

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Yanti, G., dkk., (2019) melakukan penelitian yang berjudul “Peningkatan Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton dengan Variasi Penambahan Serat Daun Nanas”. Penelitian tersebut bertujuan untuk meningkatkan kuat tekan dan kuat lentur beton dengan variasi penambahan serat sebesar 0%, 1%, 3%, 5%, dan 7% terhadap berat semen pada mutu rencana beton 22 MPa. Pada penelitian tersebut, serat daun nanas yang akan digunakan dalam campuran beton terlebih dahulu direndam dengan larutan NaOH selama 4 jam kemudian bilas hingga bersih. Benda uji dibuat dengan cetakan silinder berukuran 15 cm x 30 cm untuk uji tekan dan balok berukuran 15 cm x 15 cm x 60 cm untuk pengujian kuat lentur, jumlah sampel pada setiap penambahan serat sebanyak 3 sampel dengan total sebanyak 30 sampel. Hasil nilai rata-rata pengujian kuat tekan beton setiap variasi penambahan serat adalah berturut-turut 23,61 MPa, 23,95 MPa, 25,52 MPa, 26,18 MPa dan 23,12 MPa dan nilai kuat lentur rata-rata adalah 3,46 MPa, 3,59 MPa, 3,75 MPa, 4,08 MPa dan 3,89 MPa. Hasil pengujian menunjukkan nilai kekuatan tekan dan lentur beton tertinggi untuk variasi dengan tambahan serat daun nanas sebesar 5% dengan nilai kuat tekan rata-rata 26,18 MPa mengalami peningkatan sebesar 11% dibanding beton normal dan nilai kuat lentur rata-rata 4,08 MPa mengalami peningkatan sebesar 18% dari beton normal. Pengujian benda uji dilakukan pada umur beton 28 hari.

Penelitian Rogerd, dkk., (2013) dengan judul “Pengaruh Penambahan Serat Aren dengan Alkali *Treatment* Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton”. Tujuan penelitian tersebut adalah menghasilkan beton serat dengan kuat tekan ≥ 25 MPa. Bahan tambah yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah serat ampas aren, dengan variasi penambahan serat sebesar 0%, 1,1%, 1,6% dan 2,2% dari berat semen untuk pengujian kuat tekan dan variasi penambahan serat sebesar 0%, 1,1%, 1,7% dan 2,2% dari berat semen untuk pengujian kuat tarik. Serat yang akan digunakan dalam campuran beton terlebih dahulu dilakukan perawatan

dengan merendamnya dalam larutan NaOH dengan kadar 0,25 M dan 0,5 M. Benda uji dibuat dalam bentuk kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm untuk pengujian tekan dan silinder ukuran diameter 15 cm, tinggi 30 cm untuk pengujian kuat tarik belah beton. Hasil pengujian menunjukkan nilai terbesar pada perendaman dengan larutan NaOH kadar 0,5 M dengan kuat tekan rata-rata berturut-turut sebesar 30,44 MPa, 24,33 MPa, 31 MPa dan 23,12 MPa pada pengujian 28 hari sedangkan nilai kuat tarik belah beton diperoleh hasil berturut-turut 3,01 MPa, 1,96 MPa, 2,34 MPa dan 2,29 MPa pada pengujian umur 28 hari. Hasil pengujian menunjukkan hasil penurunan nilai kuat tekan dan kuat tarik belah beton dibanding beton normal. Hal ini dikarenakan perbedaan persentase penambahan serat yang sedikit, namun beton serat dengan perlakuan alkali *treatment* menunjukkan kenaikan bila dibanding beton serat tanpa perlakuan alkali.

Amna, K., dkk., (2017) melakukan penelitian yang berjudul “Pengaruh Penambahan Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton”. Dalam penelitian tersebut serat yang digunakan terlebih dahulu direndam dalam larutan NaOH dengan konsentrasi 10% selama 12 jam. Ukuran panjang serat yang digunakan 4 cm. Variasi persentase penambahan serat terhadap berat volume semen di dalam campuran beton adalah 0%, 5%, 10%, dan 15%. Jumlah benda uji yang digunakan sebanyak 24 buah benda uji, terdiri dari 12 benda uji silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm dan 12 benda uji balok dengan dimensi 600 mm x 150 mm x 150 mm. Hasil pengujian kuat rata-rata tekan beton adalah 24,34 MPa, 21,13 MPa, 19,43 MPa dan 20,19 MPa sedangkan kuat lentur beton rata-rata sebesar 3,49 MPa, 3,80 MPa, 4,18 MPa dan 3,91 MPa. Hasil pengujian tersebut menunjukkan untuk setiap variasi persentase penambahan serat tidak meningkatkan kuat tekan beton. Penurunan terbesar pada persentase variasi serat 10%, yaitu sebesar 20,15% dari kuat tekan beton normal, sedangkan kuat lentur mengalami peningkatan maksimum pada variasi 10% , yaitu sebesar 19,77% dari kuat lentur beton normal. Variasi penambahan serat persentase lebih dari 5% kuat tekan beton mengalami penurunan, namun untuk kuat lenturnya justru mengalami kenaikan.

Ndoen, dkk., (2015) dalam penelitiannya yang berjudul “Pengaruh Penambahan Serat Daun Gwang (*Corypha Utan Lam*) Terhadap Kuat Lentur dan Kuat Tarik Belah Beton”. Dalam penelitian tersebut benda uji yang digunakan adalah balok beton dengan ukuran 15 x 15 x 60 cm untuk pengujian kuat lentur dan silinder beton dengan ukuran tinggi 30 cm dan diameter 15 cm untuk pengujian kuat tarik belah. Mutu beton yang direncanakan sebesar 25 MPa. Jumlah benda uji 72 buah dengan 3 sampel pada masing-masing waktu pengujian dan persentase penambahan serat. Serat yang digunakan terlebih dahulu direndam dengan 5% larutan NaOH selama 2 jam dengan panjang serat 3 cm. Persentase penambahan serat yang digunakan sebesar 0%, 0,25%, 0,50% dan 0,75%. Hasil pengujian pada umur beton 28 hari menunjukkan hasil kuat tarik belah beton berturut-turut sebesar 3,28 MPa, 2,49 MPa, 3,80 MPa dan 3,94 MPa. Sedangkan hasil pengujian kuat lentur rata-rata pada umur beton 28 hari berturut-turut sebesar 4,62 MPa, 4,98 MPa, 5,51 MPa dan 5,96 MPa. Berdasarkan hasil pengujian tersebut kuat tarik belah dan kuat lentur beton mengalami kenaikan pada penambahan serat dengan persentase 0,75%, yaitu sebesar 20,12% dibandingkan kuat tekan beton normal dan sebesar 29% dibandingkan kuat lentur beton normal. Kesimpulan yang didapatkan bahwa penambahan serat daun gewang sebesar 0,75% memenuhi kuat tekan beton yang direncanakan.

Penelitian Muliadi, dkk., (2018) yang berjudul “Pengaruh Kuat Lentur Beton Terhadap Penambahan Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit”. Pada penelitian tersebut bahan tambah yang digunakan adalah Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit (STKKS). Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan serat tandan kosong kelapa sawit terhadap kuat lentur beton pada setiap variasi serat. Proses pengolahan serat yaitu serat direndam menggunakan 10% larutan NaOH selama 12 jam, kemudian dikeringkan didalam oven. Panjang serat yang digunakan yaitu 40 mm. Variasi persentase serat dengan mengurangi berat volume semen di dalam campuran adalah 0%, 5%, 10%, 15%, 20%. Benda uji dibuat dalam bentuk balok dengan ukuran 60 cm x 15 cm x 15 cm, untuk variasi serat dibuat masing-masing 3 benda uji. Pengujian dilakukan ketika umur beton mencapai 28 hari. Hasil kuat lentur rata-rata yang dihasilkan pada tiap-tiap variasi serat yaitu

3,51 MPa, 4,18 MPa, 4,09 MPa, 4,53 MPa, dan 4,62 MPa. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan serat pada campuran beton menunjukkan kenaikan terhadap kuat lentur beton pada persentase serat 5%, 10%, 15%, dan 20%, bila dibandingkan dengan beton normal. Persentase peningkatan kuat lentur beton setiap variasinya sebesar 19,08%, 22,22%, 29,05% dan 31, 26% dari kuat lentur beton normal.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Definisi Beton

Beton adalah campuran antara semen *portland* atau semen hidrolis yang lain, agregat halus, agregat kasar dan air dengan atau tanpa bahan campuran yang membentuk massa padat menggunakan agregat alam yang dipecah atau tanpa dipecah (SNI-2847-2013). Menurut Tjokrodinuljo (2007) beton diperoleh dengan cara mencampurkan semen portland, air, dan agregat ditambahkan bahan tambah, misalnya pozzolan, bahan kimia pembantu, serat, dan sebagainya. Penambahan bahan tambah pada beton bertujuan untuk menghasilkan beton khusus yang lebih baik dari beton normal.

Sebagai bahan bangunan beton mempunyai beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan bahan bangunan lainnya (Tjokrodinuljo, 2007).

1. Kuat tekannya cukup tinggi sehingga cocok digunakan untuk elemen struktur bangunan, bisa juga dikombinasikan dengan baja sebagai tulangan yang mempunyai kuat tarik tinggi.
2. Harganya relatif murah karena bahan-bahan dasar penyusun beton mudah didapat di daerah tempat lokasi penggunaan beton.
3. Tidak memerlukan perawatan khusus karena beton merupakan bahan yang awet, tahan arus, tahan kebakaran, tahan terhadap pengkaratan atau pembusukan oleh kondisi lingkungan, sehingga biaya perawatan murah.
4. Beton segar mudah dicetak sesuai bentuk yang diinginkan, mudah diangkut ke lokasi penggunaan beton.

Selain mempunyai kelebihan, beton juga mempunyai kelemahan. Beberapa kelemahan beton menurut Tjokrodimuljo (2007) adalah sebagai berikut.

1. Beton mempunyai kuat tarik yang rendah, sehingga getas/rapuh dan mudah retak. Memperbaiki sifat tersebut perlu dilakukan beberapa cara seperti memberikan tulangan baja, tambahan serat, dan sebagainya.
2. Bahan dasar penyusun beton seperti agregat halus dan agregat kasar bermacam-macam sesuai dengan lokasi pengambilannya, sehingga cara perencanaan harus sesuai dengan kondisi dilapangan.
3. Beton keras mempunyai beberapa kelas kekuatan sehingga harus disesuaikan dengan bagian bangunan yang akan dibuat, sehingga cara-cara perencanaan dan pelaksanaannya harus diperhatikan.

2.2.2 Beton Segar

Beton segar adalah campuran bahan penyusun beton setelah selesai pengadukan dan keadaan beton yang belum mengeras yang bisa diangkut, dituangkan, dipadatkan. Menurut Tjokrodimuljo (2007) tiga hal penting yang perlu diketahui dari sifat-sifat beton segar, yaitu: kelecakan, pemisahan kerikil (*segregation*), pemisahan air (*bleeding*).

1. Kelecakan

Kelecakan adalah ukuran kemudahan pengerjaan (*workability*) beton segar, semakin encer beton segar maka semakin mudah beton segar tersebut dikerjakan. Adukan beton segar adalah campuran bahan penyusun beton yaitu air, semen portland, agregat halus dan agregat kasar setelah selesai pengadukan. Unsur-unsur yang mempengaruhi kemudahan pengerjaan (*workability*) adalah.

a. Jumlah air pencampur

Semakin banyak air yang dipakai, maka akan semakin mudah beton segar itu dikerjakan, akan tetapi jumlahnya tetap diperhatikan agar tidak terjadi *segregation*.

b. Kandungan semen

Penambahan semen ke dalam campuran memudahkan cara pengerjaan adukan beton, karena diikuti dengan penambahan air campuran untuk memperoleh nilai FAS (faktor air semen) tetap.

c. Gradasi campuran pasir dan kerikil

Bila campuran pasir dan kerikil mengikuti gradasi yang telah disarankan oleh peraturan maka adukan beton akan mudah dikerjakan. Gradasi adalah distribusi ukuran dari agregat berdasarkan hasil persentase berat yang lolos pada setiap ukuran saringan dari analisa saringan.

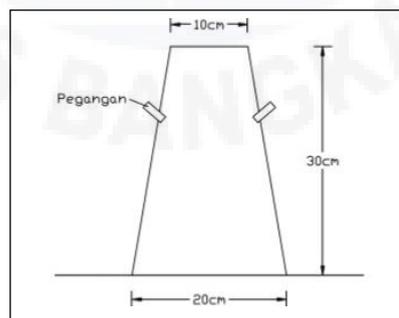
d. Bentuk butiran agregat kasar

Agregat berbentuk bulat-bulat lebih mudah untuk dikerjakan.

e. Cara pemadatan dan alat pemadat

Bila cara pemadatan dilakukan dengan alat getar maka diperlukan tingkat kelecakan yang berbeda, sehingga diperlukan jumlah air yang lebih sedikit daripada jika dipadatkan dengan tangan.

Kelecakan adukan beton dapat diperiksa dengan pengujian *slump* yang didasarkan pada SNI-03-1972-1990. Percobaan ini menggunakan corong baja yang berbentuk konus berlubang pada kedua ujungnya. Bagian bawah berdiameter 20 cm, bagian atas berdiameter 10 cm, dan tinggi 30 cm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Sumber: SNI 03-1972-1990

Gambar 2.1 Cetakan slump beton

Menurut Tjokrodimuljo (2007) penetapan nilai *slump* pada beton segar dibedakan berdasarkan jenis struktur pekerjaan dibuat seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penetapan nilai *slump* adukan beton

Pemakaian beton (berdasarkan jenis struktur yang dibuat)	Maksimum (cm)	Minimum (cm)
Dinding, plat pondasi dan pondasi telapak bertulang	12,5	5,0
Pondasi telapak tidak bertulang, kaisan dan struktur dibawah tanah	9,0	2,5
Pelat, balok, kolom, dinding	15,0	7,5
Pengerasan jalan	7,5	5,0
Pembetonan massal (beton massa)	7,5	2,5

Sumber: Tjokrodimuljo, 2007

2. Pemisahan Kerikil (*Segregation*)

Pemisahan kerikil (*Segregation*) adalah butir-butir kerikil yang memisahkan diri dari campuran beton. Terdapat dua bentuk segregasi beton segar yaitu partikel yang lebih kasar cenderung memisahkan diri dari partikel yang lebih halus dan terpisahnya air semen dari adukan (Neville, 1981 dalam Amri, 2015).

Menurut Nugraha dan Antoni (2007) ada beberapa faktor yang menyebabkan pemisahan kerikil (*segregation*) yaitu:

- a. Ukuran partikel yang lebih besar dari 25 mm,
- b. Berat jenis agregat kasar yang berbeda dengan agregat halus,
- c. Kurangnya jumlah material halus dalam campuran,
- d. Bentuk butir yang tidak rata dan tidak bulat,
- e. Campuran yang terlalu basah atau terlalu kering.

Segregasi mengakibatkan mutu beton menjadi berkurang. Upaya untuk mengurangi kecenderungan pemisahan agregat tersebut, dapat dilakukan sebagai berikut ini:

- a. Mengurangi jumlah air yang digunakan,
- b. Adukan beton jangan dijatuhkan dengan ketinggian yang terlalu besar,
- c. Cara mengangkut, penuangan maupun pemadatan harus dilakukan dengan cara yang benar.

3. Pemisahan Air (*Bleeding*)

Bleeding adalah pengeluaran air dari adukan beton yang disebabkan oleh pelepasan air dari pasta semen. Sesaat setelah dicetak, air yang terkandung di dalam beton segar cenderung untuk naik ke permukaan. Jadi *bleeding* adalah bentuk dari *segregation*. Adapun penyebab *bleeding* menurut Neville (1981) dalam Amri (2015) adalah ketidakmampuan bahan padat campuran untuk menangkap air pencampur. Ketika *bleeding* sedang berlangsung, air campuran terjebak di dalam kantung-kantung yang terbentuk antara agregat dan pasta semen. Sesudah *bleeding* selesai dan beton mengeras, kantung-kantung menjadi kering. Akibatnya apabila ada tekanan, kantung-kantung tersebut menjadi penyebab mudahnya retak pada beton.

Menurut Tjokrodimuljo (2007) pemisahan air (*bleeding*) dapat dikurangi dengan cara:

- a. Memberi lebih banyak semen *portland*,
- b. Menggunakan air sedikit mungkin,
- c. Menggunakan lebih banyak butiran agregat halus.

2.2.3 Beton Keras

Beton keras merupakan campuran bahan penyusun beton yang telah mengalami pengerasan. Beton keras memiliki kelebihan yang dapat memikul beban pada struktur bangunan. Kinerja beton keras yang baik ditunjukkan oleh kuat tekan beton yang tinggi, kuat tarik yang lebih baik, perilaku yang lebih daktail, kedap air dan udara, ketahanan terhadap sulfat dan klorida, penyusutan rendah dan keawetan jangka panjang (Amri, 2015).

1. Kuat Tekan Beton

Kekuatan beton adalah kemampuan beton menahan beban tekan per satuan luas (Mulyono, 2004). Menurut SNI-03-1974-2011, kuat tekan beton adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu, yang dihasilkan oleh mesin tekan.

Besaran kuat tekan beton didapatkan dengan rumus:

$$f_c' = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(2.1)$$

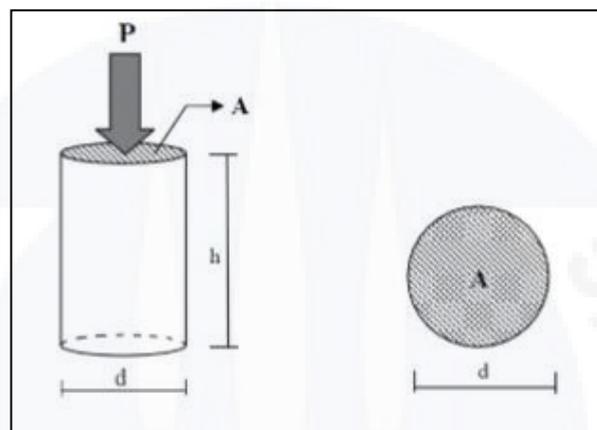
dengan :

f_c' : kuat tekan beton (MPa atau N/mm²),

P : beban maksimum (N),

A : luas penampang (mm²).

Adapun pola pembebanan pada pengujian kuat tekan beton dengan benda uji silinder dapat lihat pada gambar 2.2



Sumber : SNI 03-1974-1990

Gambar 2.2 Pembebanan pada pengujian kuat tekan beton

Nilai kuat beton beragam sesuai dengan umur pengerjaan beton. Umumnya nilai kuat tekan beton ditentukan pada waktu beton mencapai umur 28 hari setelah pengecoran. Kekuatan tekan beton diwakili oleh tegangan tekan maksimum f_c' dengan satuan N/mm² atau MPa dan kg/cm² (Mulyono, 2004). Kekuatan tekan beton merupakan sifat yang paling penting dari beton keras. Adapun beberapa jenis beton menurut kuat tekannya dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Beberapa jenis beton menurut kuat tekannya

Jenis beton	Kuat tekan (MPa)
Beton sederhana	Sampai 10
Beton normal	15 – 30
Beton pra tegang	30 – 40
Beton kuat tekan tinggi	40 – 80
Beton kuat tekan sangat tinggi	> 80

Sumber: Tjokrodimuljo, 2007

Menurut Tjokrodimuljo (2007) Kuat tekan beton dipengaruhi oleh beberapa faktor sebagai berikut.

a. Umur beton

Kekuatan tekan beton akan bertambah sesuai dengan bertambahnya umur beton. Biasanya nilai kuat tekan ditentukan pada waktu beton mencapai umur 28 hari. Kekuatan beton akan naik secara cepat (linear) sampai umur 28 hari, tetapi setelah itu kenaikannya tidak terlalu signifikan (Tabel 2.3). Umumnya pada umur 7 hari kuat tekan mencapai 65% dan pada umur 14 hari mencapai 88% - 90% dari kuat tekan umur 28 hari.

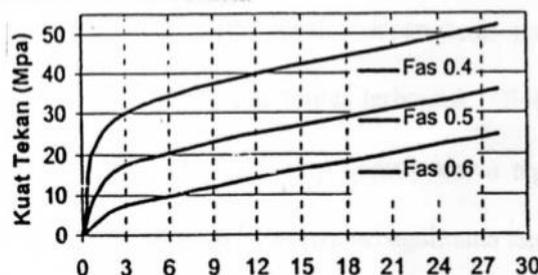
Tabel 2.3 Rasio kuat tekan beton pada berbagai umur

Umur beton (hari)	3	7	14	21	28	90	365
Semen Portland biasa	0,40	0,65	0,88	0,95	1,00	1,20	1,35
Sement Portland dengan kekuatan awal yang tinggi	0,55	0,75	0,90	0,95	1,00	1,15	1,20

Sumber: Tjokrodimuljo, 2007

b. Faktor air semen

Semakin tinggi faktor air semen maka semakin rendah nilai kuat tekan beton. Namun, nilai faktor air semen yang semakin rendah tidak selalu berarti nilai kuat tekan betonnya tinggi. Hal ini dikarenakan jika faktor air semen semakin rendah dapat menyebabkan kesulitan dalam pemadatan. Hal ini menandakan bahwa ada suatu nilai faktor air semen tertentu (optimum) yang menghasilkan kuat tekan beton maksimum. Duff dan Abrams (1919) dalam Mulyono (2004) meneliti hubungan antara faktor air semen dengan kekuatan beton pada umur 28 hari dengan benda uji silinder beton dalam Gambar 2.3 berikut.



Sumber: Duff dan Abrams (1919) dalam Mulyono, 2004

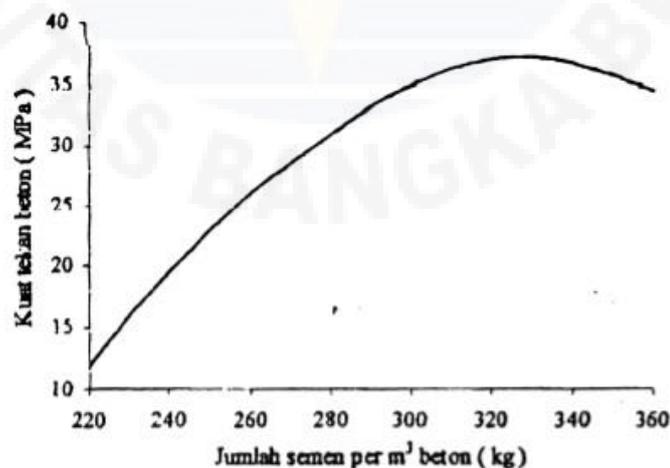
Gambar 2.3 Hubungan antara faktor air semen dengan kuat tekan

c. Kepadatan

Kepadatan adukan beton mempengaruhi nilai kuat tekan betonnya setelah mengeras. Upaya mengatasi kesulitan pemadatan adukan beton dapat dilakukan dengan cara pemadatan dengan alat getar (*vibrator*) atau dengan memberi bahan kimia tambahan (*chemical admixture*) yang bersifat mengencerkan adukan beton sehingga lebih mudah dipadatkan.

d. Jumlah pasta semen

Pasta semen dalam beton berfungsi untuk merekatkan butir-butir agregat. Pasta semen akan berfungsi secara maksimal jika seluruh pori antar butir-butir agregat terisi penuh dengan pasta semen, serta seluruh permukaan butir agregat terselimuti pasta semen. Jika pasta semen sedikit maka tidak cukup mengisi pori-pori antar butir agregat dan tidak seluruh permukaan butir, sehingga rekatan antar butir agregat antar butir kurang kuat, dan berakibat kuat tekan beton rendah. Akan tetapi, jika jumlah pasta semen terlalu banyak maka kuat tekan beton lebih didominasi oleh pasta semen. Jika terlalu banyak pasta semen yang umumnya kuat tekan pasta semen lebih rendah dari agregat maka akan menyebabkan kuat tekan beton rendah. Hubungan antara jumlah semen dengan kuat tekan dapat dilihat pada gambar 2.4.



Sumber : Tjokrodinuljo, 2007

Gambar 2.4 Hubungan antara jumlah semen dengan kuat tekan

e. Jenis semen

Semen *Portland* untuk beton terdiri dari beberapa jenis. Masing-masing jenis Semen Portland mempunyai sifat tertentu, misalnya: cepat mengeras, dan sebagainya. Hal ini dapat mempengaruhi kuat tekan betonnya.

f. Sifat agregat

Agregat terdiri dari agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil atau batu pecah). Beberapa sifat agregat yang mempengaruhi kekuatan beton sebagai berikut.

1) Kekasaran permukaan, karena permukaan agregat yang kasar dan tidak licin membuat rekatan antara permukaan agregat dan semen lebih kuat daripada permukaan agregat yang halus dan licin.

2) Bentuk agregat, karena bentuk agregat yang bersudut misalnya pada batu pecah, membuat butir-butir agregat itu saling mengunci dan sulit digeserkan, berbeda dengan batu kerikil yang bulat.

3) Kuat tekan agregat, karena sekitar 70% volume beton terisi oleh agregat, sehingga kuat tekan beton didominasi oleh kuat tekan agregat. Jika agregat yang dipakai mempunyai kuat tekan rendah akan diperoleh beton yang kuat tekannya rendah pula.

2. Kuat Tarik Belah Beton

Kuat tarik belah beton adalah kuat tarik tidak langsung dari benda uji beton yang berbentuk silinder yang diperoleh dari pembebanan benda uji tersebut yang diletakkan mendatar sejajar dengan permukaan meja penekan mesin uji ditekan (SNI-2491-2014). Hasil kuat tekan dan kuat tarik belah beton tidak mengalami perbandingan lurus. Upaya memperbaiki mutu kuat tekan beton hanya mengalami sedikit peningkatan dari nilai kuat tariknya. Perkiraan kasarnya nilai kuat tarik bahan beton normal hanya berkisar antara 9%-15% dari kuat tekannya (Dipohusodo.I.,1994)

Kuat tarik beton dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut ini:

$$f_t' = \frac{2P}{\pi LD} \dots\dots\dots (2.2)$$

dengan:

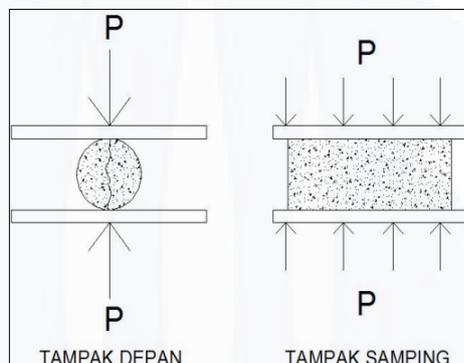
f_t' : Kuat tarik belah beton (MPa atau N/mm²),

P : Beban maksimum (N),

L : Panjang benda uji silinder (mm),

D : Diameter benda uji silinder (mm).

Adapun pola pembebanan untuk pengujian kuat tarik belah beton pada benda uji silinder dapat dilihat pada gambar 2.5.



Sumber: SNI 2491-2014

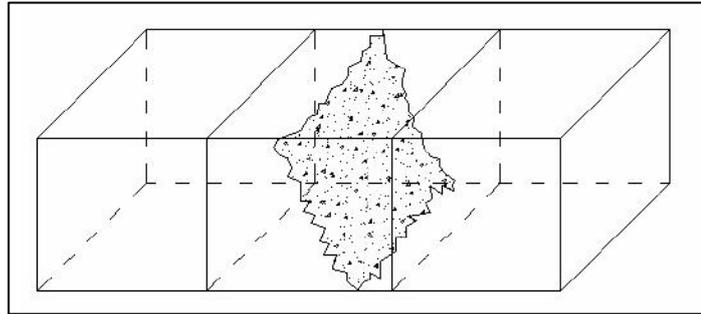
Gambar 2.5 Pembebanan pada pengujian kuat tarik belah beton

3. Kuat Lentur Beton

Kuat lentur balok beton adalah kemampuan balok beton yang diletakkan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji sampai benda uji patah (SNI-4431-2011). Kuat lentur batas (*ultimate flexure strength*) beton atau disebut juga modulus keruntuhan (*modulus of rupture*) adalah beban maksimum yang tercapai selama pembebanan. Menurut SNI 4431-2011, nilai kuat lentur beton dapat diperoleh dari rumus sebagai berikut.

a. Bila retak terjadi di 1/3 bentang bagian tengah, modulus keruntuhan dapat dihitung dengan persamaan:

$$f_r = \frac{P.L}{b.h^2} \dots\dots\dots (2.3)$$



Sumber: SNI 4431-2011

Gambar 2.6 Patah pada 1/3 bentang tengah

b. Bila retak terjadi di luar 1/3 bentang tengah dan jarak antara titik pusat dan titik patah kurang dari 5% dari jarak antara titik perletakan, modulus keruntuhan dihitung dengan persamaan:

$$f_r = \frac{P \cdot a}{b \cdot h^2} \dots \dots \dots (2.4)$$

dengan:

f_r : Modulus keruntuhan/kuat lentur batas (MPa atau N/mm²),

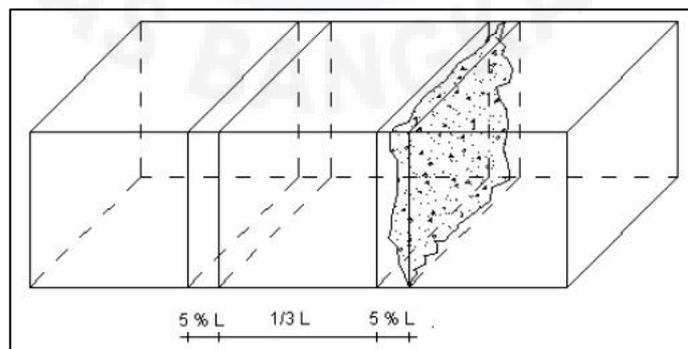
P : Beban maksimum (N),

L : Bentang balok (mm),

b : Lebar rata-rata benda uji (mm),

h : Tinggi rata-rata benda uji (mm),

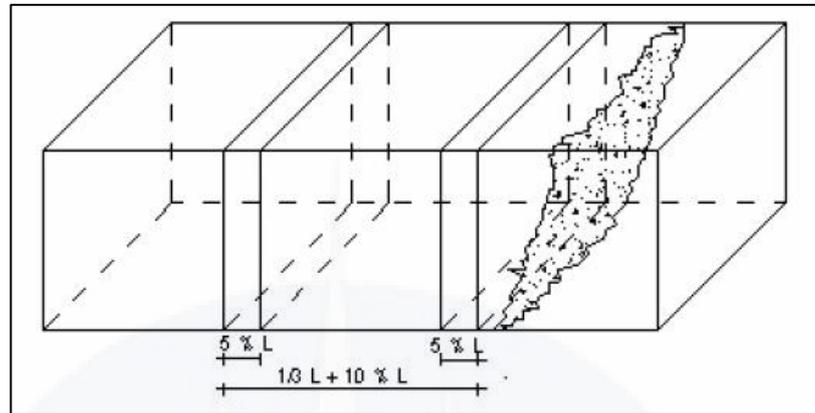
a : Jarak rata-rata antara garis retak dan tumpuan terdekat pada permukaan tarik balok (mm).



Sumber: SNI 4431-2011

Gambar 2.7 Patah di luar 1/3 bentang tengah kurang dari 5% jarak dari titik perletakan

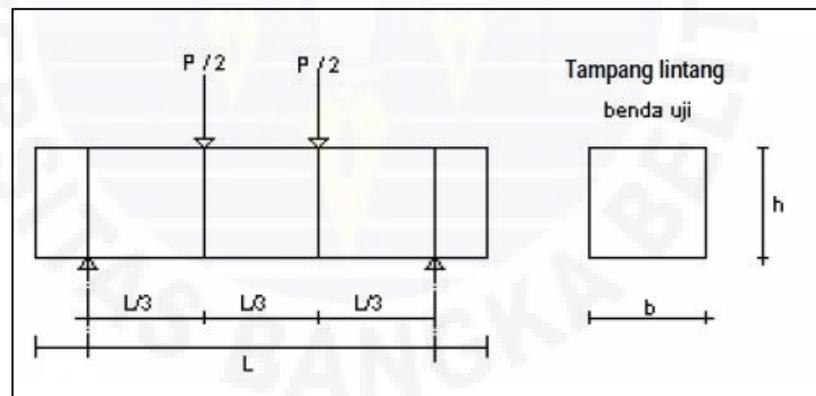
Benda uji yang patahnya di luar pusat (daerah $1/3$ jarak titik perletakan bagian tengah) dan jarak titik pembebanan dan titik patah lebih dari 5% bentang, hasil pengujian tidak digunakan.



Sumber: SNI 4431-2011

Gambar 2.8 Patah di luar $1/3$ bentang tengah lebih dari 5% jarak dari titik perletakan

Adapun pola perletakan pembebanan untuk pengujian kuat lentur beton benda uji balok dapat dilihat pada gambar 2.9.



Sumber: SNI 4432-2011

Gambar 2.9 Pembebanan pada pengujian kuat lentur beton

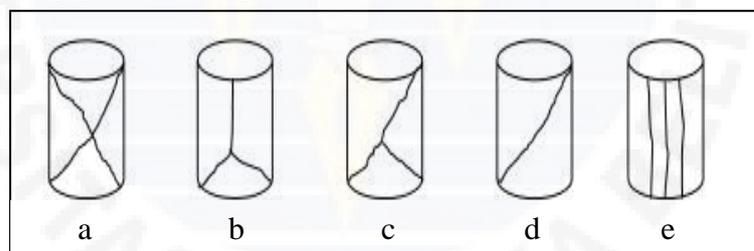
2.2.4 Pola Retak

Retak merupakan suatu jenis kerusakan yang paling umum terjadi pada struktur beton, retak disebabkan oleh sifat beton maupun material penyusun beton yang kurang baik (Amelia, dkk, 2017). Secara visual retak nampak seperti garis retak pada struktur beton terjadi sebelum beton mengeras maupun setelah beton mengeras. Retak akan terjadi saat beton mulai mengeras dan ketika telah menerima beban.

1. Pola Retak Pada Silinder

Benda uji silinder beton ketika menerima beban saat pengujian akan mengalami keretakan yang beragam. Adapun jenis pola retak pada benda uji silinder menurut SNI-1974-2011 dibedakan menjadi 5 jenis pola retak yaitu sebagai berikut:

- a. Pola retak kerucut,
- b. Pola retak kerucut dan belah,
- c. Pola retak kerucut dan geser,
- d. Pola retak geser,
- e. Pola retak sejajar sumbu tegak.



Sumber: SNI 1974-2011

Gambar 2.10 Macam-macam pola retak pada silinder

2. Pola Retak Pada Balok

Benda uji balok beton akan mengalami retak yang diakibatkan penurunan yang tidak seragam, susut, beban bertukar arah, perbedaan unsur kimia dan perbedaan suhu pada beton (Yudika, 2017). Retak dimulai dari retak permukaan yang tidak dapat terlihat secara kasat mata. Apabila pembebanan diberikan secara terus menerus dapat mengakibatkan retak rambut yang merambat. Sehingga pada akhirnya terjadi kegagalan atau keruntuhan pada struktur. Pada kondisi dilapangan

variasi pola retak berbeda antara satu sama lain. Hal ini disebabkan perbedaan tegangan tarik yang ditimbulkan oleh beban, momen dan geser.

Menurut Istiawan (2017) secara garis besar terdapat tiga jenis keretakan pada balok beton seperti dibawah ini.

a. Retak lentur (*flexural crack*)

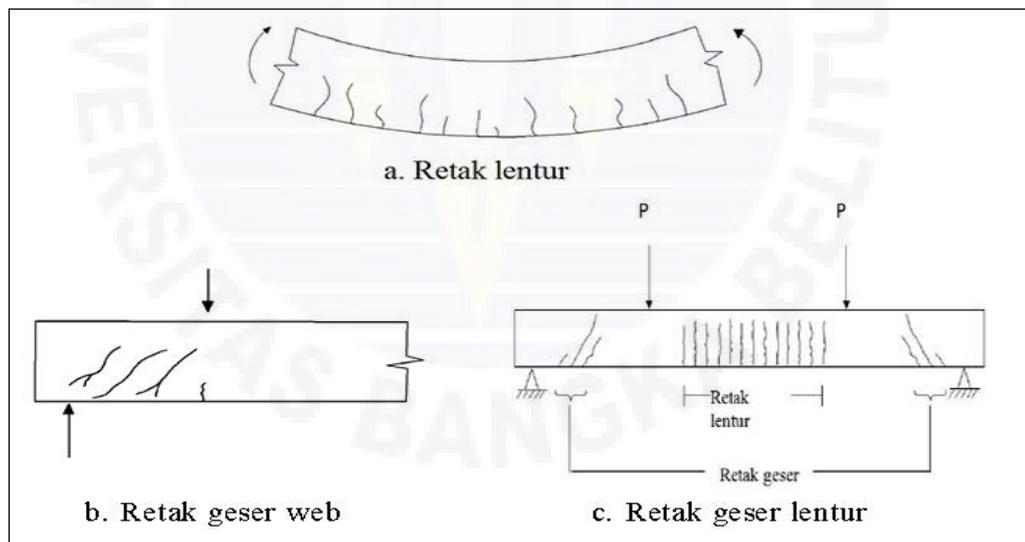
Retakan ini terjadi di daerah yang mempunyai harga momen lentur lebih besar dan gaya geser kecil. Arah retak terjadi hampir tegak lurus pada sumbu balok.

b. Retak geser pada bagian balok (*web shear crack*)

Retak geser pada bagian balok yaitu keretakan miring yang terjadi pada daerah garis netral penampang, dimana gaya geser maksimum dan tegangan aksial sangat kecil.

c. Retak geser-lentur (*flexural shear crack*)

Retakan ini terjadi pada bagian balok yang sebelumnya telah terjadi keretakan lentur. Retak geser lentur merupakan perambatan retak miring dari retak lentur yang sesudah terjadi sebelumnya.



Sumber: Istiawan, 2017

Gambar 2.11 Pola retak lentur pada balok

2.2.5 Bahan Penyusun Beton

1. Semen

Semen berasal dari kata "cement" dari dalam bahasa Inggris yang berarti pengikat/perekat. Semen merupakan bahan pengikat agregat yang digunakan dalam campuran beton. Campuran semen dengan air akan membentuk pasta semen, jika ditambah agregat halus akan menjadi mortar. Apabila ditambah agregat kasar maka akan menjadi campuran beton. Selain berfungsi sebagai bahan pengikat butir-butir agregat semen juga berfungsi mengisi rongga-rongga di antara butir-butir agregat (Tjokrodinuljo, 2007).

Menurut Mulyono (2004) semen dibedakan menjadi 2 kelompok berdasarkan cara ikatannya dengan air.

a. Semen non hidrolis

Semen non hidrolis tidak dapat mengikat dan mengeras di dalam air, akan tetapi dapat mengeras di udara. Contoh semen non hidrolis adalah kapur.

b. Semen hidrolis

Semen hidrolis mempunyai kemampuan untuk mengikat dan mengeras di dalam air. Contoh semen hidrolis antara lain: kapur hidrolis, semen pozzolan, semen terak, semen alam, semen portland, semen portland-pozollan, semen portland terak tanur tinggi, semen alumina dan semen ekspansif.

Menurut SNI-15-2049-2004 semen *portland* adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen Portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis. Semen ini digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain.

Jenis/tipe semen yang digunakan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kuat tekan beton. Menurut SNI-15-2049-2004, semen *portland* dibagi menjadi lima tipe yaitu sebagai berikut ini.

- a. Tipe I, *Ordinary Portland Cement*, semen untuk penggunaan umum. Semen ini tidak memerlukan persyaratan khusus (panas hidrasi, ketahanan terhadap sulfat, kekuatan awal). Jenis ini paling banyak diproduksi karena digunakan untuk hampir semua jenis konstruksi.

- b. Tipe II, *Moderate Sulphate Cement*, semen untuk konstruksi yang tahan terhadap sulfat sedang dan mempunyai panas hidrasi sedang. Semen ini digunakan untuk konstruksi beton yang terus-menerus berhubungan dengan air atau untuk pondasi dalam yang tertahan didalam tanah yang mengandung air agresif (garam-garam sulfat).
- c. Tipe III, *High Early Strength Cement*, semen untuk beton dengan kekuatan awal tinggi (cepat mengeras). Kekuatan 28 hari umumnya dapat dicapai dalam waktu 1 minggu. Semen jenis ini umum dipakai ketika acuan harus dibongkar secepat mungkin atau untuk struktur yang harus cepat dipakai.
- d. Tipe IV, *Low Heat of Hydration Cement*, semen untuk beton yang memerlukan panas hidrasi rendah, kekuatan awal rendah. Semen jenis ini digunakan untuk pekerjaan-pekerjaan dengan kecepatan dan jumlah panas yang timbul harus minimum. Contoh penggunaan semen jenis ini yaitu, pada bangunan seperti gravitasi besar.
- e. Tipe V, *High Sulphate Resistance Cement*, semen untuk beton yang tahan terhadap kadar sulfat tinggi. Semen ini digunakan untuk bangunan yang berhubungan dengan air tanah yang mengandung sulfat dalam persentase yang tinggi.

Bahan utama pembentuk semen portland adalah kapur (CaO), silika (SiO₃), alumina (Al₂O₃), sedikit magnesia (MgO), dan terkadang sedikit alkali. Upaya yang dilakukan untuk mengontrol komposisinya, terkadang ditambahkan oksida besi, sedangkan gipsum (CaSO₄.2H₂O) ditambahkan untuk mengatur waktu ikat semen (Mulyono, 2004). Komposisi senyawa utama dan senyawa pembentuk dalam semen portland dapat dilihat pada Tabel 2.4 dan 2.5 berikut ini.

Tabel 2.4 Komposisi senyawa utama semen *portland*

Nama senyawa	Rumus oksida	Notasi	Persen berat
Trikalsium silikat	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	50
Dikalsium silikat	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	25
Tirikalsium aluminat	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	12
Tetrakalsium aluminoforit	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	8
Gipsum	CaSO ₄ .2H ₂ O	CSH ₂	3,5

Sumber: (Nugraha dan Antoni, 2007)

Tabel 2.5 Komposisi senyawa umum semen *Portland*

Oksida	Notasi	Nama senyawa	Persen berat
CaO	C	Kapur	63
SiO ₂	S	Silika	22
Al ₂ O ₃	A	Alumina	6
Fe ₂ O ₃	F	Ferrit trioksida	2,5
MgO	M	Magnesia	2,6
K ₂ O ₃	K	Alkalis	0,6
Na ₂ O	N	Disodium oksida	0,3
SO ₃	S	Sulfur trioksida	2,0
CO ₂	C	Karbon dioksida	-
H ₂ O	H	Air	-

Sumber: (Nugraha dan Antoni, 2007)

2. Agregat

Menurut Tjokrodimuljo (2007) agregat ialah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau beton. Agregat dalam campuran beton sangat penting karena agregat menempati hingga 70% dari volume campuran bahan penyusun beton. Agregat dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu agregat alam dan agregat buatan (pecahan). Agregat alam dan pecahan juga dapat dibedakan berdasarkan berat, asal, diameter butir (gradasi), dan tekstur permukaan. Berdasarkan ukurannya, agregat dapat dibedakan menjadi dua golongan yaitu agregat halus dan agregat kasar.

a. Agregat Halus

Agregat halus adalah agregat berupa pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami dari batu-batuan atau berupa pasir buatan yang dihasilkan oleh alat-alat pemecah batu, dan mempunyai ukuran butir terbesar 5 mm atau lolos saringan no.4 dan tertahan pada saringan no.200 (SNI-03-2834-2000).

Gradasi agregat ialah distribusi ukuran butiran dari agregat. Ukuran gradasi dinyatakan dalam nilai persentase dari berat butiran yang tertinggal atau lewat didalam suatu susunan ayakan (Tjokrodimuljo, 2007). Agregat halus yang digunakan harus mempunyai gradasi yang baik, karena akan mengisi ruang-ruang kosong yang tidak dapat diisi oleh material lain sehingga menghasilkan beton yang

padat. Agregat halus yang digunakan pada campuran beton harus memenuhi ukuran gradasi sebagai berikut:

Tabel 2.6 Batas-batas gradasi agregat halus

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

Sumber: Tjokrodinuljo, 2007

Menurut Standar SK SNI-S-04-1989-F (Spesifikasi Bahan Bangunan Bagian A), agregat halus untuk bahan bangunan sebaiknya dipilih yang memenuhi persyaratan sebagai berikut ini.

- 1) Butir-butirnya tajam, dan keras, dengan indeks kekerasan $\leq 2,2$.
- 2) Kekal, tidak pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca (terik matahari dan hujan). Jika diuji dengan larutan garam Natrium Sulfat bagian yang hancur maksimum 12%, jika dengan garam Magnesium Sulfat maksimum 18%.
- 3) Tidak mengandung lumpur (butir halus yang lewat ayakan 0,06 mm) lebih dari 5 %.
- 4) Tidak mengandung zat organis terlalu banyak, yang dibuktikan dengan percobaan warna dengan larutan 3% NaOH, yaitu warna cairan diatas endapan agregat halus tidak boleh lebih gelap dari pada warna standar/pembanding.
- 5) Modulus halus butir antara 1,50-3,80 dan dengan variasi butir sesuai standar gradasi.
- 6) Khusus untuk beton dengan tingkat keawetan tinggi, agregat halus harus tidak reaktif terhadap alkali.
- 7) Agregat halus dari laut/pantai, boleh dipakai asalkan dengan petunjuk dari lembaga pemeriksaan bahan-bahan yang diakui.

b. Agregat Kasar

Agregat Kasar adalah kerikil sebagai hasil desintegrasi dari batu atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5,00 mm – 40,00 mm (SNI-03-2834-2000). Agregat kasar yang digunakan pada campuran beton harus memenuhi ukuran gradasi sebagai berikut.

Tabel 2.7 Batas-batas gradasi agregat kasar

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

Sumber: Tjokrodinuljo, 2007

Menurut Standar SK SNI-S-04-1989-F (Spesifikasi Bahan Bangunan Bagian A), agregat kasar untuk bahan bangunan sebaiknya dipilih yang memenuhi persyaratan sebagai berikut ini.

- 1) Butir-butir kasar dan tidak berpori. Indeks kekerasan $\leq 5\%$ (diuji dengan goresan batang tembaga). Bila diuji dengan bajana *Rudeloff* atau *Los Angeles*.
- 2) Kekal, tidak pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca (terik matahari dan hujan). Jika diuji dengan larutan garam Natrium Sulfat bagian yang hancur maksimum 12%, jika dengan garam Magnesium Sulfat maksimum 18%.
- 3) Tidak mengandung lumpur (butiran halus yang lewat ayakan 0,06 mm) lebih dari 11%.
- 4) Tidak boleh mengandung zat-zat reaktif terhadap alkali.
- 5) Butiran agregat yang pipih dan panjang tidak boleh lebih dari 20%.
- 6) Modulus halus butir antara 6-7,10 dan variasi butir sesuai standard gradasi.

- 7) Ukuran butir maksimum tidak boleh melebihi dari $\frac{1}{5}$ jarak terkecil antara bidang-bidang samping cetakan, $\frac{1}{3}$ tebal pelat beton, $\frac{3}{4}$ jarak bersih antar tulangan atau berkas tulangan.

3. Air

Air merupakan bahan dasar pembuatan beton yang paling penting. Air diperlukan untuk bereaksi dengan semen *portland* dan menjadi pelumas antara butir-butir agregat agar dapat mudah dikerjakan (diaduk, dituang, dan dipadatkan) (Tjokrodimuljo, 2007). Menurut Standart SK SNI-S-04-1989-F, Spesifikasi Bahan Bangunan Bagian A, Air sebagai bahan bangunan sebaiknya memenuhi syarat sebagai berikut:

- a. Air harus bersih,
- b. Tidak mengandung lumpur, minyak, dan benda melayang lainnya, yang dapat dilihat secara visual. Benda tersuspensi ini tidak boleh lebih dari 2 gram per liter,
- c. Tidak mengandung garam-garam yang dapat larut dan dapat merusak beton (asam, zat organik) lebih dari 15 gram per liter,
- d. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/liter,
- e. Tidak mengandung senyawa sulfat (sebagai SO_3) lebih dari 1 gram/liter.

Air juga digunakan dalam perawatan beton setelah dicetak. Air yang dipakai harus air yang tidak menimbulkan noda atau endapan yang merusak warna permukaan. Kualitas beton akan berkurang jika air mengandung kotoran.

4. Bahan Tambah

Menurut Tjokrodimulyo (2007) bahan tambah (*admixture*) adalah suatu bahan yang ditambahkan ke dalam campuran adukan beton, dengan tujuan untuk mengubah sifat adukan atau betonnya. Sifat karakteristik dari beton yang hendak dicapai dengan menggunakan bahan tambah misalnya untuk dapat dengan mudah dikerjakan, mempercepat pengerjaan, menambah kuat tekan, penghematan, atau untuk tujuan lain seperti penghematan energi (Mulyono, 2004).

Jenis-jenis bahan tambah yang sering digunakan dibedakan menjadi 3 bagian yaitu bahan tambah kimia, pozzolan dan serat.

a. Bahan kimia tambahan

Bahan tambah kimia (*chemical admixture*) adalah bahan tambahan (bukan bahan pokok) yang dicampurkan pada adukan beton. Hal ini bertujuan untuk memperoleh sifat-sifat khusus dalam pengerjaan, adukan, waktu pengikatan, waktu pengerasan, dan maksud-maksud lainnya (Tjokrodimuljo, 2007).

Bahan kimia tambahan dibedakan menjadi 5 jenis, sebagai berikut ini.

- 1) Bahan kimia tambahan untuk mengurangi jumlah air yang dipakai.
- 2) Bahan kimia tambahan untuk memperlambat proses ikatan dan pengerasan beton.
- 3) Bahan kimia tambahan untuk mempercepat proses ikatan dan pengerasan beton.
- 4) Bahan kimia tambahan berfungsi ganda, yaitu untuk mengurangi jumlah air dan memperlambat proses ikatan dan pengerasan beton.
- 5) Bahan kimia tambahan berfungsi ganda, yaitu untuk mengurangi air dan mempercepat proses ikatan dan pengerasan beton.

Selain 5 jenis diatas ada 2 jenis lain yang lebih khusus (Spesifikasi Bahan Tambah untuk Beton, Standar, SK SNI-S-18-1990-03), sebagai berikut ini.

- 1) Bahan kimia tambahan yang digunakan untuk mengurangi jumlah air campuran sampai sebesar 12% atau lebih.
- 2) Bahan kimia tambahan dengan fungsi ganda, yaitu mengurangi air sampai 12% atau lebih dan untuk memperlambat waktu pengikatan awal.

b. Pozolan

Pozolan adalah bahan alam atau buatan yang sebagian besar terdiri dari unsur-unsur *silikat* (SiO_2) dan atau *aluminat* (Al_2O_3) yang reaktif (Tjokrodimuljo, 2007). Pozolan sendiri tidak mempunyai sifat semen, tetapi dalam keadaan halus (lolos ayakan 0,21 mm). Apabila dicampur dengan kapur padam aktif ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dan air (H_2O) dalam beberapa waktu pada suhu kamar ($24\text{-}27^\circ\text{C}$) dapat bereaksi membentuk suatu massa yang padat dan sukar larut dalam air.

Bahan tambah pozzolan dikelompokkan (Spesifikasi Bahan Bangunan Bagian A, (Bahan Bangunan Bukan Logam, SK SNI-S-04-1989-F) antara lain:

- 1) Tras alam,
- 2) Semen merah,
- 3) Gilingan terak dapur tinggi,
- 4) Abu terbang (*abuter, fly ash*).

Menurut SK SNI-S-15-1990-F Spesifikasi Abu Terbang sebagai bahan tambah dalam campuran beton disebutkan ada 3 jenis abu terbang seperti dibawah ini.

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

c. Serat

Penambahan serat dalam campuran beton sudah diketahui sejak dahulu dimulai dari penambahan jerami dan juga menggunakan rambut kuda. Serat yang ditambahkan kedalam campuran beton terdiri dari serat alami dan serat sintetis. Serat alami umumnya berasal dari tumbuhan dan hewan yang hidup di alam. Serat sintetis atau serat buatan umumnya berasal dari bahan petrokimia. Bahan yang termasuk serat sintetis antara lain baja, plastik (*polypropylene*), *polymer*, asbes, dan karbon. Penambahan serat dimaksudkan untuk meningkatkan kinerja beton seperti, peningkatan energi, peningkatan kekokohan, pengurangan retak plastis, dan meningkatkan daktilitas beton (Paul & Antoni, 2007).

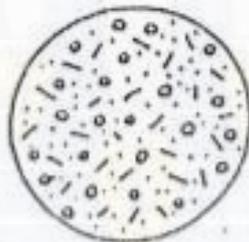
Menurut Tjokrodimuljo (2007) maksud utama penambahan serat ke dalam beton yaitu:

- 1) Menambah kuat tarik, karena beton merupakan bahan yang kuat tariknya rendah,

- 2) Menambah daktilitas, karena beton merupakan bahan yang getas,
- 3) Menambah ketahanan terhadap retak, karena kuat tarik beton sangat rendah berakibat beton mudah retak, yang pada akhirnya mudah dimasuki air, sehingga mengurangi keawetan beton.

2.2.6 Beton Serat

Beton serat (*fibre concrete*) adalah bahan komposit yang terdiri dari beton biasa dan bahan lain yang berupa serat. Serat umumnya berupa batang-batang dengan diameter antara 0,005 sampai 0,5 mm dan panjang sekitar 25 mm sampai 100 mm (Tjokrodinuljo, 2007). Menurut Sorounshian dan Bayashi (1987) dalam Sarah (2016) kelebihan beton serat dibanding beton tanpa serat dalam beberapa sifat strukturnya antara lain keliatan (*ductility*), ketahanan terhadap beban kejut (*impact resistance*), kuat tarik dan lentur (*tensile and flexural strength*), kelelahan (*fatigue life*), ketahanan terhadap pengaruh susut (*shrinkage*) dan ketahanan terhadap keausan (*abrasion*). Penyebaran serat dapat dilihat pada gambar 2.12.



Sumber: Sorounshian dan Bayashi dalam Sarah (2016)

Gambar 2.12 Penyebaran serat pada beton

Sifat-sifat mekanika beton serat dipengaruhi oleh jenis serat, aspek rasio serat (*fiber aspect ratio*), volume fraksi serat, kekuatan beton, geometri dan pembuatan benda uji serta agregat. Aspek rasio (l/d) yaitu rasio antara panjang serat (l) dan diameter serat (d). Volume *fraction* yaitu persentase volume serat yang ditambahkan pada setiap satuan volume adukan (Hannant dalam Widodo, 2015).

Menurut As'ad dalam Sarah (2016), kelebihan penggunaan serat dalam beton antara lain yaitu:

1. Posisi penyebaran serat secara acak dalam beton akan memberikan ketahanan menahan beban gempa dan beban angin dari segala arah,
2. Memperbaiki perilaku deformasi seperti ketahanan terhadap dampak, daktilitas yang lebih besar, kuat lentur, dan kapasitas torsi yang lebih baik,
3. Meningkatkan ketahanan beton terhadap keretakan akibat pembebanan,
4. Meningkatkan ketahanan beton bertulang dari korosi yang disebabkan oleh pengelupasan dan retak pada selimut beton.

Serat yang ditambahkan kedalam campuran beton akan membentuk ikatan komposit dengan bahan penyusun beton lainnya. Pada saat beton menerima beban, beton akan mengalami retak pertama kemudian akan diikuti oleh banyak retak halus lainnya. Penambahan serat pada beton ketika beton menerima beban, maka kekuatan beton menahan beban akan dialihkan ke serat. Hal ini dikarenakan serat dianggap sebagai tulangan tambahan sehingga serat akan menahan beban yang ada sesuai dengan modulus elastisitasnya. Pasta beton akan semakin kokoh/stabil dalam menahan beban karena aksi serat yang mengikat dengan bahan penyusun beton lainnya (Zulma, 2017).

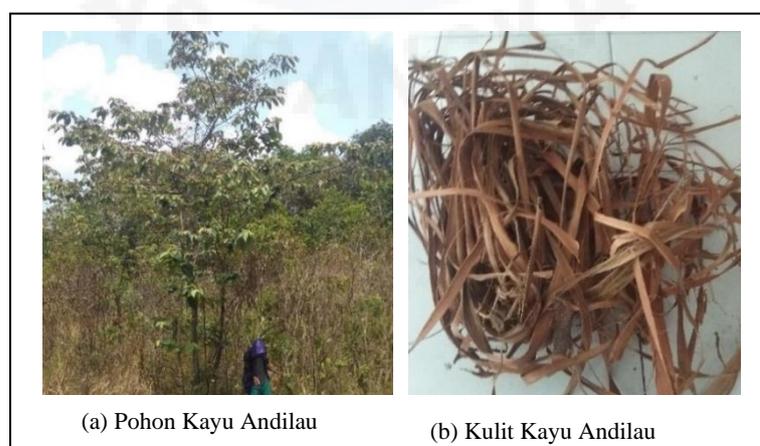
Penggunaan serat alami sebagai campuran dalam beton semakin meluas, berbagai penelitian menunjukkan penggunaan serat ke dalam beton mampu meningkatkan karakteristik beton dalam persentase tertentu. Serat alami yang digunakan dalam campuran beton seperti serat rami, ijuk, aren, bambu, kayu, dll. Penelitian Yanti, dkk., (2019) menunjukkan kenaikan kuat tekan beton dari persentase penambahan serat daun nanas sebesar 1%, 3% dan 5% namun pada 7% penambahan serat kuat tekan beton mengalami penurunan. Dalam penelitian Sidabutar (2014) penambahan serat bambu dengan persentase 1%, 1,5% dan 2% mampu meningkatkan kuat tekan dan kuat lentur beton dibandingkan dengan beton normal tanpa serat, namun pada persentase 1,5% dan 2% kuat tekan dan kuat lenturnya menurun dari kekuatan 1%. Sementara itu pada penelitian Dekky (2019) menggunakan serat ijuk terhadap kuat lentur beton mengalami kenaikan pada persentase 2% sedangkan pada persentase 4% penambahan serat kuat lentur beton

mengalami penurunan. Dari beberapa referensi sebelumnya dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin besar penambahan persentase serat justru akan membuat kekuatan beton mengalami penurunan.

2.2.7 Alkali Treatment Pada Serat Kulit Kayu Andilau

1. Serat Kulit Kayu Andilau

Kayu Andilau dikenal dengan nama latin *Commersonia bartramia* (L.) Merr. adalah jenis pohon kecil dari suku *Malvaceae*. Tumbuhan ini menyebar mulai dari India, Asia Tenggara, Tiongkok Selatan, melalui Nusantara hingga ke Pasifik. Tumbuhan ini dikenal dengan penyebutan yang berbeda-beda disetiap daerah di Indonesia (Melzerr dan Plumb, 2007). Tumbuhan ini di beberapa daerah dikenal dengan nama *Andilo* (Batak), *Nilau* (Palembang), *Kelimpuk* (Bangka). Nama tumbuhan ini dalam bahasa Inggris dikenal dengan nama *brown kurrajong* atau *scrub christmas tree*. Pohon kecil yang mempunyai tinggi sekitar 1-15 m. Pohon ini mudah ditemukan di hutan-hutan sekunder, tebing atau tepi hutan. Tumbuhan ini hidup di wilayah-wilayah dengan musim kemarau yang rendah, pada tempat dengan banyak sinar matahari atau yang sedikit teduh, sampai ketinggian 1.250 mdpl. Kayu Andilau merupakan kayu yang ringan dan kurang awet, akan tetapi dapat dipakai sebagai kayu rumah, konstruksi atap, pagar halaman, dll. Hanya saja kayu ini umumnya berukuran kecil, bengkok-bengkok, sehingga tidak banyak dimanfaatkan kecuali sebagai kayu bakar.



Sumber : Data Penelitian

Gambar 2.13 Pohon dan kulit kayu Andilau

2. Alkali *Treatment*

Alkali *treatment* merupakan perlakuan secara alkali terhadap serat alami yang bertujuan untuk meningkatkan kompatibilitas serat sebagai bahan penguat dalam campuran komposit. Perlakuan secara kimia ini berpengaruh secara langsung terhadap struktur serat dan mengubah komposisi kimia serat, mengurangi kecenderungan penyerapan kelembaban oleh serat, sehingga akan memberikan ikatan antara serat dengan matriks lainnya yang lebih baik. Hal ini akan menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik. Kekuatan dan kekakuan dari serat tanaman terutama tergantung pada kandungan selulosanya, peningkatan kandungan selulosa adalah faktor kunci untuk meningkatkan sifat serat.

Menurut Onggo H. dan Triastuti J., (2004) serat alami umumnya mengandung unsur-unsur seperti selulosa, hemiselulosa, lignin, pectin dan dalam penggunaannya pada campuran beton unsur-unsur tersebut kurang mampu mengikat dalam campuran beton sehingga diperlukan perlakuan awal dengan alkali *treatment* untuk mereduksi unsur-unsur tersebut, sehingga tersisa selulosa sebagai bahan utama pada serat. Sifat lignin memberikan efek kurang baik pada serat alami, sedangkan sifat selulosa memberikan pengaruh positif. Perlakuan khusus pada serat akan menghilangkan lignin dan mempertahankan kandungan selulosa (Salim, 2016).

Perlakuan alkali dengan NaOH dari serat alami adalah salah satu perlakuan kimia yang telah dikenal untuk meningkatkan kandungan selulosa melalui penghilangan hemiselulosa dan lignin. Perlakuan alkali adalah metode umum untuk membersihkan dan memodifikasi permukaan serat untuk menurunkan tegangan permukaan dan meningkatkan adhesi antarmuka antara serat alami dan matriks polimer. Perlakuan alkali ini juga bermanfaat mengeluarkan serabut yang tersisa pada serat. Proses perlakuan alkali dilakukan dengan cara merendam serat kulit Kayu Andilau didalam wadah yang telah diisi larutan alkali (NaOH) dengan konsentrasi 0,5 Mol selama 4 jam. Setelah waktu perendaman serat diangkat untuk dibilas kemudian dikeringkan dengan diangin-anginkan.

Pada beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan beberapa variasi lama waktu perendaman serat mulai dari 2, 4,6,8 hingga 12 jam dengan jenis serat yang

berbeda untuk mengamati waktu yang tepat untuk perendaman serat menggunakan larutan NaOH. Dalam penelitian Joni, dkk., (2009) menggunakan serat kulit Kayu *Khombouw* dengan perbandingan waktu perendaman 2,4,6 dan 8 jam didapati hasil pengujian tegangan tarik maksimum serat pada perendaman selama 4 jam. Witono, (2013) meneliti pengaruh perlakuan alkali (NaOH) terhadap morfologi dan kuat tarik serat Mendong dengan waktu perendaman 2,4, dan 6 jam didapati hasil yang menunjukkan waktu pelarutan alkali lebih dari 4 jam akan menyebabkan serat menjadi turun kekakuannya. Muliadi, (2018) dan Amna (2014) pada penelitian yang berbeda menggunakan serat tandan kosong kelapa sawit dengan waktu perendaman selama 12 jam untuk pengujian kuat lentur beton didapatkan hasil pengujian kuat lentur beton mengalami kenaikan. Yanti, dkk., (2019) menggunakan serat Daun Nanas dengan perlakuan alkali terhadap kuat tekan dan kuat lentur beton dengan waktu perendaman serat selama 4 jam.

3. Natrium Hidroksida (NaOH)

Natrium Hidroksida (NaOH) atau *Sodium Hydroxide* adalah sejenis basa logam kaustik. Zat ini digunakan diberbagai macam bidang industri. Kebanyakan digunakan sebagai basa dalam proses produksi bubur kayu, kertas, tekstil, air minum, sabun dan deterjen. Kegunaan NaOH ini adalah untuk menghilangkan *lignin*, *silika hemiselulosa*, dan *empulur* dari serat. Hal ini bertujuan agar memiliki ikatan lebih baik antara serat dan matriks dan meningkatkan kekasaran permukaan serat agar dapat terjadi interaksi yang lebih baik yang menjadi tujuan utama pengolahan secara kimia pada serat dalam campuran beton (Rohatgi, P., dalam Fitriah, 2013).

Konsentrasi merupakan satuan kepekatan dari suatu larutan. Konsentrasi didefinisikan sebagai banyaknya mol zat terlarut dalam satu liter larutan. Jika sudah diketahui molaritas yang digunakan maka penggunaan rumus molaritas bertujuan untuk mengetahui berapa gram NaOH padat yang dilarutkan dalam 1 Liter air. Di bawah ini adalah rumus molaritas yang dapat digunakan yaitu sebagai berikut:

$$M = \frac{n}{v} \dots\dots\dots(2.5)$$

dengan:

M = molaritas (mol/L atau M)

n = jumlah mol zat terlarut (mol)

v = *volume* (Liter)

Dalam beberapa penelitian sebelumnya beberapa variasi konsentrasi larutan NaOH untuk perendaman serat telah dilakukan. Penelitian Vista, dkk., (2015) menggunakan serat Daun Gwang dengan konsentrasi perbandingan konsentrasi NaOH sebesar 0,25 mol, 0,5 mol dan 0,75 mol didapatkan hasil pengujian kekuatan tekan dan lentur beton serat mengalami kenaikan seiring dengan penambahan konsentrasi larutan tersebut. Sementara itu pada penelitian Handoko, dkk., (2013) menggunakan serat Aren dengan perbandingan konsentrasi NaOH sebesar 0,25 mol dan 0,5 Mol didapatkan bahwa terjadi peningkatan kuat tekan dan kuat tarik belah beton serat ampas aren dengan alkali *treatment* jika dibandingkan dengan beton normal maupun dengan beton serat ampas aren tanpa alkali *treatment* kuat tarik beton optimum terjadi pada penambahan serat dengan konsentrasi 0,5 Mol NaOH.

2.2.8 Pengujian Bahan

Material-material yang digunakan dalam penelitian ini akan dilakukan pengujian terlebih dahulu sebelum digunakan pada campuran beton sebagai berikut.

1. Analisa saringan agregat kasar dan halus

Pengujian ini dimaksudkan untuk menentukan pembagian butir (*gradasi*) agregat halus dan agregat kasar dengan menggunakan saringan. Berdasarkan SNI-03-1968-1990 analisa saringan adalah penentuan persentase berat butiran agregat yang lolos dari satu set saringan kemudian angka-angka persentase digambarkan pada grafik pembagian butir.

Rumus yang digunakan sebagai berikut ini.

a. Persentase tertahan pada masing-masing saringan

$$(\%) \text{ tertahan} = \frac{\text{Berat tertahan}}{\text{Berat total}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.6)$$

b. Persentase lolos pada masing-masing saringan

$$(\%) \text{ lolos} = 100\% - \text{persentase tertahan} \dots\dots\dots(2.7)$$

c. Persentase berat tertahan kumulatif

$$(\%) \text{ Berat Tertahan Kumulatif} = 100\% - \text{Persentase Lolos} \dots\dots\dots(2.8)$$

d. Modulus kehalusan

$$\text{Modulus kehalusan} = \frac{\text{Jumlah Berat tertahan kumulatif}}{100\%} \dots\dots\dots(2.9)$$

2. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar

Menurut SNI-03-1969-2008, pengujian ini dimaksudkan untuk menentukan berat jenis (*Bulk*), berat jenis kering permukaan jenuh (*Saturated Surface Dry = SSD*), berat jenis semu (*Apparent*), serta penyerapan agregat kasar. Hasil dari pengujian ini nantinya akan digunakan untuk menentukan berat jenis campuran. Berat jenis (*Bulk*) adalah perbandingan antara berat agregat kering dan berat air suling yang isinya sama dengan isi agregat dalam keadaan jenuh pada suhu tertentu. Berat jenis kering permukaan jenuh (*Saturated Surface Dry = SSD*), adalah perbandingan antara berat agregat kering permukaan jenuh dan berat air suling yang isinya sama dengan isi agregat dalam keadaan jenuh pada suhu tertentu. Berat jenis semu (*Apparent*) adalah perbandingan antara berat agregat kering dan berat air suling yang isinya sama dengan isi agregat dalam keadaan kering pada suhu tertentu. Penyerapan (*Absorption*) adalah perbandingan berat air yang dapat diserap pori terhadap berat agregat kering, dinyatakan dalam persen.

Rumus yang digunakan sebagai berikut ini.

a. Berat jenis (*Bulk*) = $\frac{B_k}{B_j - B_a} \dots\dots\dots(2.10)$

b. Berat jenis kering permukaan jenuh *SSD* = $\frac{B_j}{B_j - B_a} \dots\dots\dots(2.11)$

c. Berat jenis semu (*Apparent*) = $\frac{B_k}{B_k - B_a} \dots\dots\dots(2.12)$

d. Penyerapan (*Absorption*) = $\frac{B_j - B_k}{B_k} \times 100\% \dots\dots\dots(2.13)$

dengan:

B_j : Berat benda uji kering permukaan jenuh (*SSD*) (gram),

B_k : Berat benda uji kering oven (gram),

B_a : Berat benda uji kering permukaan jenuh dalam air (gram),

B_t : Berat piknometer + benda uji + air (gram).

3. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus

Berdasarkan SNI-03-1970-2008 pengujian ini dimaksudkan untuk menentukan berat jenis (*Bulk*), berat jenis kering permukaan jenuh (*Saturated Surface Dry = SSD*), berat jenis semu (*Apparent*) serta penyerapan agregat halus. Hasil dari pengujian ini nantinya akan digunakan untuk menentukan berat jenis campuran.

Rumus yang digunakan sebagai berikut ini.

$$a. \text{ Berat jenis (Bulk)} = \frac{B_k}{B_a + B_j - B_t} \dots\dots\dots(2.14)$$

$$b. \text{ Berat jenis SSD} = \frac{B_j}{B_a + B_j - B_t} \dots\dots\dots(2.15)$$

$$c. \text{ Berat jenis semu (Apparent)} = \frac{B_k}{B_a + B_k - B_t} \dots\dots\dots(2.16)$$

$$d. \text{ Penyerapan (Absorption)} = \frac{B_j - B_k}{B_k} \times 100\% \dots\dots\dots(2.17)$$

dengan :

B_j : Berat benda uji kering permukaan jenuh (*SSD*) (gram).

B_k : Berat benda uji kering oven (gram).

B_a : Berat benda uji kering permukaan jenuh dalam air (gram).

B_t : Berat piknometer + benda uji + air (gram).

4. Pengujian berat isi agregat kasar dan halus

Berat isi adalah perbandingan antara berat dan isi. Pengujian berat isi agregat bertujuan untuk mengetahui berat isi dari agregat tersebut (SNI-03-1973-1990).

Adapun rumus yang digunakan yaitu:

$$\text{Berat isi} = \frac{W}{V} \dots\dots\dots(2.18)$$

dengan:

W : Berat benda uji (kg),

V : Isi takaran (liter).

5. Pengujian kadar air agregat

Pengujian ini dimaksudkan untuk menentukan kadar air agregat dengan cara pengeringan (SNI-03-1971-1990). Kadar air agregat adalah besarnya perbandingan antara berat air yang dikandung agregat dengan agregat dalam keadaan kering, dinyatakan dalam persen.

Rumus yang dipergunakan yaitu:

$$\text{Kadar air agregat} = \frac{W_3 - W_5}{W_5} \times 100\% \dots\dots\dots(2.19)$$

Dengan:

W_3 : Berat benda uji awal (gram).

W_5 : Berat benda uji kering (gram).

6. Pengujian keausan agregat kasar dengan mesin *Los Angeles*

Pengujian ini dimaksudkan untuk menentukan ketahanan agregat kasar terhadap keausan dengan menggunakan mesin *Los Angeles* (SNI-03-2417-2008). Keausan tersebut dinyatakan dengan perbandingan antara berat tahan aus lewat saringan no.12 terhadap berat semula dalam persen.

Rumus yang digunakan yaitu:

$$\text{Keausan Agregat} = \frac{a-b}{a} \times 100\% \dots\dots\dots(2.20)$$

Dengan :

a : Berat benda uji semula (gram).

b : Berat benda uji tertahan saringan No. 12 (gram).

2.2.9 Rancangan Benda Uji

Beton normal umumnya direncanakan dengan variasi kuat tekan antara 15 MPa hingga 30 MPa. Variasi kuat tekan berbeda serta sifat bahan penyusun yang berbeda pula, maka pelaksanaan beton dituntut untuk direncanakan dengan perbandingan adukan beton sesuai aturan yang telah ditentukan.

Perancangan adukan beton normal dimaksud untuk mendapatkan beton yang sebaik-baiknya, yang sesuai dengan bahan dasar yang tersedia, serta keinginan pembuatan sesuai yang disyaratkan, antara lain (Tjokrodinuljo, 2007):

- a) Kuat tekannya sesuai yang di syaratkan,
- b) Mudah dikerjakan,
- c) Awet,
- d) Murah.

Langkah-langkah pokok cara perancangan campuran adukan beton normal menurut (SNI-03-2834-2000), sebagai berikut ini.

1. Perhitungan nilai deviasi standar

Deviasi standar S ialah alat ukur tingkat mutu pelaksanaan pembuatan pembetonan. Nilai S ini digunakan sebagai salah satu data masukan pada perencanaan campuran adukan beton.

- a) Jika pelaksana tidak mempunyai data pengalaman hasil pengujian contoh beton pada masa lalu, maka nilai deviasi standar S tidak dapat dihitung.
- b) Jika pelaksana produsen beton (pembuat beton) mempunyai data pengalaman, maka nilai deviasi standar S ditetapkan.

Nilai deviasi standar dihitung dengan rumus:

$$S = \sqrt{\sum \frac{(f_c - f_{c,r})^2}{N-1}} \dots\dots\dots (2.21)$$

dengan:

- S : Deviasi standar,
 f_c : Kuat tekan masing-masing silinder beton (MPa),
 $f_{c,r}$: Kuat tekan rata-rata (MPa),
 N : Banyaknya nilai kuat tekan beton.

2. Perhitungan nilai tambah m (margin)

Perhitungan nilai margin (m) dihitung dengan 2 cara, sebagai berikut.

a) Jika pelaksanaan mempunyai pengalaman lapangan, maka nilai tambah dihitung berdasarkan nilai deviasi standar S dari rumus sebelumnya, dan dengan 2 rumus berikut (diambil yang terbesar):

$$m = 1,34 \cdot S \dots\dots\dots(2.22)$$

atau

$$m = 2,33 S - 3,5 \dots\dots\dots(2.23)$$

b) Jika pelaksana tidak mempunyai pengalaman lapangan, maka nilai tambah m diambil dari tabel 2.8.

Tabel 2.8 Nilai tambah m jika pelaksana tidak mempunyai pengalaman

Kuat tekan yang disyaratkan, f_c' (MPa)	Nilai tambah (MPa)
Kurang dari 21	7,0
21 s.d. 35	8,5
Lebih dari 35	10,0

Sumber: SNI 03-2847-2002

3. Penetapan kuat tekan beton yang disyaratkan (f_c') pada umur tertentu.

Pada penelitian ini kuat tekan beton yang direncanakan sebesar 20 MPa untuk kuat tekan beton normal.

4. Kuat tekan rata-rata perlu (f'_{cr})

Kuat tekan rata-rata perlu diperoleh dengan rumus:

$$f'_{cr} = f_c' + m \dots\dots\dots(2.24)$$

dengan:

f'_{cr} : Kuat tekan rata-rata perlu (MPa),

f_c' : Kuat tekan yang disyaratkan (MPa),

m : Nilai tambah (MPa).

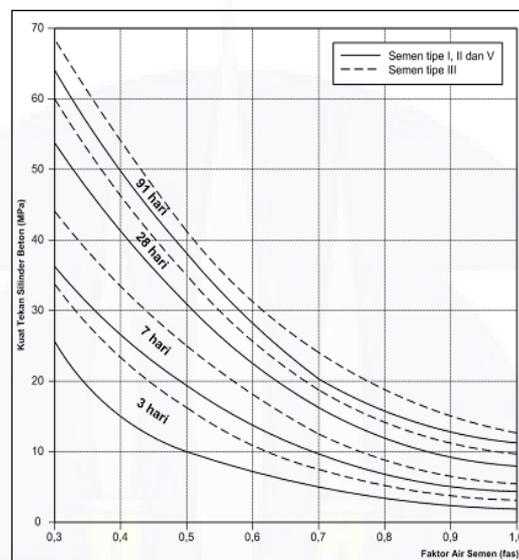
5. Penetapan jenis semen

Semen yang terdiri dari berbagai macam tipe sesuai dengan tujuan pembuatan benda uji atau struktur yang direncanakan. Pada penelitian jenis semen yang digunakan adalah semen *portland* komposit merek tiga roda tipe 1.

6. Penetapan jenis agregat

Jenis agregat kasar dan halus, berupa agregat alami (kerikil alami dan pasir alami). Sebelum dilakukan pembuatan benda uji, agregat akan dilakukan pengujian untuk mengetahui gradasi, berat jenis, kadar air, berat isi, serta keausan agregat kasar.

7. Penetapan nilai faktor air semen.



Sumber: SNI 03-2834-2000

Gambar 2.14 Hubungan faktor air semen dan kuat tekan silinder beton

8. Penetapan nilai *slump*

Penetapan nilai *slump* dilakukan dengan mempertimbangkan faktor berikut:

- Cara pengangkutan adukan beton,
- Cara penuangan adukan beton,
- Cara pemadatan beton segar,
- Jenis struktur yang dibuat.

9. Penetapan besar butir agregat maksimum

Penetapan besar butir agregat maksimum pada beton normal, ada 3 pilihan, yaitu 40 mm, 20 mm, atau 10 mm.

10. Jumlah air yang diperlukan per meter kubik beton

Jumlah air yang di perlukan per meter kubik beton, diperkirakan berdasarkan ukuran maksimum agregat, jenis agregat, dan slump yang diinginkan, seperti yang terlihat pada tabel 2.9.

Tabel. 2.9 Perkiraan kebutuhan air per meter kubik beton

Besarnya ukuran maks. agregat (mm)	Jenis agregat	Kebutuhan air per meter kubik beton (liter)			
		Slump (mm)			
		0-10	10-30	30-60	60-180
10	Alami	150	180	205	225
	Batu pecah	180	205	230	250
20	Alami	135	160	180	195
	Batu pecah	170	190	210	225
40	Alami	115	140	160	175
	Batu pecah	155	175	190	205

Sumber: SNI 03-2834-2000

Keterangan: Apabila agregat halus dan agregat kasar yang dipakai dari jenis yang berbeda (alami dan pecah), maka jumlah air yang diperkirakan diperbaiki oleh rumus:

$$A = 0,67 A_h + 0,33 A_k \dots\dots\dots(2.25)$$

dengan:

A : Jumlah air yang dibutuhkan, jenis/m³

A_h : Jumlah air yang dibutuhkan menurut jenis agregat halusnya

A_k : Jumlah air yang dibutuhkan menurut jenis agregat kasarnya

11. Berat semen yang diperlukan

Berat semen yang diperlukan didapat dengan perhitungan menggunakan rumus yaitu:

$$W_{smn} = \frac{1}{f_{as}} \cdot W_{air} \dots\dots\dots(2.26)$$

dengan:

f_{as} : Nilai faktor air semen,

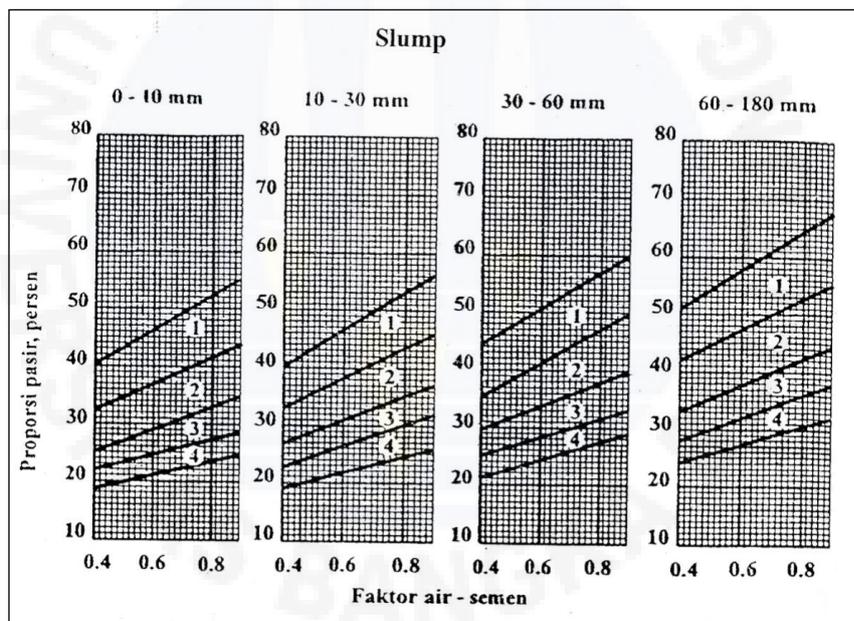
W_{air} : Berat air per meter kubik.

12. Penetapan jenis agregat halus

Agregat halus diklasifikasikan menjadi 4 jenis, yaitu pasir kasar, pasir agak kasar, pasir agak halus, dan pasir halus, penentuan jenis agregat halus itu didasarkan pada tabel 2.6.

13. Proporsi berat agregat halus terhadap agregat campuran

Perbandingan nilai antara berat agregat halus dan agregat kasar diperlukan untuk memperoleh gradasi agregat campuran yang baik. Penetapan perbandingan ini dilakukan dengan memperhatikan besar butir maksimum agregat kasar, nilai slump, faktor air semen, dan daerah gradasi agregat halus. Berdasarkan data tersebut dan gambar 2.15 maka akan diperoleh persentase berat agregat halus terhadap berat agregat campuran.



Sumber: SNI 03-2834-2000

Gambar 2.15 Proporsi agregat halus pada agregat maksimum 20 mm

14. Berat jenis agregat campuran

Berat jenis agregat campuran dihitung dengan rumus:

$$b_j \text{ camp} = \frac{kh}{100} \times b_{jh} + \frac{kk}{100} \times b_{jk} \dots \dots \dots (2.27)$$

dengan:

bj_{camp} : Berat jenis agregat campuran,

bj_h : Berat jenis agregat halus,

bj_k : Berat jenis agregat kasar,

kh : Persentase agregat halus terhadap agregat campuran,

kk : Persentase berat agregat kasar terhadap agregat campuran,

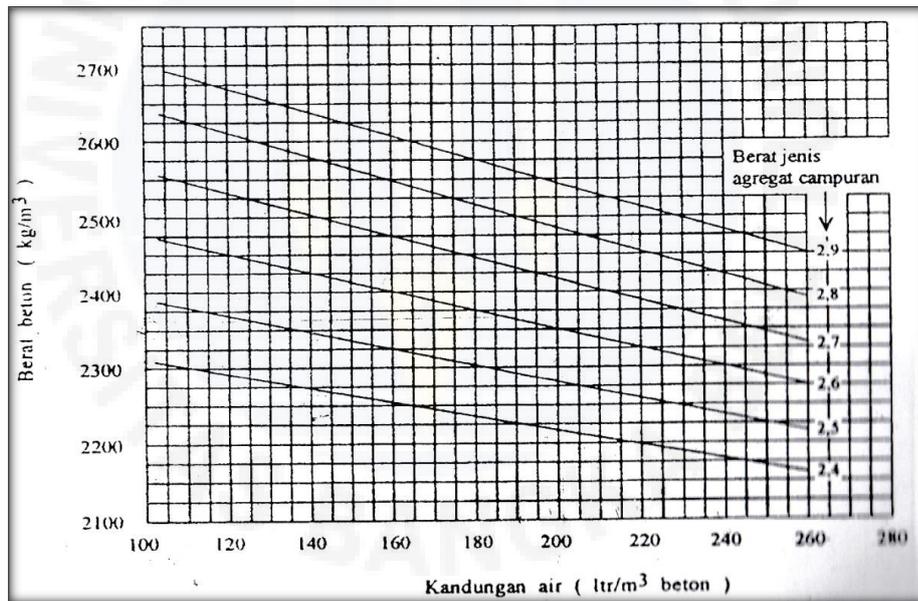
Berat jenis agregat halus dan agregat kasar diperoleh dari hasil pemeriksaan uji laboratorium, namun jika belum ada maka dapat diambil nilai sebesar:

$bj = 2,60$, untuk agregat tak dipecah/alami,

$bj = 2,70$, untuk agregat pecahan.

15. Perkiraan berat beton

Dengan data berat jenis agregat campuran dan kebutuhan air tiap meter kubik betonnya maka berat beton dapat diperkirakan dengan gambar 2.16



Sumber: SNI 03-2834-2000

Gambar 2.16 Hubungan kandungan air, berat jenis agregat campuran dan berat beton

16. Kebutuhan berat agregat campuran

Kebutuhan berat agregat campuran dihitung dengan rumus:

$$W_{agr.cap} = W_{btn} - W_{air} - W_{smn} \dots \dots \dots (2.28)$$

dengan:

- $W_{agr.cap}$: Kebutuhan berat agregat campuran per meter kubik beton (kg),
 W_{btn} : Berat beton per meter kubik beton (kg),
 W_{air} : Berat air per meter kubik beton (kg),
 W_{smn} : Berat semen per meter kubik beton (kg).

17. Hitung berat agregat halus yang diperlukan

Kebutuhan agregat halus dihitung dengan rumus:

$$W_{agr.h} = k_h \cdot W_{agr.cap} \dots\dots\dots(2.29)$$

dengan:

k_h : Persentase berat agregat halus terhadap agregat campuran,

$W_{agr.cap}$: Kebutuhan berat agregat campuran per meter kubik beton (kg).

18. Hitung berat agregat kasar yang diperlukan

Kebutuhan agregat kasar dihitung dengan rumus:

$$W_{agr.k} = k_k \cdot W_{agr.cap} \dots\dots\dots(2.30)$$

dengan:

k_k : Persentase berat agregat kasar terhadap agregat campuran,

$W_{agr.cap}$: Kebutuhan berat agregat campuran per meter kubik beton (kg).