BAB 2
KAJIAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu ini menjadi salah satu acuan dalam melakukan penelitian sehingga dapat memperkaya teori yang digunakan dalam mengkaji penelitian yang dilakukan. Berikut merupakan penelitian terdahulu berupa beberapa jurnal terkait dengan penelitian yang dilakukan penulis.

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu.

No.	Penulis	Tahun	Judul	Metode	Hasil
1.	Lirawa-ti	2018	Eksperimen-tal Kuat Lentur Balok Bertulang dan Beton Bubuk Reaktif Berserat Bendrat	Exsper-imental Labora-torium	Semen tipe II dapat meningkatkan kuat tekan biasa 43,9MPa. Untuk kuat tarik belah beton dengan menggunakan semen tipe II lebih tinggi 3,95MPa dari penggunaan semen tipe I sebesar 2,23MPa. Kuat lentur pada beton bubuk reaktif dengan serat bendrat 0,5% sebesar 23,44MPa dan

					beton bertulang dengan serat bendrat 0,5% sebesar 61,93MPa.
2.	Made Suarda-na Kader, I Made Jaya	2018	Modifikasi Beton Normal Sebagai *Rigid Pavement* yang Memenuhi Syarat Kuat Lentur	Eksper-imental Labora-torium	Penambahan serat kawat kurang dari 5% nilai kuat lentur yang diperoleh di bawah nilai kuat lentur beton tanpa serat kawat, hingga pada penambahan 5% kuat lentur mencapai kuat lentur tanpa serat kawat. Pada penambahan serat kawat mencapai 5% perbandingan antara penambahan serat kawat dengan kuat lentur adalah berbanding lurus. Melapisi bagian

					bawah dari balok beton menggunakan *woven roving* dapat meningkatkan kuat lentur balok hingga 25% dibandingkan kuat lentur balok tanpa modifikasi. Penambahan serat kawat pada campuran beton sangat mempengaruhi kuat lenturnya.
3.	Melly Nugrah-eni	2017	Pengaruh Penambahan Serat Bendrat Berkait *(hooked)* Dengan Perilaku Beton Pada Beban Tekan Berulang	Eksper-imental Labora-torium	Beton dengan konsentrasi serat 0,6% lebih mampu menahan kelelahan akibat beban berulang yang menghasilkan lebih banyak *interval* pembebanan yang dialami beton hingga pecah, kuat tekan yaitu pada

					interval ke-14, tarik belah ke-14 dan lentur ke-6. Nilai kuat tekan, tarik belah dan lentur maksimal terjadi pada beton serat dengan konsentrasi serat 0,6% dan menurun pada konsentrasi serat 0,8%. Kuat tekan maksimal pada konsentrasi serat 0,6% sebesar 35,5564MPa, kuat tarik belah maksimal pada konsentrasi serat 0,6% sebesar 3,2774MPa dan kuat lentur maksimal pada konsentrasi serat 0,6% sebesar 8,9380MPa.
4.	Fachru-rrozi Yusyaf, Alex Kurni-	2017	Pengaruh Penambahan *Steel Fibre* Terhadap Sifat	Eksper-imental Labora-torium	Hasil pengujian *slump* menunjukkan bahwa dengan penambahan

	awandy, Ermiya-ty		Mekanis Beton Normal		serat baja pada adukan beton akan menurunkan *workability* beton hingga 2,5 cm. Pada beton normal didapatkan nilai *slump* sebesar 9,5 cm Beton serat baja mempunyai kuat tekan yang lebih tinggi daripada beton normal hingga 26,98%. Kuat tekan paling besar adalah pada penambahan serat 0,6 kg/m³ yaitu sebesar 30,18Mpa. Beton serat baja mempunyai kuat tarik belah yang lebih tinggi daripada beton normal hingga 67,14%. Kuat tarik belah paling besar adalah pada

					penambahan serat 0,6 kg/m³ yaitu sebesar 2,76MPa. Beton serat baja mempunyai kuat lentur yang lebih tinggi daripada beton normal hingga 35,19 % dan meningkat seiring penambahan serat baja . Kuat lentur paling besar adalah pada penambahan serat 0,6 kg/m³ yaitu sebesar 5,01MPa.
5.	Tiffany Marvin	2016	Pengaruh Penambahan *Fiber* Baja Seling Dengan Volume *Fraction* 0,4%, 0,6% dan 0,8% Terhadap Kuat Tekan dan	Eksper-imental Labora-torium	Kuat tekan dan kuat lentur maksimal terjadi pada beton serat dengan konsentrasi serat 0,6% dan menurun pada konsentrasi serat 0,8%. Kuat tekan maksimal

			Kuat Tarik Lentur Pada Beton Mutu Normal		sebesar 27,5537MPa pada konsentrasi serat 0,6% dan nilai optimum dari grafik *regresi polinomial* didapatkan kuat tekan sebesar 27,6028MPa pada konsentrasi serat 0,5754%. Kuat lentur maksimal sebesar 5,6899MPa pada konsentrasi serat 0,6% dan nilai optimum dari grafik *regresi polinomial* didapatkan kuat lentur sebesar 5,7163MPa pada konsentrasi serat 0,5687%. Penambahan serat baja seling tidak memberikan kontribusi yang besar dalam peningkatan kuat

					tekan, sedangkan pada kuat tarik lentur, serat baja seling pada penelitian ini mempunyai kuat tarik yang tinggi, yaitu 1733,46MPa sehingga dapat memberikan peningkatan kuat lentur yang signifikan.
6.	Budi Witjak-sana	2016	Penambahan *Fibre Steel* Pada Campuran Beton	Eksper-imental Labora-torium	Tegangan tekan beton *(fc')* sebagai berikut : campuran *fibre steel* 0 % , *fc'* = 54.47, campuran *fibre steel* 2.5 % , *fc'* = 56.83, campuran *fibre steel* 5 %, *fc'* = 72.06, campuran *fibre steel* 10 % , *fc'* = 87.02.
7.	Abdul Azis, Herman Parung, Rita	2016	Studi Tarik Belah Beton Dengan Penambahan *Dramix*	Eksper-imental Labora-torium	Kuat tarik belah beton meningkat dengan penambahan *dramix steel*

	Irmawa-ty		*Steel Fiber*		*fiber*, dengan besar peningkatan rata-rata 2.23% untuk mutu beton 20MPa dan 11.2% untuk mutu beton 40MPa pada setiap penambahan 2.5% *dramix steel fiber*. Kuat tarik belah beton meningkat seiring dengan pertambahan umur dari umur 7 hari ke 28 hari dengan peningkatan rata-rata 41.4% untuk mutu beton 20MPa dan peningkatan rata-rata 24.48% untuk mutu beton 40MPa.
8.	Sustika Pratiwi, Hakas Prayuda, Fadill-	2016	Kuat Tekan Beton Serat Menggunakan Variasi *Fiber Optic*	Eksperimental Laboratorium	Kuat tekan rata-rata kadar serat 0,1%; 0,15%; dan 0,2% berturut-turut

	awaty Saleh		dan Pecahan Kaca		diperoleh sebesar 22,43MPa, 24,31MPa, dan 29,63MPa. Penambahan serat dari 0,1% menjadi 0,15% mengalami peningkatan kuat tekan rata-rata sebesar 8,4% dan penambahan serat dari 0,15% menjadi 0,2% mengalami peningkatan kuat tekan rata-rata sebesar 21,9%. Nilai *modulus elastisitas* yang diperoleh berturut-turut adalah 22259,35MPa, 23173,43MPa, dan 25583,72MPa.
9.	Nur Rohm-ad, Agus Setiya Budi,	2016	Kuat Lentur Balok Bertulang Bambu Ori Takikan Tipe U	Eksper-imental Labora-torium	Hasil pengujian kuat lentur balok bertulangan bambu ori takikan tipe U dengan jarak

	Endang Rismu-narsi		Dengan Jarak Takikan 10cm		takikan 10 cm lebar 10 mm setara 60,55 % sedangkan balok bertulangan bambu ori takikan tipe U dengan jarak takikan 10 cm lebar 20 mm juga setara 60,51 % terhadap balok dengan tulangan baja polos diameter 8 mm. Pola keruntuhan pada balok beton dengan tulangan baja maupun pada balok beton dengan tulangan bambu ori tipe ”u” dengan jarak takikan 10 cm pada lebar takikan 1 cm dan 2 cm terletak antara 1/3 bentang tengah. Sehingga termasuk dalam keruntuhan lentur.

10.	Dwi Nuur Musya-ffa, Sholih-in As'ad, Wibo-wo	2015	Pengaruh Dosis dan Aspek Rasio Serat Baja Terhadap Kuat Tekan dan *Modulus Elastisitas* pada Beton Normal dan Beton Mutu Tinggi	Eksper-imental Labora-torium	Penambahan dosis serat baja sebesar 60 kg/m3 menghasilkan kuat tekan dan nilai *modulus elastisitas* maksimum kecuali pada beton mutu tinggi aspek rasio 80. Besar kenaikan kuat tekan maksimum pada beton normal sebesar 10,54% (tipe A) dan 10,81% (tipe B) dan beton mutu tinggi sebesar 12,41% (tipe A penambahan 80 kg/m3) dan 12,41%. Peningkatan maksimum nilai *modulus elastisitas* pada beton normal adalah 25,10% pada tipe B sedangkan pada beton mutu

					tinggi sebesar 10,98% pada tipe A. Jumlah serat pada saat pemeriksaan distribusi pada beton segar dan beton setelah diuji terhadap jumlah serat teoritis terdapat perbedaan. Dosis serat lebih berpengaruh terhadap kenaikan kuat tekan dan *modulus elastisitas* daripada jumlah seratnya.

Sumber: Hasil kajian penulis, 2020.

2.2 Landasan Teori

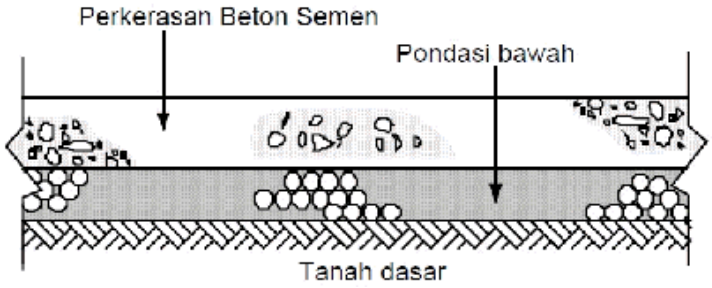
Perkerasan direncanakan untuk memikul beban lalu lintas secara aman dan nyaman serta selama umur rencana tidak terjadi kerusakan yang berarti.

Untuk dapat memenuhi fungsi tersebut, perkerasan beton semen harus:

1. Mereduksi tegangan yang terjadi pada tanah dasar (akibat beban lalu-lintas) sampai batas-batas yang masih mampu dipikul tanah dasar tersebut, tanpa menimbulkan perbedaan penurunan/lendutan yang dapat merusak perkerasan.

2. Mampu mengatasi pengaruh kembang susut dan penurunan kekuatan tanah dasar, serta pengaruh cuaca dan kondisi lingkungan.

Perkerasan beton semen adalah struktur yang terdiri atas pelat beton semen yang bersambung (tidak menerus) tanpa atau dengan tulangan, atau menerus dengan tulangan, terletak di atas lapis pondasi bawah atau tanah dasar, tanpa atau dengan lapis permukaan beraspal. Struktur perkerasan beton semen secara tipikal sebagaimana terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Tipikal struktur perkerasan beton semen.

Pada perkerasan beton semen, daya dukung perkerasan terutama diperoleh dari pelat beton. Sifat, daya dukung dan keseragaman tanah dasar sangat mempengaruhi keawetan dan kekuatan perkerasan beton semen. Faktor-faktor yang perlu diperhatikan adalah kadar air pemadatan, kepadatan dan perubahan kadar air selama masa pelayanan. Lapis pondasi bawah pada perkerasan beton semen adalah bukan merupakan bagian utama yang memikul beban, tetapi merupakan bagian yang berfungsi sebagai berikut:

- Mengendalikan pengaruh kembang susut tanah dasar.
- Mencegah *intrusi* dan pemompaan pada sambungan, retakan dan tepi-tepi pelat.
- Memberikan dukungan yang mantap dan seragam pada pelat.
- Sebagai perkerasan lantai kerja selama pelaksanaan.

Pelat beton semen mempunyai sifat yang cukup kaku/keras serta dapat menyebarkan beban pada bidang yang luas dan menghasilkan tegangan yang rendah pada lapisan-lapisan di bawahnya. Bila diperlukan tingkat kenyaman yang tinggi, permukaan perkerasan beton semen dapat dilapisi dengan lapis campuran beraspal setebal 5cm atau sesuai dengan perhitungan desain perencanaan jalan.

2.2.1 Perkerasan Kaku *(Rigid Pavement)*

Perkerasan kaku atau *rigid pavement* adalah jenis perkerasan jalan yang menggunakan beton sebagai bahan utama perkerasan tersebut, perkerasan kaku merupakan salah satu jenis perkerasan jalan yang digunakan selain dari perkerasan lentur *(asphalt)*. Perkerasan ini umumnya dipakai pada jalan yang memiliki kondisi lalu lintas yang cukup padat dan memiliki distribusi beban yang besar, seperti pada jalan-jalan lintas antar provinsi, jembatan layang *(fly over)*, jalan tol, maupun pada persimpangan bersinyal.

Jalan-jalan tersebut umumnya menggunakan beton sebagai bahan perkerasannya, namun untuk meningkatkan kenyamanan biasanya di atas permukaan perkerasan dilapisi *asphalt*.

Menurut SNI Pd-T-14-2003 perkerasan kaku *(rigid pavement)* beton semen dibedakan menjadi 4 macam, yaitu:

1. Perkerasan beton semen bersambung tanpa tulangan.
2. Perkerasan beton semen bersambung dengan tulangan.
3. Perkerasan beton semen menerus dengan tulangan.
4. Perkerasan beton semen pra-tegang.

Perkerasan kaku direncanakan untuk memikul beban lalu lintas secara aman dan nyaman serta dalam umur rencana tidak terjadi kerusakan yang berarti. Untuk dapat memenuhi fungsi tersebut perkerasan kaku *(rigid pavement)* harus:

1. Mereduksi tegangan yang terjadi pada tanah dasar (akibat beban lalu lintas) sampai batas-batas yang masih mampu dipikul tanah

dasar tersebut, tanpa menimbulkan perbedaan penurunan atau lendutan yang dapat merusak perkerasan.

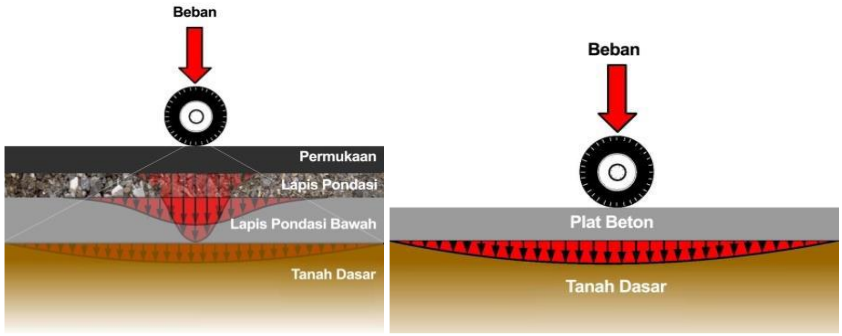
2. Mampu mengatasi pengaruh kembang susut dan penurunan kekuatan tanah dasar, serta pengaruh cuaca dan kondisi lingkungan.

2.2.1.1 Sifat Umum Perkerasan Kaku

1. Kemampuan Penyebaran Beban ke Lapisan Tanah Dasar

Seperti yang sudah disampaikan di depan, perkerasan kaku mempunyai kekakuan *(modulus elastisitas)* yang jauh lebih tinggi dari perkerasan aspal (sekitar 10 kali nya). Setiap konstruksi yang menerima beban dari atas, akan menyalurkan atau menyebarkan beban tersebut ke bawah. Dalam hal konstruksi perkerasan jalan, salah satu fungsinya adalah untuk menyalurkan dan menyebarkan beban lalu-lintas yang diterima kelapisan di bawahnya sampai ke lapisan tanah dasar *(subgrade).* Beban yang disalurkan ke lapisan di bawahnya, menghasilkan tekanan yang lebih kecil, disebabkan makin luasnya area yang menampung beban tersebut, sehingga mampu dipikul oleh lapisan tanah dasar.

Dengan kekakuan atau *modulus elastisitas* beton semen yang lebih besar, konstruksi perkerasan kaku mempunyai kemampuan penyebaran beban yang lebih tinggi dari perkerasan lentur. Sebagai akibatnya, lendutan menjadi lebih kecil serta tegangan yang bekerja pada tanah dasar juga rendah, karena itu perkerasan kaku tidak memerlukan daya dukung pondasi yang kuat. Keseragaman daya dukung tanah dasar sangat penting diperhatikan, dimana tidak boleh ada perubahan yang mencolok dari daya dukung tersebut. Hal ini sangat bertolak belakang dengan prinsip perencanaan perkerasan lentur dimana lapisan pondasi *(base)* dan lapis pondasi bawah *(subbase)* memerlukan kekuatan yang tinggi untuk mendistribusikan tegangan dari beban roda yang bekerja pada lapisan aspal. Ilustrasi distribusi beban pada perkerasan kaku dan perkerasan lentur, ditunjukkan pada Gambar 2.2.



perkerasan lentur perkerasan kaku

Gambar 2.2 Ilustrasi distribusi beban pada perkerasan kaku dan perkerasan lentur.

Hasil pengujian tegangan pada tanah dasar pada perkerasan kaku, dari beban roda seberat 12.000lb, atau tegangan yang bekerja seberat 106psi, direduksi hingga tegangan pada tanah dasar menjadi 3psi sampai 7psi dengan area daerah distribusi lebih dari 20ft. Pengujian yang dilakukan oleh *Portland Cement Association (PCA)* juga menunjukkan bahwa beban roda yang lebih berat didistribusikan pada tanah dasar dengan bidang yang luas serta tidak menimbulkan tegangan yang lebih tinggi.

2. Struktur Perkerasan Kaku

Pada awal perkembangan perkerasan kaku, perkerasan tersebut dibangun langsung di atas tanah dasar tanpa memperhatikan jenis tanah dasar atau kondisi drainase. Sejalan dengan peningkatan lalu lintas setelah perang dunia ke II, masalah *pumping* menjadi hal yang penting walaupun hal itu telah dikemukakan di awal tahun 1932.

Penebalan bagian tepi umum dilakukan pada sekitar tahun 1930-an dan 1940-an. Sebagai contoh, perkerasan kaku yang dibangun dengan tebal 15,2cm (6in) di bagian tengah, dan tebal lapisan tepinya 20,3cm (8in) sepanjang tepi pelat tersebut, yang disebut perencanaan 8-6-8. Perkerasannya sendiri umumnya hanya mempunyai lebar antara 5,5-6,1m. Ketika perancangan mengalami perkembangan, untuk mencegah *pumping* perkerasan dibangun di atas lapis pondasi

bawah dengan material berbutir. Pembangunan pada saat ini, menggunakan perancangan yang lebih tebal dan sering digunakan untuk jalan raya dengan beban lalu lintas berat.

Pada konstruksi perkerasan kaku, sebagai konstruksi utama adalah satu lapis beton semen mutu tinggi, dan lapis pondasi bawah hanya berfungsi sebagai konstruksi pendukung. Sedangkan pada konstruksi perkerasan lentur umumnya terdiri dari beberapa lapis (3 atau lebih) yaitu lapis permukaan *(surface)*, lapis pondasi dan lapis pondasi bawah, yang semuanya merupakan konstruksi utama. Dari penjelasan di atas, dapat ditarik pengertian bahwa perkerasan kaku merupakan konstruksi perkerasan satu lapis *(single layer)*, sedangkan perkerasan lentur merupakan konstruksi berlapis banyak *(multi layer)*. Skema lapisan konstruksi perkerasan kaku dan perkersan lentur ditunjukkan pada Gambar 2.2.

Lapisan pondasi *(Sub Base)*

Maksud dari penggunaan lapisan pondasi perkerasan kaku adalah untuk meningkatkan daya dukung terhadap pelat beton dan memberikan ketahanan terhadap pencegahan erosi pada lapisan pondasi akibat beban lalu lintas dan lingkungan.

Untuk perkerasan kaku, lapisan pondasi dengan bahan pengikat, bisa bermacam-macam, salah satu dari ketiga jenis ini:

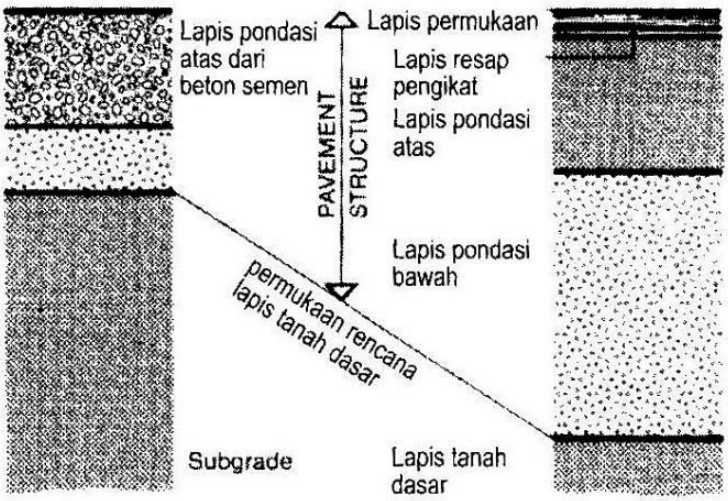
- Batu pecah yang distabilisasi semen dengan kondisi tidak lebih kecil dari 5% (perbandingan berat) untuk mencegah erosi. Bahan *cementitius* bisa mengandung semen, kapur, abu terbang dan atau *granulated blast furnace slag.*
- Campuran beraspal bergradasi rapat.
- *Lean concrete (LC)* yang mempunyai kekuatan tekan pada umur 28 hari, antara 80 dan 110kg/cm2.

Pemecah ikatan antara lapisan subbase dengan lapisan pelat beton, adalah dengan menggunakan lapisan pemecah ikatan di atas lapisan pondasi untuk memberikan permukaan yang halus dan *friksi* yang seragam. Campuran beton kurus *(lean concrete)* dibuat seperti

beton biasa tanpa sambungan melintang dan karena itu akan timbul retak. Ini dimaksudkan untuk mencapai pola retak yang dekat dan lebar retak yang sempit, sehingga memberikan tingkat penyaluran beban, yang berkaitan dengan lapis pemecah ikatan dan tidak akan menjalar ke pelat beton di atasnya.

3. Kapasitas Konstruksi Perkerasan Kaku

Konstruksi perkerasan kaku pada umumnya mempunyai ketebalan pelat beton sekitar 25cm, dengan mutu kuat tekan beton yang setara dengan kuat tarik lentur 45kg/cm2. Perkerasan kaku tersebut mempunyai kapasitas atau daya layan sebesar 8 juta *repetisistandard axle load*, yang setara dengan konstruksi perkerasan lentur setebal 55cm. Dengan demikian untuk beban dan tanah dasar yang sama, konstruksi perkerasan kaku memerlukan ketebalan konstruksi yang lebih tipis. Ilustrasi dari *ekivalensi* struktur perkerasan kaku dan perkerasan lentur ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Ilustrasi *ekivalensi* struktur perkerasan kaku dan perkerasan lentur.

4. Pengaruh Bahu Konstruksi Perkerasan Kaku

Bahu jalan dari beton yang diikatkan, pertama kali diuji coba di Illionis pada tahun 1964, dan ditemukan memberikan tambahan nilai struktur yang sangat berarti pada perkerasan kaku, sehingga tebal pelat dari perkerasan yang menggunakan bahu beton bisa menjadi lebih tipis.

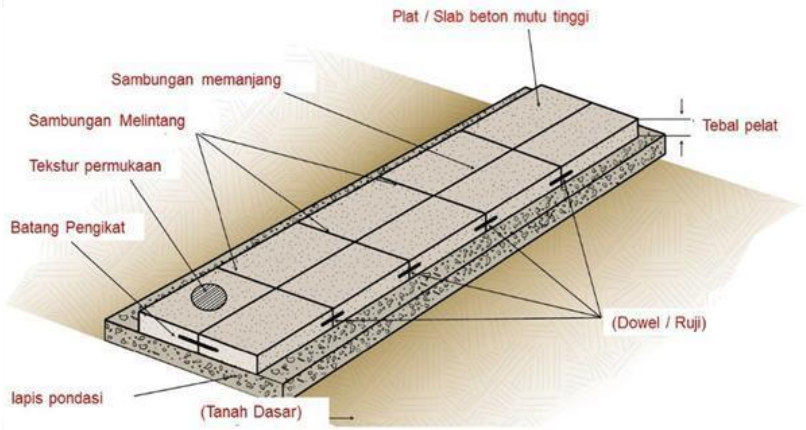
Bahu beton di sini harus merupakan bahu beton yang menyatu dengan pelat secara integral atau bahu beton yang mempunyai sifat struktural, dan harus mempunyai mutu beton dan tebal yang sama dengan tebal pelat itu sendiri dengan lebar minimum 60cm. Sedangkan lebar bahu yang menyatu dengan pelat beton dan letaknya di jalur median, lebarnya bisa dikurangi dengan minimum 50cm.

Gambar 2.4 Tipikal bahu beton pada perkerasan kaku.

Bahu beton yang diikatkan dan bersifat struktural adalah bahu beton yang sambungannya dibentuk ada takikan dengan lebar minimum 150cm. Gambar 2.4 menunjukkan tipikal bahu beton pada perkerasan kaku.

2.2.1.2 Jenis Perkerasan Kaku

Perkerasan kaku yang berupa pelat beton dilengkapi dengan beberapa sambungan, seperti sambungan susut melintang, sambungan memanjang, sambungan pelaksanaan serta sambungan muai. Masing-masing sambungan dan letaknya ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Tipe dan lokasi sambungan pada perkerasan kaku.

Ada beberapa tipe perkerasan kaku yang telah dikenal, akan tetapi ada dua hal yang paling penting. Pertama kekuatan terhadap beban lalu lintas yang dinyatakan dengan kuat tarik lentur dari beton. Jika penulangan digunakan, penulangan itu digunakan untuk mengontrol retak dan bukan untuk memikul beban lalu lintas. Hal yang kedua ialah bahwa perkerasan kaku menyusut akibat dari penyusutan beton itu sendiri sewaktu dalam proses mengeras, serta memuai dan menyusut akibat pengaruh temperatur, dan pergerakan ini harus diperhitungkan.

Jenis perkerasan kaku yang dikenal ada 5, yaitu:

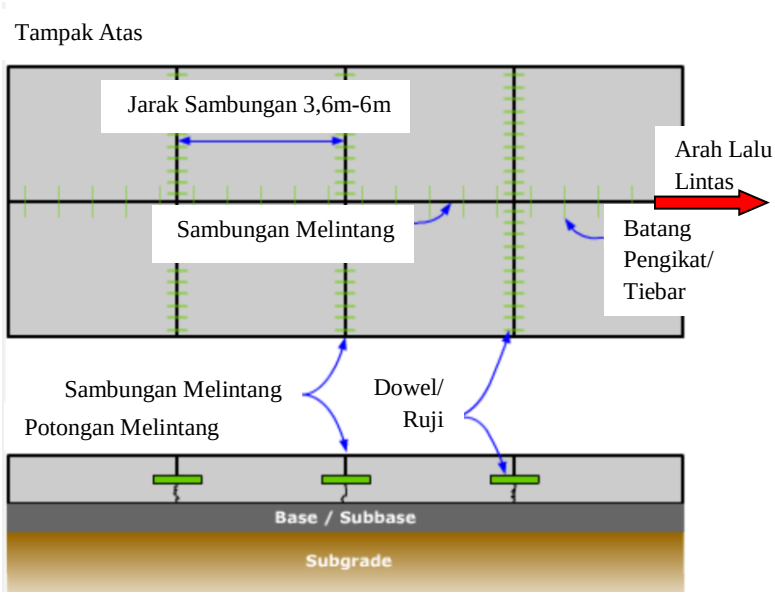
1. Perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan atau *"jointed unreinforced (plain) concrete pavement" (JPCP).*
2. Perkerasan kaku bersambung dengan tulangan atau *"jointed reinforced concrete pavement" (JRCP)*.
3. Perkerasan kaku menerus dengan tulangan atau *"continuously reinforced concrete pavement" (CRCP).*
4. Perkerasan beton semen 'prategang' atau *"prestressed concrete pavement"*.
5. Perkerasan beton semen pracetak (dengan dan tanpa prategang).

Perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan, perkerasan kaku bersambung dengan tulangan, dan perkerasan kaku menerus dengan tulangan termasuk dalam kelompok perkerasaan kaku konvensional. Perancangan dan rincian detail pada sambungan sangat penting untuk jenis-jenis perkerasan tersebut. Ketiga jenis perkerasan konvensional tersebut, juga telah digunakan sebagai pelapisan ulang, walaupun yang paling umum ialah perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan.

1. Perkerasan Kaku Bersambung Tanpa Tulangan *(Joint Plain Concrete Pavement - JPCP)*

Perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan adalah jenis yang paling umum digunakan karena biaya yang relatif murah dalam pelaksanaannya dibanding jenis lainnya. Survey yang dilakukan oleh *"American Concrete Pavement Association"(ACPA)* pada tahun 1999, di Amerika Serikat 70% dari badan pengelola jalan negara *(State Highway Agencies)* menggunakan perkerasan bersambung tanpa tulangan. Di daerah di mana korosi terhadap tulangan akan menjadi masalah, ketidakberadaan tulangan akan meniadakan masalah korosi tersebut, walaupun besi ruji *(dowel)* masih akan kena pengaruh korosi.

Sambungan susut umumnya dibuat setiap antara 3,6m dan 6m (di Indonesia umumnya antara 4,5m dan 5m). Sambungan ini mempunyai jarak yang relatif dekat sehingga retak tidak akan terbentuk di dalam pelat sampai akhir umur layan dari perkerasan tersebut. Karena itu pada perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan, pemuaian dan penyusutan perkerasan diatasi melalui sambungan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Skema perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan.

Pada perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan, tidak ada tulangan pada pelat, kecuali ruji *(dowel)* yang diletakkan pada sambungan susut tersebut, dan batang pengikat *(tiebar)* yang terletak pada sambungan memanjang, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7.

Ruji *(dowel)* Batang pengikat *(tiebar)*

Gambar 2.7 Ruji *(dowel)* dan Batang pengikat pada perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan.

Ruji *(dowel)* adalah baja polos lurus yang dipasang pada setiap jenis sambungan melintang dengan maksud sebagai sistem penyalur beban, sehingga pelat yang berdampingan dapat bekerja sama tanpa terjadi perbedaan penurunan yang berarti. Sedangkan batang pengikat *(tiebar)* adalah batang baja ulir yang dipasang pada sambungan memanjang dengan maksud untuk mengikat pelat agar tidak bergerak horizontal.

Satu kinerja yang penting dari perkerasan bersambung tanpa tulangan ialah penyalur beban yang melintang sepanjang sambungan. Jika sambungan mengalami *faulting* (perbedaan ketinggian dari kedua sisi pelat pada sambungan), maka pengemudi akan mengalami "*bumping*" pada sambungan dan menyebabkan ketidaknyamanan sewaktu mengemudi. Dua metode digunakan untuk melengkapi penyaluran beban pada sambungan perkerasan JPCP, yaitu *agregat interlocking* dan ruji *(dowel)*.

Jika ruji *(dowel)* tidak digunakan, maka penyaluran beban pada sambungan, bisa didapat melalui kekuatan geser dari *agregat interlocking*. Sambungan dengan *agregat interlocking* dibentuk selama pelaksanaan dengan menggergaji seperempat sampai sepertiga tebal pelat perkerasan untuk membuat perlemahan pada pelat di daerah tersebut. Retak akan terus menjalar melalui tebal pelat yang tidak digergaji ketika perkerasan mengalami penyusutan. Permukaan bidang retak ini akan kasar, sebab retak itu menjalar sekitar agregat melalui pasta atau *mortar* semen, dan selama retak tersebut tetap sempit, maka sambungan bisa menyalurkan beban dari satu pelat ke pelat lainnya melalui *bearing stress* dari masing masing partikel agregat yang dilalui retakan tersebut. Penyaluran beban akan menyesuaikan jika bukaan sambungan terlalu lebar atau jika agregat mengalami keausan. Kualitas dan ketahanan erosi dari bahan yang mendukung pelat pada sambungan juga mempengaruhi penyaluran beban.

Ketika perkerasan memikul beban lalu lintas yang berat, khususnya pada kecepatan tinggi, *agregat interlocking* akan hancur seiring dengan seringnya lalu lintas lewat. Hal ini akan menyebabkan

deformasi pada sambungan menjadi semakin besar, yang akhirnya menimbulkan *faulting*, dan kerusakan pada sambungan. Kedudukan batang pengikat pada sambungan memanjang ditunjukkan pada Gambar 2.8.

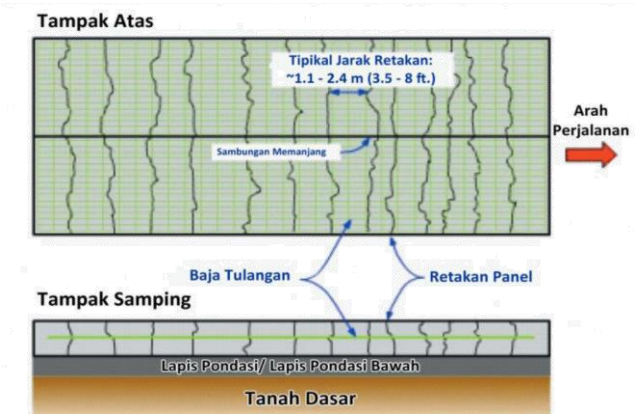
Gambar 2.8 Kedudukan batang pengikat pada sambungan memanjang.

2. Perkerasan Kaku Bersambung Dengan Tulangan *(Jointed Reinforced Concrete Pavement - JRCP)*

Perkerasan kaku bersambung dengan tulangan atau JRCP serupa dengan perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan (JPCP) kecuali ukuran pelat lebih panjang dan ada tambahan tulangan pada pelatnya. Jarak sambungan umumnya antara 7,5 m dan 12m, meskipun ada juga yang jarak sambungannya sebesar 30m. Hasil survei oleh ACPA pada tahun 1999, sekitar 20% dari pengelola jalan negara *(State Highway Agency)* di Amerika Serikat menggunakan perkerasan kaku bersambung dengan Tulangan (JRCP).

Pada pelat dan jarak sambungan yang lebih panjang, ruji *(dowel)* sangat disarankan karena bukaan sambungan akan menjadi lebih lebar dan *agregat interlocking* akan menjadi tidak efektif sebagai penyalur beban pada sambungan. Prosentase tulangan yang digunakan dalam arah memanjang umumnya antara 0,1% dan 0,2%

dari luas penampang melintang beton, sedangkan penulangan dalam arah melintang lebih kecil. Penulangan pada perkerasan kaku bersambung dengan tulangan bukan dimaksudkan untuk memikul beban secara struktural, tetapi untuk "memegang" retak agar tetap rapat, guna menjaga geser sepanjang bidang retakan sebagai penyalur beban tetap berfungsi.



Gambar 2.9 Perkerasan bersambung dengan tulangan.

Perkerasan kaku bersambung dengan tulangan ini masih tetap menggunakan ruji *(dowel)*. Selanjutnya karena panjang pelat lebih besar dari pada perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan, retak tetap terjadi pada interval yang sama, karena itu perkerasan bersambung dengan tulangan masih mempunyai satu atau dua retakan pada pelatnya.

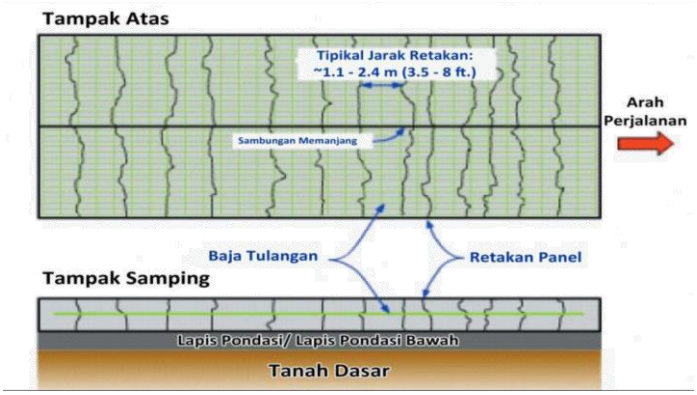
Keuntungan dari perkerasan kaku bersambung dengan tulangan adalah jumlah sambungan yang lebih sedikit, tetapi biayanya lebih mahal karena adanya penggunaan tulangan serta kinerja sambungan yang kurang baik dan adanya retak pada pelat. Karena jarak antar sambungan yang lebih besar dari perkerasan kaku bersambung tanpa tulangan, maka bukaan dan penutupan sambungan menjadi lebih lebar, serta ruji *(dowel)* sebagai penyalur beban menjadi lebih rentan ketika sambungan terbuka lebih lebar.

3. Perkerasan Kaku Menerus Dengan Tulangan *(Continous Reinforced Concrete Pavement - CRCP)*

Perkerasan kaku menerus dengan tulangan adalah pelat dengan jumlah tulangan yang cukup banyak tanpa sambungan susut. Jumlah tulangan yang digunakan pada arah memanjang umumnya antara 0,6% dan 0,8% dari luas penampang melintang beton, dan jumlah tulangan dalam arah melintang lebih kecil dari arah memanjang. Pengalaman menunjukkan jika jumlah tulangan yang digunakan pada perkerasan kaku menerus dengan tulangan lebih kecil dari 0,6%, maka potensi terjadinya kerusakan *punch out* akan menjadi lebih besar.

Retak rambut terjadi pada perkerasan kaku menerus dengan tulangan, tetapi bukan merupakan masalah bagi kinerjanya. Karakteristik retak terdiri dari beberapa retakkan, umumnya dengan jarak antara 0,6m-2,4m. Retak-retak tersebut “dipegang” oleh tulangan yang ada sehingga *agregat interlocking*-nya serta penyaluran gaya geser masih dapat terjadi. Jika *interlocking* geser agregat tidak dijaga, maka kerusakan "*punch out*" pada tepi perkerasan akan terjadi, yang merupakan tipikal kerusakan perkerasan kaku menerus dengan tulangan.

Perkerasan kaku menerus dengan tulangan memerlukan angker pada awal dan akhir dari perkerasan, untuk menahan ujung-ujung nya dari kontraksi akibat dari penyusutan, serta membantu perkembangan retak sesuai dengan yang diinginkan. Gambar 2.10 dan Gambar 2.11 memperlihatkan perkerasan kaku menerus dengan tulangan.



Gambar 2.10 Skema perkerasan kaku menerus dengan tulangan.

Gambar 2.11 Sambungan pelaksanaan melintang dan tulangan pada perkerasan menerus dengan tulangan.

Perkerasan kaku menerus dengan tulangan ini akan memberikan kenyamanan berkendaraan yang lebih baik, karena permukaanya lebih rata, serta mempunyai umur yang lebih panjang dari tipe perkerasan lainnya. Survey yang dilakukan oleh ACPA tahun 1999, menemukan hanya delapan negara bagian di Amerika Serikat yang membangun perkerasan kaku menerus dengan tulangan ini. Studi yang dilakukan pada tahun 2000 tentang kinerja perkerasan kaku di Amerika Serikat bagian tenggara terhadap jalan CRCP di negara bagian Alabama, Florida, Mississippi, Carolina utara dan Carolina Selatan, membuktikan kinerja CRCP sangat bangus. Pada saat survey dilakukan umur perkerasan tersebut antara 21 dan 30 tahun dan telah

melayani lalu lintas berat, serta mempunyai kondisi sangat bagus sampai luar biasa dengan nilai *service ability* 4 atau lebih.

Biaya untuk perkerasan kaku menerus dengan tulangan lebih mahal dari perkerasan bersambung tanpa tulangan atau perkerasan bersambung dengan tulangan, disebabkan oleh jumlah tulangan yang digunakan cukup banyak. Akan tetapi perkerasan kaku menerus dengan tulangan telah terbukti mempunyai pembiayaan yang efektif pada jalan dengan lalu lintas yang tinggi, disebabkan oleh kinerja jangka panjangnya yang lebih baik dibandingkan dengan jenis perkerasan kaku lainnya.

4. Perkerasan Kaku Prategang *(Prestres Concrete Pavement)*

Perkerasan kaku prategang diperkenalkan di akhir tahun 1940an dan pertama kali digunakan di lapangan terbang. Sekitar tahun 1959 dua pelat pratekan digunakan di lapangan terbang militer Priggs di Texas. Perkerasan kaku tanpa tulangan setebal 60cm diganti dengan perkerasan kaku prategang setebal 23cm. Di lapangan terbang internasional Chicago O'Hax, yaitu perkerasan kaku prategang setebal antara 20,3cm dan 22,8cm diletakan di atas perkerasan kaku menerus dengan tulangan lama dengan tebal 30,5cm.

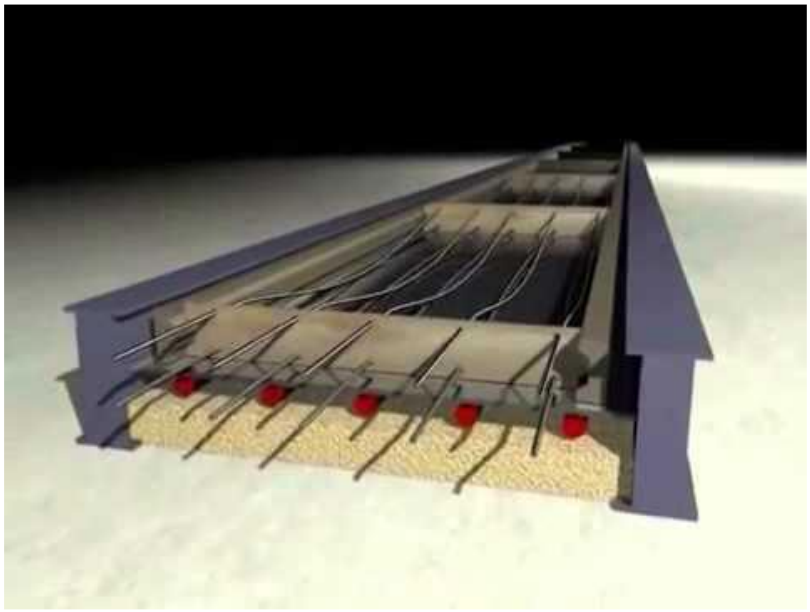
Beberapa dari proyek tersebut mempunyai *strand* untuk prategang hanya dalam satu arah saja, sehingga cenderung terjadi retak searah dengan *strand*, akibat tidak adanya tegangan tekan dalam arah melintang. Perkerasan kaku prategang dengan tebal 15cm yang diberi tegangan tekan dalam ke dua arah, dengan panjang proyeknya 1600m di Texas; masih dalam kondisi baik setelah berumur 17 tahun.

Puslitbang Jalan dan Jembatan, telah membuat jalur percobaan dengan perkerasaan kaku prategang pada tahun 2011 di Buntu, Jawa Tengah, sepanjang 80m, Lebar 7meter dan tebal 20cm.

Potensi dari perkerasan kaku prategang, berkaitan dengan dua hal, yaitu:

a. Penggunaan bahan yang lebih efisien.
b. Sambungan yang dibutuhkan menjadi lebih sedikit dan kemungkinan terjadinya retak akan lebih kecil, sehingga biaya pemeliharaan lebih sedikit dan umur perkerasan akan lebih lama.

Pada perkerasan kaku konvensional, tegangan akibat beban roda dibatasi oleh kuat tarik lentur dari beton, jadi tebal perkerasan ditentukan oleh tegangan tarik yang terjadi akibat beban roda tidak melampaui kuat tarik lentur dari beton. Pada jenis perkerasan kaku konvensional, beton antara serat atas dan serat bawah dari pelat tidak dimaksimalkan untuk menahan tegangan akibat beban roda, yang hasilnya penggunaan bahan konstruksi tersebut tidak efisien. Sedangkan pada perkerasan beton prategang, kuat tarik lentur beton ditingkatkan dengan memberikan tegangan tekan dan tidak dibatasi lagi oleh kuat tarik lentur betonnya. Dengan demikian tebal perkerasan kaku yang dibutuhkan untuk beban tertentu akan lebih tipis dari tebal perkerasan kaku konvensional. Perkerasan kaku jenis prategang, yang umum dilaksanakan, mempunyai ukuran panjang pelat sekitar 130m. Tetapi di Amerika telah dibangun dengan panjang pelat 230m, dan di Eropa dengan panjang pelat lebih dari 300m. Tebal perkerasan kaku prategang sekitar 40% sampai 50% dari tebal perkerasan kaku konvensional. Skema dari perkerasan kaku prategang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Skema perkerasan kaku prategang.

5. Perkerasan Kaku Pracetak

Perkerasan kaku pracetak dapat dibedakan menjadi 2 jenis yaitu:

a. Perkerasan kaku pracetak tanpa prategang.
b. Perkerasan kaku pracetak dengan prategang.

Perkerasan kaku pracetak prategang, telah dibuat di negara bagian Missouri dan Indiana, Amerika Serikat pada tahun 2005. Perkerasan ini terdiri dari individual panel yang dicetak terlebih dahulu serta diberi pratekan dengan tebal pelat 20cm dan dicetak selebar perkerasan jalan. Perkerasan kaku pracetak prategang ini kurang lebih mempunyai kapasitas menerima beban lalu lintas, setara dengan perkerasan kaku konvensional setebal 35,5cm.

Pada perkerasan kaku pracetak prategang ini, ada dua tipe jenis pelat yang digunakan, yaitu:

a. *Joint panel*, terletak di ujung-ujung dari masing-masing bagian rangkaian pelat pratekan dan mempunyai ruji *(dowel)* pada sambungannya untuk mengakomodir pergerakan horizontal pelat.
b. *Central panel*, terletak di tengah-tengah dari rangkaian pelat dan terdapat lubang *(pocket)* untuk penempatan ujung-ujung *posttensional strand base panel*, pelat-pelat yang dominan membentuk suatu sistem perkerasan, yang diletakan di antara *joint panel* dan *central panel*.

Dalam pelaksanaannya, pada suatu tahapan kegiatan, harus dilaksanakan paling sedikit satu segmen yang mencakup susunan pelat dari *joint panel* ke *joint panel* berikutnya. Pelat-pelat tersebut diletakkan di atas lapisan pondasi yang sudah siap dan rata, sedangkan pelat-pelat tersebut pada kedua sisinya dilengkapi dengan lidah-alur *(shear key)* yang mengontrol *alinyemen vertikal* selama pelaksanaan dan menjamin kenyamanan pengendara untuk mencegah terjadinya "*faulting*".

Keuntungan dari perkerasan kaku pracetak ialah terjaganya kualitas beton tetap tinggi sesuai yang direncanakan, pengaruh akibat cuaca sangat kecil, dan selama pelaksanaan tidak terlalu menganggu lalu lintas.

Gambar perkerasan kaku pracetak prategang diperlihatkan pada gambar di bawah ini.

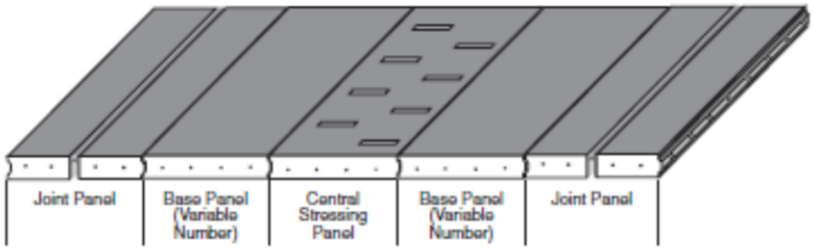


Figure 5.4 Typical panel assembly

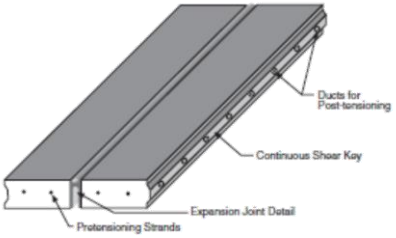


Figure 5.3 Joint panel

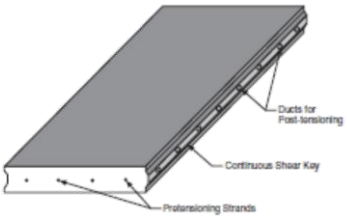


Figure 5.1 Base panel

Gambar 2.13 Skema perkerasan kaku pracetak pratekan.

Panel siap diangkut ke lapangan	Pengangkatan dan pemasangan *panel*

Pemasangan susunan *panel*

Pemberian tegangan *post tension* dari *central panel*

Gambar 2.14 Susunan *panel* dan jenis *panel* serta pemasangan *panel* menjadi lapisan perkerasan.

Pada tahun 2010 jenis perkerasan kaku pracetak prategang telah diaplikasikan di Indonesia di ruas jalan tol Kanci-Pejagan (Provinsi Jawa Barat-Jawa Tengah). Jalur tol ini menghubungkan Kanci yang berada di Kabupaten Cirebon Km 231+000 (Km 0) hingga Pejagan di Kabupaten Brebes (provinsi Jawa Tengah) pada Km 266+000 (Km 0 Jkt). Total panjang jalan tol ini 35km, dan *panel* yang dibuat dengan ukuran 8m x 2,5m x 0,20m (panjang x lebar x tebal), serta dipasang secara melintang terhadap sumbu jalan, Pada tahun 2011 jalan pracetak prategang lainnya, yang dibuat di Indonesia ialah di ruas Jalan Pantura di daerah Ciasem-Subang Jawa Barat. Pracetak dan prategang yang dilaksanakan di sini serupa dengan jalan pracetak prategang yang telah dilaksanakan di jalan tol Kanci-Pejagan, yang pemasangan pelatnya juga melintang jalan. Panjang jalan dengan pracetak prategang di Ciasem ini hanya 1,8km.

Salah satu perbedaan antara jalan tol Kanci-Pejagan dan daerah Ciasem-Pantura (Kabupaten Subang) ialah pada jalan tol Kanci-Pejagan merupakan jalan baru sehingga tidak ada gangguan lalu lintas sedangkan pada lokasi di Ciasem-Subang merupakan jalan yang sudah ada sehingga pengaruh lebar jalan dan lalu lintas menjadi hal yang menjadi pertimbangan dalam perancangan maupun pelaksanaannya.

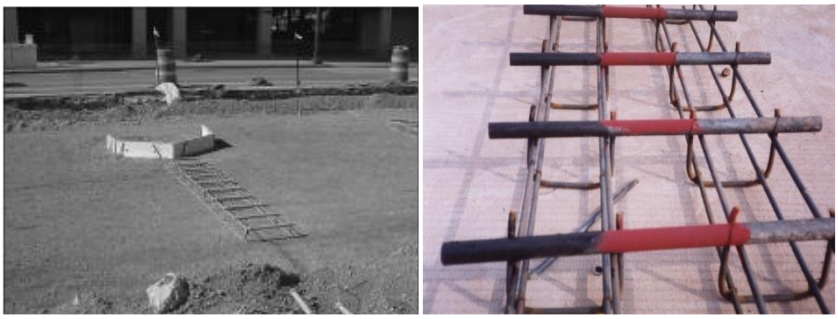
2.2.1.3 Jenis Sambungan Pada Perkerasan Kaku

Perkerasan kaku konvensional (JPCP, JRCP, CRCP) menggunakan beberapa sambungan melintang dan memanjang. Sambungan susut melintang digunakan pada JPCP dan JRCP, umumnya menggunakan ruji *(dowel)*. Pada setiap akhir dari pelaksanaan harian pembuatan perkerasan, atau pelaksanaan penghamparan yang mengalami keterlambatan, digunakaan sambungan pelaksanaan melintang, umumnya dilakukan pada lokasi sambungan susut yang telah direncanakan dari JPCP dan JRCP. Sambungan muai melintang atau sambungan isolasi dipasang di mana pemuaian dari perkerasan akan merusak jembatan atau fasilitas drainase di sebelahnya. Sambungan susut memanjang dibuat bila dua atau lebih perkerasan ataupun bahu jalan dilaksanakan pada saat yang bersamaan. Sedangkan sambungan pelaksanaan memanjang digunakan antara dua lajur atau bahu jalan yang diperkeras pada saat yang berbeda.

1. Sambungan Susut Melintang

Sambungan susut melintang didefinisikan (sesuaikan dengan pedoman/ SNI) adalah jenis sambungan melintang dengan maksud untuk mengendalikan retak susut beton, serta membatasi pengaruh tegangan lenting yang timbul pada pelat akibat pengaruh perubahan temperatur dan kelembaban. Jarak antara tiap sambungan susut, umumnya dibuat sama.

Sambungan susut pada perkerasaan dengan beban lalu lintas yang ringan, bisa hanya merupakan *agregat interlocking* sepanjang sambungan. Sedangkan untuk beban lalu lintas yang lebih berat, menggunakan ruji *(dowel)* sebagai penyalur beban pada sambungan. Ruji *(dowel)* mencegah pergerakan vertikal atau *faulting* di antara pelat, tetapi memungkinkan sambungan untuk membuka dan menutup guna melepaskan tegangan yang terjadi akibat perubahan temperatur dan kadar air pada perkerasan beton. Ruji *(dowel)* dilengkapi dengan lapisan anti karat diperlihatkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Pemasangan dudukan ruji *(dowel)* dilengkapi dengan lapisan anti karat.

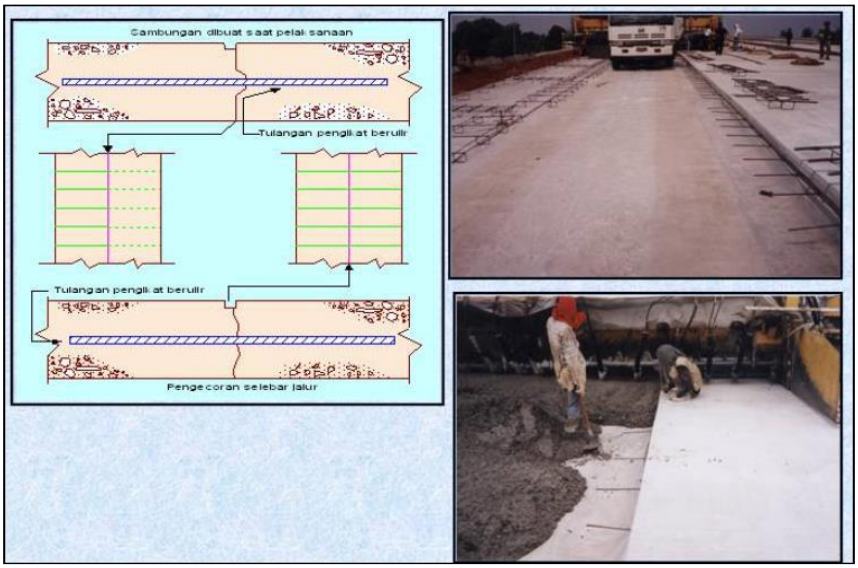
Pada perkerasan dengan sambungan, sambungan melintang (biasanya dipasang ruji) tegak lurus terhadap arah lalu lintas. Fungsi utama dari sambungan susut melintang, ialah untuk mengontrol retak sebagai akibat dari tegangan tarik dan tegangan lentur pada pelat beton yang disebabkan oleh proses *hidrasi* semen, beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan. Karena sambungan ini berjumlah sangat banyak, maka kinerjanya akan mempengaruhi kinerja perkerasan secara signifikan. Kerusakan yang terjadi pada sambungan umumnya "*faulting*" dan atau *spalling* (gompal). Kinerja sambungan yang jelek akan mengakibatkan kerusakan lebih lanjut seperti pecah di bagian sudut, *blows up*, dan retak di bagian pelat. Kinerja sambungan susut melintang berkaitan dengan tiga faktor utama, yaitu jarak antar sambungan, penyalur beban yang melintang sambungan dan bentuk sambungan serta sifat bahan penutup *(joint sealent)*.

2. Sambungan Memanjang

Sambungan memanjang ialah sambungan antar dua pelat yang memungkinkan pelat melenting tanpa terjadi pemisahan atau retak pada pelat tersebut. Sambungan memanjang digunakan untuk melepaskan tegangan lenting dan umumnya diperlukan bila lebar pelat lebih dari 4,6m. Lebar pelat yang lebih kecil atau sama dengan 4,6m menunjukkan kinerja yang memuaskan tanpa sambungan memanjang, walaupun ada kemungkinan terjadinya beberapa retak memanjang. Sambungan memanjang bila memungkinkan, sebaiknya

satu garis dengan garis lajur perkerasan, untuk meningkatkan layanan lalu lintas. Marka berupa “cat strip lurus” ditempatkan pada lajur perkerasan. Penyaluran beban pada sambungan memanjang didapat melalui *agregat interlock*. Untuk membantu penyaluran beban, batang pengikat sering digunakan yang dipasang melintang pada sambungan memanjang. Batang pengikat lebih kecil ukuranya dari ruji *(dowel)*, dan merupakan besi sirip (besi alur). Batang pengikat pada dudukannya dipasang di antara lajur dan juga diberi lapisan epoxy untuk mencegah karat seperti ditunjukkan pada Gambar 2.16.

Sambungan memanjang bisa dibuat dengan penggergajian atau dibuat sebagai sambungan pelaksanaan. Jika digergaji dudukannya dipasang terlebih dahulu dan sambungan digergaji seperti pada cara pembuatan sambungan susut melintang. Jika dibuat sebagai sambungan pelaksanaan, batang pengikat digunakan untuk mengikat pelat beton yang sudah dan baru dihampar.



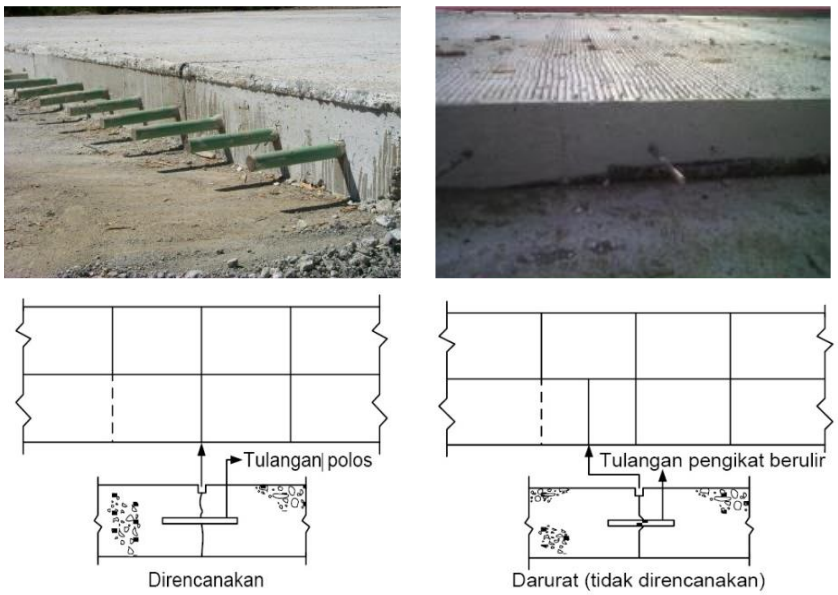
Gambar 2.16 Pemasangan sambungan memanjang.

3. Sambungan Pelaksanaan

Sambungan pelaksanaan ialah sambungan antara pelat bila beton dicor pada saat yang tidak bersamaan. Tipe sambungan ini bisa dibagi lagi menjadi sambungan pelaksanaan melintang dan memanjang. Gambar dari sambungan pelaksanaan melintang ditunjukkan pada Gambar 2.17.

Setelah penghamparan mencapai daerah sambungan, maka papan pemisah akan dilepas. Pada penghamparan berikutnya, adukan beton yang baru langsung menempel pada permukaan penampang melintang beton yang lama.

Sambungan pelaksanaan melintang, umumnya menggantikan sambungan susut, akan tetapi jangan dibuat miring, karena penghamparan dan pemadatan yang sempurna akan sulit didapat. Sambungan pelaksanaan melintang hendaknya dipasang ruji *(dowel)* dan menyatu langsung dengan beton lama. Sambungan melintang beralur cenderung gompal, sehingga tidak direkomendasikan. Disarankan sambungan pelaksanaan melintang, digergaji dan diberi lapisan penutup *(joint sealent).*



Gambar 2.17 Sambungan pelaksanaan melintang.

4. Sambungan Pelaksanaan Memanjang

Batang pengikat harus terikat kuat pada beton, batang pengikat hendaklah dimasukkan pada beton yang masih plastis. Sangat disarankan untuk melakukan pengujian "*pull out*" untuk menjamin bahwa batang pengikat tertanam kuat pada beton. Pembengkokan batang pengikat tidak dianjurkan. Bila pembengkokan harus dilakukan, kemudian diluruskan saat pelaksanaan, maka tulangan yang dipergunakan adalah grade 40 (tegangan lelehnya kurang dari 276MPa), karena tulangan seperti ini lebih toleran terhadap pembengkokan. Mungkin diperlukan pengulangan kembali pemberian lapisan tahan karat pada batang pengikat setelah diluruskan kembali. Bilamana dilakukan pengujian *pull out*, maka pengujian tersebut harus dilakukan setelah batang pengikat diluruskan kembali. Disarankan sambungan pelaksanaan memanjang digergaji dan diberi lapisan penutup. Ukuran *reservoar* hendaklah sama dengan ukuran pada sambungan melintang.

Sambungan memanjang berupa lidah alur, telah digunakan pada masa lalu dan sekarang sangat jarang. Sambungan ini berupa konfigurasi dari lidah yang pendek dan alur *(takikan)* yang pas ukuranya untuk memindahkan gaya geser. Pemilihan untuk menggunakan sambungan pelaksanaan memanjang dengan tipe lidah alur harus dilakukan dengan hati-hati. Bagian atas dari pelat di atas lidah alur seringkali mengalami kerusakan akibat geser. Dengan alasan tersebut, disarankan bahwa sambungan dengan lidah alur tidak digunakan bila tebal pelat lebih kecil dari 25cm. Pada sambungan pelaksanaan memanjang, sambungan memanjang tersebut perlu bergeser sekitar 10cm sampai 40cm dari sambungan pelaksanaan memanjang pada pelat betonnya, guna mencegah retak refleksi. Sambungan pelaksanan memanjang ditunjukkan pada Gambar 2.18.

Gambar 2.18 Sambungan pelaksanaan memanjang pada perkerasan bersambung tanpa tulangan.

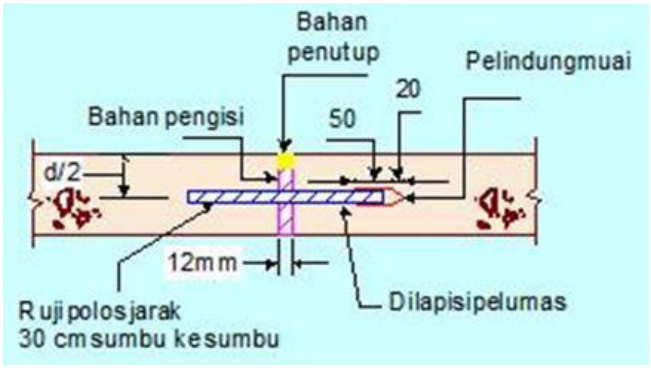
5. Sambungan Muai *(Expansion Joint)*

Sambungan muai ialah sambungan yang terletak pada lokasi spesifik untuk memungkinkan perkerasan memuai tanpa merusak struktur di sebelahnya atau merusak perkerasan itu sendiri. Umumnya ini digunakan pada daerah dekat kepala jembatan dan utilitas yang tertanam di jalan.

Perancangan perkerasan di awal, menggunakan sambungan muai melintang seperti sambungan susut, tetapi kinerjanya tidak baik. Salah satu rancangan awal menggabungkan sambungan muai dengan jarak setiap 28m dengan sambungan susut setiap 9m. Jika sambungan muai menutup memungkinkan sambungan susut terbuka dengan sangat lebar.

Perancangan dan pemeliharaan sambungan susut yang baik sebenarnya bisa menghilangkan keperluan sambungan muai, kecuali pada objek seperti struktur. Ketika sambungan muai digunakan, perkerasan bergerak mendekati sambungan muai dalam waktu beberapa tahun. Hal ini menyebabkan beberapa sambungan susut yang berdekatan akan terbuka dan merusak lapisan penutup dan *agregat interlocknya*. Lebar dari sambungan muai umumnya 19mm atau lebih dan dipasang 19mm - 25mm di bawah permukaan pelat,

untuk memberikan tempat bagi pemasangan lapisan penutup *(joint sealent)*. Ruji *(dowel)* polos paling umum digunakan sebagai alat penyalur beban pada sambungan muai ini. Setiap ruji *(dowel)* pada sambungan muai dilengkapi dengan penutup pada satu ujungnya, yang memberikan ruang pada pelat untuk mengakomodir pergerakan ruji *(dowel)*, ketika pelat di sebelahnya mendekati ke sambungan muai, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Sambungan muai.

Pada lokasi jembatan, sambungan muai sangat penting sebab perkerasan yang mengalami pemuaian bisa menimbulkan gaya dan kerusakan pada bagian atas jembatan serta kepala jembatan itu sendiri *(abutmen)*.

2.2.1.4 Perkembangan Peralatan

Pada mulanya pelaksanaan pembangunanan perkerasan kaku menggunakan acuan tetap *(fix form)* dari besi. Harga acuan ini dipandang mahal, sehingga dikembangkan alat penghampar yang dikenal dengan acuan gelincir *(slip form)*. Pada acuan gelincir ini tidak diperlukan lagi acuan tetap, karena acuannya bersatu dengan mesin penghampar dan bergerak maju selama penghamparan. Pada pembangunan dengan acuan gelincir ini, *slump* beton dirancang lebih kecil dari pada *slump* beton untuk acuan tetap, agar tepi plat beton tidak runtuh ketika ditinggalkan oleh acuan gelincir tersebut. Acuan gelincir

ini pertama kali dikembangkan di Iowa antara tahun 1946 dan 1949 oleh dua ahli jalan raya yaitu James W. Johnson dan Bet Myers. Inovasi ini pertama kali digunakan tahun 1949 pada perkerasan dengan lebar 2,7m dan tebal pelat 0,15m. Dengan menggunakan dua pengampar secara bersamaan, jalan tersebut bisa dibuat dengan sekali jalan. Menjelang tahun 1955, perusahaan Quad City Construction telah mengembangkan dan memperbaikinya sehingga penghampar bisa membuat perkerasan dengan lebar 7,3m dengan tebal 0,25m, dan selanjutnya dikembangkan penghampar yang lebih besar lagi.

Bagian-bagian dari pengerasan dengan acuan gelincir modern diperlihatkan pada Gambar 2.20 dan Gambar 2.21 Gambar 2.20 memperlihatan ruji *(dowel)* yang diletakan dan dipasang dengan kokoh pada dudukannya, untuk melengkapi penyaluran beban pada sambungan penggergajian melintang.

Pada saat ini pelaksanaan perkerasan kaku masih ada yang menggunakan acuan tetap di samping acuan gelincir.

Gambar 2.20 Ruji *(dowel)* dan batang pengikat yang di letakkan dengan kokoh sebelum penghamparan dengan *slipform.*

Gambar 2.21 Mesin penghampar *slipform*.

2.2.1.5 Lapis Tambah *(Overlay)*

Pelapisan kaku bisa juga digunakan untuk pelapisan ulang, apakah di atas perkerasan aspal maupun di atas perkerasan kaku yang lama. Ada dua klasifikasi pada pelapisan ulang tersebut, berdasarkan apakah lapisan ulang tersebut terikat *(bonded)* dengan perkerasan lama atau apakah ikatan itu diabaikan atau dicegah *(unbounded)*.

Pelapisan beton dengan cara *unbounded* ialah yang dibangun di atas perkerasan beton lama, dengan kondisi tertentu untuk mencegah ikatan antara dua lapisan tersebut. Umumnya pemecah ikatan *(bond breaker)* adalah lapisan tipis campuran beraspal panas. Alasan dari penggunaan *bond breaker* ini, ialah untuk menjaga retak dan kerusakan lainnya pada perkerasan lama yang menjalar sampai ke lapisan barunya *(reflection crack)*. Dengan adanya lapisan *bond breaker* (pemecah ikatan), fungsi perkerasan lama sebagai sebagai *base* dengan kualitas yang tinggi untuk mendukung perkerasan baru.

Lapis tambah dengan sistem *bonded* ialah pelapisan pada perkerasan lama dengan ikatan di antara dua lapisan tersebut. Pelapisan tambah dengan cara ini, ketebalannya bisa sampai 5cm, sebab adanya sistem *komposit* dengan perkerasan lamanya.

Akan tetapi, karena setiap kerusakan pada lapisan beton lama, akan menjalar ke lapisan di atasnya, maka pelapisan tambah beton dengan sitem *bonded* dibatasi untuk perkerasan lama yang mempunyai kondisi cukup baik. Hal ini mungkin yang menjadi alasan utama,

mengapa pelapisan dengan sistem ini, sangat jarang digunakan. Pengelola jalan enggan untuk mengalokasikan dananya pada jalan yang kondisinya masih relatif baik dan cenderung mengalokasikan dananya kepada perkerasan dengan kondisi yang lebih jelek. Alasan lainnya mengapa ini jarang dipergunakan, ialah jika "ikatan" tidak tercapai, pelapisan tambah ini akan mengalami kerusakan dengan cepat. Lapis tambah dengan sitem *bonded* dapat dilihat pada Gambar 2.22 di bawah ini.

Gambar 2.22 Lapis tambah sistem *bonded*.

2.2.2 Beton

Beton adalah campuran antara semen *portland*, agregat (agregat kasar dan agregat halus), air dan terkadang ditambah dengan menggunakan bahan tambah *(admixtures)* yang bervariasi mulai dari bahan tambah kimia, serat sampai dengan bahan non kimia pada perbandingan tertentu (Tjokrodimuljo, 1996). Beton dihasilkan dari sekumpulan interaksi mekanis dan kimia sejumlah material pembentuknya (Nawy, 1985).

DPU-LPMB memberikan definisi tentang beton sebagai campuran antara semen *portland* atau semen *hidrolik* yang lainnya,

agregat halus, agregat kasar dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan membentuk massa padat (SK.SNI T-15-1990-03:1).

Dalam keadaan segar, beton mudah dibentuk sesuai dengan yang diinginkan. Apabila campuran beton dibiarkan maka akan mengeras seperti batu. Pengerasan itu terjadi karena peristiwa reaksi kimia antara air dan semen. Beton dalam keadaan mengeras mempunyai nilai kuat tekan yang tinggi. Untuk Mencapai kuat tekan beton perlu diperhatikan kepadatan dan kekerasan massanya. Umumnya semakin padat dan keras massa agregat akan semakin tinggi nilai kekuatan dan *durability*-nya (daya tahan terhadap penurunan mutu dan akibat pengaruh cuaca).

Beton mempunyai sifat dan karakteristik sebagai berikut:

1. Karakteristik beton mempunyai tegangan hancur tekan yang tinggi serta tegangan hancur tarik yang rendah.
2. Beton tidak dapat dipergunakan pada elemen konstruksi yang memikul momen lengkung atau tarikan.
3. Beton sangat lemah dalam menerima gaya tarik, sehingga akan terjadi retak yang makin-lama makin besar.
4. Proses kimia pengikatan semen dengan air menghasilkan panas dan dikenal dengan proses *hidrasi*.
5. Air berfungsi juga sebagai pelumas untuk mengurangi gesekan antar butiran sehingga beton dapat dipadatkan dengan mudah.
6. Kelebihan air dari jumlah yang dibutuhkan akan menyebabkan butiran semen berjarak semakin jauh sehingga kekuatan beton akan berkurang.
7. Dengan perkiraan komposisi *(mix design)* dibuat rekayasa untuk memeriksa dan mengetahui perbandingan campuran agar dihasilkan kekuatan beton yang tinggi.
8. Selama proses pengerasan campuran beton, kelembaban beton harus dipertahankan untuk mendapatkan hasil yang direncanakan.
9. Setelah 28 hari, beton akan mencapai kekuatan penuh dan elemen konstruksi akan mampu memikul beban luar yang bekerja padanya.
10. Salah satu kekurangan yang besar adalah berat sendiri konstruksi.

2.2.2.1 Kelas dan Mutu Beton

Dalam Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971 (PBI 1971 N.I.-2) dijelaskan kelas dan mutu beton dibagi menjadi tiga kelas yaitu:

a) Beton Kelas I

Beton kelas I adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan nonstruktur. Untuk pelaksanaannya tidak diperlukan keahlian khusus. Pengawasan mutu hanya dibatasi pada pengawasan ringan terhadap mutu bahan-bahan, sedangkan terhadap kekuatan tekan tidak disyaratkan pemeriksaan.

b) Beton Kelas II

Beton Kelas II adalah beton untuk pekerjaan struktur secara umum. Pelaksanaannya memerlukan keahlian yang cukup dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga ahli. Beton Kelas II dibagi dalam mutu standar: Bl, K125, K175, dan K225. Pada mutu B1, pengawasan mutu hanya dibatasi pada pengawasan sedang terhadap mutu bahan, sedangkan terhadap kekuatan tekan tidak disyaratkan pemeriksaan. Pada mutu K125, K175, dan K225, pengawasan mutu terdiri dari pengawasan yang ketat/menerus terhadap mutu bahan dengan mengharuskan pemeriksaan kuat tekan beton secara berkala.

c) Beton Kelas III

Beton Kelas III adalah beton untuk pekerjaan struktural di mana di pakai mutu beton dengan kekuatan tekan karakteristik yang lebih tinggi dari 225kg/cm2. Pelaksanaannya memerlukan keahlian khusus dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga ahli. Disyaratkan adanya laboratorium beton dengan peralatan yang lengkap yang dilayani oleh tenaga ahli yang dapat melakukan pengawasan mutu beton secara berkala.

2.2.2.2 Macam-Macam Jenis Beton

Beton dibedakan dalam dua kelompok besar, yaitu:

1. Beton Keras

   Sifat-sifat beton keras yang penting adalah kekuatan karakteristik, kekuatan tekan, tegangan dan regangan, susut dan rangkak, reaksi terhadap temperatur, keawetan dan kekedapan terhadap air. Dari semua sifat tersebut yang terpenting adalah kekuatan tekan beton karena merupakan gambaran dari mutu beton yang ada kaitannya dengan struktur beton.

2. Beton segar

   Beton segar adalah campuran beton yang telah selesai diaduk sampai beberapa saat, karakteristiknya tidak berubah (masih plastis dan belum terjadi pengikatan) (SNI 03-3976-1995). Ada beberapa hal penting yang harus dipenuhi ketika membuat beton segar antara lain yaitu:

   a. Sifat-sifat penting yang harus dimiliki beton segar dalam jangka waktu yang lama, seperti kekuatan, keawetan, dan kestabilan volume.
   b. Sifat-sifat yang harus dipenuhi dalam jangka waktu pendek ketika beton dalam kondisi plastis *(workability)* atau kemudahan pengerjaan tanpa adanya *bleeding* dan *segregation.*

2.2.2.3 Bahan Penyusun Beton

Kualitas beton yang dihasilkan dari campuran bahan-bahan dasar penyusun beton meliputi kekuatan dan keawetan. Sifat-sifat beton sangat ditentukan oleh sifat bahan penyusunnya, nilai perbandingan dari bahan-bahan penyusunnya, cara pengadukan, cara pengerjaan selama penuangan adukan beton ke dalam cetakan beton, cara pemadatan dan cara perawatan selama proses pengerasan.

Susunan beton secara umum, yaitu: 7-15% semen, 16-21% air, 25-30% pasir, dan 31-50% kerikil. Kekuatan beton terletak pada perbandingan jumlah semen dan air, rasio perbandingan air terhadap semen *(W/C ratio)* yang semakin kecil akan menambah kekuatan

(compressive strength) beton. Kekuatan beton ditentukan oleh perbandingan air semen, selama campuran cukup plastis, dapat dikerjakan dan beton itu dipadatkan sempurna dengan agregat yang baik (Nugraha dan Antoni, 2007). Beton mempunyai karakteristik yang spesifikasinya terdiri dari beberapa bahan penyusun sebagai berikut:

1. Agregat

Agregat adalah material *granular*, misalnya pasir, kerikil, batu pecah dan kerak tungku besi, yang dipakai secara bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk suatu beton semen *hidraulik* atau adukan (SK SNI T-15-1991-03). Agregat merupakan komponen utama dari struktur perkerasan jalan, yaitu 90%-95% agregat berdasarkan persentase berat, atau 75-85% agregat berdasarkan persentase volume. Dengan demikian kualitas perkerasan jalan ditentukan juga dari sifat agregat dan hasil campuran agregat dengan material lain.

Agregat yang digunakan dalam campuran beton dapat berupa agregat alam atau agregat buatan *(articficial aggregates)*. Secara umum, agregat dapat dibedakan berdasarkan ukurannya, yaitu, agregat kasar dan agregat halus. Batasan antara agregat halus dan agregat kasar yaitu 4.80mm *(British Standard)* atau 4.75mm *(ASTM Standard)*.

a. Agregat Halus

Agregat halus dapat berupa pasir alam, pasir dari hasil olahan atau gabungan dari keduanya. Agregat pun dibedakan berdasarkan beratnya, asalnya, diameter butirnya *(gradasi)*, dan tekstur permukaannya. Persyaratan mutu berdasarkan ASTM C33-86 dan berdasarkan SII 0052-80 yang keduanya dicantumkan dalam Peraturan Beton Indonesia PBI 1971 adalah sebagai berikut:

1) Pasir terdiri dari butir-butir tajam dan keras. Bersifat kekal artinya tidak mudah lapuk oleh pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan.

2) Tidak mengandung lumpur lebih dari 5%. Lumpur adalah bagian-bagian yang bias melewati ayakan 0,063mm. Apabila kadar lumpur lebih dari 5%, maka harus dicuci. Khususnya pasir untuk bahan pembuat beton.
3) Kadar gumpalan tanah liat dan partikel yang mudah direpihkan maksimum 3.0%.
4) Agregat halus bebas dari pengotoran zat organik yang merugikan beton. Bila diuji dengan larutan NaOH dan dibandingkan dengan warna standar atau pembanding tidak lebih tua dari warna standar atau warna pembanding. Jika warna tersebut lebih tua maka agregat tersebut harus ditolak, kecuali apabila:
   a) Warna lebih tua timbul oleh adanya sedikit arang, *lignit* atau sejenisnya.
   b) Diuji dengan cara melakukan percobaan perbandingan kuat tekan yang memakai agregat tersebut dengan kuat tekan yang menggunakan pasir standar silika, menunjukkan nilai kuat tekan *mortar* tidak kurang dari 95% kuat tekan *mortar* memakai pasir standar.

b. Agregat Kasar

Agregat kasar dapat berupa batu kerikil *(coral)* yang sesuai dengan yang disyaratkan ataupun berupa batu pecah *(split)*. Syarat-syarat agregat kasar berdasarkan Peraturan Beton Indonesia (PBI 1971) adalah sebagai berikut:

1) Agregat kasar untuk beton dapat berupa kerikil *(coral)* sebagai hasil pembentukan alami dari batuan atau berupa batu pecah *(split)* yang diperoleh dari pemecah batu. Agregat kasar adalah agregat yang ukuran butirannya lebih besar dari 5mm.
2) Agregat kasar tidak boleh berpori dan terdiri atas batuan keras. Agregat kasar yang mengandung butir-butir pipih dapat dipakai asalkan jumlahnya tidak melebihi dari 20% dari berat total agregat. Butir-butir agregat kasar harus bersifat kekal

artinya tak pecah atau hancur oleh pengaruh terik matahari ataupun hujan.

3) Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1% dari berat kering dan tidak boleh mengandung zat-zat yang merusak beton. Yang dimaksud dengan lumpur adalah bagian-bagian yang melewati ayakan 0.063mm (no.200). Apabila kadar lumpur lebih dari 1% maka agregat tersebut harus dicuci.
4) Kekerasan dari butiran-butiran agregat kasar diperiksa dengan bejana penguji dari *Rudel off* dengan beban penguji 20ton, dengan mana harus dipenuhi syarat-syarat sebagai berikut:
   a) Tak terjadi pembubukan sampai fraksi 9.5mm - 19mm lebih dari 24% berat.
   b) Tak terjadi pembubukan sampai fraksi 19mm - 30mm lebih dari 22% berat. Kekerasan dapat diketahui dengan mesin *Los Angles* di mana tidak terjadi kehilangan berat hingga 50%. Besar butir agregat maksimum, tidak boleh lebih besar dari 1/5 jarak terkecil bidang-bidang samping dari cetakan.

2. Semen *Portland*

Semen *Portland* adalah semen *hidrolis* yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen *portland* terutama yang terdiri atas *kalsium silikat* yang bersifat *hidrolis* dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa *kalsium sulfat* dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain (SNI 15-2049-2004). Unsur utama yang terkandung dalam semen dapat digolongkan ke empat bagian utama, yaitu: *trikalsium silikat* (C3S), *dikalsium silikat* (C2S), *trikalsium aluminat* (C3A), dan *tetrakalsium aluminoferit* (C4AF). Menurut Tjokrodimuljo (1996) bahwa unsur C3S dan C2S merupakan bagian terbesar (70% - 80%) dan paling dominan dalam memberikan sifat semen.

Perubahan komposisi kimia semen, yang dilakukan dengan cara mengubah persentase 4 komponen utama semen, dapat menghasilkan beberapa jenis semen sesuai dengan tujuan pemakaiannya. Standar industri di Amerika (ASTM) maupun di Indonesia (SNI) mengenal 5 jenis semen, yaitu:

a. Jenis I
   yaitu semen *portland* untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus.
b. Jenis II
   yaitu semen *portland* untuk penggunaan yang memerlukan ketahanan *sulfat* dan panas *hidrasi* sedang.
c. Jenis II
   yaitu semen *portland* yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan kekuatan awal yang tinggi setelah pengikatan terjadi.
d. Jenis IV
   yaitu semen *portland* yang dalam penggunaannya menuntut panas *hidrasi* yang rendah.
e. Jenis V
   yaitu semen *portland* yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan yang sangat baik terhadap *sulfat*.

3. Air

Air diperlukan pada pembentukan beton, air sangat berperan penting dalam pembuatan beton. Semen tidak dapat menjadi pasta tanpa adanya air, air bertujuan agar terjadi *hidrasi* semen, membasahi agregat dan memberikan kemudahan dalam pekerjaan beton. Air yang dibutuhkan agar terjadi proses *hidrasi* tidaklah banyak, yaitu: sekitar 20% dari berat semen. Tetapi untuk tujuan ekonomis dapat ditambahkan lebih banyak air, sehingga lebih banyak agregat yang dipergunakan, dengan demikian dapat dihasilkan lebih banyak beton. Namun pemakaian air harus dibatasi, sebab penggunaan air yang berlebihan dapat menyebabkan berkurangnya mutu beton.

Dalam proses pembuatan beton, air memegang peranan penting karena nilai perbandingan jumlah air dan semen atau faktor air semen *(w/c ratio)* akan berpengaruh pada:

a. Kekuatan beton *(strength of concrete)*.
b. Kemudahan pengerjaan *(workability)*.
c. Kestabilan volume *(volume stability)*.
d. Keawetan beton *(durability of concrete)*.

Selain itu faktor penggunaan air juga ditentukan oleh jenis agregat, terutama agregat halus (pasir) yang mempunyai luas permukaan lebih besar dari agregat kasar (batu pecah). Jenis agregat halus yang berbeda dapat mempengaruhi pemakaian air, tergantung dari sifat penyerapannya. Jika sifat penyerapannya lebih besar maka akan membutuhkan banyak air, begitu juga sebaliknya apabila penyerapannya rendah maka tidak memerlukan banyak air. Air yang digunakan dalam pembuatan beton harus memenuhi syarat, di mana air yang digunakan dalam campuran beton harus air yang bersih, tidak mengandung minyak, asam, *alkali*, dan zat organik atau bahan lainnya yang dapat merusak beton dan tulangan.

4. Serat *(Fiber)*

ACI Committee 544 mengklasifikasikan tipe serat secara umum sebagai perkuatan beton, yaitu antara lain:

i. SRFC *(Steel Fiber ReinforcedConcrete)*.
ii. GFRC *(Glass Fiber ReinforcedConcrete)*.
iii. SNFRC *(Synthetic Fiber Reinforced Concrete)*.
iv. NFRC *(Natural Fiber ReinforcedConcrete)*.

Serat kaca memiliki kuat tarik yang relatif tinggi, kepadatan rendah dan *modulus elastisitas* tinggi. Kelemahan serat ini yaitu mudah rusak akibat *alkali* yang terkandung dalam semen dan mempunyai harga beli yang lebih tinggi bila dibandingkan serat lainnya (Soroushian & Bayasi, 1987).

Serat *polimer* telah diproduksi sebagai hasil dari penelitian dan pengembangan industri petrokimia dan tekstil. Serat *polimer* termasuk *aramid*, *acrylic*, *nylon* dan *polypropylene* mempunyai kekuatan tarik yang tinggi tetapi *modulus elastisitas* rendah, daya lekat dengan matrik semen yang rendah, mudah terbakar dan titik lelehnya rendah.

Serat karbon sebenarnya sangat potensial untuk memenuhi kebutuhan tarik yang tinggi dan kuat lentur yang tinggi. Serat karbon memiliki *modulus elastisitas* yang sama bahkan dua hingga tiga kali lebih besar dari baja dengan berat jenis yang sangat ringan. Namun penyebarannya dalam matrik semen lebih sulit dibandingkan dengan serat lainnya dan harganya juga relatif mahal.

Penggunaan serat baja pada adukan beton belum banyak dikenal di Indonesia. Penyebabnya karena tidak tersedianya serat baja di dalam negeri dan jika ingin mendatangkan dari luar negeri harganya akan menjadi lebih mahal, sehingga alternatifnya digunakan bahan lokal yaitu kawat yang dipotong-potong.

Menurut Soroushian & Bayasi (1991), beberapa jenis baja yang biasa digunakan sesuai dengan kegunaannya masing-masing yaitu antara lain:

a. Bentuk serat baja *(Steel fiber shapes)* Bentuk-bentuk serat baja yaitu lurus *(straight)*, berkait *(hooked)*, bergelombang *(crimped)*, *double duo form*, *ordinary duo form*, bundle *(paddled)*, kedua ujung ditekuk *(enfarged ends)*, tidak teratur *(irregular)*, dan bergigi *(idented)*.
b. Penampang serat baja *(Steel fiber cross section)* Penampang serat baja terdiri dari lingkaran *(round/wire)*, persegi/lembaran *(rectangular/sheet)*, dan tidak teratur/bentuk dilelehkan *(irregular/melt extract)*.
c. Serat yang dilekatkan bersama dalam satu ikatan *(fibers glued together into a bundle)*.

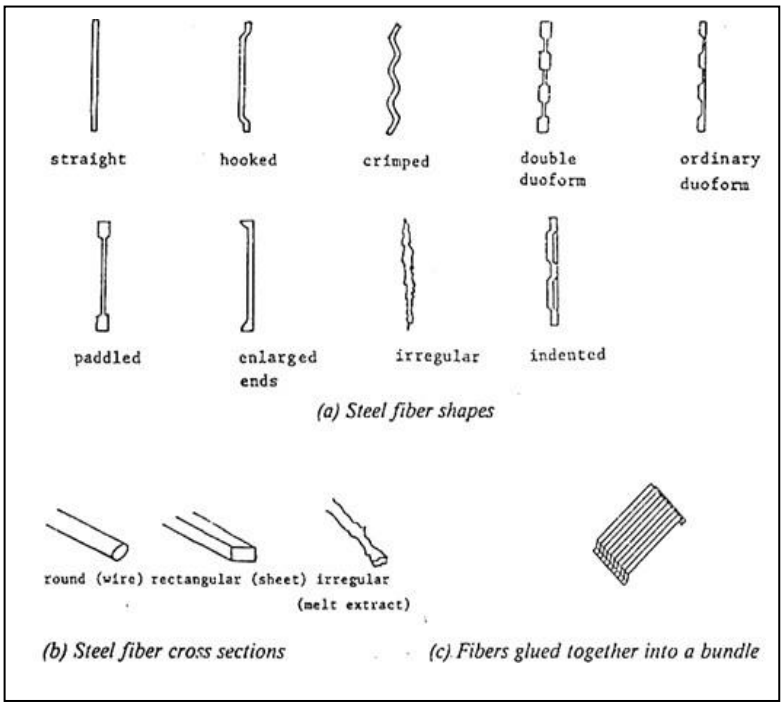
Beberapa jenis *fiber* baja yang biasa digunakan:

1. Bentuk fiber baja *(Steel fiber Shapes).*
   a. Lurus *(straight).*
   b. Berkait *(hooked).*
   c. Bergelombang *(crimped).*
   d. *Double duo form.*
   e. *Ordinary duo form.*
   f. Bundel *(paddled).*
   g. Kedua ujung ditekuk *(enfarged ends).*
   h. Tidak teratur *(irregular).*
   i. Bergerigi *(idented).*

2. Penampang *fiber* baja *(Steel fiber cross section).*
   a. Lingkaran/kawat *(round/wire).*
   b. Persegi/lembaran *(rectangular/sheet).*
   c. Tidak teratur/bentuk dilelehkan *(irregular/melt extract).*

3. *Fiber* dilekatkan bersama dalam satu ikatan *(fibers glued together into a bundle).*

Jenis dari *fiber* baja dapat dilihat pada gambar:



Gambar 2.23 Berbagai bentuk geometri serat baja (Soroushian & Bayasi, 1991).

Pada penelitian Suhendro (1992) telah berusaha mencari alternatif penggunanan bahan lokal yang mudah didapat di Indonesia dan harganya relatif murah sebagai pengganti serat produksi pabrik. Bahan lokal tersebut berupa potongan-potongan kawat bendrat (yang biasa dipakai untuk mengikat tulangan baja) dengan diameter 1mm dan panjang sekitar 60mm. Berdasarkan penelitian tersebut didapat beton menjadi sangat liat *(ductile)*, kuat tarik dan ketahanan terhadap kejut meningkat, serta terbukti dengan model skala penuh suatu balok beton kapasitas beban batas lentur beton serat jauh lebih baik dari beton biasa. Dengan demikian tingkat perbaikan beton menggunakan bahan lokal tidak kalah dibandingkan dengan serat baja asli luar negeri.

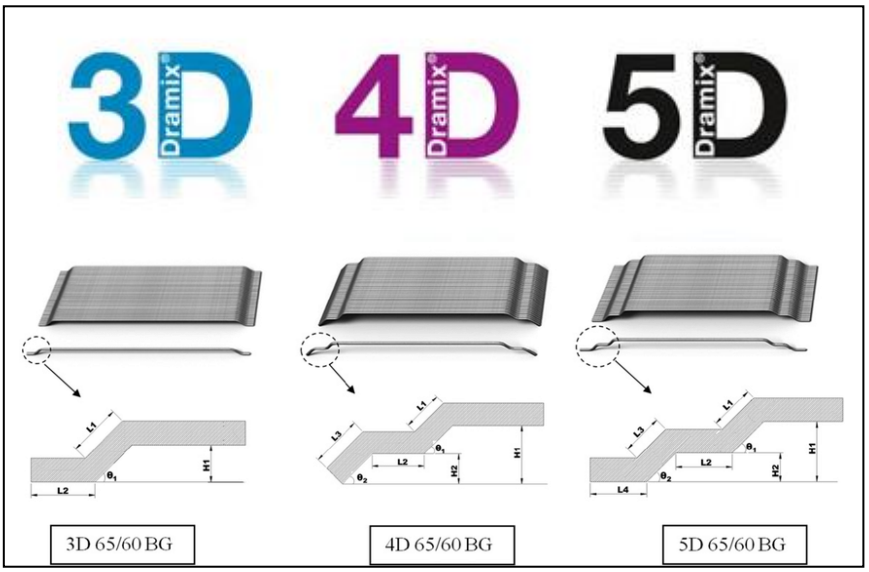
Adapun hasil pengujian kuat tarik serat lokal dari berbagai macam kawat dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 2.2 Sifat-sifat berbagai macam kawat.

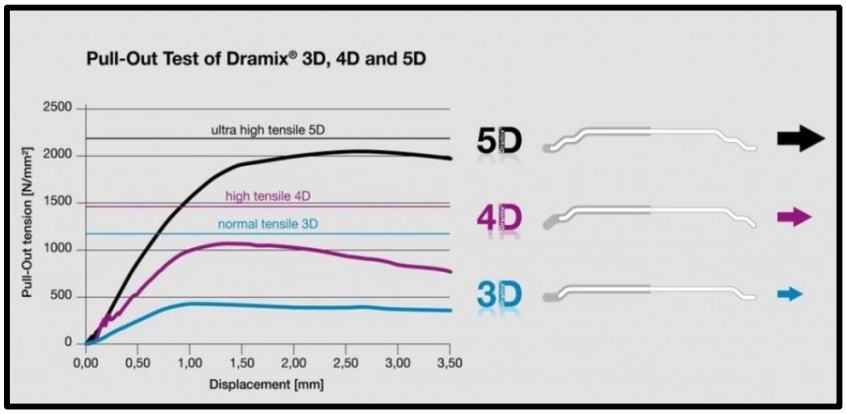
No	Jenis Kawat	Kuat Tarik (MPa)	Perpanjangan saat putus(%)	*Specific Gravity*
1	Kawat Baja	230	10,5	7,77
2	Kawat Bendrat	38,5	5,5	6,68
3	Kawat Biasa	25	30	7,70

Sumber: Suhendro, 2000.

Setelah mengalami berkembangan teknologi perusahaan Bekaert memperkenalakan dan memproduksi desain serat baja berdasarkan kait di indonesia sebagai berikut:



Gambar 2.24 Desain tipe serat baja oleh bekaert (www. Dramixsteelfiber/beakart.com).



Gambar 2.25 Diagram kuat tarik serat baja oleh bekaert (www. Dramixsteelfiber/beakart.com).

5. Bahan Tambah Beton *(admixtures)*

Bahan tambah *(admixtures)* pada pencampuran beton sangat berpengaruh dan berperan penting, walaupun penggunaan bahan tambah tersebut relatif lebih sedikit akan tetapi pengaruh yang dihasilkan cukup besar terhadap beton. Bahan tambah beton ini berguna untuk mengubah karakteristik beton, di mana dengan penambahan bahan tambah ini beton dapat dikendalikan waktu pengikatannya (mempercepat dan memperlambat pengerasan), mereduksi kebutuhan air dan menambahkan kemudahan pengerjaan beton (meningkatkan *slump*), serta memberikan kuat tekan yang tinggi. Bahan tambah beton terdiri dari bahan tambah kimia *(chemical admixtures)* dan bahan tambah mineral *(mineral admixtures)*. Menurut SK SNI S-18-1990-03 (Spesifikasi Bahan Tambahan Untuk Beton), bahan tambah kimia dapat dibedakan menjadi 5 (lima) jenis yaitu:

a. Bahan tambah kimia untuk mengurangi jumlah air yang dipakai. Dengan pemakaian bahan tambah ini diperoleh adukan dengan faktor air semen lebih rendah pada nilai kekentalan yang sama, atau diperoleh kekentalan adukan lebih encer pada faktor air semen yang sama.

b. Bahan tambah kimia untuk memperlambat proses ikatan beton. Bahan ini digunakan misalnya pada satu kasus di mana jarak antara tempat pengadukan beton dan tempat penuangan adukan cukup jauh, sehingga selisih waktu antara mulai pencampuran dan pemadatan lebih dari 1 jam.
c. Bahan tambah kimia untuk mempercepat proses ikatan dan pengerasan beton. Bahan ini digunakan jika penuangan adukan dilakukan di bawah permukaan air, atau pada struktur beton yang memerlukan waktu penyelesaian segera misalnya perbaikan landasan pacu pesawat udara, balok prategang, jembatan dan sebagainya.
d. Bahan tambah kimia berfungsi ganda, yaitu untuk mengurangi air dan memperlambat atau mempercepat proses ikatan.

2.2.2.4 Pemeriksaan Agregat

Pemeriksaan agregat bertujuan untuk mengetahui spesifikasi dan karakteristik agregat yang akan digunakan dalam suatu campuran beton yang mengacu pada peraturan-peraturan yang berlaku. Pengujian agregat yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Kasar dan Agregat Halus (SG)
   Berat jenis agregat digunakan untuk menentukan volume yang diisi oleh agregat. Berat jenis agregat pada akhirnya akan menentukan berat jenis dari beton sehingga secara langsung menentukan banyaknya campuran agregat dalam campuran beton. Hubungan antara berat jenis dan daya serap agregat adalah jika semakin tinggi nilai berat jenis maka semakin kecil daya serap air agregat tersebut.

2. Pemeriksaan Kadar Lumpur Agregat Kasar dan Agregat Halus
   Pemeriksaan kadar lumpur ini bertujuan untuk mengetahui kandungan lumpur yang terdapat di dalam agregat pasir, sehingga dapat diketahui apakah pasir tersebut layak digunakan sesuai dengan syarat-syarat dan ketentuan yang telah ditentukan dalam SNI 03-

4141-1996. Adapun rumus yang dapat digunakan untuk mengetahui kadar lumpur yang terdapat di dalam agregat halus pasir adalah:

Kandungan Lumpur = [(V1 - V2) / V1] x 100 = V3 (%) …(3.1)

Keterangan : V1 = Berat pasir sebelum dicuci (gr)
V2 = Berat pasir kering oven setelah dicuci (gr)
V3 = Kadar lumpur (%)

3. Pemeriksaan *Modulus* Halus Butiran
   Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengetahui nilai kehalusan atau kekasaran suatu agregat. Kehalusan atau kekasaran suatu agregat dapat mempengaruhi kelecakan dari *mortar* beton, apabila agregat halus yang terdapat dalam *mortar* terlalu banyak akan menyebabkan lapisan tipis dari agregat halus dan semen akan naik ke atas.

4. Pengujian keausan Agregat Kasar
   Pengujian kekuatan agregat dapat menggunakan bejana *Rudel off* ataupun *Lost Angeles Test*, dalam penelitian ini pengujian kekuatan agregat atau *abrasi test* akan dilakukan dengan menggunakan *Lost Angeles Test.* Sesuai dengan SII. 0052-80 (PB, 1989) syarat mutu kekuatan untuk agregat normal.
   Untuk mengetahui nilai *Los Angeles*, silinder diputar dengan kecepatan 30-33rpm. Caranya dengan mengukur banyaknya butiran yang pecah pada akhir putaran ke-100 kali yang pertama dibandingkan dengan putaran ke-500. Umumnya jika butiran yang pecah pada akhir ke-100 sudah lebih besar dari 20% (SNI memberikan nilai batas sebesar 27%) daripada ke-500 dianggap bagian lunak sudah terlalu banyak (Mulyono, 2004).

5. Pemeriksaan Kadar Air Agregat Halus
   Kadar air agregat adalah besarnya perbandingan antara berat air yang dikandung agregat dengan agregat dalam keadaan kering, dinyatakan dalam persen. Tujuan pengujian ini adalah untuk memperoleh angka persentase dari kadar air yang dikandung oleh agregat (SNI 03-1971-1990).

6. Analisa Saringan *(Sieve Analysis)* Agregat Kasar dan Agregat Halus
   Analisa saringan adalah pengelompokkan besar-butir analisa agregat kasar dan agregat halus menjadi komposisi gabungan yang ditinjau berdasarkan saringan. Agregat halus harus mempunyai susunan butiran berdasarkan ASTM C33-57.

2.2.2.5 *Slump* Beton dan Waktu Ikat *(Setting Time)*

Nilai *slump* digunakan sebagai petunjuk ketepatan jumlah pemakaian air dalam hubungannya dengan faktor air semen (FAS) yang ingin dicapai. Waktu pengadukan lamanya tergantung pada kapasitas isi mesin pengaduk, jumlah adukan, jenis serta susunan butir bahan penyusun, dan *slump* beton, pada umumnya tidak kurang dari 90 detik dimulai semenjak pengadukan, dan hasil umumnya menunjukkan susunan dan warna merata. Sesuai dengan tingkat mutu beton yang dihasilkan akan memberikan:

1. Keenceran dan kekentalan adukan yang memungkinkan pengerjaan beton (penuangan, perataan, pemadatan) dengan mudah kedalam adukan tanpa menimbulkan kemungkinan terjadinya *segresi* atau pemisahan agregat.
2. Ketahanan terhadap kondisi lingkungan khusus (kedap air, korosi, dan lain-lain).
3. Memenuhi uji kuat tekan yang hendak dipakai.

Penghitungan waktu ikat *(setting time)* bertujuan untuk mengetahui seberapa lama beton melewati tahap plastis menuju tahap pengerasan. Pada saat *mortar* semen tersebut mulai mengikat sehingga setelah waktu tersebut dilalui, *mortar* semen tidak boleh diganggu lagi ataupun diubah kembali kedudukannya.

2.2.2.6 Uji Kuat Tekan Beton

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 (SNI 03-1974-1990). Tujuan dari pengujian kuat tekan adalah untuk memperoleh nilai kuat tekan dengan prosedur yang benar.

2.2.2.7 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Mutu dari Kekuatan Beton

a. Faktor air semen (FAS)

   Merupakan perbandingan antara jumlah air terhadap jumlah semen dalam suatu campuran beton. Menurut Dipohusodo (1993:4), agar terjadi proses *hidrasi* yang sempurna dalam adukan beton, umumnya dipakai faktor air semen 0,40 - 0,60 tergantung mutu beton yang hendak dicapai. Semakin tinggi mutu beton yang hendak dicapai, semakin rendah nilai faktor air semen yang digunakan, sedangkan di lain pihak untuk menambah daya kelecakan *(workability)* diperlukan nilai faktor air semen yang tinggi. Nilai di bawah 0,40 meningkatkan kuat tekan beton, tetapi menurunkan daya kelecakan, sedangkan nilai di atas 0,60 akan menyebabkan kuat tekan beton rendah.

b. Jumlah pasta semen dan jenis semen yang digunakan

   Pasta semen berfungsi merekatkan butir-butir agregat dan akan berfungsi secara maksimal apabila seluruh permukaan agregat terselimuti pasta semen. Akan tetapi, jika jumlah pasta semen terlalu banyak maka kuat tekan beton didominasi oleh pasta semen yang memiliki kuat tekan lebih rendah dari agregat, sehingga kuat tekan beton menjadi lebih rendah. Sedangkan penentuan jenis semen yang digunakan mengacu pada tempat di mana struktur bangunan yang

menggunakan material beton tersebut dibuat, serta pada kebutuhan perencanaan apakah pada saat proses pengecoran membutuhkan kekuatan awal yang tinggi atau normal. Jenis semen *portland* mempunyai sifat tertentu, misalnya cepat mengeras, sehingga mempengaruhi kuat tekan beton.

c. Kepadatan beton
   Beton yang kurang padat berarti berisi rongga sehingga kuat tekannya berkurang.

d. Umur beton
   Kuat tekan beton bertambah tinggi dengan bertambahnya umur. Laju kenaikan kuat tekan beton mula-mula cepat, semakin melambat setelah berumur 28 hari, secara umum dianggap tidak naik lagi setelah umur 28 hari.

e. Sifat agregat
   Beberapa sifat agregat yang mempengaruhi kekuatan beton, antara lain:
   1. Kekasaran permukaan, karena permukaan agregat yang kasar dan tidak licin membuat rekatan antara permukaan agregat dan pasta semen lebih kuat daripada permukaan agregat yang halus dan licin.
   2. Bentuk agregat, karena bentuk agregat yang bersudut seperti *split*, membuat butir-butir saling mengunci, berbeda dengan kerikil yang bulat. Maka, beton yang dibuat dari batu pecah lebih kuat daripada beton yang dibuat dari kerikil.
   3. Kuat tekan agregat, karena 70% volume beton terisi oleh agregat, jika kuat tekan agregat rendah akan diperoleh kuat tekan beton yang rendah pula.

f. Kuat tarik

Kuat tarik beton jauh lebih kecil dari kuat tekannya, yaitu sekitar 10% - 15% dari kuat tekannya. Kuat tarik beton merupakan sifat yang penting untuk memprediksi retak dan *defleksi* balok.

g. *Modulus elastisitas*

Modulus elastisitas beton tergantung pada *modulus elastisitas* agregat dan pastanya. Dalam perhitungan struktur boleh diambil *modulus* beton sebagai berikut:

$$E_C = 4700 \sqrt{f'c} ;$$

untuk beton normal dengan:

E_C = *Modulus elastisitas* beton (MPa)

f'_C = Kuat tekan beton (MPa)

h. Berat jenis

Beton normal yang dibuat dengan agregat normal (pasir dan kerikil normal berat jenisnya antara 2,5 - 2,7) mempunyai berat jenis sekitar 2,3 - 2,5. Apabila dibuat dengan pasir atau kerikil yang ringan atau diberikan rongga udara maka berat jenis beton dapat berkurang dari 2,0.

Tabel 2.3 Beberapa jenis beton menurut berat jenisnya.

Jenis Beton	**Berat Jenis**	**Pemakaian**
Beton sangat ringan	<1,00	Non struktur
Beton ringan	1,00 – 2,00	Struktur ringan
Beton normal	2,30 – 2,50	Struktur
Beton berat	>3,00	Perisai sinar X

Sumber: Tjokrodimuljo, 2007.

i. Rangkak dan Susut
   Rangkak *(Creep)* merupakan salah satu sifat beton di mana beton mengalami *deformasi* terus menerus menurut waktu di bawah beban yang dipikul. Sedangkan, susut *(Shrinkage)* merupakan perubahan volume yang tidak berhubungan dengan pembebanan.

j. Kelecakan *(Workability)*
   Merupakan sifat-sifat adukan beton atau *mortar* yang ditentukan oleh kemudahan dalam pencampuran, pengangkutan, pengecoran, pemadatan, dan *finishing*. Cara untuk mengukur kelecakan beton adalah dengan *slump test* dan *VB-test.*

2.2.3 Konsep BetonSerat

Menurut ACI Committee544 (1993), beton berserat adalah beton yang terbuat dari semen *hidrolis*, agregat halus, agregat kasar dan sejumlah kecil serat yang tersebar secara acak, yang mana masih dimungkinkan untuk diberi bahan-bahan *additive* (Soroushian & Bayasi,1987).

Penelitian-penelitian sebelumnya memperlihatkan bahwa penggunaan serat dengan *aspect ratio* (l/d) yang lebih besar dari 100 biasanya menyebabkan kelecakan yang tidak baik dan distribusi serat yang tidak merata. Aspek rasio serat yang tinggi akan mengakibatkan penggumpalan seperti bola *(balling effects)* sehingga serat sulit tersebar.

Serat dianggap sebagai agregat yang bentuknya sangat tidak bulat yang akan mengakibatkan berkurangnya kelecakan dan mempersulit *segregasi*. Serat berguna untuk mencegah adanya retak-retak sehingga menjadikan beton serat lebih *daktail* dari beton biasa (Tjokrodimuljo, 2007).

Sifat-sifat mekanika beton serat dipengaruhi oleh jenis serat, aspek rasio serat *(fiber aspect ratio)*, *volume fraction* serat, kekuatan beton, geometri dan pembuatan benda uji serta agregat. Aspek rasio (l/d) yaitu rasio antara panjang serat (l) dan diameter serat (d). Sedangkan *volume fraction* yaitu persentase volume serat yang ditambahkan pada setiap satuan volume adukan. Menurut *ACI Committee 544 (1988)*,

untuk mendapatkan kelecakan yang baik dan *fiber dispersion* (serat tersebar merata dengan orientasi random dalam adukan beton) diperlukan batasan ukuran maksimum agregat, *gradasi* yang tepat, penambahan kadar semen, dan kemungkinan penambahan abu terbang *(fly ash)* atau bahan campur lain *(superplasticizer)*. Umumnya, kelecakan akan menurun dengan makin banyaknya prosentase serat yang ditambahkan dan makin besarnya aspek rasio.

Kelecakan tidak hanya dapat diukur dengan menggunakan *slump test* saja, ini yang membedakan dengan pengukuran kelecakan pada beton konvensional. Menurut Purwanto (1999), dalam *Committee 544-84*, prosedur pemakaian *inverted slump cone test* dan *VB-test* dapat untuk menentukan kelecakan beton serat. *VB-time* yang cukup baik untuk kelecakan beton serat menurut *ACI Committee 544-84* besarnya antara 5 s/d 25 detik. *Slump test* hanya digunakan untuk mengontrol konsistensi beton serat, dan umumnya *slump* beton serat berkisar antara 25 s/d 100 mm.

Setiap jenis serat mempunyai kelebihan dan kekurangan, masing-masing tergantung dari tujuan pemakaiannya. Perbaikan yang dialami beton dengan adanya penambahan serat antara lain yaitu:

a. *Daktilitas* meningkat
   Energi yang diserap oleh beton serat untuk mencapai keruntuhan lebih besar dibandingkan dengan energi yang diserap oleh beton biasa, baik akibat beban tekan maupun akibat beban lentur. Hal ini menjadikan beton serat bersifat lebih *daktail*.

b. Kekuatan lentur dan tarik meningkat
   Sifat kuat tarik dan lentur yang rendah pada beton dapat diperbaiki dengan penambahan serat ke dalam adukan beton.

c. Ketahanan terhadap beban kejut meningkat
   Beton normal sangat lemah dalam menerima beban kejut. Penambahan serat ke dalam adukan beton dapat meningkatkan ketahanan kejut beton dengan baik.

d. Ketahanan terhadap kelelahan *(fatigue life)* meningkat
   Penambahan volume fraksi serat pada adukan beton dapat meningkatkan ketahanan terhadap kelelahan, mengurangi lebar retak dan lendutan yang terjadi akibat pembebanan kelelahan *(fatigue)*.

e. Penyusutan berkurang
   Dengan adanya serat dalam beton dapat mengurangi penyusutan dan membatasi retak-retak penyusutan.

Sedangkan secara umum, hal-hal yang harus diperhatikan pada beton serat yaitu:

1. Masalah *workability* yang menyangkut kemudahan dalam proses pengerjaan.
2. Terjadinya *balling effect* (bola efek) yaitu serat menggumpal seperti bola dan tidak menyebar secara merata pada saat pencampuran.
3. Masalah *mix design* untuk memperoleh mutu tertentu dengan kelecakan yang memadai, maka diperlukan ketelitian yang baik.
4. Terjadi korosi pada serat jika tidak terlindung dengan baik oleh beton.

2.2.3.1 Sifat-sifat Beton Serat

Salah satu sifat penting dari beton adalah *daktilitas*. *Daktilitas* yaitu kemampuan struktur atau komponennya untuk melakukan *deformasi inelastik* bolak-balik berulang di luar batas titik leleh pertama, sambil mempertahankan sejumlah besar kemampuan daya dukung bebannya (SNI 03-1729-2002). Salah satu alasan penambahan serat pada beton adalah untuk menaikkan kapasitas penyerapan energi dari matrik campuran, yang berarti meningkatkan *daktilitas* beton. Penambahan *daktilitas* juga berarti penambahan perilaku beton terhadap lelah *(fatigue)* dan kejut *(impact)*.

Beton serat mempunyai kelebihan 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)* (Soroushian and Bayashi, 1987). Menurut As'ad (2008), beton serat memberi banyak keuntungan antara lain:

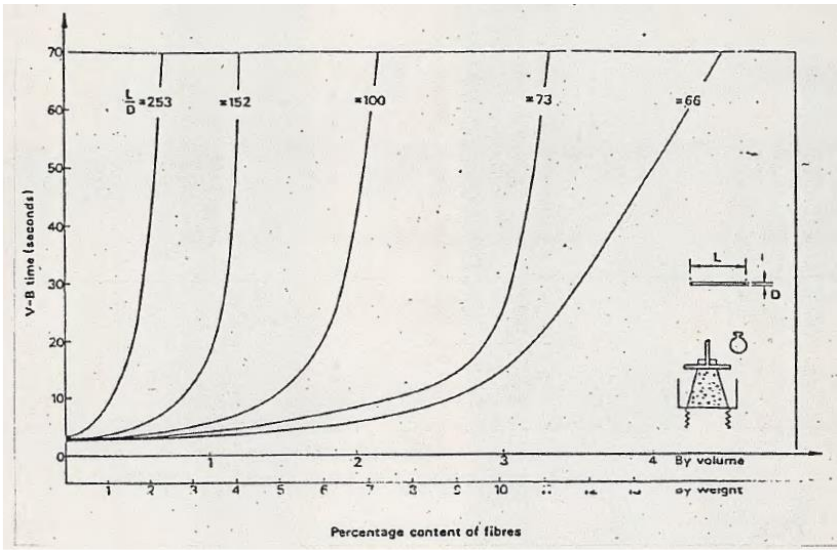
a. Serat terdistribusi secara acak di dalam volume beton pada jarak yang relatif dekat satu sama lain. Hal ini akan memberi tahanan berimbang ke segala arah dan memberi keuntungan material struktur yang dipersiapkan untuk menahan beban gempa dan angin.
b. Perbaikan perilaku *deformasi* seperti ketahanan terhadap *impak*, *daktilitas* yang lebih besar, kuat lentur, dan kapasitas torsi yang lebih baik.
c. Meningkatkan ketahanan beton terhadap formasi dan pembentukan retak.
d. Peningkatan ketahanan pengelupasan *(spalling)* dan retak pada selimut beton akan membantu menghambat korosi besi tulangan dari serangan kondisi lingkungan yang berpotensi korosi.

Untuk pemilihan jenis bahan serat perlu disesuaikan dengan sifat beton yang diperbaiki. Beberapa hal yang perlu mendapat perhatian pada beton *fiber* (Suhendro, 2000), adalah:

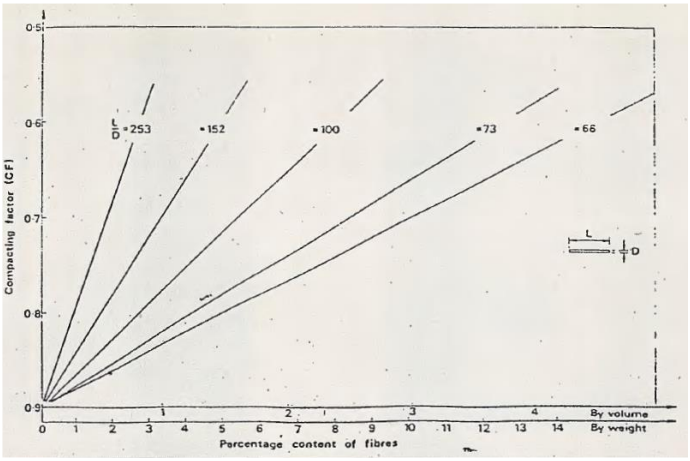
a. Masalah *fiber dispersion* yang menyangkut teknik pencampuran *fiber* ke dalam adukan agar dapat tersebar merata dengan orientasi yang *random.*
b. Masalah *workability* (kelecakan adukan), yang menyangkut kemudahan dalam proses pengerjaan/pemadatan, termasuk indikatornya.
c. Masalah *mix design/proportion* untuk memperoleh mutu tertentu dengan kelecakan yang memadai.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penambahan *fiber* ke dalam adukan beton akan menurunkan kelecakan adukan secara cepat sejalan dengan penambahan konsentrasi *fiber* dan aspek *ratio fiber*. Penurunan kelecakan adukan dapat dikurangi dengan penurunan diameter maksimal agregat, peninggian faktor air semen, penambahan

semen ataupun pemakaian bahan tambah. Meskipun demikian jika konsentrasi *fiber* dan aspek *ratio fiber* (nilai banding panjang dan diameter *fiber*) melampaui suatu batas tertentu, tetap akan didapat suatu adukan dengan kelecakan yang sangat rendah yang sulit diaduk dan dicor dengan cara-cara biasa (Sudarmoko, 1989). Aspek ratio *fiber* yang tinggi akan menyebabkan *fiber* cenderung untuk menggumpal menjadi suatu bola yang sangat sulit disebar secara merata sebelum dan sesudah proses pengadukan. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.26 dan Gambar 2.27. Batas maksimal aspek *ratio fiber* yang masih memungkinkan pengadukan dilakukan dengan mudah adalah l/d < 100. Nilai l/d yang melampaui batas di atas akan menyebabkan kesulitan dalam pengadukan (Sudarmoko, 1989).

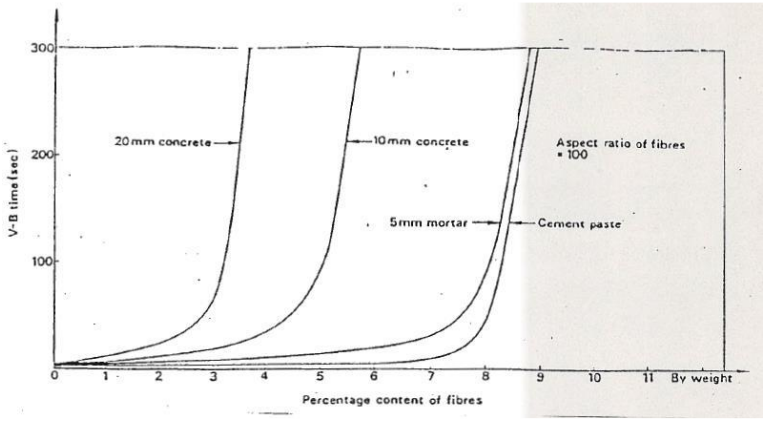


Gambar 2.26 Pengaruh aspek *ratio fiber* pada "*Vebe Time*"
Sumber: Sudarmoko (1989).



Gambar 2.27 Pengaruh aspek *ratio fiber* pada "*Compacting Factor*"
Sumber: Sudarmoko (1989).

Penelitian oleh Keer (1984), menunjukkan bahwa konsentrasi *fiber* akan dapat ditingkatkan dengan cara penurunan diameter maksimal agregat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.28 Keer dengan memakai *fiber* beraspek ratio 100 mendapatkan hasil kelecakan adukan beton *fiber* yang cukup meningkat akibat penurunan diameter agregat dari 20mm ke 10mm. Penurunan diameter agregat dari 10mm ke 5mm juga menghasilkan peningkatan kelecakan adukan.



Gambar 2.28 Pengaruh diameter agregat pada konsentrasi *fiber*
Sumber: Sudarmoko (1989).

Konsentrasi *fiber* yang masih memungkinkan pengadukan dilakukan dengan mudah adalah 2% volume. Jika konsentrasi *fiber* melampaui nilai ini, adukan beton menjadi sulit dikerjakan (Sudarmoko, 1989).

2.2.3.2 Perencanaan Campuran Beton Serat

Penambahan serat banyak mengubah perilaku beton setelah retak misalnya terjadi peningkatan regangan tarik setelah beton runtuh, sehingga dihasilkan beton yang lebih keras dan lebih tahan benturan (Salain, 2008 dalam Jaya, 2010). Peningkatan kekerasan beton banyak dipengaruhi oleh konsentrasi serat dan ketahanan serat terhadap cabutan yang terutama ditentukan oleh perbandingan aspek serat (perbandingan panjang/diameter) dan faktor lain seperti bentuk dan tekstur permukaan. Perencanaan campuran beton serat ditentukan berdasarkan (Salain, 2008 dalam Jaya 2010):

a. Kandungan serat < 2% dari volume beton.
b. Perbandingan aspek panjang dan diameter serat < 100.
c. Diameter agregat < 19mm.

2.2.3.3 Toleransi dalam Kemudahan Pengerjaan

Bila tidak ada toleransi lain dalam spesifikasi proyek, berikut ini aturan yang dapat digunakan untuk semua jenis beton berserat, kecuali beton semprot campuran kering.

a. Bila spesifikasi proyek untuk *slump* ditulis sebagai persyaratan maksimum atau tidak melampaui.

Tabel 2.4 *Slump* yang ditetapkan.

	75 mm atau kurang	lebih dari 75 mm
toleransi plus	0,00 mm	0,00 mm
toleransi minus	40,00 mm	65,00 mm

Sumber: RSNI S-05-2002.

b. Bila spesifikasi proyek untuk *slump* tidak ditulis sebagai persyaratan maksimum atau tidak melampaui.

Tabel 2.5 Toleransi untuk *slump* nominal.

untuk *slump* yang ditetapkan	Toleransi
< 50,00 mm	+ 15,00 mm
50,00 – 100,00 mm	+ 25,00 mm
> 100,00 mm	+ 40,00 mm

Sumber: RSNI S-05-2002.

2.2.3.4 Interaksi antara Serat dan Matrik Beton

Interaksi antara serat dan matrik beton merupakan sifat dasar yang memengaruhi kinerja dari material *komposit* beton serat. Pengetahuan tentang interaksi ini diperlukan untuk memperkirakan kontribusi serat dan meramalkan perilaku *komposit*. Menurut Balaguru (1992) dalam Jaya (2010), sifat karakteristik yang berpengaruh terhadap interaksi serat dan matrik beton adalah:

a. Kondisi matrik dalam keadaan retak atau tidak.
b. Komposisi matrik.
c. Bentuk geometri, jenis, dan karakteristik dari serat.
d. Kekakuan serat bila dibandingkan dengan kekakuan matrik beton.
e. Orientasi arah serat dalam pengertian distribusi secara random.
f. Volume *fraksi* dari serat.
g. Beban yang dikerjakan.
h. Keawetan serat dalam beton dan pengaruh umur beton.

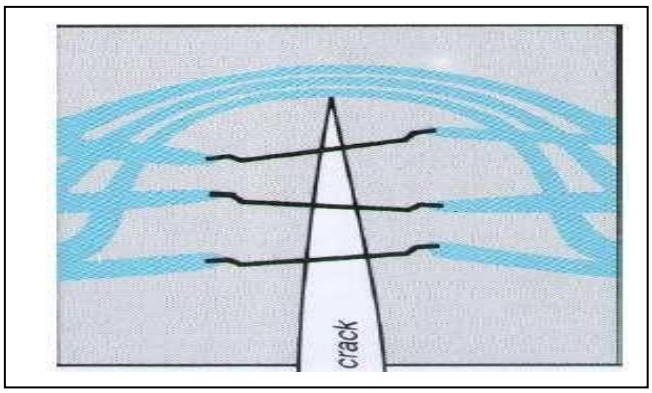
2.2.3.5 Keuntungan Menggunakan Serat Baja

Keuntungan yang didapat dari penggunaan serat baja pada pelat satu arah adalah sebagai berikut:

a. Keuntungan teknis

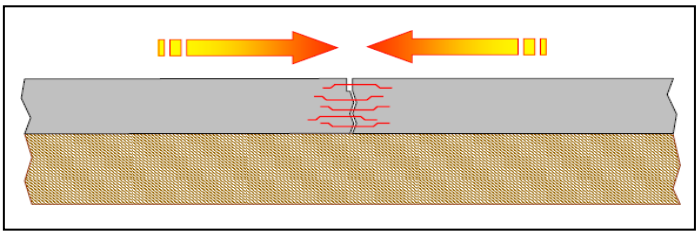
Berikut keuntungan teknis penggunaan Serat baja dibandingkan dengan beton tulangan konvesional:

- Sangat baik dalam memberikan ketahanan terhadap retak



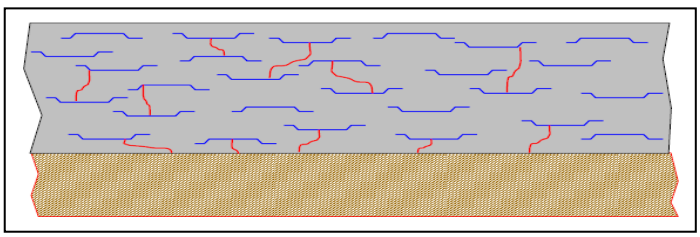
Gambar 2.29 Ilustrasi ketahanan terhadap retak.

- Tingginya penyerapan energi



Gambar 2.30 Penyerapan energi oleh serat baja.

- Tingginya resistensi terhadap *impact*



Gambar 2.31 Ilustrasi resistensi terhadap *impact*.

- Peningkatan ketahanan geser.
- Peningkatan kekuatan lentur.

- Lebih baik ketahanan terhadap korosi.
- Peningkatan kinerja keseluruhan pelat.

b. Ketangguhan serat baja pada pelat satu arah

Efek utama dari penambahan serat baja dalam pelat satu arah yang juga keuntungan dari SFRC tentang perilaku retak. Serat baja baru akan bekerja saat retak pertama baru muncul dan memiliki kemampuan untuk menyerap dan mendistribusikan beban atau energi sehingga pelat satu arah yang memiliki campuran serat baja ini akan memiliki perilaku ulet, oleh karena itu kelebihan dari kapasitas lentur dari *fase plastic* (pasca *daktilitas*) dapat digunakan untuk desain struktur ketika *deformasi* harus benar-benar dikontrol. Ini adalah alasan mengapa, untuk ketebalan yang sama sebuah pelat satu arah dengan campuran serat baja dapat mendukung beban yang lebih tinggi dibandingkan pelat satu arah dengan konvesional biasa.

c. Keuntungan ekonomis

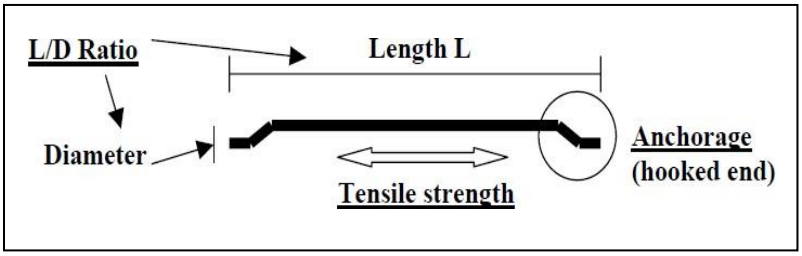
Dalam merancang pelat satu arah dengan campura serat baja akan memiliki keuntungan ekonomis sebagai berikut:

- Lebih cepat dan konstruksi nya lebih murah (dari 10% hingga 30% dari biasanya).
- Pelat kurang tebal sehingga lebih sedikit beton.
- Tidak diperlukannya instalasi *wiremesh.*
- Kurang nya pemeliharaan *slab* (retak kurang, kurang nya cacat pada beton, memiliki kelebihan terhadap *fatigue*).

Kinerja Dari Serat Baja

Kinerja dari serat baja dapat ditentukan oleh tiga parameter yaitu:

a. Kekuatan tarik.
b. *The anchorage.*
c. Rasio antara panjang dan diameter: aspek rasio L/D.



Gambar 2.32 Parameter pengaruh serat baja.

Kinerja dari serat baja pada beton akan tergantung dari masing-masing parameter tersebut dan juga interaksi mereka. Misalnya, serat dengan baja kekuatan tinggi terhadap tarik tetapi dengan *anchored* yang buruk di beton mungkin tidak akan mendapatkan nilai tarik izin yang direncanakan. Tiga parameter ini akan memberikan nilai ketangguhan pada dosis tertentu.

Namun, untuk dosis yang berbeda (nilai/volume beton), nilai ketangguhan untuk serat baja yang spesifik akan bervariasi. Jadi, kinerja sebuah SFRC akan tergantung dari:

- Jenis serat (L / D ratio, kekuatan tarik dan pelabuhan).
- Dosis serat baja per volume.

2.2.3.6 Kuat Tekan Beton/ Beton Serat

Kuat tekan beton adalah besarnya beban persatuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu, yang dihasilkan oleh mesin tekan (SNI03-1974-1990). Berdasarkan standar ASTM C 39, uji tekan beton dilakukan pada benda uji berbentuk silinder dengan diameter 150mm dan tinggi 300mm (Purwanto, 1999).

Kuat tekan beton dapat dicari dengan rumus:

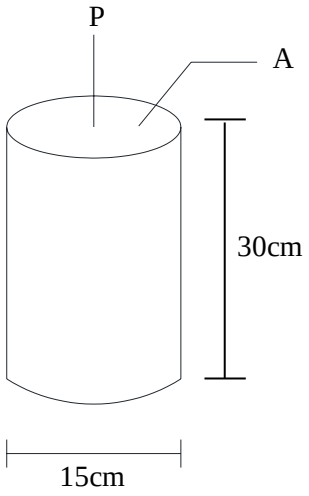
$$f'_{cf} = \frac{P}{A} \quad \text{.....(1)}$$

di mana:

f'_{cf} = Kuat tekan beton/ beton serat (MPa).

P = Beban tekan maksimum (N).

A = Luas penampang silinder = ¼ π D2 (mm2).



Gambar 2.33 Benda uji kuat tekan beton *(Silinder)*.

2.2.3.7Kuat Tarik 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 03-4431-1997). Uji kuat lentur beton dilakukan pada benda uji berbentuk balok beton bertulang dengan ukuran 150mm x 150mm x 600mm.

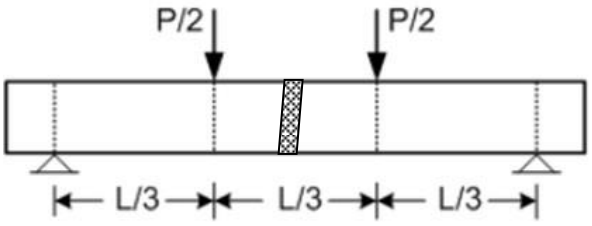
Menurut Dipohusodo (1993), apabila suatu gelagar balok bentang sederhana menahan beban yang mengakibatkan timbulnya momen lentur, akan terjadi *deformasi* (regangan) lentur di dalam balok tersebut. Pada kejadian momen lentur positif, regangan tekan terjadi di bagian atas dan regangan tarik di bagian bawah dari penampang. Regangan-regangan tersebut mengakibatkan timbulnya tegangan-tegangan yang harus ditahan oleh balok, tegangan tekan di atas dan tegangan tarik di bagian bawah.

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 tentang cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan, nilai kuat lentur beton dapat diperoleh dari rumus sebagai berikut:

1) Bila retak terjadi di 1/3 bentang bagian pusatbentang benda uji beton dapat dilihat denganpersamaan:

$$\sigma = \frac{P.L}{b.h^2} \quad \text{.....(1)}$$

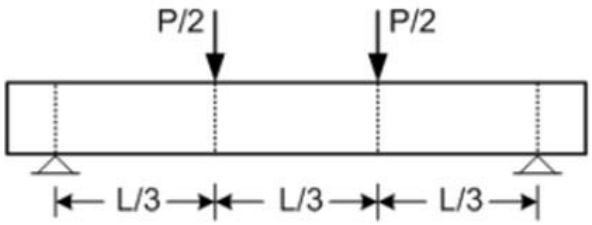


Gambar 2.34 Patah pada 1/3 bentang tengah (rumus 1).

[1]SNI 4431 -2011 cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebaban hal. 3-4

2) Bila retak terjadi di luar 1/3 bentang pusat benda uji beton dihitung dengan persamaan:

$$\sigma = \frac{P.a}{b.h^2} \quad \text{.....(2)}$$



Gambar 2.35 Patah di luar 1/3 bentang tengah (rumus 2).

di mana:

σ_l = kuat lentur benda uji (MPa).
P = Beban maksimum (N).
l = Bentang balok (mm).
b = lebar tampang lintang pada arah *horizontal* (mm).
h = lebar tampang lintang pada arah *vertikal* (mm).
a = jarak rata-rata antara tampang lintang patah dan tumpuan luar
= yang terdekat (mm).

Menurut Purwanto (1999), terdapat usulan Swamy et al. (1974) mengenai persamaan yang telah dikembangkan untuk memprediksi kuat tarik/lentur ultimit beton serat. Kuat lentur dapat diteliti dengan membebani balok pada tengah-tengah bentang atau pada setiap sepertiga bentang dengan beban titik 1/2 P. Beban ditingkatkan sampai kondisi balok mengalami keruntuhan lentur, di mana retak utama yang terjadi terletak pada sekitar tengah-tengah bentang.

---

[2]SNI 4431 -2011 cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebaban
hal. 7-9

Secara sederhana, balok beton digambarkan sebagai struktur *simple beam* dengan beban terpusat masing-masing 1/2 P. Besarnya momen yang dapat mematahkan benda uji adalah momen akibat beban

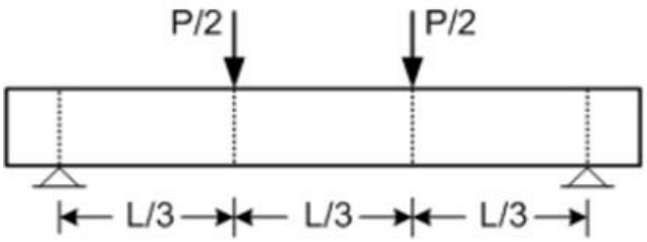
maksimum dari mesin pembebanan dan berat sendiri dari benda uji. Pada kejadian momen lentur positif, regangan tekan terjadi di bagian atas dan regangan tarik di bagian bawah dari penampang.

Dengan pembebanan pada balok beton dengan tumpuan sederhana dan besarnya beban masing-masing adalah 1/2 P, maka besarnya momen maksimum yang terjadi pada 1/3 bagian tengah bentang yaitu sebesar

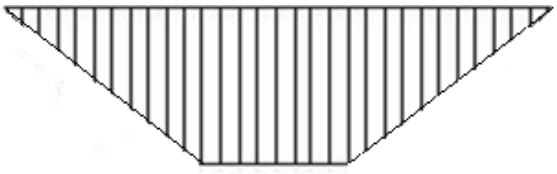
$$M = \frac{1}{6} PL \quad \text{.....(1)}$$

di mana:

M = Momen maksimum (Nmm).
P = Beban maksimum (N).
L = Bentang balok (mm).



Gambar 2.36 Balok sederhana yang dibebani gaya P/2.



Gambar 2.37 Diagram momen lentur.