

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Pengertian Beton

Beton merupakan bahan yang terdiri atas agregat, semen dan air yang di campur bersama-sama dalam keadaan plastis dan mudah untuk di kerjakan. Karena sifat ini menyebabkan beton untuk mudah dibentuk sesuai dengan keinginan pengguna. Sesaat setelah pencampuran, pada adukan terjadi reaksi kimia yang pada umumnya bersifat hidrasi dan menghasilkan suatu pengerasan. Bahan dasar beton, yaitu pasta semen dan agregat yang mempunyai sifat tegangan regangan yang linier dan getas dalam menahan gaya tekan. Material yang getas cenderung mengalami retak tarik yang tegak lurus terhadap arah regangan tarik maksimum. Pada saat menahan beban uni aksial tekan, beton idealnya mengalami retak-retak yang arahnya paralel terhadap arah tegangan tekan maksimum.

Beton adalah suatu campuran yang terdiri dari pasir, kerikil, batu pecah atau agregat-agregat lain yang dicampur jadi satu dengan satu pasta yang terbuat dari semen dan air dan membentuk suatu massa yang mirip dengan batuan, terkadang satu atau lebih bahan aditif ditambah untuk menghasilkan beton dengan karakteristik tertentu, seperti kemudahan pekerjaan (*workability*), durabilitas, dan waktu pengerasan. Penambahan bahan tambah akan mempengaruhi kemudahan pekerjaan dan tanpa harus mengurangi tingkat kekuatan kuat tekan rencananya. Beton merupakan material komposit yang rumit. Beton dapat dibuat dengan mudah bahkan oleh mereka yang tidak punya pengertian sama sekali dengan beton teknologi, tetapi pengertian yang salah dari kesederhanaan ini sering menghasilkan persoalan pada produk, antara lain reputasi jelek dari beton sebagai material bangunan. Sebagai material komposit, sifat beton sangat tergantung pada sifat unsur masing-masing serta interaksi mereka.

Beton mempunyai kuat tekan yang besar sementara kuat tarik yang kecil. Oleh karena itu untuk struktur bangunan, beton selalu dikombinasikan

dengan tulangan baja untuk memperoleh kinerja yang tinggi. Beton ditambah dengan tulangan baja menjadi beton bertulang (*reinforced concrete*) dan jika ditambahkan lagi dengan baja prategang akan menjadi beton pratekan (*prestressed concrete*). Beton adalah suatu material komposit yang terdiri dari campuran agregat (baik halus maupun kasar) yang saling terikat secara kimiawi melalui produk hidrasi semen portland. (Imran & Zulkifli, 2019)

Beton adalah hasil dari kombinasi bahan penyusunnya yang terdiri dari bahan semen hidrolik (semen *portland*), agregat kasar, agregat halus, air, dan bahan tambahan seperti *admixture* atau *additive*. Untuk memahami dan mempelajari perilaku elemen gabungan dalam beton, diperlukan pemahaman mendalam mengenai karakteristik masing-masing komponennya, seperti sifat-sifat semen, agregat kasar, agregat halus, air, dan bahan tambahan lainnya. Dengan pemahaman yang baik tentang sifat-sifat ini, kita dapat menggabungkan bahan-bahan tersebut secara optimal untuk menciptakan beton dengan kinerja yang diinginkan. Beton merupakan hasil dari interaksi mekanis dan kimiawi dari bahan-bahan penyusunnya. Terdapat beberapa parameter yang sangat memengaruhi kekuatan beton. Hal-hal tersebut meliputi kualitas semen, proporsi semen dalam campuran, kekuatan dan kebersihan agregat, interaksi atau adhesi antara pasta semen dan agregat, proses pencampuran yang tepat dari bahan pembentuk beton, penempatan yang akurat, proses penyelesaian dan pemadatan beton, serta perawatan selama proses pengerasan. Keseluruhan proses ini memiliki peran penting dalam menentukan kekuatan dan kualitas akhir dari beton yang dihasilkan. (Zulkarnain, 2021)

Sifat-sifat dari beton pada umumnya dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain kualitas bahan yang digunakan, metode pengerjaan yang diterapkan, dan perawatan selama proses pembuatannya. Karakteristik dari semen memiliki dampak besar terhadap kualitas beton serta kecepatan pengerasannya. Gradasi dari agregat halus memengaruhi proses pengerjaan beton, sedangkan gradasi dari agregat kasar mempengaruhi

kekuatan akhir dari beton tersebut. Tidak hanya itu, kualitas dan jumlah air yang digunakan dalam campuran juga memainkan peran penting dalam proses pengerasan dan menentukan kekuatan akhir dari beton yang dihasilkan. Semua faktor ini saling berinteraksi dan mempengaruhi sifat-sifat keseluruhan dari beton yang dibuat (Diah, 2019)

Beton adalah hasil dari campuran semen, agregat, dan air yang akan mengeras menjadi material yang kokoh. Beton dikenal memiliki ketahanan dan kekuatan tekan yang tinggi, namun memiliki kelemahan dalam kekuatan tariknya. Oleh karena itu, dalam aplikasinya dalam konstruksi, beton sering membutuhkan bahan tambahan, seperti baja tulangan, untuk meningkatkan kekuatan tariknya. Kombinasi beton dengan baja tulangan inilah yang dikenal sebagai beton bertulang. Baja tulangan ditempatkan di dalam struktur beton untuk mengimbangi kelemahan beton dalam menahan gaya tarik, sehingga membentuk struktur yang kokoh dan tahan lama dalam berbagai aplikasi konstruksi. (Putra, 2021)

Ada beberapa faktor yang memengaruhi kekuatan tekan beton. Ini termasuk kualitas bahan yang digunakan, rasio air-semen, gradasi agregat, ukuran maksimum agregat, proses pengerjaan seperti pencampuran, pengangkutan, pemadatan, dan perawatan, serta umur beton. Balok merupakan elemen struktural yang menerima gaya-gaya dalam arah transversal terhadap sumbunya, yang menyebabkan momen lentur dan gaya geser sepanjang bentangannya. Fungsi balok adalah untuk mentransfer beban dari pelat lantai ke kolom sebagai penyangga vertikal. Biasanya, balok dicor bersama dengan pelat secara monolitik dan diperkuat struktural dengan pemasangan tulangan pada bagian bawah atau atas dan bawahnya. Terdapat dua hal utama yang dialami oleh balok, yaitu tekanan dan tarikan, yang disebabkan oleh pengaruh lentur atau gaya lateral

2.2 Sifat-Sifat Beton

Ada dua hal yang harus dipenuhi dalam pembuatan beton yaitu sifat-sifat yang harus dipenuhi dalam jangka waktu lama oleh beton yang mengeras seperti kekuatan, keawetan dan kestabilan volume. Kedua sifat yang harus

dipenuhi dalam jangka waktu pendek ketika beton dalam kondisi plastis (*workability*) atau kemudahan pengerjaan tanpa adanya bleeding dan segregasi. Akan tetapi sifat ini tidak dapat dirumuskan dengan pasti dan berlaku untuk semua jenis bahan baku, kondisi lingkungan dan cuaca disekitar lokasi pekerjaan. Sebagai contoh, campuran yang mudah dikerjakan untuk pekerjaan lantai belum tentu akan mudah dikerjakan pada cetakan balok dengan penampang sempit serta mempunyai penulangan yang rapat.

Sifat-sifat beton diuraikan tidak selalu sama, dan sifat-sifat tersebut juga relatif ditinjau dari sudut pemakaian beton itu sendiri. Yang penting beton harus memiliki sifat-sifat yang sesuai dengan tujuan pemakaian beton. Misalnya satu kolom bangunan, yang terpenting harus memiliki kuat tekan yang tinggi yang cukup kuat untuk menahan beban bangunan itu, sedang sifat kerapatan air tidak penting untuk diperhatikan, sebaliknya suatu bak air harus memiliki sifat rapat air.

Pada umumnya sifat beton terdiri dari sifat fisis dan mekanis, yang dimaksudkan adalah sifat beton yang dikehendaki di dalam perencanaan suatu konstruksi perencanaan beton. Pada umumnya para teknisi dan perencana menghendaki bahwa bangunan beton tersebut haruslah kuat, tahan lama dan ekonomis serta memberikan perasaan aman dan tenang bagi pengguna.

Berikut ini sifat-sifat fisis dan mekanis beton terdiri atas :

- a. Kemudahan pekerjaan beton untuk dicampur, dicor dan diangkut serta di dapatkan tanpa mengurangi homogenitas beton dan bentuk tak terurai (*workability*).
- b. Ketahanan terhadap keadaan cuaca, pengaruh bahan kimia dan ketahanan terhadap erosi (*durability*).
- c. Kuat terhadap tekanan yang diberikan (*strength*)

2.3 Klasifikasi Beton

Pada umumnya klasifikasi beton dapat dibedakan berdasarkan berat jenis dan kuat tekannya.

Berdasarkan berat jenisnya beton dapat dibedakan menjadi beberapa jenis dapat diperhatikan pada tabel 2.1 sebagai berikut

Tabel 2. 1 Jenis Beton Berdasarkan Berat Jenis

No	Jenis Beton	Berat Jenis (kg/m ³)
1.	Beton Ringan	< 1800
2.	Beton Normal	2400
3.	Beton Berat	>3200

Kuat tekan beton dapat di klasifikasikan dalam beberapa jenis yang dapat dilihat pada tabel 2.2 sebagai berikut :

Tabel 2. 2 Jenis Beton Berdasarkan Mutu

No	Mutu Beton	Mpa
1.	Beton Mutu Rendah	< 20
2.	Beton Mutu Sedang	20 - 40
3.	Beton Mutu Tinggi	>40

Beton normal adalah beton yang memiliki berat isi antara (2200-2500) kg/m³ menggunakan agregat alam yang dipecah atau tanpa dipecah serta tidak menggunakan bahan tambah. Beton normal mempunyai kekuatan tekan nominal berkisar antara 20 Mpa – 40 Mpa. Dalam klasifikasi beton, yang termasuk beton normal adalah kelas II yaitu beton untuk pekerjaan-pekerjaan struktural secara umum. Pelaksanannya memerlukan keahlian yang cukup dan harus dilakukan dibawah pimpinan tenaga-tenaga ahli. Pada beton kelas II, untuk pertimbangan-pertimbangan tertentu bila diinginkan mutu lain dari pada mutu standar yang telah disebut diatas, maka hal itu diisinkan asal syarat-syarat yang ditentukan tetap dipenuhi. Dalam hal ini mutu beton tersebut dinyatakan dengan huruf (*f'c*) diikuti dengan angka dibelakangnya, yang menyatakan kekuatan karakteristik beton yang bersangkutan.

Karena beton ini memiliki kekuatan yang tinggi maka disebut dengan *High Strenght Concrete* (HSC) , selain memiliki kekuatan yang tinggi, beton ini juga memiliki keawetan yang tinggi sehingga disebut juga *High*

Performance Concrete (HPC). Perbedaan yang jelas antara beton mutu tinggi dan beton normal adalah faktor air semen (FAS) yang digunakan. Pada beton mutu tinggi faktor air semen yang digunakan rendah sehingga proses pengeringannya lebih cepat. Teknologi beton mutu tinggi telah banyak digunakan dalam konstruksi-konstruksi baik dalam konstruksi gedung, jembatan, maupun untuk konstruksi beton pratekan.

2.4 Beton Serat

Beton serat merupakan jenis beton komposit yang terdiri dari campuran beton biasa dengan bahan tambahan berupa serat atau fiber. Beton serat pada dasarnya merupakan beton konvensional yang ditambahkan dengan sejumlah kecil serat, baik serat sintetis, logam, kaca, atau serat alami seperti serat *polipropilena*, serat baja, atau serat karbon. Campuran beton serat terdiri dari komponen-komponen utama seperti semen, agregat halus, agregat kasar, dan kemudian diperkaya dengan serat dalam jumlah tertentu. Penambahan serat ini bertujuan untuk meningkatkan beberapa sifat beton seperti kekuatan tarik, ketahanan terhadap retakan, dan ketahanan terhadap deformasi. Kehadiran serat dalam beton serat memberikan tambahan dukungan dalam menahan tegangan, sehingga meningkatkan performa struktural beton dalam kondisi tertentu seperti dalam konstruksi jembatan, lantai, dinding, atau struktur bangunan lainnya yang memerlukan ketahanan yang lebih baik terhadap gaya tarik dan retakan. (Tjokrodinuljo, 2007)

Bahan serat yang digunakan dalam beton serat dapat bervariasi. Beberapa contoh bahan serat termasuk serat asbes, serat dari tumbuhan-tumbuhan seperti rami, bambu, atau ijuk, serat plastik seperti *polipropilena*, dan juga potongan kawat logam. Penggunaan serat berbeda-beda tergantung pada kebutuhan dan karakteristik yang diinginkan dalam beton yang akan dibuat. Misalnya, serat logam dapat memberikan kekuatan yang lebih tinggi, sementara serat plastik atau serat tumbuhan mungkin memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap korosi atau lingkungan tertentu. Namun, perlu diingat bahwa penggunaan serat asbes, karena

risiko kesehatan yang terkait dengannya, telah dikurangi secara signifikan atau dilarang di banyak negara. Oleh karena itu, penggunaan bahan serat yang lebih aman dan ramah lingkungan menjadi lebih disukai dalam aplikasi beton serat modern.(Mudjanarko et al., 2021)

Penggunaan serat ijuk dalam campuran beton dengan variasi konsentrasi 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% menghasilkan peningkatan kuat tarik belah beton. Perlu dicatat bahwa semakin tinggi konsentrasi serat ijuk dalam campuran beton, semakin tinggi pula nilai kuat tarik belah beton yang dihasilkan. Beton tanpa serat ijuk (beton normal): 2,149 MPa; Beton dengan 2,5% serat ijuk: 2,269 MPa; Beton dengan 5% serat ijuk: 2,401 MPa; Beton dengan 7,5% serat ijuk: 2,591 MPa; Beton dengan 10% serat ijuk: 2,667 MPa. Dari peningkatan nilai kuat tarik belah beton tersebut, terlihat bahwa penambahan serat ijuk dalam campuran beton memberikan hasil yang lebih tinggi daripada beton tanpa serat ijuk, dan peningkatannya cenderung seiring dengan peningkatan konsentrasi serat ijuk yang digunakan. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan serat ijuk secara proporsional dapat meningkatkan kekuatan tarik belah beton.(Ongky Perdana & Wahyuni, 2015).

Pada penelitian (Amna et al., 2014) terlihat bahwa penambahan serat tandan sawit dalam campuran beton pada variasi persentase 5%, 10%, dan 15% tidak memberikan peningkatan pada kuat tekan beton. Namun, terdapat peningkatan maksimum pada kuat lentur beton saat penambahan serat tandan sawit sebanyak 10%, yaitu sebesar 19,77% dari nilai kuat lentur normal. Berdasarkan analisis menggunakan persamaan regresi linier, komposisi optimum yang dapat meningkatkan kuat lentur beton dengan mempertahankan kuat tekan beton dalam batas rencana adalah pada variasi dengan 12% serat tandan sawit. Pada komposisi ini, tercapai kuat lentur sebesar 3,99 MPa, meningkat sekitar 14,33% dari nilai kuat lentur normal, dengan tetap mempertahankan kuat tekan beton sebesar 20 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa adanya titik optimal dalam penambahan serat tandan sawit dalam campuran beton yang dapat meningkatkan kuat

lentur tanpa mengorbankan kuat tekan beton hingga di luar batas yang direncanakan, dan titik optimal tersebut berada pada konsentrasi sekitar 12% serat tandan sawit.

Penelitian yang dilakukan (Sahrudin & Nadia, 2016) terlihat bahwa penambahan serat sabut kelapa pada campuran beton menyebabkan peningkatan kuat tekan beton. Semakin besar penambahan sabut kelapa pada campuran beton, berat volume beton cenderung menjadi lebih ringan. Diketahui bahwa terjadi peningkatan kuat tekan beton yang berserat pada dua variasi penambahan serat sabut kelapa penambahan serat sebesar 0,50% menghasilkan kuat tekan sebesar 272,14 kgf/cm², naik sebesar 29,55% dari nilai beton normal tanpa serat sabut kelapa sebesar 210,06 kgf/cm². Penambahan serat sebesar 0,125% menghasilkan kuat tekan sebesar 244,84 kgf/cm², naik sebesar 16,56% dari nilai beton normal tanpa penambahan serat sabut kelapa. Dapat disimpulkan bahwa penggunaan serat sabut kelapa dalam beton memberikan peningkatan signifikan pada kuat tekan beton. Penambahan serat sabut kelapa pada konsentrasi tertentu, terutama pada 0,50%, menunjukkan peningkatan yang paling signifikan dalam kuat tekan beton. Selain itu, penambahan serat sabut kelapa juga berkontribusi pada penurunan berat volume beton, yang menghasilkan beton yang lebih ringan secara keseluruhan.

2.5 Material Pembentuk Beton

Karena beton terbuat dari agregat yang diikat bersama oleh pasta semen yang mengeras maka kuat semen sangat memengaruhi kualitas beton. Pasta semen adalah lem, yang bila semakin tebal tentu semakin kuat. Namun jika terlalu tebal juga tidak menjamin lekatan yang baik, yang dicampur dalam perbandingan tertentu.

2.5.1 Semen

Arti kata semen adalah bahan yang mempunyai sifat *adhesive* maupun kohesif, yaitu bahan pengikat. Menurut Standar Industri Indonesia, SII 0013-1981, definisi semen portland adalah semen hidraulis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yaitu terutama terdiri dari

silikat-silikat kalsium yang bersifat hidraulis bersama dengan bahan-bahan yang biasa digunakan, yaitu gypsum. Gypsum merupakan salah satu bahan baku pada proses produksi semen. Pada proses produksi semen, gypsum berperan sebagai retarder yaitu untuk mengatur waktu pengerasan dan menghambat waktu pengikatan sehingga campuran akan tetap mudah dikerjakan dalam jangka waktu lama.

Bahan baku utama produksi semen diantaranya batu kapur, pasir besi, tanah liat, pasir silika dan gypsum. Perbandingan komposisi masing-masing bahan baku tersebut berpengaruh terhadap jenis dan karakteristik semen yang dihasilkan. Beberapa jenis karakteristik semen, memiliki aplikasi yang berbeda-beda diantaranya pada sektor konstruksi bangunan pelabuhan, perkapalan, perumahan, pertambangan, pengeboran minyak dan infrastruktur. Salah satu jenis semen adalah semen PCC (*Portland Composite Cement*). Semen tersebut merupakan turunan dari semen OPC (*Ordinary Portland Cement*). Bahan baku semen PCC sama dengan semen OPC tetapi pada semen PCC terdapat material aditif. Material aditif tersebut diantaranya *limestone, fly ash dan trass*. Ketiga aditif tersebut mempunyai kontribusi yang sangat penting sehingga semen PCC memiliki kualitas yang baik dari pada semen OPC.

Semen portland yang dijual dipasaran umumnya berkualitas baik dan dapat dipertanggung jawab. Namun untuk memberikan kepastian harus dicatat bahwa kelakuan semen tergantung merk, karena perbedaan baik dalam bahan mentah, yaitu kapur dan tanah liat yang dipakai.

Jenis-jenis semen portland terdiri atas :

- a. Type I adalah semen portland untuk tujuan umum. Jenis ini paling banyak diproduksi karena digunakan untuk hampir semua jenis konstruksi.
- b. Type II adalah semen portland modifikasi, adalah type yang sifatnya setengah type IV dan setengah type V. Belakangan lebih banyak diproduksi sebagai pengganti type IV.

- c. Type III adalah semen portland dengan kekuatan awal tinggi. Kekuatan 28 hari umumnya dapat dicapai dalam 1 minggu. Semen jenis ini umum dipakai ketika acuan harus dibongkar secepat mungkin atau Ketika struktur harus dapat cepat dipakai.
- d. Type IV adalah semen portland dengan panas hidrasi rendah yang dipakai untuk kondisi dimana kecepatan dan jumlah panas yang ditimbulkan harus minimum. Misalnya pada bangunan massif seperti bendungan gravitasi yang besar. Pertumbuhan kekuatan lebih lambat dari pada type I.
- e. Type V adalah semen portland tahan sulfat, yang dipakai untuk menghadapi aksi sulfat yang ganas. Umumnya dipakai di daerah dimana tanah atau airnya memiliki kandungan sulfat yang tinggi.

Selain itu ada type IA, IIA, IIIA. Huruf A singkatan dari *air entrained*, mengandung buih udara. Jenisnya sama dengan semen portland type tersebut, tetapi mengandung *air entrained* yang digiling bersama klinker pada waktu produksi. Material air entrained ini menghasilkan buih udara yang sangat kecil, terbagi rata dan saling terpisah dalam beton keras. Jenis ini dibuat untuk meninggikan ketahanan terhadap aksi membeku sampai mencair yang umumnya terjadi di negara-negara empat musim.

Terdapat beberapa kandungan senyawa kimia dari jenis semen portland beserta dengan sifat-sifatnya yang dapat dilihat pada tabel 2.3 sebagai berikut :

Tabel 2. 3 Jenis-Jenis Semen Portland Dengan Sifat-Sifatnya

Type semen	Sifat pemakaian	Kadar senyawa (%)				Kehalusan blaine (m ² /kg)	Kuat 1 hari (kg/cm ²)	Panas hidrasi (J/g)
		C ₃ S (Tri-kalsium Silikat)	C ₂ S (Di-kalsium Silikat)	C ₃ A (Tri-kalsium Alumina)	C ₄ AF (Aluminoferit)			
I	umum	50	24	11	8	350	1000	330
II	modifikasi	42	33	5	13	350	900	250

Type semen	Sifat pemakaian	Kadar senyawa (%)				Kehalusan blaine (m ² /kg)	Kuat 1 hari (kg/cm ²)	Panas hidrasi (J/g)
		C ₃ S (Tri-kalsium Silikat)	C ₂ S (Di-kalsium Silikat)	C ₃ A (Tri-kalsium Alumina)	C ₄ AF (Alumina)			
III	Kekuatan awal tinggi	60	13	9	8	450	2000	500
IV	Panas hidrasi rendah	25	50	5	12	300	240	210
V	Tahan sulfat	40	40	9	9	350	900	250

Sumber : (Nugraha & Antoni, 2007)

Semakin halus bentuk dari semen maka reaksi hidrasi akan semakin cepat, karena hidrasi dimulai dari permukaan butir. Pada umumnya butiran semen portland berukuran lebih kecil dari 45 micro (325 mesh), atau sebesar 320 m²/kg, menurut uji kehalusan Blaine. Kekuatan (*strength*) semen diuji dengan menggunakan pasir standar, yaitu pasir kuarsa dari bangsa dengan kadar SiO₂ minimal 95% dan diameter 1,2-0,6 mm 8 bagian berat dan diameter 0,6-0,42 mm 1 bagian berat.

Dalam penyimpanan semen, semen harus tetap kering. Udara yang lembab biasa menimbulkan bahaya yang sama dengan bila mana semen terkena air. Semen yang disimpan secara kedap udara dapat bertahan untuk waktu yang sangat lama. Dalam silo (ruang atau menara penyimpanan yang kedap udara) dapat bertahan hingga 3 bulan. Namun untuk semen yang dibungkus dalam sak kertas berlapis 3 lembar dalam kondisi baik, masih dapat berkurang kekuatannya ($\pm 20\%$) setelah 4-6 minggu. Pengurangan ini disebut *ignition lost* atau kehilangan daya hidrasi.

Semen dalam kantung (sak) harus disimpan dalam gudang. Jangan diterima jika kantung sudah sobek atau terlihat lembab, sebab bisa terjadi "pengikatan udara" (air set). Tolak juga bila terdapat bongkahan-bongkahan semen yang sulit dipecah dengan tangan.

2.5.2 Agregat

Agregat ialah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran beton. Agregat menempati 70-75% dari total volume beton maka kualitas agregat sangat berpengaruh terhadap kualitas beton. Dengan agregat yang baik, beton dapat dikerjakan (*workable*), kuat, tahan lama (*durable*), dan ekonomis. Sifat paling penting dari suatu agregat (batuan-batuan, kerikil, pasir, dan lain sebagainya) ialah kekuatan hancur dan ketahanan terhadap benturan, yang dapat memengaruhi ikatannya dengan pasta semen, proporsi dan karakteristik penyerapan air yang mempengaruhi daya tahan terhadap agresi kimia, serta ketahanan terhadap penyusutan.

Pengaruh karakteristik dan sifat agregat memiliki pengaruh langsung terhadap sifat-sifat beton yang dapat dilihat pada tabel 2.4 sebagai berikut:

Tabel 2. 4 Pengaruh Sifat Agregat pada Sifat Beton

Sifat Agregat	Pengaruh pada	Sifat Beton
Bentuk, tekstur, gradasi	Beton cair	Keleccakan peningkatan dan pengerasan
Sifat fisik, sifat kimia, mineral	Beton keras	Kekuatan, kekerasan, ketahanan (<i>durability</i>)

Sumber : (Nugraha & Antoni, 2007)

Umumnya agregat dipisahkan menurut ukuran butirannya yaitu :

- a. Ukuran butir > 40 mm, disebut batu.
- b. Ukuran butir 4,80-5,00 mm, disebut agregat kasar atau kerikil.
- c. Ukuran butir \leq 4,8 mm disebut agregat halus atau pasir.

Berdasarkan ukuran butiran-butirannya, agregat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu agregat kasar dan agregat halus. Agregat yang memiliki butiran yang besar (lebih besar dari 4,8 mm) disebut agregat kasar dan agregat yang memiliki butiran kecil (lebih kecil dari 4,8 mm) disebut agregat halus. Agregat yang digunakan sebagai pengisi beton harus mempunyai bentuk

yang baik (bulat atau mendekati kubus), bersih, kuat, keras, ulet, dan gradasi yang baik.

Menurut (Tri Mulyono, 2019) gradasi agregat ialah distribusi dari ukuran agregat. Distribusi ini bervariasi dapat dibedakan menjadi tiga yaitu gradasi sela (*gap grade*), gradasi menerus (*countinous grade*) dan gradasi seragam (*uniform grade*).

1. Gradasi sela (*gap gradation*), jika salah satu atau lebih dari ukuran butir atau fraksi pada satu set ayakan tidak ada, maka gradasi ini akan menunjukkan satu garis horizontal dalam grafiknya dengan keistimewaan pada nilai fas kemudahan pengerjaan, pada kondisi kelecakan yang tinggi cenderung mengalami segregasi, dan gradasi ini tidak berpengaruh buruk pada kekuatan beton
2. Gradasi menerus (*countinous grade*), didefinisikan jika agregat yang semua ukuran butirnya ada dan terdistribusi dengan baik dan sering dipakai dalam campuran beton. Dibanding dengan gradasi sela atau seragam, gradasi menerus adalah yang paling baik.
3. Gradasi seragam (*uniform grade*), agregat ini memiliki ukuran yang sama yang terdiri dari batas yang sempit dari ukuran fraksi dalam diagram terlihat garis yang hampir tegak/vertikal. Agregat dengan gradasi ini biasanya dipakai pada beton ringan yaitu beton tanpa pasir atau untuk campuran agregat yang tidak memenuhi syarat.

1) Agregat Halus

Pasir alam dari sungai merupakan jenis agregat halus yang digunakan dalam pembuatan beton. Pasir yang memenuhi kriteria kualitas harus memiliki beberapa karakteristik tertentu. Pasir yang baik memiliki bentuk butiran yang tajam dan tidak mudah hancur. Selain itu, gradasi butiran yang baik juga penting, yaitu ukuran butiran pasir berkisar antara 0,075 mm hingga 0,5 mm. Kualitas pasir juga terkait dengan tidak adanya kandungan lumpur yang signifikan. Pasir yang baik tidak boleh memiliki kandungan lumpur yang melebihi 5% dari ukuran butir kurang dari 0,075 mm. Jika pasir mengandung lumpur melebihi batas yang ditentukan, pasir tersebut harus

dicuci menggunakan ayakan dengan ukuran 0,075 mm untuk memisahkan dan menghilangkan lumpur yang terkandung dalam pasir tersebut. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa pasir yang digunakan dalam campuran beton memiliki kualitas yang memadai dan tidak mengganggu sifat-sifat beton yang dihasilkan.

Dalam penggunaannya agregat halus memiliki syarat-syarat sebagai berikut::

- a. Agregat halus terdiri dari butir-butir yang tajam dan keras.
- b. Bersifat kekal, yaitu tidak mudah hancur dan pecah oleh pengaruh cuaca seperti terik matahari dan hujan.
- c. Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% (terhadap berat kering).
- d. Tidak menggunakan pasir laut (kecuali petunjuk staf ahli), karena kandungan garam dari pasir laut dapat merusak beton atau baja tulangan, dan
- e. Gradasi agregat halus harus memenuhi syarat seperti pada table 2.5

Susunan batas-batas zona agregat halus dapat terlihat pada tabel 2.5 sebagai berikut :

Tabel 2. 5 Batas Gradasi Agregat Halus

Lubang Ayakan (mm)	Berat Butir Lewat Ayakan Dalam Persen			
	Zona I Kasar	Zona II Agak Kasar	Zona III Agak Halus	Zona IV Halus
9,6	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	89-100
0,3	5-20	8-30	12-40	15-50
0,15	0-10	0-10	0-10	0-15

Sumber : ('Tjokrodimuljo, 2007)

Keterangan :

Zona 1 : Pasir kasar

Zona 2 : Pasir agak kasar

Zona 3 : Pasir agak halus

Zona 4 : Pasir halus

2) Agregat Kasar

Agregat kasar adalah komponen utama dalam pembuatan beton yang memiliki ukuran lebih besar dari 5 mm hingga 40 mm, atau butiran yang tertahan pada ayakan dengan ukuran 4,75 mm. Agregat kasar ini digunakan dalam campuran beton dan dapat berupa kerikil yang terbentuk secara alami dari disintegrasi batuan atau batu pecah yang diperoleh melalui mesin pemecah (*stone crusher*), atau kadang juga dipecahkan secara manual. Agregat kasar berperan penting dalam beton sebagai pengisi ruang antara butiran dalam campuran beton. Kualitas dan karakteristik agregat kasar sangat memengaruhi kekuatan dan sifat-sifat beton yang dihasilkan. Penggunaan agregat kasar yang baik dan sesuai dengan standar sangat penting dalam proses konstruksi untuk mencapai hasil beton yang kuat dan tahan lama.

Sifat-sifat penting dari agregat kasar yang sangat berperan dalam beton ialah ketahanan (*Hardness*) ketahanan agregat kasar mengacu pada tingkat kekerasan atau kekuatan fisik butiran agregat. Kekerasan ini berpengaruh terhadap daya tahan agregat terhadap beban mekanis dan abrasi selama proses penggunaan. Bentuk dan tekstur permukaan (*Shape and Texture Surface*) bentuk dan tekstur permukaan agregat kasar mempengaruhi kemampuan agregat untuk saling mengunci dan berikatan dalam campuran beton, yang pada gilirannya memengaruhi kekuatan beton. Berat jenis agregat (*Specific Gravity*) berat jenis agregat kasar adalah perbandingan antara berat jenis agregat terhadap berat jenis air. Ini penting untuk menghitung volume absolut agregat dan menentukan komposisi campuran beton yang tepat. Ikatan agregat kasar (*Bonding*): Kemampuan agregat untuk berikatan dengan pasta semen mempengaruhi

kekuatan akhir beton. Ikatan yang baik antara agregat dan pasta semen akan meningkatkan kekuatan beton secara keseluruhan. Modulus halus butir (*Fines Modulus*) modulus halus butir mengacu pada ukuran partikel halus dalam agregat kasar. Hal ini mempengaruhi distribusi dan kepadatan agregat dalam campuran beton. Gradasi agregat (*Grading*) gradasi agregat merujuk pada distribusi ukuran butiran agregat dalam campuran. Distribusi yang baik dari butiran butiran dengan berbagai ukuran dapat mempengaruhi kekuatan dan sifat-sifat mekanis beton. Porositas dan karakteristik penyerapan air porositas agregat dan kemampuannya menyerap air dapat mempengaruhi daya tahan terhadap pembekuan pada musim dingin, agresi kimia, serta penyusutan dan perubahan volume beton.

Berikut uraian dari batas-batas dari agregat kasar yang dapat terlihat pada tabel 2.6 yaitu sebagai berikut :

Tabel 2. 6 Batas-Batas Gradasi Agregat Kasar

Ukuran Saringan (mm)	Persentase lolos saringan	
	Kasar	Agak Halus
40	95-100	100
20	30-70	95-100
10	10-35	22-25
0-5	0-5	0-10

Sumber : (Tjokrodinuljo, 2007)

Susunan untuk butiran (gradasi) yang baik akan menghasilkan kepadatan (*density*) maksimum dan porositas (*voids*) minimum. Sifat penting dari suatu agregat (baik kasar maupun halus) ialah kekuatan hancur dan ketahanan terhadap benturan yang dapat memengaruhi ikatannya dengan pasta semen, porositas dan karakteristik penyerapan air yang memengaruhi daya tahan terhadap proses pembekuan waktu musim dingin dan agresi kimia, serta ketahanan terhadap penyusutan.

Berdasarkan (Tri Mulyono, 2019) bentuk agregat dibedakan atas:

1. Agregat bulat, agregat ini terbentuk karena terjadinya karena pengikisan oleh air atau pergeseran memiliki rongga minimum 33% sehingga rasio

luas permukaannya kecil. Beton yang dihasilkan dari agregat ini kurang cocok untuk struktur yang menekankan pada kekuatan atau untuk beton mutu tinggi, karena ikatan antar agregat kurang kuat.

2. Agregat bulat sebagian atau tidak teratur, agregat ini terbentuk karena pergeseran sehingga permukaan berbentuk bulat. Memiliki rongga 35%-38%, sehingga memutuskan pasta semen agar mudah dikerjakan.
3. Agregat bersudut, rongga udara pada agregat ini berkisar 38%-40%, agregat ini cocok untuk beton mutu tinggi karena ikatan antar agregatnya baik (kuat).
4. Agregat panjang, memiliki ukuran $>9/5$ dari ukuran rata-rata. Jenis ini berpengaruh buruk pada mutu beton yang akan dibuat.
5. Agregat pipih, jika perbandingan tebal agregat terhadap ukuran-ukuran lebar dan tebalnya lebih kecil. Ukuran terkecilnya kurang dari $3/5$ ukuran rata-ratanya.
6. Agregat pipih dan panjang, jenis ini mempunyai panjang yang jauh lebih besar daripada lebarnya, sedangkan lebarnya jauh lebih besar dari tebalnya.

2.5.3 Air

Hukum kadar air konstan merupakan prinsip yang menyatakan bahwa jumlah air yang diperlukan untuk mencapai tingkat kelembaban tertentu dalam campuran beton relatif tetap, tidak terlalu bergantung pada jumlah semen yang digunakan, terutama untuk kombinasi agregat halus dan kasar tertentu. Meskipun prinsip ini tidak sepenuhnya berlaku untuk semua situasi atau kisaran material, namun prinsip ini cukup berguna dalam perencanaan dan koreksi campuran beton. Ini membantu dalam menentukan sejumlah air yang dibutuhkan dalam suatu campuran beton untuk mencapai kelembaban yang diinginkan, dengan mempertimbangkan jenis dan kombinasi agregat yang digunakan tanpa terlalu bergantung pada jumlah semen yang ada dalam campuran. Prinsip hukum kadar air konstan ini memberikan panduan praktis bagi para ahli konstruksi dalam menyesuaikan campuran beton untuk mencapai sifat-sifat yang diinginkan

tanpa harus secara drastis mengubah perbandingan antara semen, air, dan agregat. Namun, tetap diperlukan pengujian dan penyesuaian sesuai dengan kondisi khusus dan karakteristik material yang digunakan untuk memastikan kecocokan campuran beton.

Semen tidak bisa menjadi pasta tanpa air, air harus selalu ada dalam beton cair, tidak saja untuk hidrasi semen, tetapi juga untuk mengubahnya menjadi suatu pasta sehingga betonnya lecah (*workable*). Jumlah air yang terikat dalam beton dengan factor air semen 0,65 adalah sekitar 20% dari berat semen umur 4 minggu. Dihitung dari komposisi mineral semen, jumlah air yang diperlukan untuk hidrasi secara teoritis adalah 35-37% dari berat semen.

Menurut (Hamdi et al., 2021) Syarat-syarat yang Anda sebutkan merupakan pedoman penting dalam pemakaian air untuk campuran beton guna memastikan kualitas dan kekuatan beton yang dihasilkan. Ini termasuk :

- 1) Tidak mengandung lumpur (benda melayang lain): air yang digunakan harus bersih dari partikel-partikel lumpur atau benda melayang lainnya. Kandungan lumpur yang tinggi dapat mempengaruhi sifat-sifat beton dan mengurangi kekuatannya.
- 2) Tidak mengandung garam-garam yang merusak beton: garam-garam tertentu seperti asam, zat organik, dan sejenisnya dapat merusak beton. Oleh karena itu, air yang digunakan harus bebas dari kandungan garam-garam yang dapat merusak struktur beton.
- 3) Tidak mengandung klorida (CL): kandungan klorida dalam air juga harus terbatas, karena klorida dapat menyebabkan korosi pada material baja yang ada di dalam struktur beton. Klorida yang tinggi dapat merusak beton dan material penyusunnya.
- 4) Tidak mengandung senyawa sulfat: kandungan sulfat yang tinggi dalam air juga harus dihindari, karena sulfat dapat bereaksi dengan komponen beton seperti kalsium alumina hidrat dan menghasilkan produk yang dapat merusak kekuatan beton.

Pemilihan air yang memenuhi syarat-syarat ini penting dalam pembuatan beton yang berkualitas. Air yang bersih dan bebas dari kontaminan dapat membantu memastikan bahwa campuran beton akan memiliki kualitas yang baik, daya tahan yang tinggi, serta meminimalkan risiko kerusakan pada struktur beton yang dibuat.

2.6 Bahan Tambah

Bahan tambah atau bahan campur adalah suatu bahan yang berbentuk bubuk atau cair, yang ditambah ke dalam adukan campuran beton selama pengadukan, dengan tujuan untuk mengubah sifat adukan atau betonnya. Fungsi dari bahan ini adalah untuk mengubah sifat-sifat dari beton agar menjadi lebih cocok untuk pekerjaan tertentu atau untuk menghemat biaya.

Bahan tambah atau *admixture* yang didefinisikan dalam *Standard Definitions of terminology Relating to Concrete dan Concrete Aggregates* (ASTM C. 125-1995:61) dan dalam *Cement and Concrete Terminology* (ACI SP-19) adalah material selain air, agregat dan semen hidrolis yang dicampur dalam beton atau mortar yang ditambah sebelum atau selama pengadukan berlangsung. Bahan tambah digunakan untuk memodifikasi sifat dan karakteristik dari beton misalnya untuk dapat dengan mudah dikerjakan, mempercepat pengerasan, menambah kuat tekan, penghematan, atau untuk tujuan lain seperti penghematan energi. Bahan tambah biasanya diberikan dalam jumlah yang relatif sedikit, dan harus dengan pengawasan yang ketat agar tidak berlebihan yang justru akan dapat memperburuk sifat beton.

Penggunaan bahan campur seharusnya hanya dipertimbangkan, bila beton keras atau yang belum mengeras diinginkan untuk dirubah sifatnya karena alasan tertentu maupun yang tak dapat dimodifikasi dengan perubahan proporsi dari komposisi campuran beton normalnya. Misalnya, campuran yang kaku dapat dibuat lebih plastis dan kohesif dengan penambahan untuk menjadikan plastis (*plasticizer*). Atau dapat juga dengan pengisi pori, bahan pengisi udara, bahan perubahan proporsi pasir kepada

agregat kasar, perubahan gradasi pasir, atau dengan menggunakan tambahan semen.

Secara umum bahan tambah yang digunakan dalam beton dapat dibedakan menjadi dua yaitu bahan yang berifat kimiawi (*chemical admixture*) dan bahan yang bersifat mineral (*additive*). Bahan tambah admixture ditambahkan saat pengadukan dan atau saat pelaksanaan pengecoran (*placing*) sedangkan bahan tambah additive yaitu bahan yang bersifat mineral ditambah saat pengadukan dilaksanakan. Dan juga terdapat bahan tambah lain (*miscellaneous admixture*), yaitu bahan tambah jenis polimer (*air entraining*, beton tanpa *slump*, *polimer*, *polypropylene*, *fiber mash*, serat bambu, serat kelapa dan lainnya), bahan pencegah pengarat dan bahan tambah untuk perekat (*bonding agent*).

Bahan kimia pembantu (*chemical admixture*) ada bermacam-macam. Menurut ASTM, bahan kimia pembantu itu terbagi menjadi:

- a. Jenis A - Mengurangi air (*Water Reducer*)
- b. Jenis B – Memperlambat Pengikatan (*Retarder*)
- c. Jenis C – Mempercepat pengikatan (*Accelerator*)
- d. Jenis D – A+B (*Water Reducer + Retarder*)
- e. Jenis E – A+C (*Water Reducer + Accelerator*)
- f. Jenis F – Superplasticizer (*Water Reducer & High Range*)
- g. Jenis G - *Water Reducer & High Range & Retarder*

Dan juga terdapat bahan kimia lain seperti menambahkan buih udara (*Air Entrainer*) dan membuat kedap air (*Waterproofing*).

2.6.1 Abu Dan Serat Daun Nanas

Nanas (*Ananas Comusus*) merupakan salah satu tanaman buah tropis dengan produksi terbesar kedua setelah pisang dan menjadi komoditas buah yang penting di Indonesia. Serat daun nanas (*pineapple-leaf fibers*) merupakan salah satu jenis serat yang berasal dari tumbuhan (*vegetable fibre*) yang diperoleh dari helai daun nanas. Tanaman nanas termasuk dalam *Family Bromeliaceae*, yang pada umumnya termasuk jenis tanaman semusim.

Pemanfaatan pada tanaman nanas yang telah selesai masa panennya dapat dikembangkan melalui penggunaan daun nanas sebagai produk yang dapat memberikan nilai tambah yang cukup tinggi. Daun nanas mempunyai lapisan luar yang terdiri dari dua lapisan yaitu lapisan atas dan lapisan bawah. Kedua lapisan tersebut terdapat banyak ikatan di setiap helai-helai (*bundles of fibre*) yang terikat dengan satu dengan yang lain oleh sejenis zat perekat (*gummy substances*) yang terdapat dalam daun nanas.

Penelitian yang dilakukan oleh Firman dkk (2015) dalam jurnal (Yanti et al., 2019) menunjukkan bahwa serat daun nanas memiliki kuat lentur yang tinggi dengan massa serat 0,7 gram memiliki kuat lentur tertinggi yaitu 5,74 Mpa. Pada penelitian (Yanti et al., 2019) kuat tekan dan lentur tertinggi diperoleh dengan penambahan 5% serat daun nanas yaitu sebesar 267,00 kg/cm² untuk kuat tekan dan 41,61 kg/cm² untuk kuat lentur.

Pada penelitian (Palupi, 2019) menunjukkan hasil kalsinasi daun nanas pada suhu 800°C diperoleh material sebesar 4,61% dari berat kering daun nanas. Pada pengujian *XRF* terdapat hasil kalsinasi daun nanas menunjukkan adanya kandungan silika (SiO₂) sebesar 38,161%. Penelitian yang dilakukan oleh (Yandi, 2021) dengan menggunakan daun nanas untuk campuran beton f'c 17,5 Mpa dengan variasi campuran 0%, 0,5%, 1,0%, dan 1,25% dengan umur 7, 14, 21, dan 28 hari untuk mengetahui nilai kuat tekan dan tarik belah beton yang menghasilkan nilai maksimum pada kuat tekan ada di variasi 0,5% di umur 28 hari sebesar 17,73 Mpa serta untuk kuat tarik belah di campuran 1% umur 28 hari dengan nilai 1,45 Mpa.

Maka dari itu penulis tertarik untuk membuat daun nanas sebagai bahan tambah terhadap kuat tekan dan lentur beton.

Gambaran umum tanaman nanas yang berada di sekitar pekarangan rumah, dapat dilihat pada gambar 2.1



Gambar 2. 1 Buah Nanas

Sekumpulan hasil serat nanas yang telah melalui proses pengolahan yang dapat dilihat pada gambar 2.2



Gambar 2. 2 Serat Daun Nanas

Hasil pembakaran daun nanas yang dihaluskan hingga menjadi abu, yang dapat terlihat pada gambar 2.3



Gambar 2. 3 Abu Daun Nanas

2.7 Kekuatan Beton

2.7.1 Kuat Lentur beton

Kuat lentur beton adalah kemampuan balok beton tanpa tulangan berpenampang 15 cm x 15 cm dengan panjang 60 cm untuk memikul tegangan lentur akibat momen lentur yang diletakkan pada dua perletakan. Satuan untuk menyatakan kuat lentur beton dinyatakan dalam satuan Mega Pascal. Nilai kuat tarik lentur beton diperoleh dari rumus sebagai berikut :

1. Untuk pengujian dimana bidang patah terletak di daerah pusat (1/3 jarak titik perletakan bagian tengah)

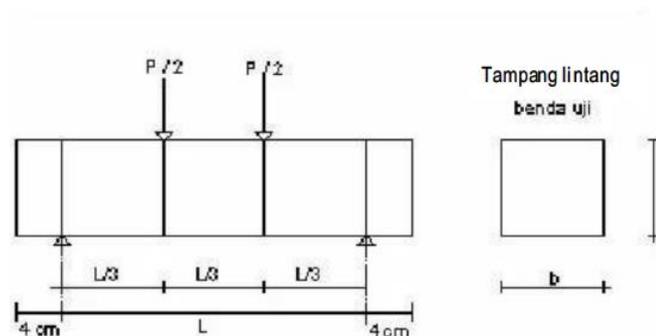
$$f_r = \frac{P.L}{b.h^2}$$

2. Untuk pengujian dimana bidang patah terletak diluar pusat (1/3 jarak perletakan bagian tengah)

$$f_r = \frac{P.a}{b.h^2}$$

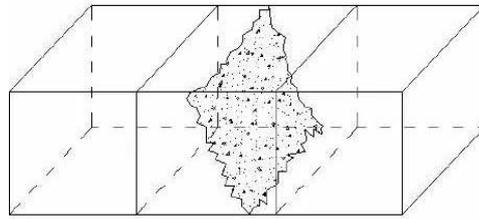
Keterangan

- f_r = Kuat lentur (Mpa)
 P = Beban pada waktu lentur (kN)
 L = Jarak (bentang) perletakan (cm)
 b = Lebar penampang balok (cm)
 h = Jarak antara tampang lintang patah dan tumpuan luar yang terdekat.



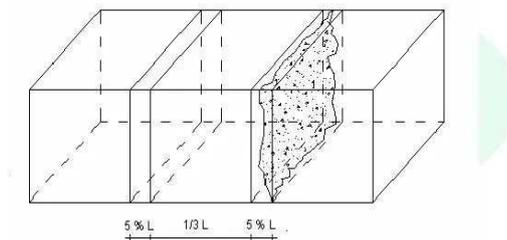
Gambar 2. 4 Benda uji, perletakan dan pembebanan

(Sumber : (Anonim, n.d.)



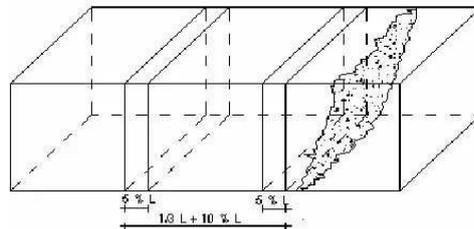
Gambar 2. 5 Patah pada $1/3$ bentang tengah (rumus 1)

(Sumber : (Anonim, n.d.)



Gambar 2. 6 Patah diluar $1/3$ bentang tengah dan garis pada $<5\%$ dari bentang (rumus 2)

(Sumber : (Anonim, n.d.)



Gambar 2. 7 Patah diluar $1/3$ bentang tengah dan garis patah pada $>5\%$ dari bentang (diabaikan)

(Sumber : (Anonim, n.d.)

Retak adalah jenis kerusakan yang sering terjadi pada struktur beton. Retak dapat terjadi sebelum beton mengeras atau setelah beton mengeras. Secara visual, retak biasanya terlihat sebagai garis yang memisahkan massa beton dalam dimensi yang relatif panjang atau sempit (Chelcea et al., 2017). Pada saat beton mulai mengeras dan dibebani, retak bisa muncul saat beton masih dalam proses pengerasan tapi sudah dikenai beban tertentu. Ini bisa terjadi karena perubahan dimensi beton akibat beban yang dikenakan sebelum beton sempurna mengeras. Pengerasan beton pada

kondisi musim dingin, suhu yang rendah dapat mempengaruhi proses pengerasan beton, menyebabkan retak akibat perubahan suhu yang drastis. Susut (*shrinkage*) retak bisa muncul karena adanya susut pada beton saat air dalam campuran beton menguap, menyebabkan penurunan volume. Penurunan (*settlement*) retak juga dapat terjadi akibat penurunan struktur yang tidak merata atau tidak terkendali, menghasilkan tekanan di beberapa bagian beton. Penurunan acuan (*formwork*) proses penurunan formwork setelah pengecoran juga bisa menyebabkan retak jika tidak dilakukan secara terkontrol dan terencana. Pemahaman akan penyebab retak pada beton penting untuk mencegah dan mengelola kerusakan yang mungkin terjadi. Upaya perencanaan yang baik dan pemilihan bahan yang tepat dapat mengurangi risiko retak pada struktur beton.

Beberapa jenis pola retak pada balok terdiri atas :

- a. Retak geser pada bagian balok, yang dikenal sebagai "*web shear crack*" adalah jenis retakan miring yang muncul di daerah sepanjang garis netral penampang balok. Retakan ini terjadi di daerah dimana gaya geser maksimum terjadi dan tegangan aksial relatif sangat kecil. Saat balok menerima beban, terdapat gaya geser yang bekerja pada daerah web (bagian vertikal dari balok). Jika tegangan geser yang terjadi melebihi kapasitas tahan geser beton pada daerah tersebut, dapat menyebabkan terbentuknya retakan miring yang disebut retak geser. Retak geser ini sering terjadi pada daerah yang dekat dengan support atau titik tumpuan balok. Hal ini disebabkan oleh distribusi gaya geser yang tinggi di daerah tersebut. Retakan ini menunjukkan bahwa kemampuan beton untuk menahan gaya geser pada daerah tersebut telah terlewati, namun tegangan aksial (tegangan sepanjang sumbu balok) relatif rendah.
- b. Retak geser-lentur, dikenal sebagai "*flexural shear crack*," merupakan jenis retakan miring yang terjadi pada bagian balok setelah sebelumnya terjadi keretakan lentur. Retakan ini merupakan perambatan dari retakan lentur yang terjadi sebelumnya. Pada saat terjadi beban lentur

pada balok, retak lentur pertama kali muncul. Kemudian, jika beban yang diteruskan menyebabkan peningkatan gaya geser yang signifikan, retakan tersebut bisa berlanjut dan menjadi retak geser-lentur. Retakan ini berjalan secara miring dari retak lentur yang awalnya terbentuk. Retak geser-lentur terjadi ketika gaya geser yang bertambah menyebabkan tegangan geser melebihi kapasitas tahan geser beton pada daerah tersebut, sehingga terjadi perambatan retak dari daerah lentur ke daerah geser. Retakan ini merupakan indikasi bahwa terjadi kombinasi antara gaya geser dan gaya lentur yang signifikan pada bagian balok tersebut.

- c. Retak puntir (*torsion crack*) adalah jenis retakan yang terjadi pada balok atau elemen struktural saat terkena torsi (torsi murni). Retak ini mirip dengan retak geser, namun retak puntir berbentuk melingkar atau spiral di sekeliling balok. Ketika sebuah balok tanpa tulangan menerima torsi murni, tegangan torsi akan bekerja menyebabkan tarikan diagonal pada beton. Ini mengakibatkan terbentuknya garis-garis spiral dengan sudut sekitar 45 derajat terhadap sumbu panjang balok. Retak-retak spiral ini mencerminkan tegangan puntir yang terjadi akibat torsi. Fenomena retak puntir menjadi lebih signifikan pada struktur beton tanpa tulangan yang menerima beban torsi yang tinggi. Oleh karena itu, dalam perencanaan struktur, tulangan (biasanya tulangan spiral atau tulangan lengkung) sering digunakan untuk meningkatkan ketahanan terhadap torsi pada balok dan mencegah terbentuknya retak-retak puntir yang dapat mengurangi kekuatan dan kestabilan struktur.
- d. Retak lekatan (*bond-splitting crack*) adalah jenis retakan yang terjadi di sekitar tulangan dalam beton bertulang. Retakan ini biasanya muncul di sepanjang tulangan karena adanya perpindahan atau gerakan antara tulangan dan beton di sekitarnya. Ketika beban diterapkan pada struktur beton bertulang, tulangan membawa gaya tarik yang berusaha untuk menahan gaya pada struktur. Namun, terkadang terjadi perpindahan atau gerakan relatif antara beton dan tulangan yang menyebabkan

interlocking di antara keduanya terganggu. Hal ini dapat menghasilkan retakan yang berjalan secara radial di sekitar tulangan. Retak lekatan ini sering kali disebabkan oleh tegangan lekat yang berlebihan antara beton dan tulangan. Namun, kemampuan ulir atau desain khusus pada permukaan tulangan, seperti adanya belokan atau penjepitan (*mechanical interlock*), dapat membantu menahan retakan lekatan.