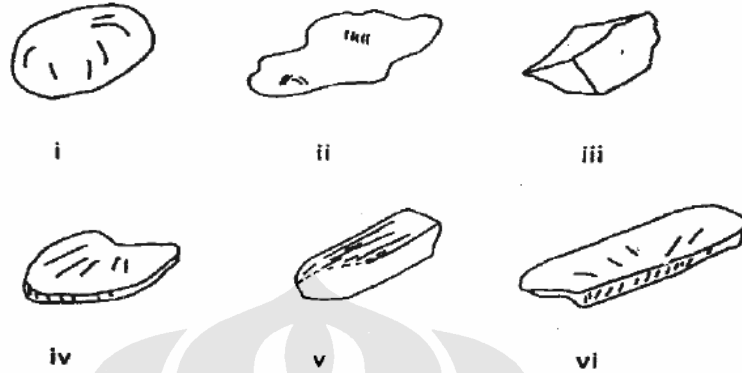
Bentuk dan gradasi agregat mempengaruhi kelecakan (*workability*) beton dan jumlah pemakaian agregat dalam campuran beton.

Tabel II.2 Klasifikasi Fisik Agregat [2]

Klasifikasi	Deskripsi	Contoh
Bulat	Aus akibat air atau terbentuk akibat keseluruhannya	Kerikil sungai
Tidak beraturan	Tak beraturan alami, atau sebagian terkikis dan memiliki bentuk bulat	Kerikil lain; batu tanah atau galian
<i>Flaky</i>	Material yang tipis pada salah satu sisinya	Batu yang terlindung salah satu sisinya
<i>Angular</i>	Memiliki bentuk sisi yang baik pada potongan sisi planar yang kasar	Batuan tebing yang dipecah, batuan kerak
<i>Elongated</i>	Material yang bersudut salah satunya lebih panjang dari yang lain	

¹ P. Nugraha. Teknologi Beton dengan Antisipasi Terhadap Pedoman Beton 1989 Surabaya Penerbitan U K Petra, 1980, hal. 31.

<i>Flaky dan Elongated</i>	Material yang memiliki panjang yang lebih besar dari lebarnya dan lebar ini lebih besar dari tebalnya	
----------------------------	---	--



i. *Rounded*; ii. *Irregular*; iii. *Angular*; iv. *Flaky*; v. *Elongated*; vi. *Flaky & Elongated*

Gambar II.1 Bentuk agregat²

Agregat untuk beton harus memenuhi ketentuan dan mutu dan cara uji agregat beton dalam SII 00452-80 ataupun persyaratan ASTM C 330 tentang *Specification for Concrete Aggregate*.

Dalam perencanaan beton, diperlukan pembagian butiran (gradasi) agregat. Untuk menentukan gradasi agregat dilakukan dengan analisa saringan. Alat yang digunakan adalah seperangkat saringan dengan ukuran jaring-jaring tertentu.

Menurut ukuran butirannya agregat bisa diklasifikasikan menjadi dua, yaitu agregat halus dan agregat kasar. Batasan ukuran dan klasifikasi di atas adalah ayakan dengan lubang 4.75 mm (saringan No.4 Standar ASTM), butiran yang tertahan diayakan tersebut digolongkan sebagai agregat kasar sedangkan butiran yang dapat melewati ayakan tersebut digolongkan sebagai agregat halus.

Pemilihan agregat dilakukan dengan memperhatikan hal-hal berikut:

- Kualifikasi dari beton yang ingin dibentuk
- Perbandingan antara biaya dengan mutu
- Persediaan di sekitar lokasi proyek

² BSI 812-1975

2.3.2.1 Agregat Halus

Agregat halus menurut SK SNI 03-2847-2002 adalah pasir alam sebagai hasil disintegrasi 'alami' dari batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir sebesar 5.0 mm. Sedangkan menurut ASTM C 125-92, agregat halus ialah agregat yang lewat ayakan 3/8 in (9,5 mm) dan hampir seluruhnya melewati saringan 4.75 mm (saringan No.4 Standar ASTM) dan tertahan pada ayakan 75- μ m (No.200). Untuk penelitian digunakan campuran antara agregat alam dan daur ulang yaitu Pasir yang berasal Adhi Mix dan pasir hasil daur ulang dari Pioner Beton.

Agregat halus yang umum dipakai sebagai campuran beton adalah pasir alam. Menurut asal dan cara mendapatkannya, pasir alam dapat digolongkan menjadi:

- Pasir galian, diperoleh dari permukaan tanah dengan cara menggali. Pasir jenis ini biasanya berbentuk tajam, bersudut, berpori, bebas dari kandungan garam, tetapi perlu dicuci dahulu untuk membersihkan kotoran tanah.
- Pasir sungai, diperoleh dari dasar sungai, umumnya berbentuk bulat karena gesekan dengan air, sehingga kurang dapat diikat dengan kuat. Butirannya relatif halus, baik untuk pekerjaan plesteran.
- Pasir laut, diperoleh dari pantai, butirannya bulat dan halus. Kurang baik karena kandungan garamnya tinggi yang menyebabkan besarnya absorpsi dan pengembangan pada beton.

Berikut adalah sifat-sifat dari beton yang dipengaruhi oleh sifat-sifat dasar agregat halus yang membentuknya (sesuai dengan ACI 221R - 89):

1. Ketahanan beton

Ketahanan beton dipengaruhi oleh sifat-sifat agregat halus, antara lain:

- Absorpsi, semakin besar kemampuan agregat halus menyerap kandungan air mengurangi ketahanan beton. Nilai absorpsi yang baik dalam hal ini adalah di bawah 2% (ASTM C 128).
- Kandungan sulfat, kandungan sulfat agregat halus yang diizinkan menurut ASTM C 88 adalah 1 sampai 10%.

- Bentuk dan tekstur permukaan agregat, agregat halus yang baik adalah yang mempunyai bentuk tajam dan kubikal, sehingga mempunyai bidang kontak yang luas untuk diikat.
 - Kadar lumpur, keberadaan lumpur akan meningkatkan kebutuhan air atau mengurangi rongga udara. Keberadaan material yang lebih halus dari ayakan 75- μm (No.200) dapat ditoleransi asal bebas dari kandungan lumpur. Kadar lumpur yang diizinkan pada agregat halus menurut ASTM C 117 adalah 0.2 – 6 %.
 - Kekerasan dan kekuatan agregat halus berpengaruh terhadap ketahanan abrasi dari beton.
 - Indeks durabilitas dari agregat halus menunjukkan besarnya jumlah agregat yang bereaksi seperti lumpur bila bercampur dengan air.
2. Ketahanan terhadap reaksi alkalis
Ketahanan beton terhadap unsur alkalis dipengaruhi oleh sifat reaktif agregat terhadap *alkali-silica*, *alkali-carbonate* dan semen. Sifat reaktif yang tidak diinginkan dapat menyebabkan perpanjangan beton, keretakan atau kehilangan kekuatan beton.
 3. Ketahanan terhadap pemanasan dan pendinginan
Koefisien pengembangan termal dari agregat berpengaruh dalam hal ini, walau pun biasanya tidak menimbulkan persoalan yang berarti terhadap beton.
 4. Ketahanan terhadap kebakaran
Kuantitas dari agregat halus yang lewat dari ayakan 75- μm (No.200) mengurangi ketahanan beton terhadap bahaya kebakaran. Kandungan material halus di atas diizinkan pada agregat halus adalah antara 0.2 - 6 % (ASTM C 117).
 5. Kekuatan beton
Kekuatan beton yang biasanya diperhatikan adalah kuat tekan dan kuat lentur. Kekuatan agregat juga berpengaruh terhadap kekuatan beton, tapi pada umumnya kekuatan agregat lebih besar daripada kekuatan butiran semen yang digunakan, hal ini sudah mencukupi. Sifat-sifat agregat halus lainnya yang mempengaruhi kekuatan beton adalah:

- Kandungan organik, yang dapat melemahkan kekuatan beton. Pengujian agregat halus dilakukan dengan memperhatikan warnanya di dalam larutan NaOH, di mana tidak boleh melebihi standar No.3 (ASTM C 40).
- Bentuk partikel, semakin bersudut dan tajam bentuk partikel agregat halus akan semakin kuat diikat oleh pasta semen. Bentuk partikel yang tidak dianjurkan adalah bentuk bulat, pipih dan panjang.
- Kadar lumpur dan abu, keberadaan lumpur dan abu tidak diharapkan karena sifatnya yang tidak dapat bereaksi dengan semen-air sehingga melemahkan pengikatan yang terjadi dan pada akhirnya akan menurunkan kekuatan beton.
- Gradasi agregat halus yang baik menurut ASTM C 33 - 78 :

Tabel II.3 Gradasi Standar Agregat Halus Alam

Diameter ayakan	Prosentase Lolos
9.5 mm (No.2)	100
4.75 mm (no.4)	95 sampai 100
2.36 mm (No.8)	80 sampai 100
1.18 mm (No.16)	50 sampai 85
600 μ m (No.30)	25 sampai 60
300 μ m (No.50)	10 sampai 30
150 μ m (No.100)	2 sampai 10

6. Konsistensi volume
Perubahan volume beton dipengaruhi oleh kuantitas material yang lolos dari ayakan No.200, juga kadar lumpur dari agregat halus.
7. Karakteristik termal
Karakteristik termal beton dipengaruhi oleh konduktivitas dan difusivitas dari agregat.
8. Kepadatan
Sifat-sifat agregat halus yang mempengaruhi kepadatan beton antara lain:
 - Berat jenis, agregat alam biasanya memiliki berat jenis antara 2.5 sampai 2.7, sedangkan beton agregat alam yang dihasilkan mempunyai berat jenis sekitar 2.3 sampai 2.4. Semakin besar berat jenis agregat akan menyebabkan bertambahnya berat jenis dan kerapatan beton yang dihasilkan.

- Bentuk partikel, semakin bersudut dan tajam bentuk partikel agregat halus, semakin kuat diikat pasta semen. Bentuk partikel yang tidak dianjurkan adalah bentuk bulat, pipih, panjang.
- *Fineness Modulus*, ialah suatu indeks yang dipakai untuk ukuran kehalusan-kekasaran butiran agregat. Modulus halus ini didapat dari pengujian Analisa Saringan (ASTM C 136) yang merupakan penjumlahan kumulatif dari persentase agregat yang tertahan dibagi dengan 100. Untuk agregat halus, nilai ini berkisar antara 2.2 sampai 3.1.
- Kandungan partikel ringan, yaitu partikel alami dengan berat jenis kurang dari 2.4 %, jumlah maksimum yang diizinkan adalah 5 %.
- Kepadatan, kepadatan dari agregat dinyatakan dalam *kg/liter*, dihitung berdasarkan berat agregat dalam suatu tempat tertentu, sehingga yang dihitung volume padat (termasuk volume pori tertutup) dan volume pori terbukanya (ASTM C 29).

9. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas beton dipengaruhi juga oleh elastisitas agregat, semakin tinggi modulus elastisitas agregat yang didapat dari uji beban uniaksial, semakin tinggi kekuatan agregat tersebut.

10. Kekuatan gesek permukaan

Sifat ini dipengaruhi oleh tekstur permukaan dari agregat, ketajaman dan kekasaran tekstur permukaan agregat memperbesar friksi permukaan beton pada kondisi basah (ASTM C 295).

11. Bleeding

Merupakan peristiwa terpisahnya air dari adukan campuran beton (SK SNI T-28-1991-03), yang dapat menyebabkan rusaknya pekerjaan penyelesaian dan memperlemah bagian permukaan beton, dan juga mengganggu pekerjaan pemompaan beton. Tapi peristiwa ini diharapkan pada proses beton-hampa, karena air dapat dipisahkan dengan mudah. Bentuk dan gradasi agregat halus sangat dominan menyebabkan terjadinya bleeding.

12. Workabilitas

Beton yang dihasilkan harus dapat dikerjakan dengan baik, yaitu dapat ditempatkan atau dicor serta dipadatkan secara baik sehingga dapat membentuk struktur sehomogen mungkin. Sifat beton yang menjadi tolak ukur hal di atas disebut workabilitas dari beton. Beberapa sifat agregat halus yang berpengaruh terhadap workabilitas beton antara lain adalah gradasi, *fineness modulus*, bentuk dan tekstur permukaan, kandungan material lebih halus dari saringan No.200, kadar lumpur dan abu serta ruang antar agregat. Sifat yang diinginkan dari agregat halus sama seperti yang dijelaskan di butir sebelumnya.

13. **Kandungan udara**
Kandungan material halus (lewat saringan No.200), lumpur dan kadar organik pada agregat halus dapat mengurangi kandungan rongga udara yang dianjurkan pada beton.
14. **Pumpability**
Beton segar yang dibentuk oleh agregat yang bersudut serta bergradasi kurang baik diyakini lebih susah dipompa karena friksi internal yang timbul di dalamnya. Biasanya untuk pemompaan dilakukan penambahan rasio mortar terhadap agregat kasar sekitar 10% dari proporsi semula (ACI 211.1 dan ACI 304).
15. ***Shrinkage* (Susut)**
Susut akibat kondisi kering tergantung pada potensial susut dari pasta semen dan sifat serta jumlah agregat. Faktor yang berhubungan dengan agregat halus yang dapat mempengaruhi terjadinya susut pada beton, antara lain:
 - Sifat-sifat seperti gradasi, bentuk partikel, kandungan air agregat serta jumlah dari agregat yang dipakai.
 - Tekstur, porositas agregat yang berpengaruh pada ikatan pasta semen dengan agregat.
 - Kandungan lumpur

SNI 03-2834-1992 mengklasifikasikan distribusi ukuran butiran agregat halus (pasir) menjadi empat daerah atau zone, yaitu : zone I (kasar), zone II (agak kasar) , zone III (agak halus) dan zone IV (halus).

Tabel II.4 Batas-batas Gradasi Agregat Halus Menurut SNI 03-2834-1992

Ukuran Saringan	Persentase berat yang lolos saringan			
	Gradasi Zone I	Gradasi Zone II	Gradasi Zone III	Gradasi Zone IV
9.60 mm	100	100	100	100
4.80 mm	90-100	90-100	90-100	95-100
2.40 mm	60-95	75-100	85-100	95-100
1.20 mm	30-70	55-90	75-100	90-100
0.60 mm	15-34	35-59	60-79	80-10
0.30 mm	5-20	8-30	12-40	15-50
0.15 mm	0-10	0-10	0-10	0-15

2.3.2.2 Agregat Kasar

Agregat kasar menurut SK 03-2847-2002 adalah kerikil sebagai hasil disintegrasi 'alami' dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5 mm sampai 40 mm. Sedangkan menurut ASTM C 125-92, agregat kasar adalah porsi dari agregat yang tertahan (9.5 mm) dan pada saringan 4.75 mm (saringan No.4 Standar ASTM).

Fungsi agregat kasar adalah sebagai penyusun kekuatan sedangkan agregat halus berfungsi sebagai pengisi ruang kosong. Dalam praktek, agregat halus bekerja dengan bahan matriks membentuk suatu mortar yang melingkupi seluruh permukaan agregat kasar dan memberikan sifat adhesive. Asumsi umum yang ada mengenai ukuran butiran agregat kasar yang baik adalah ukuran butiran yang berkisar antara 5 mm sampai 25 mm, dengan prediksi bahwa ukuran yang relatif lebih kecil akan menghasilkan beton dengan kuat tekan lebih baik. Hal ini sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa semakin luas bidang kontak dari agregat kasar tersebut akan menyebabkan reaksi pengikatan yang lebih sempurna.

Berikut adalah sifat-sifat dari beton yang dipengaruhi oleh sifat-sifat dasar agregat kasar yang membentuknya (sesuai dengan ACI 221R-89):

1. Ketahanan beton

Ketahanan beton dipengaruhi oleh sifat-sifat agregat kasar, antara lain:

- Absorpsi, semakin besar kemampuan agregat kasar menyerap kandungan air akan mengurangi ketahanan beton. Nilai absorpsi yang baik dalam hal ini adalah di bawah 4% (ASTM C127).
- Kandungan sulfat, kandungan sulfat agregat kasar yang diizinkan menurut ASTM C 88 adalah 1 sampai 12%.
- Bentuk dan tekstur permukaan agregat, agregat kasar yang baik adalah yang mempunyai bentuk tajam dan kubikal, sehingga mempunyai bidang kontak yang luas untuk diikat.
- Kadar lumpur, kadar lumpur yang diizinkan pada agregat kasar menurut ASTM C 117 adalah 0.2 – 1 %.
- Kekerasan dan kekuatan agregat kasar berpengaruh terhadap ketahanan abrasi dari beton.
- Indeks durabilitas dari agregat kasar menunjukkan besarnya jumlah agregat yang bereaksi seperti lumpur bila bercampur dengan air.
- Porositas, adalah rasio yang menyatakan prosentase dari volume rongga di dalam material terhadap volume total material termasuk rongganya. Porositas yang diizinkan pada agregat kasar adalah antara 1 - 10 % dari volume total agregat kasar tersebut.
- Ketahanan terhadap keausan dengan menggunakan *Los Angeles Testing Machine*, kehilangan berat setelah pengujian harus berkisar antara 15 - 50% (ASTM C 131 dan C 535).

2. Ketahanan terhadap reaksi alkalis

Ketahanan beton terhadap unsur alkalis dipengaruhi oleh sifat reaktif agregat terhadap *alkali-silica*, *alkali-carbonate* dan semen. Sifat reaktif yang tidak diinginkan dapat menyebabkan perpanjangan beton, keretakan atau kehilangan kekuatan beton. Agregat kasar dalam pengujian terhadap sifat reaktif ini harus dihancurkan menjadi seukuran pasir.

3. Ketahanan terhadap pemanasan dan pendinginan

Koefisien pengembangan termal dari agregat berpengaruh dalam hal ini, walau pun biasanya tidak menimbulkan persoalan yang berarti terhadap beton.

4. Ketahanan terhadap kebakaran

Kuantitas dari agregat kasar yang lewat dari ayakan 75- μ m (No.200) mengurangi ketahanan beton terhadap bahaya kebakaran. Kandungan material halus di atas diizinkan pada agregat kasar adalah antara 0.2 - 1% (ASTM C-117).

5. Kekuatan beton

Kekuatan beton yang biasanya diperhatikan adalah kuat tekan dan kuat lentur. Kekuatan agregat juga berpengaruh terhadap kekuatan beton, tapi pada umumnya kekuatan agregat lebih besar daripada kekuatan butiran semen yang digunakan, hal ini sudah mencukupi. Sifat-sifat agregat kasar lainnya yang mempengaruhi kekuatan beton adalah:

- Bentuk partikel, semakin bersudut dan tajam bentuk partikel agregat kasar akan semakin kuat diikat oleh pasta semen. Bentuk partikel yang tidak dianjurkan adalah bentuk bulat, pipih dan panjang.
- Kadar lumpur dan abu, keberadaan lumpur dan abu tidak dianjurkan karena sifatnya yang tidak dapat bereaksi dengan semen-air sehingga melemahkan pengikatan yang terjadi dan pada akhirnya akan menurunkan kekuatan beton.
- Ukuran maksimum dari agregat kasar, menurut ASTM C 136 berkisar antara ½ sampai 6 in.
- Gradasi agregat kasar yang baik menurut ASTM C 133 :

Tabel II.5 Gradasi Standar Agregat Kasar Alam Berdasarkan ASTM C 33 - 78

Diameter ayakan	Prosentase Lolos
25.4 mm (1")	100
19.0 mm (3/4")	90 sampai 100
9.50 mm (3/8")	20 sampai 55
4.75 mm (No.4)	0 sampai 10
2.36 mm (No.8)	0 sampai 5

6. Konsistensi volume

Perubahan volume beton dipengaruhi oleh kuantitas material yang lolos dari ayakan No.200, juga kadar lumpur dari agregat kasar. Selain itu juga berpengaruh ukuran maksimum dari agregat kasar, menurut ASTM C 136 berkisar antara ½ sampai 6 in.

7. Karakteristik termal

Karakteristik termal beton dipengaruhi oleh konduktivitas dan difusivitas dari agregat serta koefisien termal dari agregat kasar.

8. Kepadatan

Sifat-sifat agregat kasar yang mempengaruhi kepadatan beton antara lain:

- Berat jenis, agregat alam biasanya memiliki berat jenis antara 2.5 sampai 2.7, sedangkan beton agregat alam yang dihasilkan mempunyai berat jenis sekitar 2.3 sampai 2.4. Semakin besar berat jenis agregat akan menyebabkan bertambahnya berat jenis dan kerapatan beton yang dihasilkan.
- Bentuk partikel, semakin bersudut dan tajam bentuk partikel agregat kasar, semakin kuat diikat pasta semen. Bentuk partikel yang tidak dianjurkan adalah bentuk bulat, pipih, panjang.
- *Fineness Modulus*, ialah suatu indeks yang dipakai untuk ukuran kehalusan-kekasaran butiran agregat. *Fineness Modulus* ini didapat dari pengujian Analisa Saringan yang merupakan penjumlahan kumulatif dari persentase agregat yang tertahan dibagi dengan 100. Untuk agregat kasar, nilai ini berkisar antara 5.5 sampai 8.5.
- Kandungan partikel ringan, yaitu partikel alami dengan berat jenis kurang dari 2.4 %, jumlah maksimum yang diizinkan adalah 5 %.
- Kepadatan, kepadatan dari agregat dinyatakan dalam *kg/liter*, dihitung berdasarkan berat agregat dalam suatu tempat tertentu, sehingga yang dihitung volume padat (termasuk volume pori tertutup) dan volume pori terbukanya (ASTM C 29). Standar kepadatan agregat berkisar antara 75 sampai 110 *lb/ft*.

9. Modulus elastisitas

Modulus elastisitas beton dipengaruhi juga oleh elastisitas agregat, semakin tinggi modulus elastisitas agregat yang didapat dari uji beban uniaksial, umumnya akan semakin tinggi kekuatan agregat tersebut.

10. Kekuatan gesek permukaan

Sifat ini dipengaruhi oleh tekstur permukaan dari agregat, ketajaman dan kekasaran tekstur permukaan agregat memperbesar friksi permukaan beton pada kondisi basah (ASTM C 295).

11. **Workabilitas**
Beton yang dihasilkan harus dapat dikerjakan dengan baik, yaitu dapat ditempatkan atau dicor serta dipadatkan secara baik sehingga dapat membentuk struktur sehomogen mungkin. Sifat beton yang menjadi tolak ukur hal di atas disebut workabilitas dari beton. Beberapa sifat agregat kasar yang berpengaruh terhadap workabilitas beton antara lain adalah gradasi, *fineness modulus*, bentuk dan tekstur permukaan, kandungan material lebih halus dari saringan No.200, kadar lumpur dan abu serta ruang antar agregat. Sifat yang diinginkan dari agregat kasar sama seperti yang dijelaskan di butir sebelumnya.
12. **Kandungan udara**
Kandungan material halus (lewat saringan No.200), lumpur dan kadar organik pada agregat kasar dapat mengurangi kandungan rongga udara yang diharapkan pada beton.
13. **Pumpability**
Beton segar yang dibentuk oleh agregat yang bersudut serta bergradasi kurang baik diyakini lebih susah dipompa karena friksi internal yang timbul di dalamnya. Biasanya untuk pemompaan dilakukan penambahan rasio mortar terhadap agregat kasar sekitar 10% dari proporsi semula (ACI 211.1 dan ACI 304).
14. ***Shrinkage* (Susut)**
Susut akibat kondisi kering tergantung pada potensial susut dari pasta semen dan sifat serta jumlah agregat. Faktor yang berhubungan dengan agregat kasar yang dapat mempengaruhi terjadinya susut pada beton, anatara lain:
 - Sifat-sifat seperti gradasi, bentuk partikel, kandungan air agregat serta jumlah dari agregat yang dipakai.
 - Tekstur, porositas agregat yang berpengaruh pada ikatan pasta semen dengan agregat.
 - Kandungan lumpur

Batasan gradasi agregat kasar yang baik untuk ukuran butir agregat maksimum 19 mm dan 38 mm, menurut SNI 02-2834-1992 pada tabel di bawah ini:

Tabel II.6 Batas-batas Gradasi Agregat Kasar SNI 03- 2834-1992

Ukuran Saringan	Persentase berat yang lolos saringan	
	5 mm sampai 38 mm	5 mm sampai 19 mm
38.0 mm	90-100	100
19.0 mm	35-70	90-100
9.6 mm	10-40	50-85
4.8 mm	0-5	0-10

Menurut Persyaratan Umum Bahan Bangunan di Indonesia, perlu diuji ketahanannya terhadap keausan (dengan mesin *Los Angeles*). Persyaratan mengenai ketahanan agregat kasar beton keausan ditunjukkan pada tabel II.7 di bawah ini:

Tabel II.7 Persyaratan Kekerasan Agregat Kasar

Kekuatan beton	Maksimum bagian yang hancur dengan Mesin Los Angeles, lolos ayakan 1,7 mm (%)
Kelas I (sampai 10 MPa)	50
Kelas II (10 MPa – 20 MPa)	40
Kelas III (di atas 20 MPa)	27

2.3.3 Air

Air diperlukan dalam pembentukan beton untuk hidrasi semen, membasahi agregat dan memudahkan proses pencampuran untuk kemudahan pekerjaan. Agar beton mudah dikerjakan harus ditentukan perbandingan antara jumlah air dan semen yang digunakan. Kualitas air perlu diperhatikan karena kandungan kotoran yang ada di dalamnya akan mempengaruhi mutu beton. Salah satunya dapat mengurangi kekuatan beton. Selain dilakukan pemeriksaan visual dalam kejernihannya, perlu pula dilakukan pemeriksaan mengenai kandungan bahan-bahan perusak. Contoh asam, alkali, bahan-bahan organik dan lain-lain. Penelitian semacam ini harus dilakukan di laboratorium kimia. Selain itu air dibutuhkan untuk reaksi pengikatan pada beton, dapat pula digunakan untuk masa perawatan beton setelah pengecoran.

Proporsi air yang sedikit akan memberikan kekuatan yang tinggi pada beton, tetapi kelemasan beton atau daya kerjanya akan berkurang. Sedangkan proporsi air yang agak besar akan memberikan kemudahan pada waktu pelaksanaan pengecoran, tetapi kekuatan beton menjadi rendah. Proporsi air ini

dinyatakan sebagai rasio air-semen (*water-cement ratio*), yaitu angka yang menyatakan perbandingan antara berat air (*kg*) dibagi dengan berat semen (*kg*) dalam adukan beton tersebut.

Beton untuk konstruksi gedung biasanya memiliki nilai rasio air-semen sebesar 0.45 hingga 0.65. Dengan rasio tersebut dapat dihasilkan beton yang kedap air, namun mutu beton tetap dipengaruhi cara pemadatan dan daya kerja. Pemadatan yang kurang baik, akan menimbulkan sarang kerikil (*honeycomb*) yang mengakibatkan beton keropos. Daya kerja beton diukur dari nilai *slump*. Nilai *slump* beton untuk bangunan berkisar 7.5 hingga 15 cm.

2.4 SIFAT-SIFAT MEKANIS BETON

Dalam pembuatan beton selalu diperhatikan sifat-sifat dari beton yang kita inginkan. Sifat-sifat yang utama dan umum kita kehendaki adalah sifat-sifat mekanis beton, hal ini mempengaruhi kita dalam perhitungan dan pembuatan campuran beton. Sifat-sifat mekanis beton dapat dikaitkan dengan dua kondisi beton masih baru dan encer disebut kondisi beton segar, dan yang kedua adalah kondisi di mana beton sudah mengeras.

Pada keadaan beton segar, ada beberapa sifat mekanis dan fenomena yang harus kita perhatikan, antara lain:

- Workabilitas beton segar
- Temperatur beton
- Segregasi
- *Bleeding*
- *Pumpability*
- Kandungan udara
- Waktu ikat

Dari sifat-sifat beton segar di atas, hanya akan dijabarkan mengenai sifat workabilitasnya saja.

Sedangkan pada saat beton sudah mengeras harus diperhatikan sifat-sifat mekanisnya sebagai berikut:

- Durabilitas atau ketahanan beton, terutama pemanasan-pendinginan, reaksi alkalis dan bahaya kebakaran.

- Kekuatan beton, terutama kuat tekan, kuat lentur, kuat tarik-belah.
- *Shrinkage* (Susut)
- *Creep* (Rangkak)
- Modulus Elastisitas
- Gesekan permukaan beton
- Karakteristik termal
- Stabilitas volume beton

2.4.1 Workabilitas

Workabilitas beton atau sifat kemudahan pengerjaan dari beton yang meliputi kemudahan penempatan-pencetakan beton dan ketahanan beton terhadap segregasi serta sifat-sifat beton dalam kondisi plastis lainnya.

Menurut Newman [4], sifat workabilitas (biasa disebut kelecakan) beton dapat diklasifikasikan menjadi:

1. *Compactibility*, mewakili sifat kemudahan pemampatan beton dengan cara menghilangkan rongga udara yang ada.
2. *Stability*, yaitu ketahanan beton terhadap segregasi materialnya selama masa pengangkutan atau saat pepadatan.
3. *Mobility*, yaitu kemudahan beton segar untuk mengisi seluruh sudut cetakan dan rongga antar tualangan.
4. *Finishability*, yaitu sifat yang menolong untuk memperoleh penyelesaian permukaan beton yang licin dan baik.

Sifat workabilitas beton ini sedikit banyak dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti rasio air-semen, gradasi agregat, ukuran maksimum agregat, bentuk dan tekstur permukaan agregat, rasio pasir-agregat, kepadatan agregat, absorpsi agregat dan kekayaan atau proporsi campuran beton.

Pengukuran derajat workabilitas beton dilakukan dengan pengujian-pengujian seperti [4]:

1. Uji *Slump* (ASTM C 143 - 78), untuk mengetahui variasi dari keseragaman dan konsistensi dari campuran beton tertentu.

2. *Compacting Factor Test* (ACI 211.3 - 75), yaitu pengukuran derajat pemadatan dan rasio kepadatan dengan standar berupa jumlah usaha yang dilakukan.
3. *Flow Test* (ASTM C 124 - 39), merupakan uji laboratorium untuk mengetahui konsistensi beton dan ketahanan terhadap segregasi dengan cara mengukur sebaran beton yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu.
4. *Vebe Test* (ACI 211.3 - 75) adalah pengembangan dari *remolding test*.
5. *Ball Penetration Test*, merupakan uji lapangan yang bertujuan sama dengan uji *slump*.

2.5 KUAT LENTUR BETON

Dalam perencanaan beton untuk struktur tertentu, seperti perkerasan rigid dan landasan pesawat terbang, kriteria kuat lentur beton lebih dominan dibandingkan kuat tekan beton. Kuat lentur beton dapat ditentukan dari balok beton yang mengalami pembebanan arah transversal. Kuat lentur maksimum dialami oleh serat bawah balok beton dan disebut sebagai *Modulus of Rupture*, yang besarnya tergantung dari panjang balok dan jenis pembebanan.

Kuat lentur beton biasanya kurang mempunyai pengaruh yang berarti pada struktur beton bertulang, karena gaya lentur yang terjadi ditanggung oleh tulangan yang ada. Walau begitu pengetahuan mengenai kuat lentur beton berguna untuk mengetahui batasan dan jenis keretakan pada struktur beton, karena keretakan yang tampak akibat tekanan selalu berkaitan dengan *modulus of rupture* dari beton.

Modulus of rupture diukur dari percobaan balok sederhana berpenampang bujur sangkang 15 cm dengan bentang 55 cm yang diberi beban pada dua titik dengan jarak 1/3 bentang hingga benda uji itu patah.

Nilai *modulus of rupture* adalah $7.5 \sqrt{f_c}$ psi atau $0.62 \sqrt{f_c}$ MPa. (ACI 318 - 83) dan menurut SNI 03-2847-2002 nilai *modulus of rupture* adalah $0.7 \sqrt{f_c}$ MPa.

2.6 PERUBAHAN PANJANG (SUSUT) BETON

Perubahan panjang adalah fenomena berkurangnya volume beton akibat proses pengeringan dan fenomena deformasi jangka panjang beton yang disebabkan oleh adanya perubahan volume karena menguapnya air dari rongga-rongga mikro struktural beton sebagai akibat adanya proses hidrasi selama proses pengikatan beton.

Susut juga diartikan sebagai berkurangnya volume beton seiring penambahan waktu setelah proses pengerasan beton. Pengurangan ini terjadi akibat perubahan muatan campuran beton dan perubahan fisika-kimia, yang terjadi tanpa dipengaruhi gaya tekan yang timbul akibat beban luar, sehingga dapat digambarkan sebagai berkurangnya dimensi dari *strain* (in/in atau m/m) dalam kondisi kelembaban relatif dan temperatur yang konstan.

Penyusutan pada beton adalah variasi volume akibat faktor struktur beton maupun lingkungan seperti suhu.

Tiga macam jenis susut yang terjadi pada beton adalah sebagai berikut :

- *Autogeneous Shrinkage* :
Adalah penyusutan yang terjadi akibat reaksi kimia semen pada beton. Pada saat senyawa kimia bereaksi dan menyatu, maka akan menyisakan ruang kosong pada beton. Perbedaan kecepatan penguapan air pada kulit dan bagian dalam beton akan menyebabkan variasi volume pada kulit dan bagian dalam.
- *Drying Shrinkage* :
Adalah penyusutan yang disebabkan oleh penguapan air pada saat reaksi hidrologis berlangsung cepat. Air yang terdapat di pori-pori menguap mengurangi volume beton.
- *Thermal Shrinkage* :
Adalah penyusutan akibat perubahan suhu lingkungan. Perbedaan koefisien pengaruh thermal beton akan menyebabkan penyusutan yang tidak seragam pada beton.

Perubahan volume pada beton dapat berbentuk mengembang dan menyusut. Dari kedua bentuk tadi yang perlu diperhatikan adalah pengembangan

dari beton, karena sifat dari beton yang memiliki tegangan tarik yang rendah. Akibat mengembang maka material beton akan mengalami tegangan tarik.

Sifat mengembang dari beton bisa disebabkan dari dalam bahannya itu sendiri seperti semen yang terlalu banyak mengandung MgO atau dapat pula adanya reaksi antara agregat yang reaktif terhadap alkali dengan alkali dalam semen. Pengaruh lain adalah dari luar, seperti reaksi antara sulfat dengan senyawa yang terdapat dalam semen terutama senyawa C_3A , atau dapat pula akibat termal.

Penyusutan yang berlebihan dapat menyebabkan retak pada beton. Retak-retak rambut pada beton akan menyebabkan korosi pada tulangan logam yang terkena proses oksidasi. Tetapi juga mempunyai pengaruh yang menguntungkan sebagai penguat pelekatan antara beton dengan penulangan baja. Susut mulai terjadi segera setelah beton diaduk, disebabkan pertama-tama karena penyerapan air oleh beton dan agregat. Susut selanjutnya disebabkan oleh penguapan air yang naik ke permukaan beton. Selama proses pembentukan, hidrasi semen menimbulkan sejumlah besar panas, dan dengan mendinginnya beton, susut lebih lanjut terjadi akibat penurunan panas. Bahkan setelah beton sudah mengeras, susut akibat pengeringan berlangsung terus sampai berbulan-bulan, dan setiap pembasahan dan pengeringan berikutnya dapat pula menyebabkan muai dan susut. Susut akibat perubahan suhu dapat dikurangi dengan pembatasan suhu selama hidrasi, yang dapat dilakukan dengan prosedur berikut:

- 1) Mempergunakan suatu rencana adukan dengan kadar semen rendah;
- 2) Menghindarkan pengerasan cepat dan penggunaan semen halus, bila mungkin;
- 3) Menjaga agar agregat dan air pengaduk tetap dingin.
- 4) Mempergunakan acuan baja dan mendinginkannya dengan siraman air.
- 5) Membongkar acuan waktu dini untuk memungkinkan panas hidrasi dilepaskan keluar.

Suatu rasio air-semen yang rendah akan membantu mengurangi susut akibat pengeringan dengan menjaga volume air yang dapat hilang pada suatu batas minimum.

2.7 MODULUS ELASTISITAS DAN *POISSON RATIO*

Modulus elastisitas atau disebut juga *modulus young* adalah perbandingan antara tegangan tarik atau tekan terhadap regangan yang bersangkutan, di bawah batas proporsionalnya dari material.

Nilai ini pada perhitungan perencanaan disebut sebagai modulus elastisitas beton. Modulus ini memenuhi asumsi praktis bahwa regangan yang terjadi selama pembebanan pada dasarnya dapat dianggap elastisitas (pada keadaan beban dihilangkan bersifat *reversible* penuh) dan regangan lainnya akibat beban dipandang sebagai rangkakan.

SNI 03-2847-2002 memberikan persamaan untuk menghitung modulus elastisitas beton, yaitu $E_c = 4700 \sqrt{f_c'} \text{ (MPa)}$.

Besarnya nilai perbandingan antara regangan lateral (ϵ_2) terhadap regangan longitudinal (ϵ_1) pada suatu bahan/material adalah tetap (konstan). Nilai perbandingan inilah yang disebut dengan Rasio *Poisson* yang umumnya bernilai pada kisaran angka 0.15 - 0.2. Regangan yang arahnya segaris dengan arah gerak gaya disebut regangan longitudinal. Sedangkan regangan yang arahnya tegak lurus terhadap arah gerak gaya disebut regangan lateral.