

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori Beton

Beton adalah bahan yang terbuat dari berbagai macam tipe semen, agregat, dan juga bahan pozzolan, abu terbang, kerak tanur tinggi, sulfur, serat dan lain-lain (Neville and Brooks, 1987). Seiring dengan penambahan umur, beton akan semakin mengeras dan akan mencapai kekuatan rencana ($f'c$) pada usia 28 hari. Kecepatan kekuatan beton ini sangat dipengaruhi pada Faktor Air Semen (FAS) dan suhu selama perawatan. Salah satu kinerja beton yang sering diperhatikan adalah kekuatan tekan. Kekuatan tekan adalah kemampuan beton untuk dapat menerima gaya per satuan luas (Ir. Tri Mulyono MT., 2004, *Teknologi Beton*).

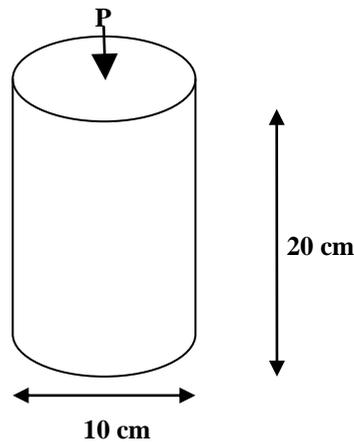
2.2 Kuat Tekan Beton

Nilai kekuatan beton diketahui dengan melakukan pengujian kuat tekan terhadap benda uji silinder (diameter 100 mm, tinggi 200 mm) pada umur 28 hari yang dibebani dengan gaya tekan sampai mencapai beban maksimum. Beban maksimum didapat dari pengujian dengan menggunakan alat *compression testing machine*. Standar yang digunakan ialah *ASTM C-39* untuk benda uji silinder, dan persamaan umum yang dipakai untuk menghitung kuat tekan beton adalah :

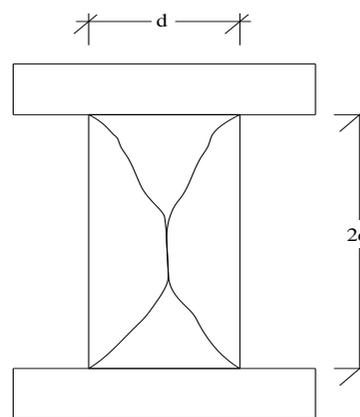
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Dimana, σ = kuat tekan beton (MPa)
 P = beban maksimum (N)
 A = luas bidang tekan (mm^2)

Berdasarkan kuat tekan, beton dapat digolongkan dalam beton normal, beton mutu tinggi dan beton mutu sangat tinggi. Menurut *Supartono* (1998), beton mutu tinggi adalah beton dengan kuat tekan diatas 50 MPa, sedang beton mutu sangat tinggi adalah beton dengan kuat tekan diatas 80 MPa.



Gambar 2.1 Pemodelan uji kuat tekan silinder beton



Gambar 2.2 Pemodelan pola retak uji kuat tekan beton

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi mutu dari kekuatan beton, yaitu :

1. Faktor air semen (FAS)

Faktor air semen (FAS) merupakan perbandingan antara jumlah air terhadap jumlah semen dalam suatu campuran beton. Fungsi FAS, yaitu :

- Untuk memungkinkan reaksi kimia yang menyebabkan pengikatan dan berlangsungnya pengerasan.
- Memberikan kemudahan dalam pengerjaan beton (*workability*)

Perbandingan air terhadap semen merupakan faktor utama di dalam penentuan kekuatan beton (*Wang, 1986*). Hampir untuk semua tujuan, beton yang mempunyai FAS minimal dan cukup untuk memberikan *workabilitas* tertentu yang dibutuhkan untuk pemadatan merupakan beton yang terbaik (*Murdock & Brooks, 1979*).

2. Sifat agregat

Sifat agregat yang paling berpengaruh terhadap kekuatan beton adalah kekasaran permukaan dan gradasi butiran agregat, (agregat halus maupun agregat kasar). Agregat ini harus bergradasi sedemikian rupa sehingga

seluruh massa beton dapat berfungsi sebagai satu kesatuan yang utuh, homogen, dan rapat, dimana agregat yang berukuran kecil berfungsi sebagai pengisi celah yang ada di antara agregat yang berukuran besar (Nawy, 1998).

3. Proporsi semen dan jenis semen yang digunakan

Berhubungan dengan perbandingan jumlah semen yang digunakan saat pembuatan *mix design* dan jenis semen yang digunakan berdasarkan peruntukkan beton yang akan dibuat. Penentuan jenis semen yang digunakan mengacu pada tempat dimana struktur bangunan yang menggunakan material beton tersebut dibuat, serta pada kebutuhan perencanaan apakah pada saat proses pengecoran membutuhkan kekuatan awal yang tinggi atau normal.

4. Bahan tambah

Bahan tambah yang digunakan adalah yang bersifat mineral (*additive*). Bahan tambah *additive* ditambahkan pada saat pengadukan dilaksanakan. Bahan tambah *additive* merupakan bahan tambah yang lebih banyak digunakan untuk penyemenan (*cementitious*), jadi bahan tambah *additive* lebih banyak digunakan untuk perbaikan kinerja.

2.3 Material

Untuk memahami dan mempelajari seluruh perilaku elemen gabungan, diperlukan pengetahuan tentang karakteristik masing – masing komponen. Beton dihasilkan dari sekumpulan interaksi mekanis dan kimiawi sejumlah material pembentuknya (Nawy, 1998). Bahan pembentuk beton terdiri dari campuran agregat halus dan agregat kasar dengan air dan semen sebagai pengikatnya.

2.3.1 Agregat

Agregat adalah bahan – bahan campuran beton yang saling diikat oleh perekat semen (CUR 2, 1993). Pada beton biasanya terdapat sekitar 65% sampai 80 % volume agregat terhadap volume keseluruhan beton (Illstone

& Domone, 2001). Agregat ini harus bergradasi sedemikian rupa sehingga seluruh massa beton dapat berfungsi sebagai benda yang utuh, homogen, rapat, dimana agregat yang kecil berfungsi sebagai pengisi celah yang ada di antara agregat berukuran besar (Nawy, 1998). Dua jenis agregat adalah (Nawy, 1998) :

1. Agregat halus (pasir alami dan buatan)

Agregat halus didefinisikan sebagai material granular, misalnya pasir, kerikil, batu pecah, dan kerak tungku besi yang dipakai bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk mortar atau beton semen hidrolik atau adukan. Agregat halus disebut pasir, baik berupa pasir alami yang diperoleh langsung dari sungai atau tanah galian, atau dari hasil pemecahan batu. Agregat yang butir-butirnya lebih kecil dari 1,2 mm disebut pasir halus, sedangkan butir-butir yang lebih kecil dari 0,075 mm disebut *silt*, dan yang lebih kecil dari 0,002 mm disebut *clay* (SK SNI T-15-1991-03). Persyaratan mengenai proporsi agregat dengan gradasi ideal yang direkomendasikan dalam standar ASTM C 33/ 03 “*Standard Spesification for Concrete Aggregates*”. Sedangkan untuk syarat modulus halus butir agregat halus berkisar antara 1,5 – 3,8 (SNI 03 – 1750 - 1990). Persyaratan lainnya mengacu pada SK SNI S-04-1989-F.

2. Agregat kasar (kerikil, batu pecah, atau pecahan dari *blast furnance*)

Menurut PBBI 1971 N.I – 2, agregat kasar adalah agregat dengan ukuran butir lebih besar dari 5 mm. Ketentuan mengenai agregat kasar antara lain :

- Harus terdiri dari butir – butir yang keras dan tidak berpori.
- Butir – butir agregat kasar harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh – pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan.
- Tidak boleh mengandung zat – zat yang dapat merusak beton, seperti zat – zat yang relatif alkali.
- Tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1 %. Apabila kadar lumpur melampaui 1 %, maka agregat kasar harus dicuci.

Persyaratan mengenai proporsi gradasi saringan untuk campuran beton berdasarkan standar yang direkomendasikan *ASTM C 33/ 03 “Standard Spesification for Concrete Aggregates”* (lihat *Tabel 2.1*). Dan standar pengujian lainnya mengacu pada standar yang direkomendasikan pada ASTM.

Tabel 2.1 Gradasi saringan ideal agregat kasar

Diameter Saringan (mm)	Persen Lolos (%)	Gradasi Ideal (%)
25,00	100	100
19,00	90 -100	95
12,50	-	-
9,50	20 – 55	37,5
4,75	0 – 10	5
2,36	0 - 5	2,5

(Sumber: *ASTM C 33/03*)

3. Kerak Tanur Tinggi (*Granulated Ground Blast-furnace Slag*)

Merupakan hasil residu pembakaran tanur tinggi. Definisi *slag* dalam *ASTM C.989 - 99, “Standard spesification for ground granulated Blast-Furnace Slag for use in concrete and mortars”* adalah produk non – metal yang merupakan material berbentuk halus, granular hasil pembakaran yang kemudian didinginkan, misal dengan mencelupkan dalam air. *Slag* baja yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil limbah olahan besi – besi rosok dari PT. Inti General Yaja Steel (I.G.Y.S) Semarang. Pada proses peleburan baja, besi – besi rosok dicairkan dengan kombinasi batu gamping, dolomite atau kapur. Pembuatan baja dimulai dengan penghilangan ion – ion pengotor baja, diantaranya aluminium, silikon, dan fosfor. Ion – ion tersebut akan menyebabkan baja menjadi tidak keras dan mudah rapuh atau sulit untuk dibentuk menjadi lembaran – lembaran baja.

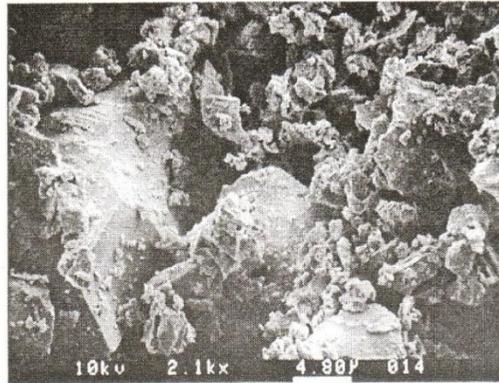
Untuk penghilangan ion pengotor tersebut diperlukan kalsium yang terdapat pada batu kapur. Campuran kalsium dan aluminium, silikon, dan fosfor akan membentuk *slag*. *Slag* mengambang pada permukaan cairan baja, kemudian dibuang. *Slag* terbentuk pada suhu 1600°C dan akan tersesuai seperti kaca, berbentuk tidak beraturan dan mengeras ketika dingin. *Slag* dapat berupa butiran halus sampai berupa balok-balok besar yang sangat keras. *Slag* juga mengandung logam berat yang tinggi.

Tabel 2.2 Komposisi kimia limbah padat slag

No	Parameter	Satuan	Hasil Analisis	Metode Uji	Baku Mutu TCLP (PP.85/1999)
1	Seng (Zn)	Mg/l	0.01	US.EPA SW-846/1311, SM.3111B	50
2	Khrom (Cr)	Mg/l	< 0,03	US.EPA SW-846/1311, SM.3111B	5
3	Kadmium (Cd)	Mg/l	< 0,005	US.EPA SW-846/1311, SM.3111B	1
4	Timbal (Pb)	Mg/l	0,280	US.EPA SW-846/1311, SM.3111B	5
5	Tembaga (Cu)	Mg/l	< 0,005	US.EPA SW-846/1311, SM.3111B	10
6	Boron (B)	Mg/l	2,213	US.EPA SW-846/1311, SM.3111B	500
7	Perak (Ag)	Mg/l	< 0,03	US.EPA SW-846/1311, SM.3111B	5
8	Air Raksa (Hg)	Mg/l	0,003	US.EPA SW-846/1311, SM.3111B	0,2
9	Selenium (Se)	Mg/l	0,025	US.EPA SW-846/1311, SM.3111B	1
10	Barium (Ba)	Mg/l	< 0,01	US.EPA SW-846/1311, SM.3111B	100
11	Arsen (As)	Mg/l	0,019	US.EPA SW-846/1311, SM.3111B	5

(Sumber: PT.Inti General Yaja Steel)

Komposisi kimia dan fisik dari *slag* sendiri menggunakan standar *ASTM C 989 - 99* (*tabel 1 Physical Requirements; table 2 Chemical Requirements*).



Gambar 2.3 Bentuk partikel blast – furnace slag
(Sumber : Antoni – P. Nugraha, 2007, *Teknologi Beton*)

2.3.2 Semen (*Portland Cement*)

Portland cement merupakan bahan pengikat utama untuk adukan beton dan pasangan batu yang digunakan untuk menyatukan bahan menjadi satu kesatuan yang kuat. Jenis atau tipe semen yang digunakan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kuat tekan beton, dalam hal ini perlu diketahui tipe semen yang distandardisasi di Indonesia. Menurut *SNI 0031-81*, semen Portland dibagi menjadi lima tipe, yaitu :

- Tipe I : *Ordinary Portland Cement (OPC)*, semen untuk penggunaan umum, tidak memerlukan persyaratan khusus (panas hidrasi, ketahanan terhadap sulfat, kekuatan awal).
- Tipe II : *Moderate Sulphate Cement*, semen untuk beton yang tahan terhadap sulfat sedang dan mempunyai panas hidrasi sedang.
- Tipe III : *High Early Strength Cement*, semen untuk beton dengan kekuatan awal tinggi (cepat mengeras)
- Tipe IV : *Low Heat of Hydration Cement*, semen untuk beton yang memerlukan panas hidrasi rendah, dengan kekuatan awal rendah.

Tipe V : *High Sulphate Resistance Cement*, semen untuk beton yang tahan terhadap kadar sulfat tinggi.

2.3.3 Air

Fungsi dari air disini antara lain adalah sebagai bahan pencampur dan pengaduk antara semen dan agregat. Air harus bebas dari bahan – bahan yang bersifat asam, basa, dan minyak. Air yang mengandung tumbuh – tumbuhan busuk harus benar – benar dihindari karena dapat mengganggu proses pengikatan semen. Pada umumnya air minum yang memenuhi persyaratan sebagai air pencampur beton bisa digunakan, dengan pengecualian pada air minum yang banyak mengandung sulfat (*Oglesby, 1996*).

Persyaratan air sebagai bahan bangunan, sesuai dengan penggunaannya harus memenuhi syarat menurut Persyaratan Umum Bahan Bangunan Di Indonesia (*PUBI-1982*), antara lain:

1. Air harus bersih.
2. Tidak mengandung lumpur, minyak dan benda terapung lainnya yang dapat dilihat secara visual.
3. Tidak boleh mengandung benda-benda tersuspensi lebih dari 2 gram / liter.
4. Tidak mengandung garam-garam yang dapat larut dan dapat merusak beton (asam-asam, zat organik dan sebagainya) lebih dari 15 gram / liter. Kandungan klorida (Cl), tidak lebih dari 500 p.p.m. dan senyawa sulfat tidak lebih dari 1000 p.p.m. sebagai SO₃.
5. Semua air yang mutunya meragukan harus dianalisa secara kimia dan dievaluasi.

2.4 Teori Pengujian Lekatan

Pengujian kuat lekatan antara agregat kasar terhadap mortar atau pasta semen telah banyak dilakukan, hal ini dilakukan karena sedikitnya informasi mengenai kekuatan lekatan antara agregat kasar terhadap mortar. Pengujian

kuat lekatan dilakukan untuk mempelajari perilaku kekuatan lekatan yang terjadi antara agregat kasar – mortar. Kekuatan tarik langsung antara agregat kasar terhadap mortar atau pasta semen sangat bergantung pada beberapa faktor berikut (*Thomas T. C. Hsu and Floyd O. Slate, 1963, Paper of Tensile Bond Strength Between Aggregate and Cement Paste or Mortar*), yaitu :

1. Jenis agregat kasar,
2. Kekasaran permukaan agregat kasar,
3. Faktor air semen (pasta semen atau mortar),
4. Umur dari pasta semen atau mortar,
5. Kadar kelembaban pasta semen atau mortar pada saat pengujian
6. Kadar kelembaban agregat kasar pada saat proses pengecoran pasta semen atau mortar ke dalam cetakan,
7. Jenis semen, dan
8. Ukuran dari agregat yang digunakan.

2.4.1 Hubungan Antara Sifat Lekatan dan Sifat Mekanik Beton

Daerah lekatan antara agregat kasar terhadap mortar atau pasta semen merupakan hubungan terlemah di dalam beton (*Thomas T. C. Hsu and Floyd O. Slate, 1963, Paper of Tensile Bond Strength Between Aggregate and Cement Paste or Mortar*). Sudah umum kita melihat retakan pada beton normal terletak di sepanjang permukaan antara mortar dan partikel agregat kasar, apakah ini terutama disebabkan oleh kelemahan lekatan pada *Interfacial Transition Zone* atau mungkin juga disebabkan oleh susunan partikel agregat kasar yang lebih kaku di dalam beton tidak sepenuhnya merata (*Rilem Report 11, Interfacial Transition Zone in Concrete, Edited by J.C. Maso*). Kebanyakan studi tentang kekuatan lekatan menunjukkan bahwa peningkatan kuat lekatan agregat kasar terhadap mortar mampu meningkatkan kekuatan beton, baik itu dalam kuat tarik, kuat tekan, atau kuat lentur. Dari tidak adanya lekatan menuju adanya lekatan yang sempurna, secara umum kekuatan meningkat, berkisar antara 15 – 40%

dengan peningkatan pada kekuatan tarik yang lebih tinggi daripada kekuatan tekan.

2.4.2 Persiapan Benda Uji Untuk Pengukuran Sifat Mekanik Lekatan

Dalam menentukan sifat dari zona lekatan antara agregat kasar terhadap mortar, dibutuhkan beberapa jenis benda uji yang berbeda, hal ini bertujuan untuk mendapatkan sebaran data yang lebih baik. Berikut adalah hal – hal yang harus diperhatikan dalam pemilihan agregat kasar sebagai benda uji :

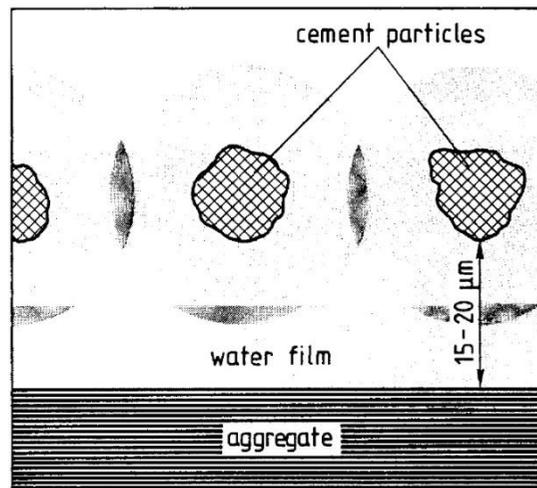
1. Kekasaran permukaan agregat kasar

Untuk keperluan penelitian kekasaran permukaan agregat bisa dibuat dengan berbagai variasi, seperti yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya oleh *Thomas T. C. Hsu and Floyd O. Slate, 1963, Paper of Tensile Bond Strength Between Aggregate and Cement Paste or Mortar*. Dengan membuat permukaan agregat menjadi 3 kondisi, yaitu permukaan halus (dihaluskan), dan permukaan kasar (kondisi permukaan kasar akibat dipotong dengan alat pemotong dan kondisi permukaan kasar yang ditimbulkan secara alami). Kekasaran permukaan agregat kasar mampu memberikan cukup perbedaan pada sifat mekanis lekatan antara agregat kasar terhadap mortar.

2. Zona kontak atau lekatan (*Interfacial Transition Zone*)

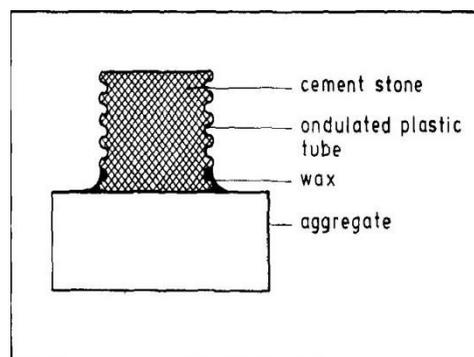
Pada daerah lekatan (*ITZ*) terdapat dua gejala yang harus diperhatikan, yaitu adanya konsentrasi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan porositas yang tinggi di daerah ini, mencapai 50 % dari persentase rongga. Kedua gejala ini ditandai dengan tingginya kadar air yang berada di sekitar daerah lekatan, selama dan sesudah proses penyatuan antara agregat dengan mortar. Anggapan ini ditopang oleh adanya konfirmasi bahwa tidak ada butiran semen yang dapat ditemukan di daerah zona kontak (*ITZ*), dengan ketebalan 15 μm – 25 μm (*R. Zimbelman, 1987, A Method for Strengthening The Bond Between Cement Stone and Aggregates*). Atau dengan ketebalan sekitar

50 μm (Rilem Report 11, *Interfacial Transition Zone in Concrete*, Edited by J.C. Maso).



Gambar 2.4 Formasi dari water film selama menyatukan mortar dengan agregat kasar (R. Zimbelmann, 1987)

Oleh sebab itu, pada saat proses penyatuan agregat dengan mortar, bagian dari samping agregat diberi semacam lapisan lilin, seperti pada Gambar 2.5 (R. Zimbelmann, 1985, *A Contribution to The Problem of Cement – Aggregate Bond*), atau dilapisi dengan menggunakan bahan lain yang dapat menghindarkan kontak antara mortar dengan bagian samping dari agregat, contoh dengan menggunakan *teflon* (Gambar 2.6).



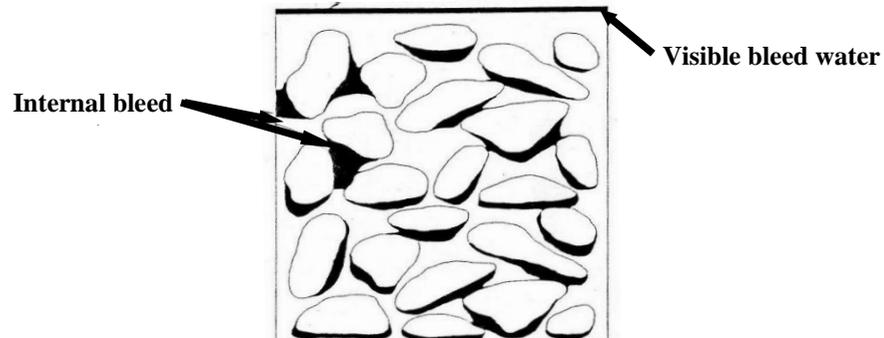
Gambar 2.5 Sampel untuk pengujian kekuatan lekatan antara agregat dan semen (R. Zimbelmann, 1985)



Gambar 2.6 Sampel untuk pengujian kekuatan lekatan antara agregat dan mortar

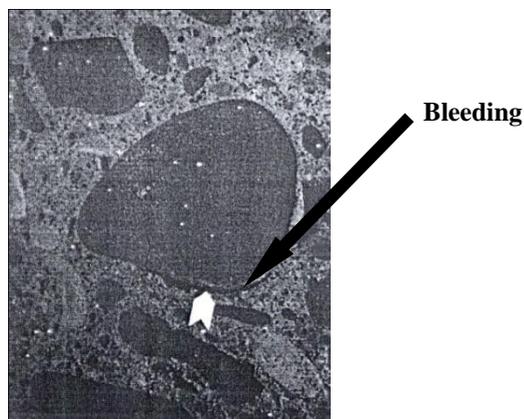
3. *Bleeding*

Permasalahan lainnya dalam pengujian lekatan adalah adanya pengaruh *bleeding*. *Bleeding* adalah air jernih yang secara bertahap dapat terakumulasi pada permukaan beton yang baru, mortar, pasta semen, dan *grouting*. *Bleeding* disebabkan karena sedimentasi atau penurunan dari partikel padat (semen dan agregat) dan secara simultan air berpindah ke permukaan (*ASTM STP 169D, Chapter 12, Bleed Water*). Naiknya air ke permukaan beton atau mortar dalam jumlah yang kecil dikatakan normal dan tidak mempengaruhi kekerasan dari beton atau mortar.



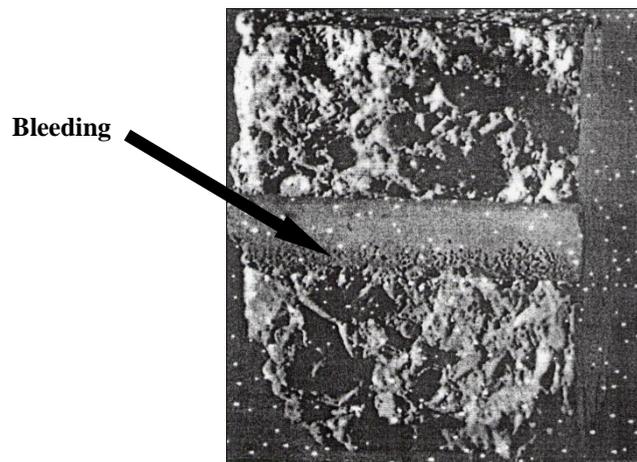
Gambar 2.7 Bleed water pada beton (Mehta, 1986)

Bleeding dapat terakumulasi di bawah dan sepanjang sisi dari partikel agregat kasar (*Gambar 2.8*). Hal ini sangat rawan terjadi ketika adanya perbedaan penurunan antara agregat dan pasta. Setelah agregat tidak dapat lagi turun, pasta terus mengalami penurunan diikuti naiknya air dan mengumpulkan dari bawah agregat.



Gambar 2.8 Penampang melintang dari beton, untuk mengilustrasikan akumulasi "bleed water" sepanjang partikel agregat kasar (ASTM STP 169D)

Namun terkadang, jika permukaan beton atau mortar, *set* lebih cepat dari beton karena kondisi cuaca panas, beberapa partikel agregat kasar mungkin turun, meninggalkan pori udara di atas partikel agregat. Dengan adanya pengaruh evaporasi, mortar lebih cepat kering dan tidak cukup mempunyai kekuatan di sekeliling mortar. Hal ini dapat menyebabkan kondisi yang disebut pengelupasan mortar (*mortar – flaking*) terhadap partikel agregat kasar (*ASTM STP 169D, Chapter 12, Bleed Water*).

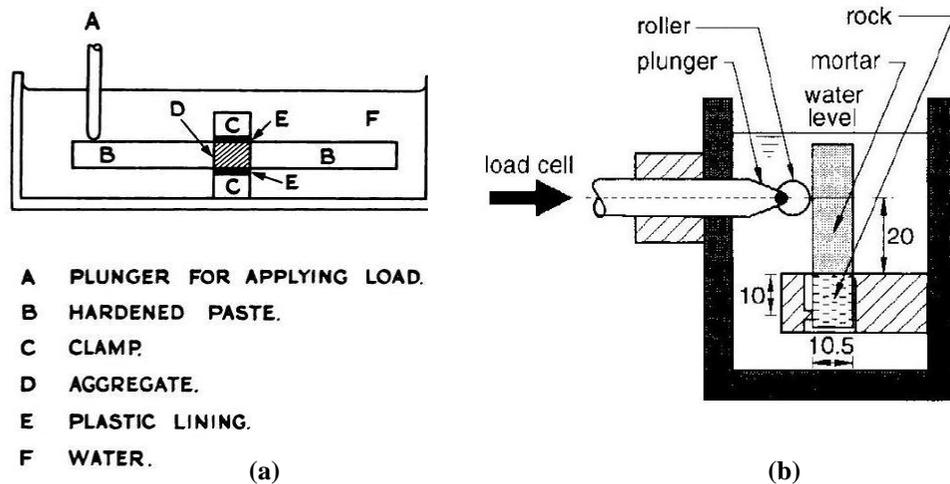


Gambar 2.9 Bleeding yang terjadi pada baja tulangan dengan permukaan halus yang diletakkan dengan posisi mendatar (ASTM STP 169D)

2.4.3 Pengukuran Sifat Lekatan

Selama bertahun – tahun berbagai macam bentuk konfigurasi pengujian tentang lekatan antara agregat kasar terhadap mortar telah dilakukan. *Alexander (Paper of Strength of The Cement – Aggregate Bond, 1959)*, mengadopsi prinsip balok kantilever (*Gambar 2.10 a*), untuk menentukan kuat lentur pada pertemuan antara HCP (pasta semen terhidrasi) dengan jenis batuan yang berbeda. Pada awal penelitian ini, telah disimpulkan bahwa adanya sedikit ketidaksempurnaan lekatan (pada permukaan benda uji), yang sangat kuat berpengaruh pada hasilnya. Kekuatan lekatan agregat – semen ditentukan dengan mengukur beban transversal yang dibutuhkan untuk pecah anantara lekatan agregat, balok pasta semen, dan penjepit. Bagian agetat yang dilakukan berada pada kondisi SSD (kering permukaan).

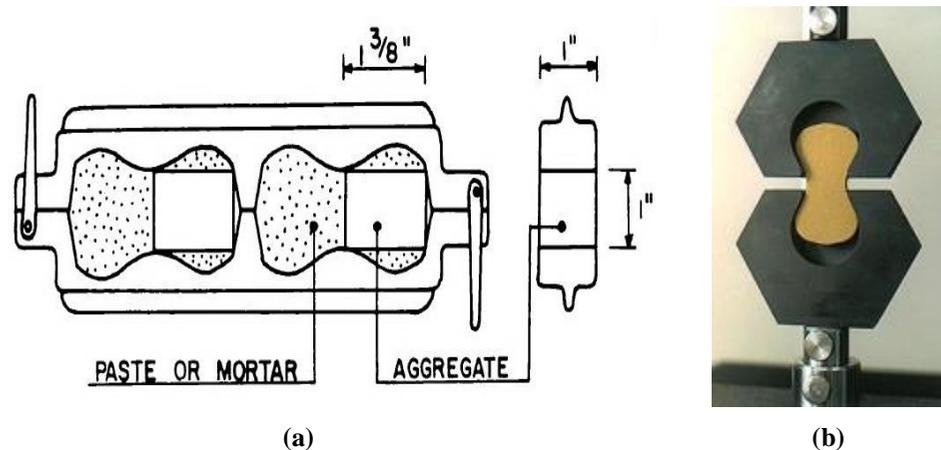
Sebagai perbandingan, pengujian yang telah dilakukan oleh *Alexander* kemudian diadopsi oleh *C. Perry dan J.E Gillot* (*Paper of The Influence of silica fume on the strength of the cement – aggregate bond, 1994*), seperti yang ditunjukkan pada *Gambar 2.10 b*.



Gambar 2.10 Bentuk geometri dari kantilever beam untuk mempelajari lekatan mortar – agregat dengan uji lentur, yang diadopsi oleh *K.M. Alexander, 1959* (a) dan *C.Perry & J.E Gillot, 1994* (b)

Yang membedakan antara penelitian yang dilakukan oleh *C. Perry dan J.E Gillot*, mortar ditambahkan dengan *admixture* silicafume, dengan ditambahkan silicafume, lekatan antara mortar – agregrat meningkat secara signifikan. *K.M Alexander* dan *C. Perry dan J.E Gillot* melakukan pengujiannya di dalam air dengan maksud untuk menghindari adanya penyusutan tegangan pada benda uji. Pengujian lekatan pada keadaan kondisi basah, seperti yang dilakukan oleh *C. Perry dan J.E Gillot*, telah dilakukan sebelumnya oleh *Hsu & Slate* (*Paper of Tensile Bond Strength Between Aggregate and Cement Paste or Mortar, 1963*).

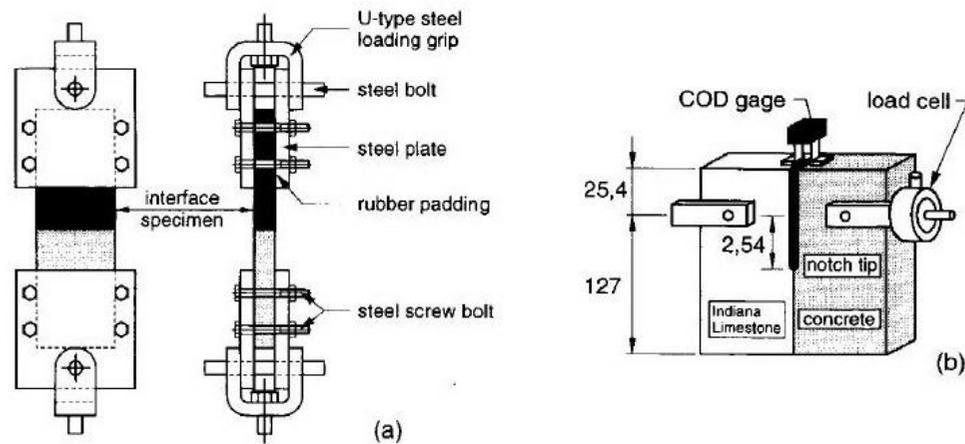
Hsu & Slate mengadopsi standar pengujian lekatan berdasarkan pada ASTM (*Gambar 2.11*). untuk mempelajari *ITZ* (*Interfacial Transition Zone*), sebuah agregat berbentuk prisma ditempatkan di dalam cetakan, dan pasta semen atau mortar dimasukkan di dalam cetakan pada bagian lainnya.



Gambar 2.11 Penempatan agregat berbentuk prisma di dalam cetakan, mengacu pada ASTM (a), alat uji Mortar Briquette Testing Machine (b).
(Thomas T.C.Hsu dan Floyd O. Slate, 1963)

Pada penelitian *Hsu & Slate*, benda uji menggunakan 4 (empat) jenis batuan yang berbeda, yaitu batu pasir, granit, dan 2 jenis dari batu kapur, bersama dengan campuran pasta semen dan 6 (enam) mortar. Kesimpulan yang diambil *Hsu & Slate* dari penelitian ini adalah tidak ada korelasi langsung yang ditemukan antara lekatan dari pasta semen dan mortar, dan kuat tekan dari material. Retak pada pengujian lekatan perlu diperhatikan secara seksama, dan seharusnya dibedakan dari perilaku retak material ketika diberi tekanan.

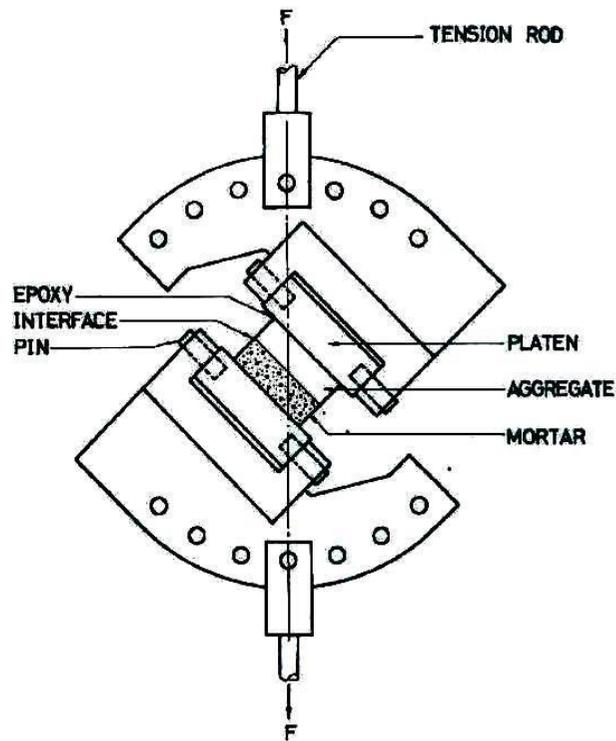
J.Wang dan A.K. Maji (*Experimental Studies and Modeling of The Concrete/ Rock Interface, 1994*), juga mengadopsi benda uji tarik uniaksial untuk mempelajari *Interfacial Transition Zone* antara mortar dengan batu kapur *Indiana* (*Gambar 2.12*). Bentuk geometri pengujian lekatan yang diadopsi *Wang & Maji*, mirip dengan pengujian lekatan yang diusulkan oleh *Gopalaratnam & Shah* (*Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension, 1985*). Meski bentuk pengujian yang dilakukan mempunyai kemiripan, namun terdapat perbedaan, yaitu *Gopalaratnam & Shah* menggunakan baji / pasak untuk menjepit benda uji, sedangkan *Wang & Maji* menggunakan baut. Diantara sambungan agregat dengan semen atau mortar dan plat beban direkatkan lapisan karet (*Gambar 2.12 a*).



Gambar 2.12 Pengujian tarik uniaksial (a), pengujian tegangan kepadatan (b), diadopsi oleh J. Wang dan A.K. Maji, 1994.

Wang & Maji juga melakukan pengujian geometri belah (Gambar 2.12 b). Prosedur pengujian mengikuti prosedur pengujian pada benda uji tarik uniaksial. Hasil pengujian belah tersebut terutama digunakan untuk verifikasi dari pemodelan yang diadopsi Wang dan Maji untuk pemodelan zona pertemuan (*Interfacial Zone*).

Pengujian kuat lekatan antara agregat kasar terhadap mortar tidak hanya dilakukan dengan pengujian tarik saja tetapi bisa dilakukan dengan kombinasi antara pengujian tarik – geser, seperti yang telah dilakukan oleh C. C. Kao dan F. O. Slate (*Paper of Tensile – Shear Bond Strength and Failure Between Aggregate and Mortar, 1976*). Di dalam artikelnya disebutkan bahwa sampai sebelum dia melakukan penelitian ini, belum ada informasi yang tersedia mengenai kuat lekatan dengan mengkombinasikan perlakuan gaya tarik dan geser. Model percobaan yang dilakukan oleh C. C. Kao dan F. O. Slate, dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Model pembebanan pada benda uji pengujian kuat lekatan penelitian C.C Kao dan F. O. Slate (1976) dengan menggunakan perlakuan kombinasi gaya tarik dan geser.

Penelitian ini dilakukan dengan memberikan gaya tarik maksimum F , yang diteruskan melalui pusat dari benda uji dengan kemiringan sudut θ terhadap permukaan normal zona pertemuan / sambungan antara agregat – mortar. Semua benda uji dilakukan pengujian pada umur 7 hari. Besarnya gaya yang dihasilkan oleh kuat tarik normal dan kuat geser dapat dihitung dengan persamaan berikut (C. C. Kao dan F. O. Slate, 1976):

$$\begin{aligned} \sigma_n &= (F/A) \cos \theta \\ \tau &= (F/A) \sin \theta \end{aligned} \quad (2.2)$$

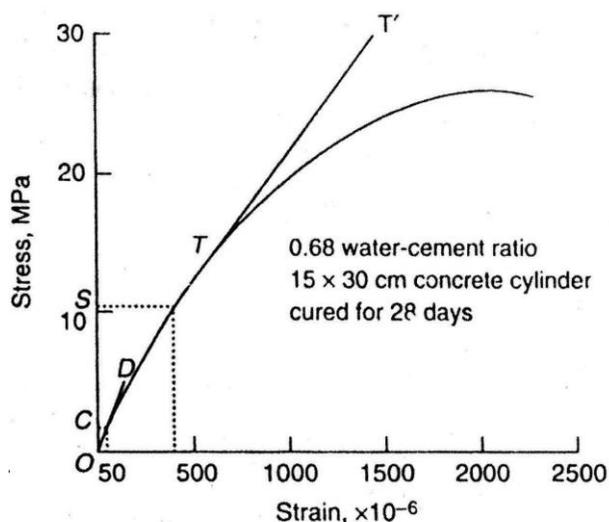
Digunakan 7 sudut θ yang berbeda pada pengujian tersebut, yang diperoleh dengan cara menghubungkan batang penarik untuk menempatkan lubang pin yang sesuai pada plat peralatan pembebanan.

2.4.4 Pendekatan Perilaku Modulus Elastisitas (E)

Karakteristik elastis material adalah ukuran kekakuannya. Meskipun perilaku beton non – linier, perkiraan dari modulus elastisitas (rasio antara tegangan yang diterima dan regangan seketika, diasumsikan dalam batas proporsional) sangat penting untuk menentukan pengaruh tegangan oleh regangan terkait dengan dampak lingkungan. Jenis perilaku modulus elastisitas adalah sebagai berikut : (P. Kumar Mehta dan Paulo J. M. Monteiro, 1993, Concrete)

a. *Modulus elastisitas statis*, untuk sebuah material di bawah pengaruh tegangan atau tekanan ditunjukkan oleh *slope* / kemiringan dari hubungan kurva $\sigma - \epsilon$ untuk beton yang dibebani uniaksial. Sejak bentuk kurva dari beton tidak berupa linear, ada 3 metode atau cara untuk menghitung modulus yang digunakan, yaitu :

- *Tangent modulus* ditentukan dari *slope*/ kemiringan garis singgung terhadap kurva hubungan tegangan – regangan pada setiap titik.
- *Secant modulus* ditentukan dari *slope*/ kemiringan garis yang ditarik dari titik asal ke titik pada kurva yang sesuai dengan tegangan 40% dari kegagalan pembebanan.



Calculating the Elastic Moduli

$$f_t = 26 \text{ MPa}$$

$$40\% f_t = 10.4 \text{ MPa} = S O$$

Secant Modulus: Slope of the line corresponding to stress SO

$$10.4 / (417 \times 10^{-6}) = 24.9 \text{ GPa}$$

Chord Modulus: Slope of the line corresponding to stress SC (10.4 – 1.6) / (417 $\times 10^{-6}$ – 50 $\times 10^{-6}$) = 24.0 GPa

Tangent Modulus: Slope of the line TT' drawn tangent to any point on the $\sigma - \epsilon$ curve (30 – 14.6) / (1445 $\times 10^{-6}$ – 625 $\times 10^{-6}$) = 18.8 GPa

Dynamic Modulus (Initial Tangent Modulus): Slope of the line OD from the origin $5/143 \times 10^{-6} = 34.9 \text{ GPa}$

Gambar 2.14 Contoh grafik yang menggambarkan perbedaan penggunaan pendekatan perilaku modulus elastis dan metodenya yang ditentukan (P. Kumar Mehta dan Paulo J. M. Monteiro, 1993, Concrete)

- *Chord modulus* ditentukan dari *slope* atau kemiringan garis singgung antara 2 titik pada kurva hubungan tegangan – regangan. Dibandingkan dengan *secant modulus*, yang menarik garis dari titik pusat (O) sebagai sebuah titik yang mewakili sebuah regangan longitudinal sebesar 50 $\mu\text{m/m}$ terhadap titik yang menghubungkan pada 40 % beban maksimum. Pergeseran garis awal tegangan sebesar 50 $\mu\text{m/m}$ dianjurkan sebagai koreksi terhadap kelengkungan kurva yang sering diamati pada permulaan dari sebuah kurva hubungan tegangan – regangan.
- b. *Modulus elastisitas dinamis*, sesuai dengan regangan yang sangat kecil, kira – kira ditentukan dengan modulus tangen awal (*initial modulus tangent*) untuk garis yang ditarik pada titik awal. Pada umumnya 20, 30, 40 persen lebih tinggi daripada modulus elastisitas statis untuk masing – masing beton mutu tinggi, sedang, dan rendah.
- c. *Modulus elastisitas lentur*, dapat ditentukan dari pengujian lendutan pada balok yang dibebani. Untuk balok yang ditumpu pada ujung – ujungnya dan dibebani pada tengah bentang, dengan mengabaikan lendutan geser. Modulus elastisitas lentur umumnya digunakan pada perencanaan dan analisis dari perkerasan.

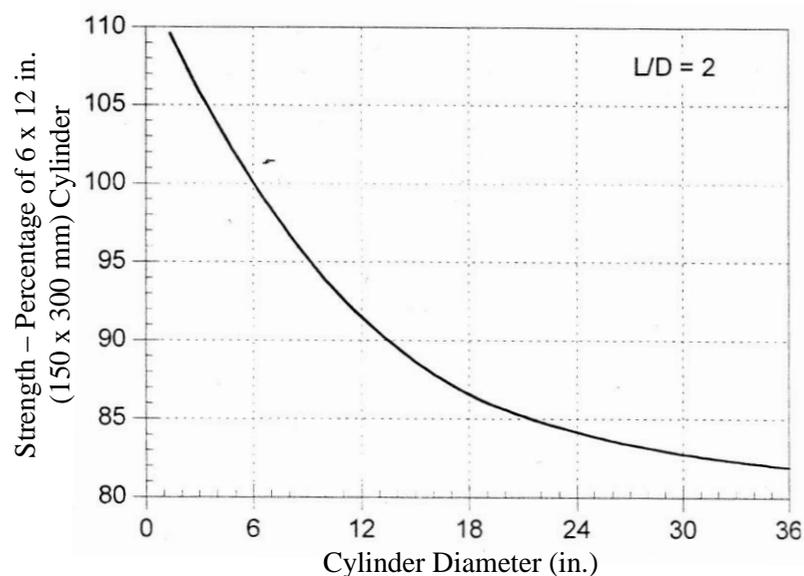
2.5 Metode Pengujian

2.5.1 Pengujian Cabut (*Pull of Test*)

Prinsip pengujian pada uji cabut dimaksudkan untuk menguji lekatan antara agregat kasar terhadap mortar dan prosedur prinsip pelaksanaan pengujian berdasarkan pada *ASTM C 190-59 (Method of Test for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars)* dan *ASTM C 900 – 01 (Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete)*. Pengujian cabut dilakukan dengan kontrol waktu menggunakan alat uji cabut *Proceq EDm electromotor*, yang dapat diatur kecepatannya dengan loading rate 7 – 14,5 N/s.

2.5.2 Pengujian Kuat Tekan Beton (*Compressive Strength of Concrete*)

Pengujian kuat tekan beton mengacu ke standar *ASTM C39/ C39M-01*, karena pengujian pada skala laboratorium (masih berupa benda uji) dan penggunaan peralatan yang sederhana, dengan menggunakan alat *compression test machine*. Bentuk benda uji menggunakan silinder 15 x 30 cm (jumlah sampel minimal 3). Nilai kuat tekan beton dapat mencapai f'_c pada umur 28 hari. Selain itu, pada standar *ASTM STP 169D, Chapter 13, Concrete Strength Testing*, menyebutkan bahwa pengujian kuat tekan beton bisa menggunakan ukuran benda uji silinder yang lebih kecil, yaitu silinder berukuran 10 x 20 cm. Mengacu pada *Grafik 2.1*, kuat tekan yang mampu dihasilkan dengan ukuran silinder 10 x 20 cm, lebih besar 20% dibandingkan dengan silinder 15 x 30 cm pada umur beton mencapai 28 hari, tentu saja perbandingan tersebut berlaku untuk *mix design* yang sama. Namun besarnya rasio perbandingan nilai kuat tekan tersebut dapat diterima bila jumlah sampel silinder yang digunakan (diameter 10 cm x tinggi 20 cm), jumlahnya 1,5 kali lebih banyak dari jumlah benda uji silinder ukuran diameter 15 cm x tinggi 30 cm (*ASTM STP 169D, Chapter 13, Concrete Strength Testing*).



Grafik 2.1 Perbandingan pengaruh ukuran silinder beton terhadap nilai kuat tekan silinder beton (150 x 300 mm) umur 28 hari (*ASTM STP 169D*)

2.6 Perencanaan Campuran (*Mix Design*)

2.6.1 Perencanaan Campuran Mortar

Perencanaan campuran (*mix design*) mortar yang digunakan sebagai benda uji pada pengujian kuat lekatan dengan menggunakan percobaan uji cabut (*pull of test*) adalah :

1. Proporsi gradasi saringan agregat

Menggunakan proporsi gradasi agregat dengan saringan ideal yang direkomendasikan dalam standar *ASTM C 33/ 03 “Standard Specification for Concrete Aggregates”* (Tabel 2.3).

2. *Job Mix Formula (JMF)*

Job Mix Formula mengacu pada perbandingan semen terhadap agregat halus (pasir) yang direkomendasikan standar *ASTM C 109/ C 109M – 02 “ Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars”*, yaitu 1 Pc : 2,75 Ps : 0,485 Air. Zat tambahan yang digunakan adalah berupa *Superplasticizer* dari produk SIKA (*Viscocrete 10*), dengan perbandingan 0,28 % terhadap berat semen (diambil dari prosedur manual pemakaian produk *Viscocrete 10*). Penggunaan *superplasticizer* ini dimaksudkan untuk memudahkan dalam pengerjaan (*workability*).

Tabel 2.3 Gradasi saringan ideal agregat halus

Diameter Saringan (mm)	Persen Lolos (%)	Gradasi Ideal (%)
9,50	100	100
4,75	95 – 100	97,5
2,36	80 – 100	90
1,18	50 – 85	67,5
0,600	25 – 60	42,5
0,300	5 – 30	17,5
0,150	0 - 10	5

(Sumber: *ASTM C 33/03*)

2.6.2 Perencanaan Campuran Beton

Tujuan utama mempelajari sifat – sifat beton adalah untuk perencanaan campuran (*mix design*), yaitu pemilihan bahan – bahan beton yang memadai, serta menentukan proporsi masing – masing bahan untuk menghasilkan beton ekonomis dengan kualitas yang baik (*Antoni – P.Nugraha, 2007, Teknologi Beton*). Dalam penelitian ini, *mix design* dilaksanakan menggunakan cara DOE (*Department of Environment*). Perencanaan dengan cara DOE dipakai sebagai standar perencanaan oleh Departemen Pekerjaan Umum di Indonesia dan dimuat dalam buku standar *SK SNI T-15-1990*. Pemakaian metode DOE karena metode ini yang paling sederhana dengan menghasilkan hasil yang akurat, diantaranya penggunaan rumus dan grafik yang sederhana. Langkah – langkah dalam perhitungan perencanaan beton dengan metode DOE adalah sebagai berikut :

1. Penentuan kuat tekan beton

Penentuan kuat tekan beton berdasarkan kekuatan beton pada umur 28 hari.

2. Penetapan nilai standar deviasi

Penentuan nilai standar deviasi berdasarkan 2 hal yaitu:

- Mutu pengendalian pelaksanaan pencampuran beton.
- Volume pekerjaan

Nilai standar deviasi pada penelitian ini yaitu $S_d = 46$ (volume beton kurang dari 1000m^3 dan mutu pengendalian pelaksanaan pencampuran beton baik sekali), penetapannya sesuai *Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971*.

3. Penetapan kuat tekan rata – rata yang direncanakan.

Dengan menganggap nilai dari hasil pemeriksaan benda uji menyebar normal (mengikuti lengkung Gauss) maka kekuatan tekan beton karakteristik adalah:

$$\sigma^{\text{bk}} = \sigma^{\text{bm}} - M \quad (2.3)$$

kuat tekan beton rata-rata dapat dihitung dengan rumus:

$$\sigma^{\text{bm}} = \sigma^{\text{bk}} + M \quad (2.4)$$

dimana :

σ_{bm} = kuat tekan beton rata-rata (kg/cm^2)

σ_{bk} = kuat tekan beton yang direncanakan (kg/cm^2)

M = $1.645 \times Sd$ = nilai tambah margin (kg/cm^2)

Sd = Standar deviasi (kg/cm^2)

4. Mencari faktor air semen

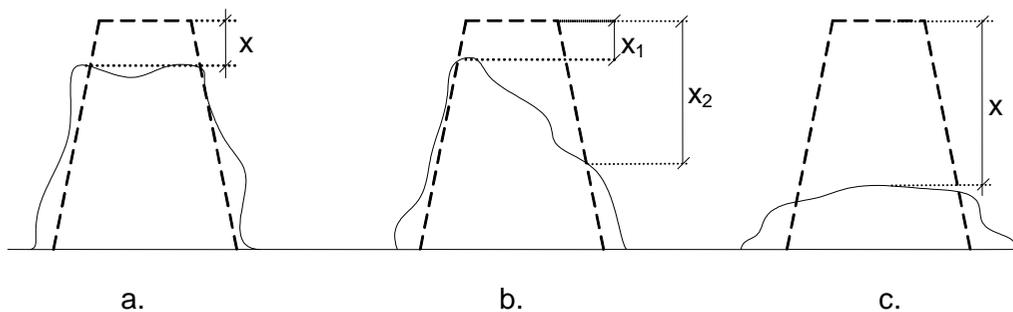
Faktor air semen dicari dengan grafik hubungan kuat tekan dengan faktor air semen (*Grafik III*), sesuai yang terdapat pada buku *Teknologi Beton* (Ir. Tri Mulyono, MT., 2004).

5. Penentuan nilai *Slump*

Penentuan nilai *Slump* berdasarkan pemakaian beton untuk jenis konstruksi tertentu sesuai *SNI 03-1974-1990*..

Dalam praktek ada tiga macam tipe *slump* yang terjadi yaitu:

- Slump* sebenarnya, terjadi apabila penurunannya seragam tanpa ada yang runtuh.
- Slump* geser, terjadi bila separuh puncaknya bergeser dan tergelincir kebawah pada bidang miring.
- Slump* runtuh, terjadi bila kerucut runtuh semuanya.



Gambar 2.15 Tipe – tipe keruntuhan slump, (a) slump sebenarnya, (b) slump geser, (c) slump runtuh

6. Perhitungan nilai kadar air bebas

Kadar air bebas ditentukan berdasarkan ukuran agregat, jenis batuan dan nilai slump sesuai dengan *SNI 03-1971-1990*.

7. Perhitungan jumlah semen yang dibutuhkan

Kadar atau jumlah semen dapat dihitung dengan rumus :

$$Kadar\ semen = \frac{kadar\ air\ bebas}{FAS} \quad (2.5)$$

8. Penentuan prosentase jumlah agregat halus dan kasar

Proporsi agregat ditentukan berdasarkan Modulus Kehalusan Butir (MHB) gabungan, dengan sebelumnya menentukan MHB masing – masing agregat halus dan agregat kasar. Perhitungan MHB dan prosentase jumlah agregat seperti terdapat pada buku *Teknologi Beton, halaman 100 – 101 (Ir. Tri Mulyono, MT., 2004)*.

9. Penentuan berat jenis gabungan

Berat jenis gabungan adalah gabungan dari berat jenis agregat halus dan agregat kasar dengan prosentase dari campuran agregat tersebut. Berat jenis gabungan dapat dihitung dengan rumus:

$$Bj_{gab} = \frac{xa}{100} \times Bj_{xa} + \frac{xb}{100} \times Bj_{xb} \quad (2.6)$$

dimana : xa : prosentase agregat halus

xb : prosentase agregat kasar

Bj_{xa} : berat jenis agregat halus

Bj_{xb} : berat jenis agregat kasar

10. Penentuan berat beton segar

Berat beton segar dapat ditentukan dengan menggunakan Grafik II (*Ir. Trimulyono, MT., 2004, Teknologi Beton*), berdasarkan data berat jenis gabungan dan kebutuhan air pengaduk untuk setiap meter kubik beton.