

BAB II

DASAR TEORI

2.1. TINJAUAN PUSTAKA

Pemanfaatan bahan bangunan yang dibentuk dari bahan sisa atau limbah industri saat ini banyak dilakukan, melalui proses yang ramah lingkungan serta aman terhadap kesehatan baik saat diterapkan maupun pada saat pemanfaatan bangunan. Penelitian-penelitian yang berkelanjutan untuk dapat memanfaatkan kembali bahan limbah menjadi bahan bangunan ini, biasa disebut bahan bangunan ekologis.

Bahan bangunan ini dikembangkan untuk mengurangi dampak negatif dari limbah terhadap lingkungan, sebagai konsekwensi semakin berkembangnya kegiatan industri dan aktivitas lainnya termasuk timbulnya bahan limbah yang dihasilkan.

Secara umum limbah merupakan bahan buangan dari suatu proses yang dalam jumlah tertentu bila tidak ditangani secara baik akan menimbulkan gangguan lingkungan.

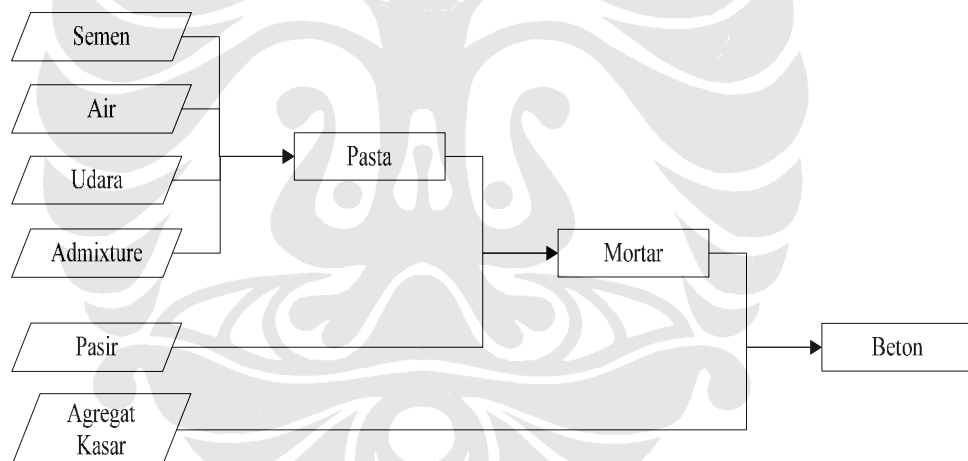
Pada penelitian ini akan dibahas tentang pemanfaatan limbah botol pelumas/HDPE (high-density polyethylene) sebagai bahan dasar pembuatan agregat kasar ringan. Bahan-bahan yang berasal dari jenis HDPE (high-density polyethylene) sebenarnya banyak sekali kita jumpai dalam kehidupan sehari-hari, diantaranya botol shampo, botol detergen, botol kosmetik, botol pelumas kendaraan bermotor, kantong pupuk, kantong makanan, pipa gas, pipa air dll.

Dalam hal ini limbah HDPE (high-density polyethylene) akan dianalisa apakah dapat memenuhi persyaratan mutu sebagai bahan dasar pembuatan agregat ringan dan sebagai bahan campuran beton ringan dari segi fisik dan mekanisnya. Selain itu pengaruh yang ditimbulkan terhadap beton ringan akibat dari pemakaian agregat ringan buatan ini terhadap sifat mekanis beton ringan, baik dari segi keuntungannya maupun kerugiannya.

2.2. BETON

Beton didefinisikan sebagai sekumpulan interaksi mekanis dan kimiawi dari material pembentuknya [Nawy, Edward G., 1985:8][15]. Diantaranya yaitu semen, air, admixture, udara dan agregat. Semua material pembentuk beton tersebut setelah dicampur akan bersifat plastis untuk sementara waktu dan kemudian akan berubah mengeras semakin padat yang dapat dipakai untuk kebutuhan teknis bangunan.

Sifat-sifat dan karakteristik material penyusun beton akan mempengaruhi sifat dan kinerja beton yang dibuat seperti : *workability*, *cohesiveness*, *durability* dan *strength* dll. Disamping itu parameter-parameter lain yang juga mempengaruhi seperti kualitas semen, proporsi semen terhadap campuran, interaksi atau adhesi antara pasta semen dan agregat, dll [Mulyono, T, 2003:3][14]. Prosesnya dapat dilihat pada diagram alir berikut :



Gambar 2.1. Diagram alir terbentuknya beton.

2.3. KLASIFIKASI BETON

Beton terdiri dari beberapa jenis, salah satu klasifikasi yang digunakan untuk membedakannya yaitu berdasarkan volume beton. Secara langsung agregat yang digunakan berpengaruh terhadap besarnya volume beton yang terjadi. Adapun klasifikasinya sebagai berikut :

1. Beton Normal

Beton yang mempunyai berat isi (2200-2500) kg/m³ dengan menggunakan agregat alam yang dipecah [SNI; 03-2834-1993][10],

agregat yang digunakan pada beton normal yaitu agregat normal. Penggunaan beton normal umumnya pada industri konstruksi yang dapat dijumpai dalam pembuatan gedung-gedung, jalan (*rigid pavement*), bendung, saluran dan lainnya.

Agregat alam yang dipakai berupa agregat halus yaitu pasir dan agregat kasarnya yaitu kerikil, keduanya merupakan hasil desintegrasi alami dari batu atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dengan ukuran butir antara 5-40mm.

Agregat normal dihasilkan dari pemecah batuan dengan quarry atau langsung dari sumber alam. Agregat ini biasanya berasal dari granit, basalt, kuarsa, dan sebagainya. Berat jenis rata-ratanya adalah 2.5-2.7 atau tidak boleh kurang dari 1.2 kg/dm³. Beton normal yang dihasilkan mempunyai berat 2.200-2.500 kg/m³ dan kuat tekan sekitar 15-40 Mpa (150-400 kg/cm³).

2. Beton Berat

Beton dengan kepadatan berat isi lebih dari 2500 kg/m³, dihasilkan dari penggunaan agregat yang mempunyai berat jenis lebih dari 4.0 dibandingkan dengan agregat yang biasa digunakan untuk beton normal dengan berat jenis 2.5-2.7. Beton ini biasanya dimanfaatkan untuk kepentingan tertentu seperti pada reactor, menahan radiasi sinar X dan sinar *gamma*, menahan benturan dan lainnya [Mulyono, T, 2003][14].

Agregat yang mempunyai berat jenis yang besar seperti barium sulfat yaitu 4.1 atau agregat alam dengan bahan lainnya seperti biji besi, magnetite, limonite, hematite, ilmenite (FeTiO₃) dan goethite. Beton yang dihasilkan menggunakan biji besi dapat mencapai 3000-3900 Kg/m³ [Neville A.M, 1981][16].

3. Beton Ringan

Beton dengan berat isi lebih rendah dari 2200 kg/m³, dengan menggunakan agregat ringan atau campuran agregat kasar ringan dan pasir alami sebagai pengganti agregat halus ringan [SNI 03-3449-2002][9], untuk beton ringan struktural SNI memberi ketentuan berat isi maksimum beton tidak boleh melampaui 1850 kg/m³ kering udara dan harus

memenuhi kuat tekan dan kuat tarik belah beton ringan untuk tujuan struktural.

Berat jenis agregat yang digunakan untuk beton ringan biasanya lebih kecil dari 2.5. Agregat ringan pada beton ringan dapat diperoleh dari bahan dasar alami (agregat ringan alami) maupun buatan (agregat ringan buatan). Pemakaian beton ringan dapat digunakan untuk struktural maupun non struktural (dinding penyekat, dsb).

2.4. KARAKTERISTIK BETON

2.4.1. Kemudahan Pengerjaan (workability)

Workability berarti kemudahan campuran beton untuk dapat dikerjakan, beton yang kering dan kaku akan sulit untuk dikerjakan, dituang, dipadatkan dan dirapihkan sehingga memiliki ketahanan dan kekuatan yang kurang bila nantinya mengeras. Kemudahan pengerjaan beton biasanya diukur dengan uji slump. Hal-hal yang mempengaruhi kemudahan pengerjaan beton yaitu :

- ◆ Pasta semen
Pasta semen merupakan bagian halus atau cair adukan beton yang bertindak sebagai pelumas dan mengisi ruang-ruang yang terbentuk antara agregat.
- ◆ Agregat
Bentuk butiran dari agregat, perbandingan agregat halus dan agregat kasar dan gradasi dari agregat mempengaruhi kemudahan pengerjaan beton.

2.4.2. Kohesif (cohesiveness)

Sifat kohesif beton adalah kondisi dimana campuran beton dapat menyatu dalam keadaan plastis dengan baik. Kohesif beton sangat dipengaruhi oleh gradasi agregat dan kadar air dalam campuran beton.

Gradasi agregat berarti jangkauan sebaran ukuran agregat dari batu yang berukuran besar sampai yang kecil dan pasir, hal ini akan menyebabkan ikatan (interlocking) antara agregat akan semakin baik dan dapat mengurangi rongga-rongga yang terjadi akibat ikatan tersebut. Pengaruh kadar air yang banyak akan menyebabkan beton menjadi tidak kohesif bahkan bisa menyebabkan agregat

terpisah (segregasi) dan berair (bleeding) [Marzuki M. Hanif, Priyanto Arie, 2004][12].

2.4.3. Keawetan (durability)

Daya tahan terhadap kemunduran mutu akibat siklus dari pembekuan-pencairan dan terhadap serangan bahan yang agresif selama masa penggunaannya, misalnya tanah, air laut, penimbunan bahan kimia dan cuaca. Keawetan beton dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti : keadaan disekeliling beton, mutu beton, beton penutup tulangan dan lebar retak pada beton.

Permeabilitas merupakan sifat utama beton yang mempengaruhi keawetan pada beton selain pengaruh fisik dan kimia [Mosley W. H., Bungey J. H., 1989][13]. Beton akan lebih awet bila beton tersebut kedap air dan tahan terhadap aus, untuk memperolehnya maka beton yang dihasilkan harus padat dan mempunyai pori-pori yang kecil didalamnya.

2.4.4. Kekuatan (strength)

Kekuatan beton ditentukan oleh pengaturan dari perbandingan semen, agregat kasar dan agregat halus, air dan berbagai jenis campuran. Perbandingan dari air terhadap semen merupakan faktor utama didalam penentuan kekuatan beton. Semakin rendah perbandingan air-semen, semakin tinggi kekuatan tekan beton [Chu-Kia Wang, Charles G. Salmon, 1986:9][7].

Beton mempunyai tiga jenis kekuatan yaitu : kekuatan tekan (kemampuan beton untuk menahan tekanan), kekuatan tarik (ketahanan beton dalam menerima gaya tarik) dan kekuatan lentur (kombinasi dari kekuatan tekan dan kekuatan tarik). Umumnya kekuatan tarik pada beton dipikul oleh tulangan tarik, karena beton mempunyai sifat sangat kuat menahan tekanan dan relatif lemah dalam menahan gaya tarik, kekuatan tarik pada beton besarnya hanya kira-kira 10 persen dari kekuatan tekan [Mosley W. H., Bungey J. H., 1989][13].

2.4.5. Rangkak (creep)

Rangkak atau *lateral material flow* didefinisikan sebagai penambahan regangan terhadap waktu akibat adanya beban yang bekerja [Nawy, Edward G.,

1985][15]. Deformasi awal akibat pembebanan disebut sebagai regangan elastis, sedangkan regangan tambahan akibat beban yang sama disebut regangan rangkak, deformasi ini tergantung dengan waktu. Beton bersifat elastis hanya dibawah pembebanan yang singkat, dan karena pertambahan deformasi sesuai dengan waktu, maka sifat efektif dari beton adalah sama dengan sifat bahan yang tidak elastis. Oleh karena itu lendutan setelah jangka waktu yang lama menjadi sangat sulit diperkirakan, sekalipun pengendaliannya adalah sangat perlu untuk menjamin keawetan (durability) dari struktur selama umur pakai rencananya.

Deformasi yang tidak elastis ini bertambah dengan tingkat perubahan yang berkurang selama pembebanan, dan jumlah totalnya dapat mencapai besar yang beberapa kali dari deformasi elastis dalam jangka waktu pendek [Chu-Kia Wang, Charles G. Salmon, 1986][7]. Faktor yang mempengaruhi besarnya rangkak diantaranya adalah :

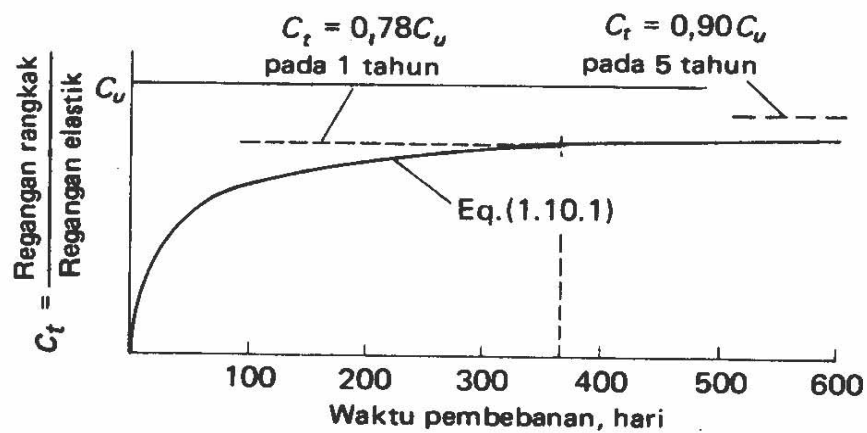
- ♦ Komposisi dan kehalusan semen, campuran, ukuran, mutu dan isi mineral agregat.
- ♦ Perbandingan kadar air dan semen serta slump.
- ♦ Suhu pengerasan, kebasahan dan kelembaban beton.
- ♦ Umur beton pada pembebanan, lamanya pembebanan dan besarnya tegangan.

Perkiraan yang tepat dari rangkak adalah sangat kompleks disebabkan oleh variabel-variabel yang berhubungan, akan tetapi suatu metode pendekatan umum yang dikembangkan oleh *Branson* memberikan persamaan koefisien rangkak yang standar (untuk slump 4 inchi atau lebih kecil, kelembaban nisbi 40%, pengerasan yang lembab, dan pembebanan setelah umr 7 hari) sebagai berikut :

$$C_t = \frac{\text{regangan rangkak}}{\text{regangan elastis awal}} \quad \text{dimana : } t = \text{Lamanya pembebanan (hari)}$$

$$= \frac{t^{0,60}}{10 + t^{0,60}} C_u \quad C_u = \text{Koefisien rangkak batas}$$

(Branson menyarankan penggunaan suatu harga rata-rata 2,35 untuk keadaan standar akan tetapi batasannya ternyata berkisar antara 1,3 sampai 4,15), dibawah ini gambar variasi dari koefisien rangkak :



Gambar 2.2. Variasi dari koefisien rangkai sesuai dengan lamanya beban.

2.4.6. Susut (shrinkage)

Susut didefinisikan sebagai perubahan volume yang tidak berhubungan dengan beban. Susut dapat menyebabkan retak pada beton yang disebabkan oleh terjadinya perubahan volume (susut) baik bertambah akibat penyerapan air atau berkurang karena penguapan air pada saat beton mengeras, akan tetapi susut juga mempunyai pengaruh yang menguntungkan yaitu sebagai penguat pelekatan beton dan tulangan baja.

Susut mulai terjadi segera setelah beton diaduk, penyebab terjadinya pertama-tama karena penyerapan air oleh beton dan agregat, kemudian selanjutnya oleh karena penguapan air yang naik ke permukaan beton. Selama proses pengerasan beton, panas hidrasi yang ditimbulkan oleh semen dan kemudian setelahnya mendingin, ikut berpengaruh terhadap susut sebagai akibat dari perubahan suhu, bahkan setelah beton sudah mengeras, susut yang diakibatkan oleh pengeringan berlangsung terus sampai berbulan-bulan, dan setiap pembasahan dan pengeringan berikutnya dapat pula menyebabkan muai dan susut pada beton [Mosley W. H., Bungey J. H., 1989][13].

Metode pendekatan umum dari *Branson* memberikan suatu persamaan regangan susut yang standar (untuk slump 4 inchi, atau yang lebih kecil, 40% kelembaban nisbi dan ketebalan minimum unsur dari 6 inchi, atau kurang, setelah beton mengering 7 hari) sebagai berikut :

$$\epsilon_{sh} = \left(\frac{t}{35+t} \right) (\epsilon_{sh})_u$$

dimana :

t = waktu (hari) setelah mulai proses pengeringan

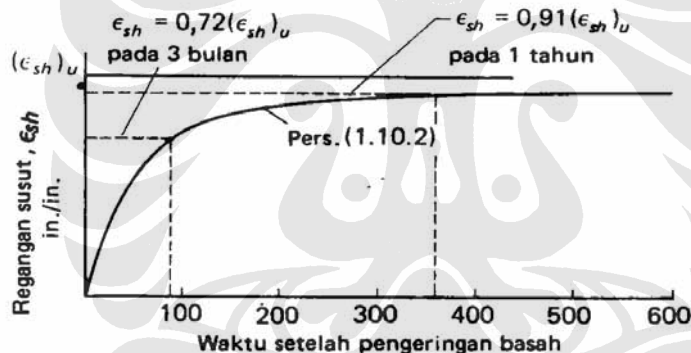
$(\epsilon_{sh})_u$ = regangan susut ultimate

Branson menyarankan penggunaan 800×10^{-6} inchi/inchi untuk keadaan rata-rata akan tetapi batas variasi harga adalah dari 415 sampai melebihi 1000×10^{-6} .

Faktor koreksi diberikan untuk pengaruh dari kelembaban H .

- ♦ Faktor koreksi = $1.40 - 0.01H$ untuk $40\% = H = 80\%$
- ♦ Faktor koreksi = $3.00 - 0.03H$ untuk $80\% = H = 100\%$

Dibawah ini gambar variasi dari regangan susut standar terhadap waktu setelah pengeringan (untuk slump 4 inchi atau kurang, 40% kelembaban relatif disekitarnya dan tebal terkecil dari batang 6 inchi atau kurang, setelah 7 hari pengeringan).



Gambar 2.3. Variasi dari regangan susut standar terhadap waktu.

2.5. AGREGAT

Sifat-sifat agregat mempunyai pengaruh yang besar terhadap perilaku beton, karena agregat mempunyai komposisi sebesar 75% dari total isi beton, bukan hanya sifat akan tetapi juga mempengaruhi terhadap ketahanan (durability) [Chu-Kia Wang, Charles G. Salmon, 1986:7][7].

Oleh karena agregat lebih murah dari semen, maka adalah logis untuk menggunakan agregat dengan prosentase yang setinggi mungkin untuk mencapai aspek yang ekonomis, selain itu aspek kekuatan yang maksimum dan ketahanan juga harus terpenuhi dengan mengatur tingkatan ukuran agregat (gradasi agregat)

antara agregat halus dan agregat kasar agar nantinya diperoleh beton yang padat. Agregat halus adalah bahan yang lolos dari ayakan No.4 (4,75 mm), sedangkan agregat kasar (kerikil) adalah semua bahan yang tertahan dari ayakan No.4 atau yang berukuran lebih besar dari 4,75 mm. Agregat kasar yang mempunyai ukuran lebih besar dari 4,75mm dibagi lagi menjadi dua yaitu : yang berdiameter 4.75-40 mm disebut kerikil beton, dan yang lebih dari 40mm disebut kerikil kasar.

Agregat yang digunakan dalam campuran beton biasanya berukuran lebih kecil dari 40mm. Agregat yang berukuran lebih besar dari 40mm digunakan untuk pekerjaan sipil lainnya, misalnya untuk pekerjaan jalan, tanggul-tanggul penahan tanah, bronjong, atau bendungan dan lainnya.

Pemilihan jenis agregat akan mempengaruhi pada beton yang dihasilkan, bila menggunakan agregat ringan maka akan dihasilkan beton ringan, penggunaan agregat normal menghasilkan beton normal dan penggunaan agregat berat akan menghasilkan beton berat. Sama halnya dengan beton, agregat dapat pula dibedakan berdasarkan beratnya. Ada tiga jenis agregat berdasarkan beratnya yaitu :

1. Agregat Normal

Dihasilkan dari pemecahan batuan dengan quarry atau langsung dari sumber alam. Agregat ini biasanya berasal dari granit, basalt, kuarsa dan sebagainya. Berat jenis rata-ratanya adalah 2.5-2.7 atau tidak boleh kurang dari 1.2 kg/dm^3 .

2. Agregat Ringan

Dihasilkan melalui pembekahan (expanding) dan ada yang dihasilkan dari pengolahan bahan alam. Berat isi agregat ini berkisar $350\text{-}880 \text{ kg/m}^3$ untuk agregat kasarnya dan $750\text{-}1200 \text{ kg/m}^3$ untuk agregat halus. Campuran kedua agregat ini mempunyai berat isi maksimum 1040 kg/m^3 .

3. Agregat Berat

Agregat alam yang biasa digunakan adalah barites (BaSO_4), limonite, goethite, magnetik (FeO_4) dan serbuk besi. Berat jenis agregat tersebut lebih besar dari 2.800 kg/m^3 . Untuk mengetahui apakah suatu agregat termasuk agregat berat, ringan atau normal maka dapat diperiksa berat isinya dengan menggunakan standar ASTM C29.

2.5.1. Agregat Kasar

Sifat dari agregat kasar akan mempengaruhi kekuatan akhir beton keras dan daya tahannya terhadap disintegrasi beton, cuaca dan efek-efek perusak lainnya. Agregat kasar mineral ini harus bersih dari bahan-bahan organik, dan harus mempunyai ikatan yang baik dengan gel semen. Jenis agregat kasar yang umum [Nawy, Edward G., 1985:8][15] adalah :

1. *Batu pecah alami* : Bahan ini didapat dari cadas atau batu pecah alami yang digali. Batu ini dapat berasal dari gunung api, jenis sedimen, atau jenis metamorf. Meski pun dapat menghasilkan kekuatan yang tinggi terhadap beton, batu pecah kurang memberikan kemudahan pengerjaan dan pengecoran dibandingkan dengan jenis agregat kasar lainnya.
2. *Kerikil alami* : Kerikil didapat dari proses alami, yaitu dari pengikisan tepi maupun dasar sungai oleh air sungai yang mengalir. Kerikil memberikan kekuatan yang lebih rendah daripada batu pecah, tetapi memberikan kemudahan pengerjaan yang lebih tinggi.
3. *Agregat kasar buatan* : Terutama berupa *slag* atau *shale* yang biasa digunakan untuk beton berbobot ringan. Biasanya dari proses lain seperti dari *blast furnace* dan lain-lain.
4. *Agregat untuk pelindung nuklir dan berbobot berat* : Dengan adanya kebutuhan untuk pembangunan instalasi atom, juga untuk pelindung dari radiasi nuklir, maka perlu ada beton yang dapat melindungi dari sinar x , sinar gamma dan neutron. Pada beton demikian syarat kemudahan pengerjaan tidak begitu menentukan akan tetapi kriteria kerapatan yang tinggi dan kepadatannya yang lebih diutamakan disamping kekuatannya juga. Sifat-sifat beton penahan radiasi yang berbobot berat ini bergantung pada kerapatan dan kepadatannya. Agregat kasar yang diklasifikasikan disini misalnya baja pecah, barit magnetit dan limonit.

2.5.2. Agregat Halus

Agregat halus merupakan pengisi yang berupa pasir. Ukurannya bervariasi antara No.4 dan No.100. Agregat halus yang baik harus bebas bahan organik, lempung, partikel yang lebih kecil dari saringan No.100, atau bahan-bahan lain

yang dapat merusak campuran beton. Variasi ukuran dalam suatu campuran harus mempunyai gradasi yang baik. Untuk beton penahan radiasi, serbuk baja halus dan serbuk besi pecah digunakan sebagai agregat halus.

2.6. BETON RINGAN

Seperti telah dijelaskan diatas bahwa beton dengan berat isi lebih rendah dari 2200 kg/m^3 diklasifikasikan sebagai beton ringan. Karena berat isinya yang rendah, maka ada beberapa keuntungan menggunakan beton ringan diantaranya :

1. Menghemat pemakaian besi tulangan karena berat sendiri struktur menjadi rendah, sehingga momen yang terjadi juga kecil.
2. Menghemat penggunaan tiang formwork.
3. Dapat mengurangi ukuran pondasi.
4. Memiliki isolasi panas (thermal insulation) yang tinggi atau penghantar panas (thermal conductivity) yang rendah.

kerugiannya adalah kuat tekannya relatif rendah dan tidak tahan terhadap abrasi. Umumnya beton ringan lebih mahal dari beton normal dan dalam pengerjaannya baik pada waktu pencampuran, pengadukan serta pematatannya memerlukan perhatian yang tinggi dibandingkan beton normal [Djedjen, 2000][11].

Beton yang dibuat dari agregat alam dan berasal dari batu keras mempunyai kepadatan dengan batasan yang sempit dikarenakan berat jenis agregat yang berasal dari agregat alam mempunyai variasi yang kecil antara sesama agregat alam, meskipun kandungan volume dari agregat mempengaruhi kepadatan campuran beton, akan tetapi bukan merupakan faktor yang utama. Oleh karena itu pemilihan jenis agregat ringan dan asal dari agregat ringan yang akan dipakai akan berpengaruh terhadap kepadatan beton.

Pada umumnya beton ringan mempunyai kandungan semen yang lebih banyak dibandingkan dengan beton normal dan juga agregat ringan yang mahal, hal ini akan berpengaruh pada biaya [Neville, A.M., 1981][16]. Akan tetapi agregat ringan yang mahal tidak bisa dijadikan batasan untuk mahalnya pemakaian beton ringan, dasarnya adalah desain campur yang disesuaikan dengan penggunaannya misal akan digunakan untuk penggunaan struktural, dari sisi harga

beton mungkin mahal tetapi dengan berat sendiri yang ringan akan mereduksi biaya-biaya yang lain.

2.6.1. Klasifikasi Beton Ringan

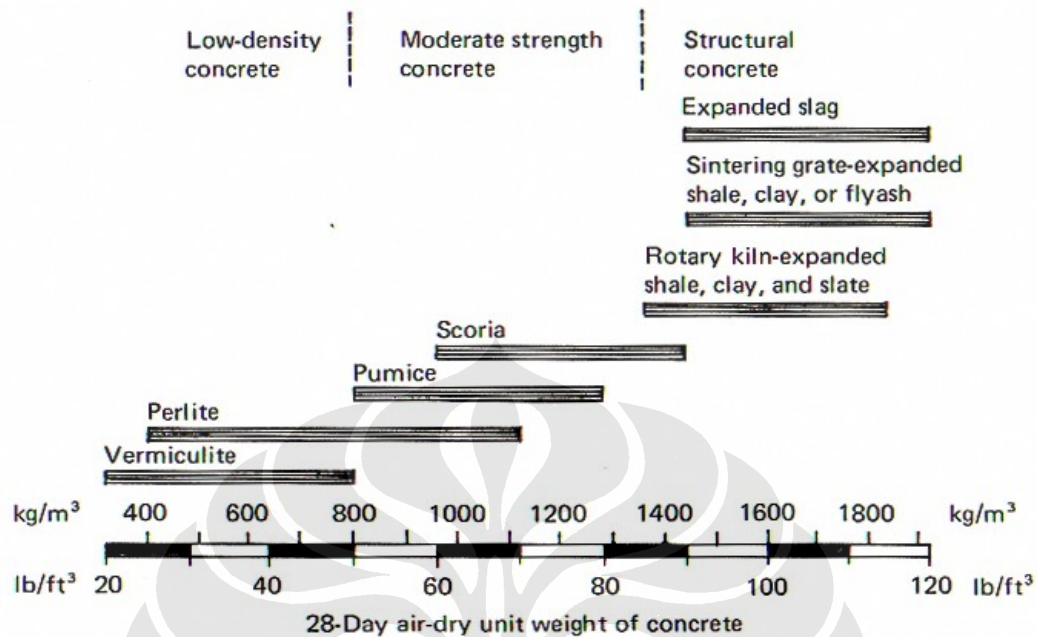
Berat volume beton dapat dikurangi dengan menggantikan beberapa bahan padat didalam campuran dengan rongga udara. Ada tiga kemungkinan lokasi rongga udara tersebut yaitu didalam partikel agregat (yang mana biasa dikenal sebagai *lightweight agregat*), didalam pasta semen (beton yang dihasilkan dinamai *cellular concrete*). Beton yang dibuat dengan menggunakan agregat ringan dikenal dengan nama *lightweight agregat concret*, dan merupakan kategori dari beton ringan. Ada tiga cara pembuatan beton ringan :

- a. Menggunakan agregat ringan yang porous dengan berat jenis < 2.5 , nama beton yang dihasilkan tergantung dari jenis agregat yang digunakan.
- b. Memperbesar pori dalam beton, atau masa mortarnya, dengan cara memasukkan udara. Beton yang dihasilkan disebut *aerated, cellular foamed* atau *gas concrete*.
- c. Dengan mengurangi agregat halus (pasir) dari campuran betonnya. Beton yang dihasilkan disebut *no fines concrete*.

Batasan yang praktis dari kepadatan beton ringan yaitu antara 300 dan 1850 kg/m³ (20 dan 115 lb/ft³). Klasifikasi yang berdasarkan kepadatan (berat volume) adalah sesuai karena kepadatan dan kekuatan sebagian besar merupakan hal yang bersamaan. ACI 213R-79 menggunakan berat jenis kering udara pada 28 hari dan kepadatan untuk membuat kategori dari beton ringan [Neville, A.M., 1981][16]. Ada tiga kategori yaitu :

1. Beton dengan kepadatan rendah (*low density concrete*)
Beton dengan kepadatan antara 300 sampai 800 kg/m³ (20-50 lb/ft³), beton ini digunakan untuk tujuan non-structural, utamanya digunakan untuk tujuan isolasi panas (thermal insulation), kuat tekannya rendah berkisar antara 100 s/d 1000 psi (0,69 s/d 6.89 Mpa).
2. Beton dengan kekuatan medium (*moderate strength concrete*)
Penggunaan beton ini untuk kuat tekan dengan tingkatan yang sedang, terkadang digunakan sebagai beton pengisi. Kuat tekannya berkisar 6,89

s/d 17,24 Mpa (1000-2500 psi), karakteristik isolasi panasnya berada diantara *low density concrete* dan *structural concrete*.



Gambar 2.4. Klasifikasi Beton Ringan Berdasarkan Berat Isi Beton
Sumber : ACI committee 213R-79, Manual of Concrete Practice, 1979 [3]

3. Beton untuk konstruksi (*structural concrete*)

Beton dengan efisiensi struktural penuh, kebanyakan agregat ringan struktural mampu menghasilkan beton dengan kuat tekan lebih dari 5000 psi (34,47 Mpa) bahkan dapat mencapai 6000 psi (41,36 Mpa) tetapi isolasi panasnya rendah, akan tetapi bila dibandingkan dengan beton normal masih lebih baik beton ringan struktural ini. Mempunyai kepadatan diantara 1350 sampai 1900 kg/m³ (85-120 lb/ft³), beton ini digunakan untuk kebutuhan struktural dan mempunyai kekuatan tekan minimum yaitu 17,24 Mpa (2500 psi).

2.6.1.1. Beton Ringan Agregat

Dari gambaran diatas ternyata pemakain beton ringan agregat sangat luas dengan menggunakan beberapa jenis agregat. Berat isi dari beton ringan agregat sangat bervariasi antara 300 sampai 1850 kg/m³ dengan kuat tekan antara 0,3 sampai 40 Mpa, kekuatan lebih dari 60 Mpa dapat dicapai dengan memperbanyak kadar semen (560 kg/m³), akan tetapi banyak faktor yang dapat mempengaruhi

kekuatan beton ringan agregat, selain dipengaruhi kepadatan agregat juga sangat dipengaruhi oleh jenis agregat yang digunakan.

Umumnya pada beton ringan agregat, untuk mencapai kekuatan yang sama dengan beton normal, membutuhkan semen dalam jumlah yang lebih banyak dua sampai tiga kali lipat [Djedjen, 2000][11], hal ini akan mempengaruhi workability pada beton ringan agregat, sehingga menyebabkan workability yang rendah pada beton ringan agregat. Pemakaian agregat ringan yang hampir sama karakteristiknya maupun berbeda perlu diuji terlebih dahulu, karena akan memberikan sifat yang berlainan pada beton. Sifat beton ringan agregat sangat dipengaruhi oleh gradasi agregat, kadar semen, faktor air semen dan tingkat pematatannya. Beton ringan agregat mempunyai sifat-sifat seperti :

- ◆ Mempunyai berat isi yang rendah serta isolasi panas yang tinggi.
- ◆ Perbandingan kuat tarik dan kuat tekan yang jauh, kecuali yang bermutu tinggi tidak begitu jauh dibandingkan dengan beton normal.
- ◆ Modulus elastisitas sekitar $\frac{1}{2}$ - $\frac{3}{4}$ nya dibandingkan beton normal pada kuat tekan yang sama.
- ◆ Koefisien daya serap bunyi 2 kali lebih baik dibandingkan beton normal.
- ◆ Ketahanan terhadap api, lebih tinggi dibandingkan beton normal.

A. Agregat Ringan

Karakteristik dan sifat-sifat yang mendasar dari agregat ringan adalah mempunyai porositas yang tinggi dan berat jenis yang rendah sehingga dari hasil penggunaan agregat ringan tersebut dihasilkan beton ringan agregat. Beberapa agregat yang digunakan pada beton ringan agregat dapat terbentuk secara alami dan yang lainnya dengan cara dibuat dari bahan alami atau dari hasil industri.

- ◆ Agregat alam, yang terutama dari jenis ini adalah : diatomite, pumice, scoria, volcanic, cinders dan tuff. Kecuali diatomite yang lainnya adalah batuan vulkanic.
- ◆ Agregat buatan, dalam pembuatannya dikenal dua cara yaitu : dengan dibakar sehingga mengembang atau didinginkan pada saat mengembang. Contohnya : expanded, clay, shale, slate, expanded blast furnace slag, breeze, lytag, clinker agregat.

Sifat-sifat yang umum pada agregat ringan yaitu mempunyai bentuk yang tidak beraturan dan kasar permukaannya, mempunyai porositas yang tinggi, berat jenisnya rendah dan penyerapan airnya tinggi. Dibawah ini tabel penggunaan agregat ringan yang umum digunakan pada beton ringan agregat.

Tabel 2.1. Typical Properties of Common Lightweight Concrete

Type of concrete		Bulk density Of aggregate		Dry density Of concrete		Compressive Strength at 28 days	
		<i>kg/m³</i>	<i>lb/ft³</i>	<i>kg/m³</i>	<i>lb/ft³</i>	<i>MPa</i>	<i>psi</i>
Expanded slag	Fine	900	50	1 850	115	21	3 000
	Coarse	650	40	2 100	130	41	6 000
Rotary-kiln Expanded clay	Fine	700	45	1 200	75	17	2 500
	Coarse	400	25	1 300	80	20	3 000
Rotary-kiln Expanded clay With natural sand	Coarse	400	25	1 500	95	20	3 000
				1 600	100	35	5 000
				1 750	110	50	7 000
				1 900*	120	70†	10 000
Sinter-strand Expanded clay	Fine	1 050	65	1 500	95	25	3 500
	Coarse	650	40	1 600	100	30	4 500
Rotary-kiln Expanded slate	Fine	950	60	1 700	105	28	4 000
	Coarse	700	45	1 750	110	35	5 000
Sintered fly ash	Fine Coarse	1 050	65	1 500	95	25	3 600
		800	50	1 540	96	30	4 400
				1 570	98	40	5 800
Sintered fly ash With natural sand	Coarse	800	50	1 700	106	25	3 600
				1 750	109	30	4 400
				1 790	112	40	5 800
Pumice		500-800	30-50	1 200	74	15	2 000
				1 250	77	20	2 800
				1 450	90	30	4 200
Perlite		40-200	3-13	400-500	-	1.2-3	-
Vermiculite		60-200	4-13	300-700	20-30	0.3-3	50-400
Cellular	Fly ash sand	950	60	750	47	3	500
		1 600	100	900	55	6	800
Autoclaved Aerated		-	-	800	55	4	600

*with fly ash and silica fume; †at 1 year

Sumber : Neville A.M., Properties of Concrete, 1981 [16]

Karakteristik dan proses pembuatan dari jenis-jenis agregat ringan yang umum digunakan pada beton ringan agregat [Mulyono, T, 2003][14] adalah sebagai berikut:

1. Perlite

Merupakan jenis batuan *glassy* vulkanik dengan berat isi yang rendah sekitar 30-240 kg/m³. *Perlite* dibuat dari hasil pemanasan dan proses fusi batuan *glassy* pada suhu 900-1100°C. Kekuatan tekan beton yang dihasilkan oleh agregat jenis ini biasanya rendah dan pengembangan yang tinggi. Beton yang dibuat biasanya digunakan untuk tujuan insulator

2. Vermiculite

Merupakan material yang berstruktur pelat, nama lainnya adalah mica dengan berat isi yang rendah sekitar 60-130 kg/m³. Pembuatannya melalui proses pemanasan dan proses fusi batuan *glassy* pada suhu 650-1000°C. beton yang dibuat akan mempunyai kekuatan tekan yang rendah dan pengembangan yang tinggi, biasanya digunakan untuk tujuan insulator (penahan panas).

3. Pumice

Merupakan agregat ringan dari jenis batuan *glassy* lebih tepatnya berasal dari sepon (bunga karang) lava. Prosesnya berasal dari gas yang mencoba keluar pada saat lava gunung berapi mencapai permukaan bumi akan tetapi tetap bersifat cair. Kebanyakan pumice cukup kuat digunakan sebagai agregat ringan untuk tujuan struktural seperti, perkerasan jalan, dinding, panel, industri precast, atap serta lantai dasar. Kira-kira 2000 tahun, agregat pumice digunakan sebagai bahan agregat ringan untuk beton. Jenis bahan agregat ringan alam lainnya yaitu *scoria dan tuff* [Popovics Sandor, 1979][19].

4. Expanded clay, shale, dan slate

Merupakan hasil dari proses *rotary kiln* (tanur putar) dengan temperatur 1000-1200°C. *Expanded shale* dan agregat *clay* yang dibuat dengan proses *sinter strand* mempunyai kepadatan 650-900 kg/m³, dan jika menggunakan *kiln* yang berputar akan mempunyai kepadatan sekitar 350-650 kg/m³. beton yang menggunakan agregat jenis ini akan mempunyai berat isi sekitar 1400-1800 kg/m³ dan kadang-kadang dapat pula dihasilkan beton ringan dengan kepadatan 800 kg/m³. Kekuatan tekan

beton yang dihasilkan oleh agregat jenis ini biasanya cukup tinggi, terutama jika digabungkan dengan jenis agregat ringan lainnya.

5. Expanded blast-furnace slag

Dapat dihasilkan dengan dua cara. Pertama yaitu mencampurkan bahan batuan dengan air kemudian dilakukan pembakaran. Misalnya tanah liat dibakar. Tanah liat dengan kadar air tertentu dibuat berbutir sekitar 5-20 mm, kemudian dibakar. Hasilnya berbentuk bola, ringan, dan berpori. Serapam air sekitar 8-20%. Beton dengan agregat ini berat jenisnya sekitar 1900 kg/m^3 . Kedua dengan cara penguapan (steam) batuan buatan yang dihasilkan seperti batu apung. Batuan expanded biasanya mempunyai berat isi sekitar $300\text{-}1100 \text{ kg/m}^3$, bergantung pada proses pendinginan dan derajat pembentukan partikel serta ukuran dan gradasinya.

6. Clinker aggregate

Nama lainnya adalah cinder, merupakan hasil proses pembakaran pada industri dengan temperature yang sangat panas. Beton yang menggunakan agregat ini cenderung tidak tahan terhadap sulfat dan kehilangan panas yang tinggi. Beton yang dibuat digunakan untuk tujuan umum. Peraturan standar tidak merekomendasikan beton yang menggunakan agregat ini digunakan untuk beton bertulang. Beton yang menggunakan clinker cenderung lebih awet. Jika digunakan sebagai agregat halus atau agregat kasar beton yang dihasilkan akan mempunyai berat isi sekitar $1100\text{-}1400 \text{ kg/m}^3$. Untuk meningkatkan kemudahan pekerjaannya agregat ini sering digabung dengan pasir alam, akan tetapi berat isi betonnya akan meningkat menjadi $1750\text{-}1850 \text{ kg/m}^3$.

7. Agregat abu terbang (Sintered Fly-ash Aggregates)

Merupakan produk sisa dari hasil PLTU yang mengeras dan membentuk butir-butir seperti kerikil. Beton yang dibuat dari agregat jenis ini akan mempunyai kuat tekan yang cukup baik. Berat isi beton yang menggunakan agregat ini sekitar 1000 kg/m^3 , jika menggunakan fraksi agregat halusnya lebih banyak akan menghasilkan beton dengan berat isi 1200 kg/m^3 .

8. Herculite

Merupakan hasil pembuatan dari *shale* yang dimasukkan dalam tungku putar pada suhu 1100°C. Gas dalam *shale* mengembang membentuk jutaan sel kecil udara dalam massa yang dikelilingi oleh selaput tipis yang kuat dan bening. Agregat ini dipakai untuk menggantikan agregat yang dipakai pada pekerjaan struktural. Berat jenis yang dihasilkan sekitar dua pertiga beton biasanya, dengan kuat tekan yang hampir sama pada jumlah semen yang sama. Beton yang dibuat akan mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap panas, sehingga biasanya digunakan untuk dinding penahan panas, lapisan tahan api untuk baja struktural, selain itu mempunyai sifat meredam suara yang baik.

2.6.1.2. Aerated Concrete

Beton ringan yang dibuat dengan memasukkan gelembung udara kedalam mortar pada waktu masih plastis, sehingga membentuk benda yang menyerupai busa. Gelembung udara dalam ukuran yang kecil (0.1 mm dan 1 mm) harus stabi didalam beton, baik pada waktu dicampur atau dipadatkan. Pada umumnya beton seperti ini tidak mengandung agregat kasar. Ada dua cara untuk pengisian udara kedalamnya yaitu :

a. *Beton Gas*

Didapat dengan cara kimia antara bahan yang menimbulkan gas dalam mortar. Mortar harus memiliki konsistensi yang baik (tidak terlalu encer) agar gas yang terdapat didalamnya tetap dan tidak keluar. Kecepatan terbentuknya gas, konsistensi mortar dan waktu pengikatan harus tepat. Serbuk alumunium umumnya dapat dipakai sebanyak 0,2% terhadap semen dapat menghasilkan gelembung udara, selain itu dipakai juga seng atau alumunium campuran.

b. *Beton Busa (Foamed Concrete)*

Dihasilkan dengan cara menambahkan kedalam campuran sejenis bahan yang menghasilkan busa. Umumnya dari hydrolized protein atau resin soap yang stabil pada saat dicampur pada kecepatan tinggi.

Aerated concrete dapat mengandung agregat atau tanpa agregat. Umumnya digunakan untuk pemakain non struktural yang memerlukan isolasi panas dengan kepadatan 300 kg/m^3 . Jika menggunakan agregat yang sangat halus, sebagian besar memiliki kepadatan antara $500\text{-}1100 \text{ kg/m}^3$.

Sama dengan beton agregat ringan kekuatan dan konduktivitas panasnya sangat tergantung kepadatannya. Beton dengan kepadatan 500 kg/m^3 dapat mencapai kekuatan $3\text{-}4 \text{ Mpa}$. Dan konduktivitas panas $0.1 \text{ J/m}^2\text{s}.\text{°C/m}$. Sebagai perbandingan untuk beton normal bisa lebih besar dari 10 kali lipat. Konduktivitas panas pun sangat tergantung kadar air, dengan kadar air 20% konduktivitas panasnya bisa dua kali lipat dibandingkan dengan beton normal kering mutlak. Aerated concrete memiliki sifat fisik sebagai berikut :

- ◆ Memiliki modulus elastisitas antara $1,7$ sampai $3,5 \text{ Gpa}$.
- ◆ Memiliki perubahan panas, penyusutan dan perubahan kadar air yang tinggi (kadang lebih tinggi dari beton agregat ringan pada kekuatan yang sama) tetapi sifat ini dapat diperkecil dengan perawatan dalam *high pressure steam*.
- ◆ Memiliki sifat konduktivitas yang rendah, juga memiliki sifat tahan api lebih tinggi dibandingkan beton normal.
- ◆ Memiliki penyerapan air yang tinggi dan tahan terhadap pembekuan (*freezing*).
- ◆ Mudah untuk digergaji dan dipasang paku.
- ◆ Untuk mencegah agar tuangan tidak berkarat, maka harus diimdingi dengan bahan anti korosi, seperti aspal, epoxy resin.

2.6.1.3. No Fines Concrete

Beton ini

di dibuat dengan cara mengurangi bagian agregat halusnya, sehingga hanya mengandung pasta semen dan agregat kasar saja. Jadi sekelompok agregat kasar yang terselimuti oleh pasta semen setebal $\pm 1,3 \text{ mm}$. Dengan pori yang besar, maka kekuatan menjadi lebih rendah, tetapi tidak terjadi perubahan kadar air didalamnya, karena tidak ada pori-pori kapiler.

Biaya pembuatan beton jenis ini menjadi ringan karena kadar semennya rendah antara 70 sampai 130 kg untuk setiap kubik beton, karena berkurangnya luas permukaan butiran. Kepadatan beton tergantung gradasi agregat ksarnya, dengan gradasi yang baik maka kepadatannya lebih tinggi dibandingkan dengan satu jenis butiran agregat kasar. Apabila menggunakan agregat normal berat isi betonnya bervariasi antara 1600 kg/m³ sampai 2000 kg/m³, tapi dengan menggunakan agregat ringan maka berat isinya hanya 640 kg/m³.

Ukuran butiran yang biasa digunakan adalah 9,5 mm sampai 19 mm. 5% di atasnya dan 10% dibawahnya. Tetapi tidak boleh ada agregat yang lebih kecil dari 4,75 mm. Kadang-kadang butir agregat lebih dari 50 mm juga digunakan.

Pemadatan dengan vibrator tidak boleh terlalu lama, tidak boleh dengan cara ditusuk-tusuk, karena keduanya dapat menurunkan pasta semen, sehingga kepadatan beton tidak merata, demikian pula pasta semen tidak boleh terlalu encer. Pengujian workability hanya dilakukan secara visual dengan melihat sampai seberapa tebal pasta semen menyelimuti agregat.

Tabel 2.2. Beton tanpa agregat halus dengan ukuran agregat 9,5-19 mm

Perbandingan Agregat/Semen (Vol)	FAS	Berat Isi (kg/m ³)	Kuat Tekan 28 Hari (Mpa)
6	0,38	2020	14
7	0,40	1970	12
8	0,41	1940	10
10	0,45	1870	7

Sumber : Neville A.M., Properties of Concrete, 1981 [16]

Untuk menentukan kadar air dalam campuran dapat diambil 180 kg/m³ beton. Kadar semennya tergantung kuat tekan yang diharapkan sesuai dengan tabel. Untuk mendapatkan hasil campuran yang sesuai maka harus dilakukan *trial mix* karena banyaknya faktor yang menentukan terhadap penampilan (tebal selimut pasta semen terhadap agregat) dan kekuatan beton ini.

Dalam pelaksanaannya, campuran sangat bervariasi. Dengan campuran yang kurus 1 : 10 (perbandingan semen dan agregat dalam volume) memerlukan semen 130 kg/m³ dan dengan perbandingan 1 : 20 kadar semennya 70 kg/m³.

Karena dalam beton ini tidak terdapat agregat halus, maka daya kohesi menjadi kecil, sehingga pemasangan cetakan memerlukan waktu yang agak lama sampai kekuatan betonnya memenuhi syarat. Perawatan dalam tempat yang lembab (curing normal) sangat diperlukan terutama pada musim panas, hal ini dilakukan untuk mencegah pasta semen yang sangat tipis cepat kehilangan air, sehingga proses hidrasi yang terjadi tidak sempurna. *No fines concrete* setelah mengeras mempunyai sifat seperti :

- ◆ Perbandingan kuat lentur dan kuat tekannya $\pm 30\%$ lebih tinggi dibandingkan beton normal.
- ◆ Modulus elastisitasnya 2,5-3 kali lipat kuat tekannya.
- ◆ Penyusutan lebih kecil dibandingkan beton normal berkisar antara 120×10^{-6} sampai 200×10^{-6} .
- ◆ Tahan terhadap pembekuan (*freezing*).
- ◆ Sangat tinggi penyerapan airnya (dapat mencapai 25% dari volumenya), sehingga tidak diijinkan untuk pondasi atau konstruksi yang selalu bersentuhan dengan air.
- ◆ Beton ini tidak umum menggunakan tulangan, tetapi jika disyaratkan harus menggunakannya, maka tulangan perlu dilapisi pasta semen setebal 3mm atau untuk mempercepat dapat dilapisi dengan shotcrete.

2.6.1.4. Sawdust Concrete

Dalam bahan bangunan kadang diperlukan beton yang mudah digergaji atau dipaku, seperti untuk dinding nonstruktural atau untuk plafon. Untuk menghasilkan beton seperti itu dapat dibuat dengan menggunakan campuran semen dan serbuk gergaji (*sawdust concrete*) selain serbuk gergaji, bahan lain yang dapat digunakan sebagai campuran adalah serutan kayu, sekam padi atau dapat juga menggunakan limbah kayu lainnya, batu apung dan expanded polystyrene dapat pula digunakan.

Serbuk gergaji yang digunakan harus bersih, untuk mencegah supaya tidak memperlambat pengikatan pada semen, maka perlu terlebih dahulu serbuk tersebut direndam dalam air kapur. Pembuatannya dengan cara mencampur semen, pasir, serbuk gergaji dan air sampai mencapai nilai slump 25-50 mm.

Ukuran butiran yang baik antara 1,18 mm sampai 6,3 mm, tapi ini juga tergantung bahannya karena dapat menghasilkan beton yang berbeda. Berat isinya bervariasi antara 650-1600 kg/m³, dengan kadar semen 410 kg/m³ dapat menghasilkan kuat tekan 2 Mpa. Beton jenis ini tidak dapat digunakan pada tempat yang lembab karena mempunyai sifat penyerapan kadar air yang cukup tinggi.

2.7. PROPORSI DAN PERHITUNGAN RANCANG CAMPUR

Proporsi campuran beton ringan dihitung berdasarkan karakteristik dari masing – masing material pembentuknya. Untuk beton ringan proporsi campuran akan dibatasi pada berat isi beton maksimum yang akan dihasilkan., hal lain yang harus diperhatikan adalah faktor *workability*, *bleeding*, dan *finishability*. Tingkat workabilitas akan mempengaruhi berat jenis dan kekuatan beton yang dihasilkan.

Dalam perencanaan campuran beton ringan harus dipenuhi persyaratan sebagai berikut [SNI 03-3449-2002][9] :

1. Pada bagian pekerjaan konstruksi yang berbeda, jika digunakan bahan yang berbeda, maka setiap proporsi campuran yang akan digunakan harus direncanakan secara terpisah.
2. Perhitungan perencanaan campuran beton ringan harus didasarkan pada sifat-sifat bahan yang akan digunakan dalam produksi beton ringan.
3. Susunan campuran beton ringan yang diperoleh dari perencanaan ini harus dibuktikan melalui campuran coba yang menunjukkan bahwa proporsi tersebut dapat memenuhi kekuatan dan berat isi beton ringan yang disyaratkan.
4. Bahan untuk campuran uji coba harus mewakili bahan yang akan digunakan dalam produksi beton ringan.

Penentuan proporsi campuran beton mula – mula dipilih berdasarkan kombinasi campuran optimum dari bahan – bahan pembentuknya. Kemudian dilakukan penyesuaian dengan melakukan rancang campur uji coba (*trial mix*) di laboratorium dan kembali disesuaikan dengan keadaan di lapangan.

Prinsip dari prosedur perhitungan campuran beton normal, seperti metode volume absolute dapat diaplikasikan untuk beberapa jenis agregat, tetapi tidak dapat dipakai untuk jenis agregat lainnya. Metode volume absolute memerlukan penentuan nilai absorpsi dan berat jenis (*specific gravity*) masing – masing agregat dalam kondisi jenuh kering permukaan (SSD), sedangkan untuk agregat ringan tidaklah mudah untuk menentukan keadaan SSD agregat karena daya absorpsi agregat ringan sangat besar dimana kadar air dalam agregat berbeda-beda, sehingga penentuan nilai berat jenis agregat sulit dilakukan. Dengan demikian metode volume absolut jarang dipakai untuk menghitung proporsi campuran beton ringan.

2.7.1. Metode Rancang Campur Beton Ringan Standar SNI 03-3449-02

SNI 03-3449-2002 menentukan tata cara perhitungan campuran beton ringan meliputi persyaratan proporsi campuran, rancangan campuran, bahan yang dipergunakan, pemilihan proporsi campuran beton ringan, perhitungan proporsi campuran, koreksi proporsi campuran dan prosedur pembuatan rancangan campuran beton ringan.

Persyaratan proporsi campuran beton ringan harus menghasilkan beton ringan yang memenuhi persyaratan, yaitu : kelecakan (*workability*), berat isi, kekuatan (*strength*), keawetan (*durability*), dan ekonomis. Rancangan campuran beton ringan menurut standar SNI 03-3449-2002 ditentukan berdasarkan hubungan antara :

1. Kuat tekan beton ringan ($f'_{c_{Br}}$) terhadap bobot isi beton yang diharapkan.
2. Bobot isi beton ringan (BI_{Br}) terhadap jumlah fraksi agregat ringan yang digunakan.
3. Kuat hancur agregat (f'_{c_A}) tidak boleh lebih besar dari kuat tekan adukan atau mortar (f'_{c_M}).

Agregat ringan yang digunakan untuk pembuatan beton ringan struktural dan beton ringan isolasi harus memenuhi ketentuan menurut SNI 03-2461-1991 tentang spesifikasi agregat ringan untuk beton struktural serta SNI 03-3984-1995 tentang spesifikasi agregat ringan untuk beton isolasi. Selain itu agregat ringan yang digunakan dalam proporsi campuran beton ringan harus dikoreksi terhadap

kandungan air dalam agregat, jika agregat ringan yang digunakan tidak dalam keadaan jenuh kering permukaan.

2.8. HIGH DENSITY POLYETHYLENE (HDPE)

Polimerisasi yaitu proses perubahan molekul besar (*monomers*) dari polymer menjadi molekul yang lebih sederhana/kecil, atau proses sintesis dari molekul polymer yang besar/berat dengan bantuan katalis, yang berfungsi sebagai pemrakarsa (*initiator*) untuk memulai proses reaksi polimerisasi. Properties atau karakteristik polymer yang terbentuk dapat dimodifikasi dengan penambahan bahan additive [Callister W. D., 1997][6].

Polyethylene merupakan bahan termoplastik yang diproduksi melalui polimerisasi ethylene (C_2H_4) dengan variabel proses seperti energi panas, tekanan, dan katalis. Jenis kopolimernya diproduksi melalui polimerisasi ethylene dan sedikit penambahan monomer lain, polyethylene itu sendiri merupakan polymers dari tipe *vinyl monomers*. Tidak seperti senyawa organik monomer umumnya, polyethylene tidak dihasilkan dari molekul-molekul yang sama, polyethylene dihasilkan dari berat molekul yang tidak sama dengan panjang molekul yang bervariasi.

Pada umumnya komposisi polymers yang ada, berdasarkan dari tipe *vinyl monomers*, dengan komposisi yaitu [Young J.F., Mindess S., Bentur A., 1993][24] :



R_1 dan R_2 adalah kelompok bagian yang akan diganti dengan monomer lain. Perkiraan nama dari polymers yang terbentuk berdasarkan dari kesatuan monomer utamanya. Beberapa dari nama polymer dibawah ini sudah umum kita dengar, karena mereka merepresentasikan bahan yang secara luas telah digunakan, dalam tabel 2.3 diberikan contoh polymer yang umum digunakan.

Tabel 2.3. Thermoplastic Polymers With Carbon Backbone

Nama Polymer	KOMPOSISI DARI R_1	KOMPOSISI DARI R_2
Polyethylene	H	H
Polypropylene	H	CH ₃
Polyvinyl Chloride (PVC)	H	Cl
Polystyrene	H	C ₆ H ₅
Polymethylmethacrylate	CH ₃	COOCH ₃

Sumber : Young J.F., Mindess S., Bentur A., "The Science and Technology of Civil Engineering Material", Prentice Hall, 1993. [24]

Ada beberapa grade polyethylene yang berbeda-beda sifatnya satu sama lain dan variabel yang membedakan sifat polyethylene [Pamuji Slamet, 1995][18] diantaranya :

- ◆ Derajat panjang dan pendeknya cabang ikatan.
- ◆ Berat molekul rata-rata.
- ◆ Distribusi berat molekul.
- ◆ Jumlah sisa comonomer yang ada.
- ◆ Adanya impuritas yang bergabung dengan polymer.

Pada umumnya, polymer dalam hal ini polyethylene dikarakterisasi berdasarkan densitas dan melt flow indexnya, dimana densitas polyethylene berkaitan dengan cabang ikatan panjang atau pendek dan melt flow indexnya berkaitan dengan berat molekul. Berdasarkan densitasnya, polyethylene dapat diklasifikasikan seperti dibawah ini :




Tabel 2.4. Klasifikasi Polyethylene

Klasifikasi	HDPE	MDPE	LDPE	VLDPE
Densitas (gr/cm ³)	= 0.942	0.942-0.930	0.930-0.910	< 0.910

HDPE (high-density polyethylene) ; MDPE (medium-density polyethylene)
LDPE (low-density polyethylene) ; VLDPE (very low-density polyethylene)

Densitas polyethylene ditentukan dengan jumlah cabang dari ikatan molekul. Rantai cabang yang pendek (*short chain branching*). Mempunyai sekitar enam atau kurang dari atom carbon melalui kopolimerisasi α -olefin, sedangkan rantai cabang yang panjang (*long chain branching*) dibentuk dari radikal polimerisasi tekanan tinggi dengan spesifikasi seperti tabel dibawah ini :

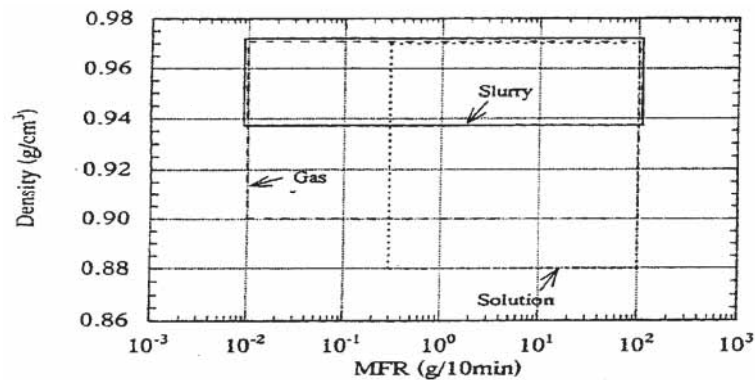
Tabel 2.5. Struktur HDPE, LDPE dan L-LDPE

	Structural Model	Species of Branching	Number of SCB
HDPE		SCB	≤5
LDPE		SCB, LCB	10-30
L-LDPE		SCB	10-30

SCB : short chain branching ; LCB : low chain branching
L-LDPE : linear low density polyethylene

HDPE (high-density polyethylene) diproduksi dengan proses reaksi bertekanan rendah antara 5-140 kg/cm² dengan temperatur berkisar antara 60-300° C menggunakan katalis *slurry* Ziegler-Natta dengan isobutana sebagai pelarut sehingga lebih dikenal dengan proses *slurry*, selain proses fase gas maupun fase larutan untuk jenis-jenis polyethylene yang lain. Untuk mengontrol berat molekul yang berhubungan dengan sifat-sifat fisik polyethylene digunakan hidrogen sedang, komonomer α -olefin dapat digunakan untuk mengatur densitasnya.

Karakteristik komersial polyethylene, umumnya diukur melalui *melt flow index (MFI)*. Untuk memproduksi berat molekul dan densitas yang rendah dapat dilakukan dengan menaikkan sejumlah hidrogen dan penambahan komonomer α -olefin. Tetapi dalam prosesnya ada batasan (limit) untuk range dari melt flow rate (MFR) dan densitas untuk setiap prosesnya, seperti gambar ini :



Gambar 2.5. Hubungan Antara Model-Model Proses Polimerisasi Terhadap MFR & Densitas Yang Dihasilkan.

Sifat-sifat HDPE (*high-density polyethylene*) [Young J.F., Mindess S., Bentur A., 1993][24], sebagai berikut :

- a. Kuat tarik (*tensile strength*) : 22 – 40 MPa
- b. Modulus elastisitas (*modulus of elasticity*) : 0.4 – 1.3 Gpa
- c. *Elongation at Failure* : 15 – 130 %
- d. *Density* : 960 kg/m³
- e. *Heat Deflection* : 85 (Temp. 68 psi (°C))

dibawah ini diberikan tabel perbandingan karakteristik produk-produk komersial dari thermoplastic polymers :



Tabel 2.6. Typical Properties of Commercial Thermoplastic Polymers

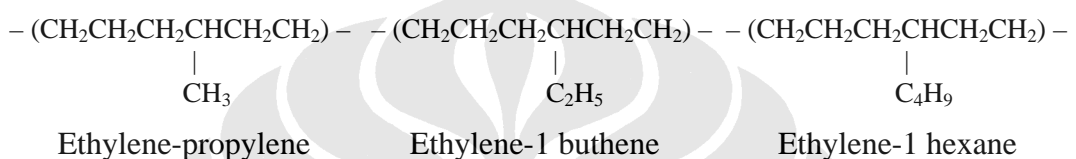
Property	Polyethylene			Poly(ethylene terephthalate)	Polyimide	Polypropylene	Polysulfone
	Low Density (Branched)	“Linear” Low Density	High Density (Linear)				
Specific gravity (g/cm ³)	0.910–0.925	0.918–0.935	0.941–0.965	1.34–1.39	1.43	0.902–0.906	1.24
Refractive index (n_D^{25})	1.51	1.51	1.54	1.64	—	1.49	1.633
Tensile strength (psi)	600–2300	1900–4000	3100–5500	8500–10,500	10,500	4300–5500	10,200 ^c
Elongation (%)	90–800	100–950	20–1000	50–300	5.0–7.0	200–700	50–100
Tensile modulus (10 ⁵ psi)	0.14–0.38	0.38–0.75	0.6–1.8	4.0–6.0	4.5	1.6–2.3	3.6
Impact strength (ft-lb/in. of notch)	>16	1.0–9.0	0.5–2.0	0.25–0.65	1.1	0.5–2.0	1.3 ^d
Heat-deflection temperature (°F, 264 psi)	90–105	—	110–130	100–106	650	125–140	345
Dielectric constant (1000 cycles)	2.25–2.35	2.25–2.35	2.30–2.35	3.46–4.5	3.4	2.2–2.6	3.13
Dielectric loss (1000 cycles)	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.002–0.03	0.002	<0.0005–0.0018	0.001
Water absorption (one-eighth in. bar, 24 hr, %)	<0.015	—	<0.01	0.1–0.2	0.32	<0.01	0.22
Burning rate	Very slow	Very slow	Very slow	Burns	None	Slow	Self-extinguishing
Effect of sunlight	Requires protection	Requires protection	Requires protection	Slight	None	Requires protection	Slight
Effect of strong acids or bases	Resistant	Resistant	Resistant	Resistant	Attacked, alkalis	Resistant	Resistant
Effect of organic solvents	Resistant below 80°C	Resistant	Resistant below 80°C	Resistant	Very resistant	Resistant below 80°C	Soluble
Clarity	Opaque	Opaque	Opaque	Transparent	Opaque	Opaque	Transparent

Sumber : Billmeyer Fred W., “*Textbook of Polymer Science*”, John Wiley & Sons, Inc., 1984. [5]

2.8.1. Struktur Molekul HDPE (High Density polyethylene)

Linear polyethylene (PE) merupakan polymer dengan komposisi kimia polymethylene $(CH_2)_n$ yang tersusun secara teratur. Molekul-molekul HDPE (high-density polyethylene) selalu mengandung sedikit cabang ikatan sebagai hasil samping reaksi pada mekanisme polimerisasi tertentu atau dengan α -olefin.

Untuk kopolimerisasi dengan α -olefin, menghasilkan struktur cabang yang ditentukan oleh jenis α -olefin seperti gambar dibawah ini :



Gambar 2.6. Jenis kopolimer struktur HDPE (high-density polyethylene)

Kuantitas cabang bergantung pada kondisi polimerisasi dan konsentrasi α -olefin. Derajat pencabangnya sangat rendah yaitu sekitar 0.5-3 CH_3 per 1000 carbon dan kemungkinan disebabkan trace α -olefin dalam feed ethylene. Pencabangan ini merupakan salah satu aspek kimiawi, yang mempengaruhi sifat-sifat fisika dan mekanik HDPE seperti halnya dengan berat molekul.

Ikatan paling ujung rantai biasanya adalah gugus metil : $-CH_2CH_2CH_2CH_3-$ yang lainnya kemungkinan adalah gugus yang jenuh apabila hidrogen digunakan sebagai transfer ikatan dalam polimerisasi atau ikatan ganda vinyl ($CH_2=CH-$), vinylidene ($CH_2=CH=$), dan trans-vinylene ($trans-CH=CH-$) dimana gugus vinyl dibentuk selama reaksi transfer ikatan atau selama reaksi terjadi pada ujung cabang dan isomerisasi ikatan ganda [Zulkifli Muhammad, 1997][25].

Jumlah ikatan ganda pada ujung rantai kurang lebih sama dengan ikatan gugus metil berkisar antara 0.5-1 ikatan ganda per 1000 carbon. Oksidasi gugus ini selama pembuatan HDPE (high-density polyethylene) dan penyimpanan menghasilkan suatu gugus karbonil dan hidroksil.

HDPE yang dihasilkan dengan katalis Ziegler-Natta kemungkinan akan membentuk ikatan akhir organometallic : $-CH_2CH_2CH_2Al(CH_3)_2Cl$ apabila $Al(CH_3)_2Cl$ sebagai katalis pembantu (co-catalyst).

2.8.2. Aplikasi HDPE (High Density Polyethylene)

Sejak dikembangkannya proses pembuatan HDPE (high-density polyethylene), aplikasinya begitu luas dan cepat mampu menembus pasaran baru. Kekakuan, ketangguhan dan moldabilitasnya dapat digunakan dalam aplikasi yang sangat lebar mulai dari drum-drum besar sampai botol susu dan dari pipa pembuangan sampai pipa lapangan minyak, dsb.

HDPE (high-density polyethylene) dengan distribusi berat molekul yang besar (broad molecular weight distribution) untuk aplikasi seperti, pipa-pipa bertekanan, menggunakan metode fabrikasi *blow molding* dan *blow film*. Sedangkan HDPE (high-density polyethylene) dengan distribusi berat molekul sempit (narrow molecular weight distribution) digunakan metode fabrikasi seperti *injeksi molding*, *monofilamen*. Dibawah tabel aplikasi HDPE (high-density polyethylene) serta metode fabrikasinya.

Tabel 2.7. Berbagai Aplikasi HDPE

METODE FABRIKASI	APLIKASI HDPE
Injeksi Molding	Kontainer, kontainer dinding tipis, alat-alat tulis, tutup botol, peralatan industri.
Monofilamen	Tali, jaring (net).
Blow Molding	Industri botol-botol kimia, botol-botol farmasi, botol detergen, pengepakan makanan.
Tali Lentur	Kantong pupuk, kantong makanan.
Blow Film	Film plastik, pengepakan, tas belanja.
Pipa	Pipa gas, pipa air.