

MEKANISME PERAWATAN DAN PERBAIKAN STRUKTUR BETON BERTULANG DENGAN PENDAYAGUNAAN ABU TERBANG

Kazan Gunawan, Dicky R. Munaf, Frits Torang Siahaan
Dosen Universitas INDONUSA Esa Unggul, Jakarta
Dosen ITB, Bandung
Diagnostic Engineer Alumni NUS Singapore
kazan_gunawan@yahoo.co.id

Abstrak

Beton bertulang merupakan tulangan baja yang ditambahkan ke dalam beton dengan cara komposit. Struktur beton bertulang ini perlu dirawat agar masa layan diupayakan sesuai rencana sehingga ketahanan dari struktur beton tetap terjaga. Dalam tulisan ini mengulas bagaimana perawatan struktur beton bertulang yang dimulai dari penilaian terhadap kondisi struktur, inspeksi dan pengujian lapangan, appraisal struktur serta pendayagunaan beton kinerja tinggi abu terbang. Abu terbang ini memiliki sifat-sifat fisik dan kimia yang baik dalam campuran beton sehingga sangat baik untuk digunakan dalam perbaikan struktur beton bertulang.

Kata Kunci: Abu terbang, beton bertulang, perawatan, kualitas

Pendahuluan

Beton yang mulai berkembang sejak akhir abad ke-19, merupakan material konstruksi yang mempunyai kemampuan ketahanan yang baik terhadap lingkungan luar serta mempunyai kekhasan berupa rasio yang tinggi antara kekuatan tekan, terhadap kekuatan tarik. Dalam penerapannya, rendahnya kemampuan beton terhadap tarik, ditangani dengan prinsip komposit yaitu menambahkan tulangan-baja yang disebut beton bertulang.

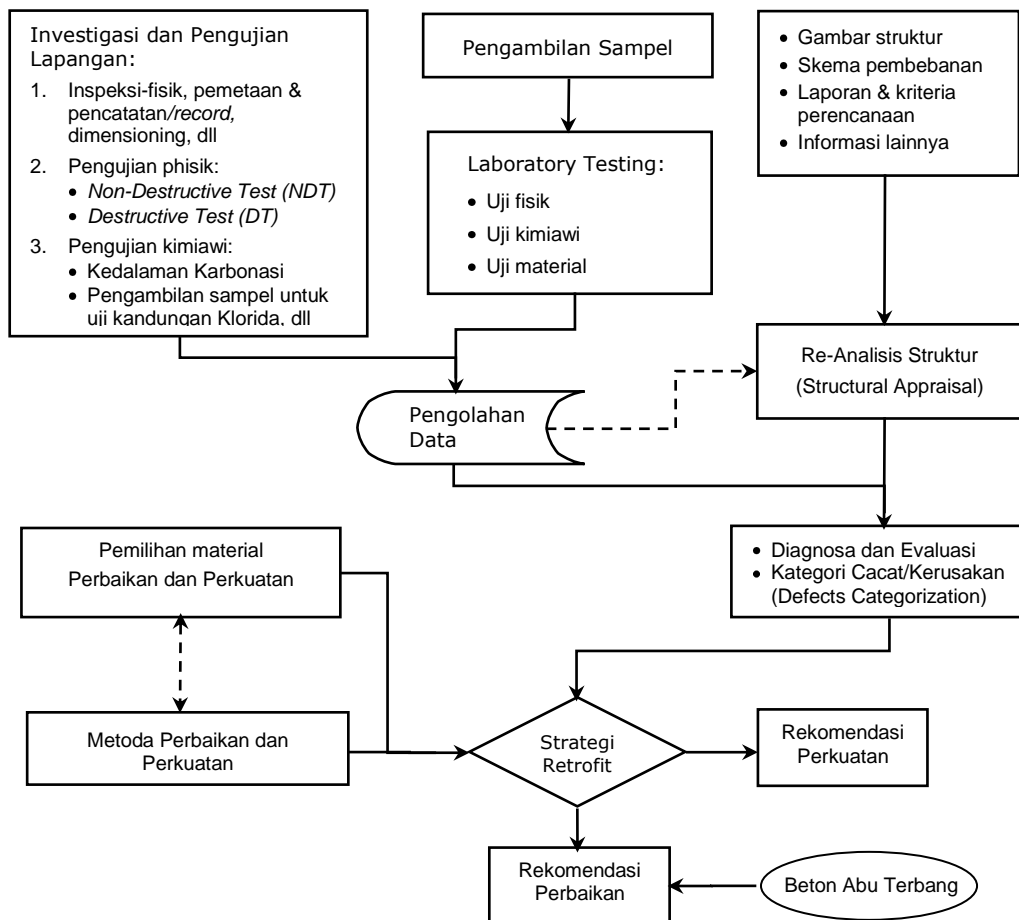
Tulangan baja tersebut haruslah dilindungi agar tidak kehilangan kontak efek komposit yang disebabkan dengan turunnya sifat-sifat pasif/alkali yang dimiliki beton akibat lingkungan luar yang ekstrem, sehingga tidak lagi dapat melindungi tulangan baja dari kemungkinan korosi. Proses mekanisme tersebut tidak hanya berakibat kepada penurunan kinerja beton bertulang, tetapi juga akan ditandai dengan penurunan masa layan struktur secara keseluruhan.

Masa layan diupayakan agar sesuai rencana sehingga ketahanan dari suatu struktur beton tetap terjaga, atas dasar hal ini sudah sewajarnya perlu pemahaman yang mantap tentang penanganan struktur beton yang terdiri pemeliharaan, perawatan dan inspeksi. Program pemeliharaan, perawatan dan inspeksi dimulai dengan identifikasi kerusakan struktur yang selanjutnya dilakukan diagnosa untuk menghasilkan rekomendasi pekerjaan perbaikan dengan maksud meminimumkan kerusakan kinerja struktur sehingga ketahanan struktur dapat dipertahankan. Skenario perawatan dan perbaikan merupakan aktivitas yang dirancang untuk mencapai masa layan sesuai kondisi awal rancangan struktur atau mengembalikan kinerja struktur atau bagiannya yang telah mengalami degradasi akibat pemakaian selama waktu tertentu. Dengan berkurangnya kinerja struktur, maka perlu diterapkan prosedur perbaikan sebagai langkah

awal sebelum pekerjaan perbaikan dilakukan.

Makalah ini mengulas hal yang berkaitan dengan penilaian terhadap kondisi aktual struktur, inspeksi dan pengujian lapangan, appraisal struktur serta pendayagunaan beton kinerja tinggi abu terbang. Dalam proses perbaikan struktur, elemen utamanya adalah “diagnosa struktur” yang secara komprehensif dapat diilustrasikan dalam bentuk diagram alir seperti pada gambar 1 yang ditujukan untuk

mendapatkan pengambilan tindakan (*post-assesment action*). Diagnosa struktur dapat diartikan dengan maksud untuk pemeriksaan cacat (*defect*) dalam struktur, sehingga memungkinkan ahli strukur dalam memberikan petunjuk serta saran untuk *repair* atau *strengthening*, sehingga keadaan dan masa layan struktur dapat kembali seperti semula dengan mempertimbangkan aspek konsep ketekniksipilan dan optimasi anggaran.



Sumber: Munaf, 2003:1-33

Gambar 1. Elemen Utama Diagnosa Struktur

Penelitian Kinerja Struktur

Penelitian Kinerja Struktur adalah upaya untuk memperoleh informasi maksimal atas kondisi aktual struktur sebelum dilakukan diagnosa struktur dengan mengacu pada metoda kajian secara analitis deskriptis, guna mengidentifikasi berbagai faktor yang dapat mempengaruhi kinerja suatu struktur beton. Dalam melakukan penelitian ini, sistem struktur terlebih dahulu dikelompokkan menjadi beberapa kelompok, sesuai dengan sistem dan elemen struktur. Identifikasi faktor diperoleh melalui pengamatan visual dan pengukuran dilapangan berdasarkan prinsip-prinsip dan metoda pengukuran yang umum dipakai dalam suatu kegiatan perbaikan struktur.

Hasil penelitian struktur tersebut kemudian dibandingkan dengan data perancangan, data sekunder mengenai standard dan dikembangkan lebih lanjut ke pemodelan penurunan kinerja serta usulan program penanganannya. Unsur utama penelitian struktur meliputi 2 hal berikut yaitu INSPEKSI STRUKTUR dan DIAGNOSTIK STRUKTUR.

Inspeksi struktur merupakan upaya untuk pemeriksaan secara visual yang dilakukan dengan cara mencatat kondisi struktur termasuk seluruh kerusakan yang terjadi di lapangan disertai bukti tentang informasi, gambar, dokumentasi eksisting dan pengamatan langsung dilapangan, sehingga diharapkan semua data dan permasalahan dapat tercatat seluruhnya. Objek pemeriksaan visual dilakukan terhadap keseluruhan komponen elemen-elemen struktur. Keseluruhan hal-hal yang dilakukan, secara garis besar adalah :

1. Membuat denah secara keseluruhan; sistem struktur, dimensi atau bentuk/ geometri elemen-struktur, dan lain-lain yang dianggap perlu seperti jarak kolom/tiang, *joint*-pemisah, sistem pembebanan, dll.
2. Membuat peta kerusakan elemen struktur secara detail seperti :

spalling, *pops-out*, *delamination*, keretakan dan pola yang terjadi, tulangan yang terputus, korosio-tulangan, *discolouration*, dll.

3. Pengamatan lendutan atau defleksi pada balok atau pelat lantai;
4. Pengamatan perubahan warna pada permukaan balok dan pelat lantai;
5. Pengamatan temperatur terhadap selimut beton dan pelapukan beton pada kolom, balok serta dan pelat lantai. (Munaf, 2003:1-33)

Dianjurkan pada pelaksanaan inspeksi dilakukan juga melalui pengambilan gambar digital sehingga dapat membantu proses evaluasi dan analisis. Keseluruhan perolehan data baiknya tersaji dalam bentuk gambar agar pengguna dan pemilik mudah memahami atas kondisi struktur yang sebenarnya.

Diagnostik struktur adalah merupakan penyelidikan kekuatan dari material beton-eksisting yang meliputi data mutu-beton, kualitas, keseragaman, kerapatan, lokasi dan kondisi dari tulangan serta sifat-sifat lainnya akibat pengaruh lingkungan yang agresif seperti kandungan klorida, karbonasi, sulfat, dll. Penelitian ini diantaranya adalah pengujian kimia, pengujian beton & kondisi tulangan serta pengujian beban. Adapun jenis diagnostik struktur standar yang sering dipakai meliputi penjelasan berikut.

Uji Kimia

Pengujian ini meliputi 2 jenis utama, yaitu Kandungan Karbonat dan Kandungan Sulfat dan Klorida. Pengujian Kandungan Karbonat dilakukan untuk menentukan indikasi proses terkarbonasinya beton yang dilakukan dengan cara menyemprotkan larutan phenophthalein pada hasil core drill atau serbuk beton hasil pengeboran yang dilakukan secara acak pada elemen struktur. Pengaruh phenophthalein pada

beton dalam uji karbonasi adalah sebagai berikut:

1. Jika larutan phenophtalein yang disemprotkan beton berubah warna menjadi merah-muda (bersifat basa/pasif), indikasi beton belum terkarbonasi.
2. Jika larutan phenophtalein yang disemprotkan beton, tidak berubah warna, indikasi bahwa beton sudah terkarbonasi.

Sifat pasif/alkali yang dimiliki oleh beton adalah untuk berfungsi sebagai pelindung tulangan baja dari proses terjadinya korosi, jika hasil pengujian di lapangan menunjukkan bahwa pada beton tidak berubah warna, artinya sifat pasif beton telah berkurang akibatnya peluang terjadinya korosi pada tulangan menjadi lebih besar.

Sedangkan pengujian kandungan sulfat dan klorida dilakukan untuk beton yang berada dalam lingkungan agresif yang dapat diketahui melalui kandungan/ konsentrasinya pada kedalaman tertentu dengan mengambil sampel debu atau core 50 mm dan diuji dilaboratorium.

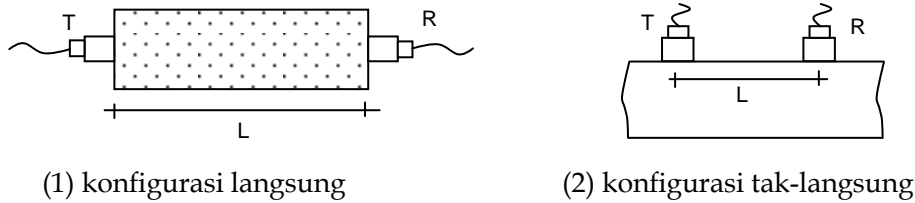
Uji Beton & Kondisi Tulangan

Pengujian kualitas beton yang terpasang pada struktur dapat dilakukan dengan 2 (dua) jenis pengujian, yaitu *non-destructive test* (NDT) dan *destructive test* (DT). *Non-Destructive-Test* (NDT) tidak secara langsung memberikan hasil/nilai *compressive strength* yang sesungguhnya. Pengujian *Destructive-Test* (DT) dengan mengambil benda uji *core* dan uji-tekan, meski terbatas dalam hal kuantitas, dapat secara langsung memberikan hasil yang memuaskan. Oleh karena dapat merusak elemen-struktur, perlu seksama dalam menentukan titik/lokasi dan disarankan lebih banyak dilakukan pengujian dengan cara tidak merusak (NDT).

Pengujian-NDT standar adalah Schmidt Hammer Test, Windsor Probe-

Test, Ultrasonic Pulse Velocity (UPV). Pengujian NDT dengan alat Schmidt mengacu kepada ASTM C 805 (*American Society For Testing and Materials*, 1985). Schmidt Hammer test bukan dimaksudkan untuk secara langsung menentukan mutu-beton, tetapi digunakan sebagai penilaian keseragaman kualitas permukaan beton tanpa merusak, biaya murah dan cepat. Agar dapat diinterpretasikan kedalam mutu-beton meski tidak secara langsung, suatu pendekatan dapat dilakukan dengan cara korelasi formula antara hasil pengujian (NDT) disekitar lokasi *core-drill versus* hasil uji tekan sampel beton *coredrill*.

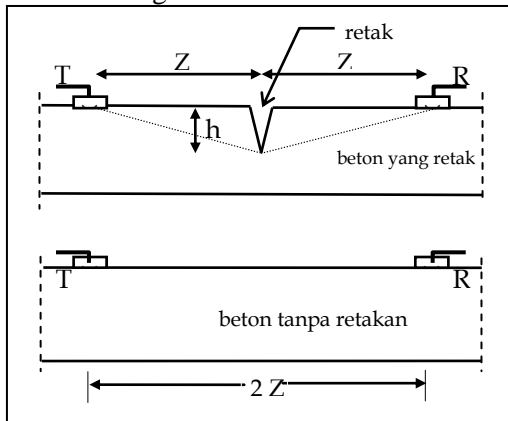
Jenis uji beton yang kedua adalah dengan Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) yang mengacu kepada ASTM C 597 (ASTM, 1983). *Ultrasonic pulse velocity test* dimaksudkan menilai kerapatan beton tanpa dipengaruhi oleh usia. Prinsip kerja pengujian beton dengan alat ultrasonic adalah mengubah energi gelombang listrik yang dibangkitkan oleh pembangkit pulsa *Transducer* (T) menjadi energi gelombang mekanik yang selanjutnya merambat pada beton. Setelah sampai pada *Receiver* (R), energi gelombang tadi diubah kembali menjadi energi gelombang listrik yang selanjutnya melewati penguat dan akhirnya dihitung waktu tempuh dalam pencacah digital. Kecepatan pulsa dapat dihitung dengan diketahui jarak dan waktu tempuh. Untuk beton yang tidak mengandung cacat, semakin cepat gelombang yang melewati beton, semakin tinggi kerapatan beton yang secara langsung menggambarkan mutu beton tinggi, demikian sebaliknya. Dikarenakan pulsa merambat pada ketebalan beton, maka beton yang terkarbonasi tidak berpengaruh. Konfigurasi *transducer* dapat dilakukan dengan cara metoda langsung (*direct*), semi dan tak langsung (*in-direct*) seperti pada Gambar 2.



Sumber: Munaf, 2003:1-33

Gambar 2. Konfigurasi Transducer dan Receiver pada UPV-test

Meski tidak ada hubungan antara kecepatan-pulsa dengan kekuatan tekan beton, pendekatan korelasi antara UPV-test versus kuat tekan (*core-drill*) dapat dilakukan. Sebelum dilakukan evaluasi lebih lanjut, lakukan UPV-test dengan konfigurasi langsung (*direct-method*) pada benda uji. Lalu data tersebut dibuat dalam grafik untuk mendapatkan persamaan korelasi, selanjutnya persamaan ini digunakan untuk mendapatkan kualitas beton ditempat lain yang telah dilakukan uji UPV dengan *direct-method*.



Sumber: Munaf, 2003:1-33

Gambar 3. Pengukuran kedalaman retak dengan konfigurasi tak-langsung (UPV-Test)

Dengan mengacu kepada besaran kecepatan yang terjadi, maka interpretasi kualitas beton dapat dinilai pada Tabel 1.

Kecepatan rambat gelombang ultrasonic (UPV) (km/sec)	Kualitas beton
> 4.5	Sangat baik
3.5 - 4.5	Baik
3.0 - 3.5	Sedang
2.0 - 3.0	Buruk
< 2.0	Sangat buruk

Sumber: Neville, 1977:506

Jika terdapat retak, perkiraan kedalaman retakan yang terjadi pada beton, dilakukan dengan konfigurasi tak langsung (*in-direct*) dengan menggunakan alat Ultrasonic (UPV) yaitu pengukuran dilakukan dengan cara meletakkan *Transducer* (T) dan *Receiver* (R) pada suatu bidang permukaan beton dimana terdapat retakan. Informasi mengenai kedalaman retak diperlukan sebagai data pendukung dalam melakukan kajian dan analisis struktur serta pembuatan rekomendasi solusi. Dengan menggunakan kedua data waktu tempuh t_1 dan t_2 tersebut akan dapat dihitung kedalaman retak (h) dengan menggunakan persamaan (1). Perlu diketahui bahwa waktu tempuh jika terjadi retak atau void dalam beton akan lebih besar daripada beton tanpa retakan.

$$h = z \sqrt{\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

dengan h dan z adalah besaran yang dapat dilihat pada Gambar 3 dimana

lebar retak dapat diukur dengan menggunakan crack-meter, simultan pada waktu pemetaan kerusakan dilakukan.

Metoda pengujian lainnya adalah jenis yang merusak (DT) yang disebut dengan teknik *core-drill* mengacu kepada standar BS 1881 (British Standards Institutions, 1983), dengan tujuan menentukan kuat tekan beton dari aktual struktur. Pengambilan contoh uji dilakukan dengan cara melubangi, yaitu mengambil benda uji beton dari bagian struktur yang dianggap dapat mewakili dengan ukuran diameter 10 cm dengan arah pengambilan disesuaikan dengan kondisi di lapangan. Contoh benda uji tersebut kemudian diberi nomenklatur yang untuk selanjutnya dilakukan uji tekan di laboratorium beton untuk dapat mengetahui tegangan karakteristik beton (f_c').

Sedangkan didalam menentukan kekuatan aktual adalah perkalian antara kekuatan hasil melubangi (*core strength*) dengan angka koreksi arah pengambilan (rasio panjang/diameter dan tulangan). Kuat tekan beton dihitung menurut persamaan (2), yaitu:

$$\text{Core Strength} = \frac{P}{A} \quad (2)$$

dimana: P = beban tekan maksimum, (kg)
A = luas bidang tekan, (cm²)

Dan kekuatan aktual dihitung menurut persamaan (3), yaitu:

$$\text{Kekuatan aktual} = \alpha * \beta * \text{core strength} \quad (3)$$

dimana : $\alpha = \frac{2,5}{1,5+1/\lambda}$ (koreksi untuk arah pengambilan horizontal)

$$\alpha = \frac{2,3}{1,5+1/\lambda} \quad (\text{koreksi untuk arah pengambilan vertikal})$$

sedangkan λ = rasio panjang/diameter benda uji

$$\beta = \left\{ 1 + 1,5 \frac{\sum(d_i \cdot l_i)}{D \cdot L} \right\} \quad (\text{koreksi untuk tulangan})$$

dimana d_i = diameter tulangan

l_i = jarak tulangan ke tepi benda uji yang terpendek

D = diameter benda uji

L = panjang benda uji

Pengujian lain adalah pengujian jika sudah tampak kerusakan visual, yaitu uji laju korosi yang akan mengindikasikan tingkat kategori dan resiko korosi tulangan pada beton dapat dilakukan dengan data keluaran beda potensial yang dihasilkan dengan menggunakan *half-cell instrument* yang metoda dan penggunaan dapat mengacu pada ASTM C 876 (ASTM, 1980). Hasil pembacaan yang menggunakan *copper/copper sulphate half-cell* yang terukur dilapangan untuk mengetahui kondisi tulangan, diinterpretasikan, seperti yang terdapat dalam Tabel-2.

Tabel 2

Rate of corrosion	Corrosion current density, i_{corr} (mA/cm ²)
High	10 – 100
Medium	1 – 10
Low	0.1 – 1
Passive	< 0.2

Half - cell potential (mV) relative to copper/copper sulphate reference electrode	Percentage chance of active corrosion
< -350	High; more than 90%
-200 to -350	Moderate; 50%
> -200	Low; 10%

Resistivity (k Ω /kilo ohm-cm)	Likelihood significant corrosion
< 5	Very high
5 – 10	High
10 – 20	Low moderate
> 20	Low

Sumber: Kay, 1992

Pengujian DT yang relatif terakurat adalah uji pembebanan langsung beban merata ataupun beban terpusat adalah dimaksudkan untuk mengetahui perilaku struktur terhadap

beban vertikal yang bekerja serta merupakan bagian (alternatif) dari metoda pengujian kondisi kapasitas struktur. Dengan mengadakan suatu uji pembebanan statik yang dimaksud maka akan dapat diketahui sifat-sifat dan perilaku kondisi aktual struktur eksisting pada saat memikul beban vertikal/beban hidup. Uji beban juga dilakukan untuk keadaan-keadaan sebagai berikut:

1. Keraguan atas keamanan-struktur atas beban-beban yang bekerja setelah melakukan survey dan pengujian lokal/setempat.
2. Sulitnya atau ketidakmungkinan dan keraguan dalam menentukan kekuatan atau mutu atas informasi yang didapat pada struktur dan material.
3. Ketidaksesuaian antara detailing dalam gambar ataupun material dan metoda yang tercantum dalam spesifikasi pada waktu pelaksanaan.

Sebelum melakukan pengujian beban langsung (*destructive-test*) pada bagian struktur yang akan diuji, ada baiknya metoda pengujian (*non-destructive test*) telah dilakukan dan juga pengamatan kondisi bagian struktur yang akan dibebani. (Munaf, 2003:1-33)

Inspeksi Untuk Deteksi Pengurangan Kinerja

Meskipun beton adalah material yang relatif mudah dibuat sesuai bentuk, tetapi material ini tidak selalu dapat sepenuhnya berperilaku seperti yang diinginkan yang ditunjukkan dengan beberapa bentuk dasar gejala (*symptoms*) yang bisa berakibat buruk pada struktur secara keseluruhan, akibatnya tidak hanya penurunan kinerja (*deterioration*) material, tetapi juga berkurangnya kinerja struktur secara keseluruhan sehingga masa layan rencana akan berkurang. Gejala ini dapat dalam bentuk retak/crack, spalling dan disintegration (yang dapat didefinisikan rusaknya kesatuan unsur-unsur

pembentuk beton, sehingga matriks beton menjadi lemah). (Ibid, 2003:1-33)

Dalam kenyataannya terdapat 2 kategori cacat, yaitu struktural dan tidak struktural yang sulit dibedakan. Ketika anggapan cacat yang terjadi pada saat awal dapat digolongkan sebagai tidak berbahaya atau tidak-struktur, tetapi perkembangan selanjutnya akan dapat menjadi cacat/kerusakan struktur. Misal, desain dan analisis struktur pada struktur beton bertulang yang dibuat atas dasar hipotesa, bahwa beton akan retak dalam daerah tarik sebelum tulangan mengambil alih fungsi tarik. Retak yang terjadi pada bagian elemen struktur tidak langsung akan berpengaruh terhadap kapasitas penampang jika lebar retak yang terjadi lebih kecil dari yang diizinkan. Pada saat layan, jika proses karbonasi terjadi, kemungkinan tulangan akan berkarat, pada awalnya tidak mempengaruhi kapasitas penampang, namun dengan waktu berjalan, karat tulangan berakibat pada luas penampang tulangan berkurang, cover beton terkelupas/spalling, sehingga kapasitas penampang berkurang. Cacat pada tahap ini menjadikan cacat struktur sehingga harus menjadi perhatian. (Ibid, 2003:1-33)

Salah satu fenomena cacat yang sering terjadi adalah retak, yaitu dimulai jika tegangan tarik melebihi kekuatan tarik yang diijinkan. Demikian pula akibat pengaruh beban yang bekerja atau/dan pengaruh lingkungan, retak dapat terjadi walaupun kondisi rencana tidak retak. Beton dapat retak dalam setiap atau masing-masing pada 3 tahapan berikut saat beton dalam masa layan, yaitu:

1. tahap plastis (*plastic-phase*), terjadi sesaat setelah penuangan beton (dua jam pertama)
2. tahap pengerasan (*hardening-phase*), terjadi dalam 3 minggu pertama
3. tahap pasca-pengerasan/layan (*service life-phase*), yang terjadi setelah

28 hari. (Ibid, 2003:1-33), (Raina, 1996)

Berdasarkan klasifikasi dalam pekerjaan inspeksi, retakan-beton dapat dibagi kedalam 2 jenis, yaitu:

1. Retak-tidak aktif (*dormant-cracks*). Retak ini tidak berkembang/stabil atau yang lebih dikenal dengan '*dead-cracks*'.
2. Retak-aktif (*active-cracks*). Retak ini masih berlanjut baik lebar maupun panjang retakan atau yang lebih dikenal dengan '*live-cracks*'. Untuk kemudahan dalam menilai jenis retakan yang terjadi, lekatkan kaca tipis pada jalur retakan, yang sekaligus pemantauan perkembangan retakan.

Cacat yang sering terjadi lainnya adalah spalling dapat diartikan dengan penampakan bagian permukaan beton yang lepas. Berbeda dengan lepasnya sebagian *mortar/aggregat* dari permukaan beton (*scalling*) yang lebih sering terjadi pada beton usia-muda, spalling lebih banyak terjadi pada struktur-beton yang relatif sudah tua. Sebelum elemen struktur melayani tegangan tekan, spalling mungkin sudah ada dari bentuk beton yang tidak masif atau yang disebut juga 'delaminasi/ delamination', yang dapat dideteksi dengan alat sederhana yaitu 'palu'. Berbagai macam penyebab terjadinya spalling, diantaranya: (Munaf, 2003:1-33)

- (a) selimut beton tipis
- (b) beton keropos dan kualitas beton buruk
- (c) tulangan/*reinforcement* kurang (tidak cukup)
- (d) suhu tinggi akibat kebakaran
- (e) pengaruh dari proses kimiawi, seperti konsentrasi klorida dan sulfat.

Dalam banyak kasus, penyebab terjadinya spalling adalah korosi tulangan yang disebabkan proses kimiawi akibat sifat pasif/alkali yang

dimiliki beton telah berubah (*depassivation*). Sifat pasif/alkali jika nilai pH dari beton lebih dari 11.5, sedangkan nilai pH yang dimiliki beton-segar 13.5. Berubahnya kondisi sifat-sifat pasif/alkali menjadi tidak pasif (*depassivation*) dapat terjadi dalam 2 kondisi:

1. berkurangnya nilai pH disebabkan reaksi CO₂ (karbonat/*carbonation*)
2. penetrasi ion klorida (Cl⁻) hingga mencapai cover beton ke beton dan merusak lapisan tipis/film yang berfungsi sebagai proteksi tulangan dari lingkungan luar/korosi. Akan tetapi, pada saat konsentrasi kandungan ion-klorida cukup tinggi, ion ini dapat merusak kestabilan lapisan tipis, meskipun beton mempunyai nilai pH tinggi. Kasus ini dijumpai untuk bangunan struktur beton berada dalam lingkungan yang agresif seperti lingkungan laut. (Bentur,1997)

ACI 318-95, mensyaratkan batas konsentrasi kandungan ion-klorida (*threshold-level*) untuk beton-prategang maupun beton-bertulang tergantung fungsi struktur, sebagai fungsi kontrol keamanan selama masa layan akibat penetrasi ion-klorida. Ketika nilai konsentrasi ion-klorida mencapai batas seperti yang dipersyaratkan oleh ACI 318-95 dan telah mencapai kedalaman cover beton, diasumsikan proses korosi tulangan dimulai. Dengan demikian sisa masa layan akibat penetrasi ion-klorida pada struktur beton dapat diestimasi/prediksi. Hal yang sama dapat dilakukan untuk kerusakan beton (korosi tulangan) akibat proses karbonasi.

Appraisal Struktur

Appraisal struktur adalah salah satu proses dalam diagnosa struktur dengan menilai kondisi aktual pada sebuah struktur yang telah dibangun. Intinya langkah ini adalah suatu aktivitas yang berbeda dengan desain

struktur tetapi dasar teori sama dan diperlukan pertimbangan yang tepat dalam hal penilaian beban, metoda dan evaluasi untuk menentukan kekuatan struktur, komponen dan unsur pembentuk material, dan metoda perhitungan yang tepat. Keandalan suatu struktur dinilai oleh pertimbangan rekayasa dengan informasi yang didapat dari gambar-gambar teknik dan perhitungan, hasil dari kunjungan lapangan, pemeriksaan dan pengujian lapangan atau laboratorium dengan mengacu pada suatu standar tertentu.

Standar diacu dengan tujuan untuk dipakai dalam *appraisal* struktur yang mutu serta bahannya telah diketahui, dan kemudian asumsi-asumsi baik secara implisit ataupun eksplisit bila tidak tersedia, diperlukan pertimbangan untuk menelaah kembali asumsi-asumsi prinsip dasar yang diturunkan, sehingga kondisi struktur setelah analisis dilakukan tetap dalam batas aman (Kay, 1992).

Dalam banyak standard yang digunakan sebagai acuan desain struktur beton, tertuang pernyataan ketentuan mengenai kekuatan dan laik pakai, dimana kombinasi beban dan gaya terfaktor, struktur dan komponen struktur harus direncanakan mempunyai kuat rencana minimum sama dengan kuat perlu, sehingga:

$KUAT\ PERLU \leq KUAT\ RENCANA$, yang dapat ditulis kembali seperti berikut :

$$\gamma \times BEBAN \leq \phi \times KEKUATAN\ NOMINAL\ STRUKTUR$$

dimana γ = faktor beban (load-factor), masing-masing untuk beban mati, hidup dan sementara nilainya berbeda

ϕ = faktor reduksi kapasitas

Informasi yang diperoleh dari struktur eksisting untuk keperluan analisis struktur, seperti: dimensi/geometri elemen struktur aktual; mutu, kualitas dan kekuatan material dari uji sampel di lapangan/laboratorium, telah diketahui. Demikian juga dengan beban-gravitasi,

ketelitian dalam estimasi beban-mati (tebal pelat dan super-imposed dead load) dapat dilakukan, pola pembebanan-hidup serta penggunaan bangunan. Hal yang berbeda dengan proses desain-baru suatu struktur dengan banyak faktor ketidakpastian. Berbekal atas banyaknya informasi yang didapat, maka dapat dimungkinkan adanya penyesuaian faktor beban khususnya untuk beban mati (Institutions Of Structural Engineers, 1980), sedangkan faktor beban untuk beban hidup tetap sediakala.

Beton Abu Terbang Untuk Perbaikan

Rancangan perbaikan struktur bertujuan untuk memperoleh suatu sistem perencanaan, pelaksanaan dan evaluasi kegiatan perbaikan struktur yang terpadu. Tujuan pokok yang paling efektif dari program perbaikan adalah memperbaiki dan mencegah agar tidak terjadi kerusakan lagi pada struktur. Dapat pula diartikan bahwa program perbaikan adalah menjaga durabilitas suatu struktur agar masa layan tetap seperti sediakala bahkan dapat meningkat.

Pengaruh dari ketepatan penelitian frekuensi inspeksi dan appraisal dapat memperpanjang masa layan dari suatu struktur melalui suatu identifikasi cacat-struktur yang dapat mempengaruhi kinerja struktur dan pekerjaan perbaikan adalah bagian dari program pemeliharaan. Frekuensi inspeksi dan pemeliharaan regular tergantung dari kinerja dan *performance* dari struktur. Pemeliharaan rutin pada struktur tetap dilakukan meskipun pekerjaan perbaikan selesai dan jika dilihat dari rangkaian ini, maka peran material perbaikan menjadi sangat penting.

Pemilihan material perbaikan dan/atau perkuatan pada struktur beton adalah penting, kompleks, memahami apa yang dipersyaratkan oleh pemilik, pengguna dan engineer, kondisi serta

metoda pelaksanaan. Tergantung kepada ukuran, lokasi serta kondisi, pertimbangan pemilihan material perbaikan dicirikan antara lain oleh beberapa faktor:

- (i) material perbaikan sesuai dengan lapisan dasar material lama
- (ii) mutu sama atau lebih dari material lama
- (iii) kecukupan nilai kekuatan lekat (bond-strength) dengan lapisan dasar material lama
- (iv) tidak ada kandungan klorida, bubuk metal
- (v) biaya yang efektif
- (vi) aplikator terbiasa terhadap produk (Munaf, 2003).

Bahan perbaikan yang digunakan sebagai perbaikan yang bersifat struktur atau tidak-struktur (kosmetik) dibagi dalam 2 kelompok yaitu: cementitious material (*cement-based*) dan *polymer-based*. Produk material *cementitious* dalam bentuk *pre-package* diperlukan dalam bentuk *pre-package* diperlukan air-bersih sebagai pelarut, sementara bahan *polymer* diperlukan unsur tambahan/ pengatur yang disebut '*setting-agent*'. Material polimer memberikan perlindungan sifat-fisik terhadap tulangan baja yang tertanam, akan tetapi tidak untuk sifat pasif/alkali (*repassivation*). Jika strategi yang dilakukan bertujuan perlindungan tulangan baja terhadap resiko korosi dengan aplikasi '*galvanic-protection* (misal, *sacrificial anode*); maka material cementitious digunakan sebagai material perbaikan.

Makalah ini akan mengulas perkembangan kegiatan yang terkait dengan Teknologi Beton Kinerja Abu Terbang yang terbuat dengan substitusi parsial semen oleh Abu Terbang (hasil pembakaran batu bara di PLTU) dan

penggunaannya sebagai material perbaikan mengingat abu terbang memiliki unsur kimia (SiO₂) yang mampu membantu meningkatkan kinerja material beton yang akan diaplikasikan dengan Teknologi Pre-Pak (*Prepacked Technology*). Teknologi Pre-Pak (*Prepacked Technology*) dalam pembuatan beton telah berkembang jauh tidak hanya untuk membuat konstruksi baru, tetapi juga untuk perbaikan struktur.

Karakteristik fisika, komposisi kimia serta warna abu terbang sangat bervariasi tergantung dari asal batu bara yang menghasilkannya. Namun secara umum Abu Terbang secara visual tampak seperti tepung berwarna abu sampai coklat serta memiliki kandungan silika yang cukup tinggi, mencapai rata-rata 45-60% dari berat total.

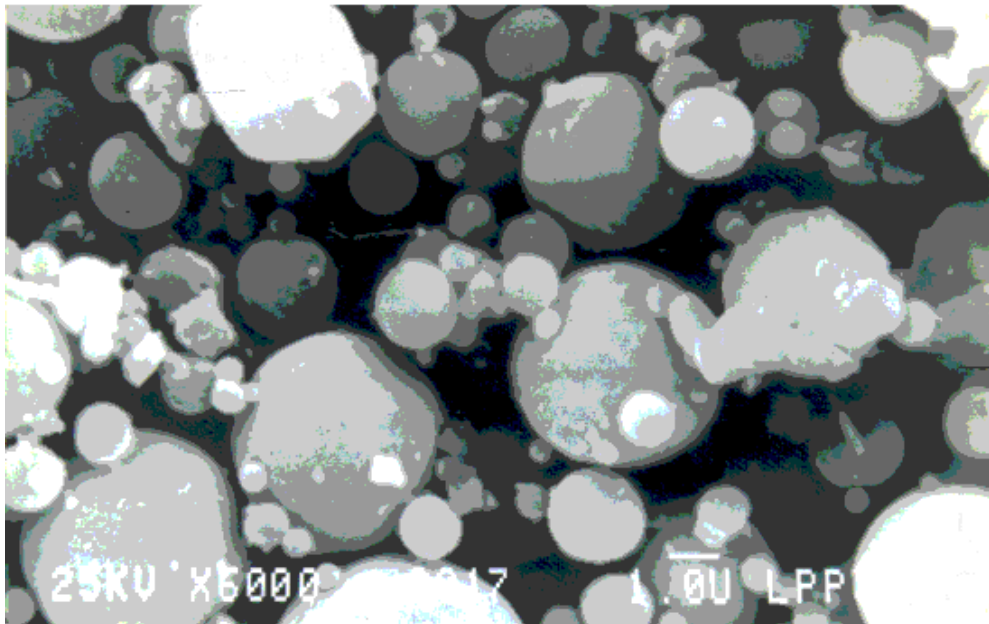
Partikel silika tampak berbentuk bola (spherical) berukuran antara 0,1-30 µm serta memiliki permukaan spesifik (specific surface) antara 0,2-0,6 m³/gr. Tabel 3 menampilkan hasil analisis kimia abu terbang batu bara yang didapat dari berbagai tambang di Indonesia. Kolom terakhir adalah komposisi kimia abu terbang yang didapat dari PLTU Suralaya. Tampak kandungan silika yang cukup tinggi mencapai 56,30%. Pengamatan Scanning Electron Microscope (SEM) menunjukkan bahwa silika berbentuk bola kecil yang amorp, bergerombol saling terkait dan berukuran antara 0,3-20 µm. Gambar 4 menampilkan foto SEM dari abu terbang tersebut. Sedangkan analisis ayakan menghasilkan 77,15% lolos saringan 45 µm (Hanafiah,1995).

Tabel 3. Komposisi Kimia Abu Batubara Indonesia

KOMPOSISI	ASAL BATUBARA										
	KIMIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

SILIKA (SiO ₂)	59,4	52,0	51,2	51,0	50,9	41,1	35,5	32,8	30,7	28,0	56,30
ALUMINIUM (Al ₂ O ₃)	24,7	25,0	29,6	36,6	34,9	22,0	25,0	21,4	24,9	12,0	29,36
BESI (Fe ₂ O ₃)	4,6	12,6	6,5	4,2	3,5	15,0	15,5	20,0	12,3	18,0	4,12
CALCIUM (CaO)	3,1	2,2	3,9	1,7	2,5	8,8	10,0	8,5	11,5	16,0	3,61
MAGNESIUM (MgO)	1,7	2,2	1,7	0,4	1,4	3,0	6,0	3,1	2,7	12,0	2,14
SODIUM (Na ₂ O)	2,5	1,0	0,8	0,3	0,2	1,5	1,0	0,9	0,8	0,8	0,20
POTASIUM (K ₂ O)	0,5	1,8	0,2	0,3	0,3	0,9	1,6	0,8	0,9	0,5	
TITANIUM (TiO ₂)	0,8	1,0	2,3	3,1	2,8	0,6	1,6	0,8	0,8	0,3	N.A
PHOSPHOR (P ₂ O ₅)	0,4	0,5	0,2	0,1	0,3	0,5	0,8	0,7	1,0	0,2	N.A
SULFIDA (SO ₃)	N.A	1,6	2,7	1,5	0,4	6,6	8,0	9,0	8,4	12	0,00
MANGAN (Mn ₃ O ₄)	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A

1 : Air Laya 4 : Satui 7 : Tanito 10 : Adaro - Wara
 2 : Prima Coal 5 : Senakin 8 : Berau 11 : PLTU Suralaya
 3 : Petangis 6 : Pinang Coal 9 : Multi Brand
 Sumber: Besari, 1998



Gambar 4. Bentuk Butiran Abu Terbang, Hasil SEM diperbesar 6000 x

Peran Abu Terbang dalam beton adalah dalam proses hidrasi, dimana air dalam campuran beton segar mengikat Dicalcium Silicate (C₂S) dan Tricalcium Silicate (C₃S) menjadi Calcium Silicate Hydrate gel (CSH, 2CaO.2SiO₂.3H₂O) dan membebaskan Calcium Hydroxide (Ca(OH)₂). Dalam kasus beton kinerja tinggi yang telah diberikan tambahan SiO₂ dari Abu Terbang, maka (Ca(OH)₂) yang dibebaskan proses hidrasi akan bereaksi di SiO₂ membentuk pula CSH yang

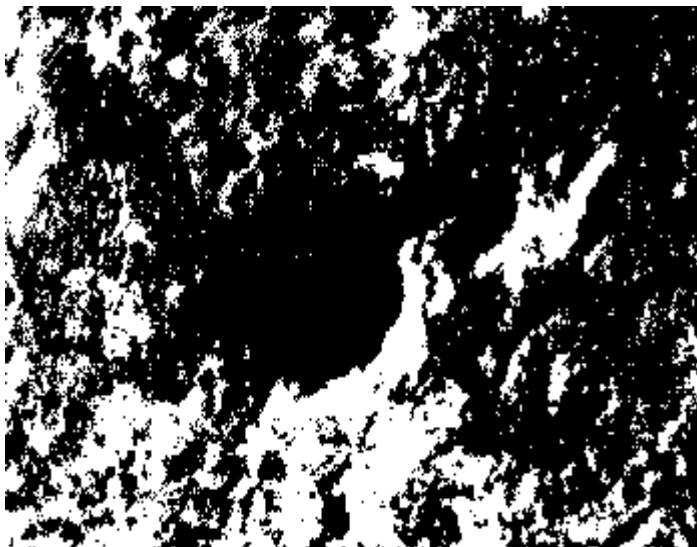
menambah kepadatan dan kekuatan produk beton. Reaksi kimia yang terakhir ini sering juga disebut reaksi sekunder untuk membedakan reaksi hidrasi yang terdahulu. Reaksi hidrasi sekunder berlangsung lebih lambat dan berlaku lebih lama.

Penelitian berhasil memproduksi beton kinerja (mutu) tinggi yang memiliki kekuatan 85,557 MPa pada umur 28 hari dan meningkat menjadi 103,277 MPa pada umur 180 hari, dengan menambahkan abu terbang dan

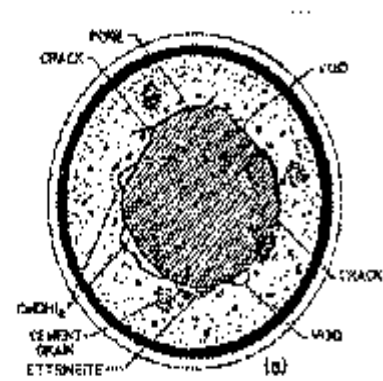
superplasticizer pada beton segar. Beton yang sama tanpa tambahan abu terbang memberikan kuat tekan 72,170 MPa pada umur 28 hari serta kuat tekan 88,030 MPa pada umur 180 hari, sehingga tambahan abu terbang telah meningkat kekuatannya sebanyak 18,5 % pada umur 28 hari dan 17,3% pada umur 128 hari. Pada penelitian tersebut telah didapatkan jumlah optimum abu terbang pengganti semen sebesar 15% berat total cementitious material (85%

semen + 15% abu terbang (Hanafiah, 1996).

Selain uji parameter makromekanik juga ditinjau aspek mikrostruktur guna mengetahui karakteristik *Interface Transitional Zone* yang merupakan daerah lemah antara matriks dan agregat. Gambar 5 menunjukkan potensi kelekatan *Interface Transitional Zone* antara Beton Lama dengan Beton Abu Terbang (Munaf, 1995).



Sumber: Munaf, 1995

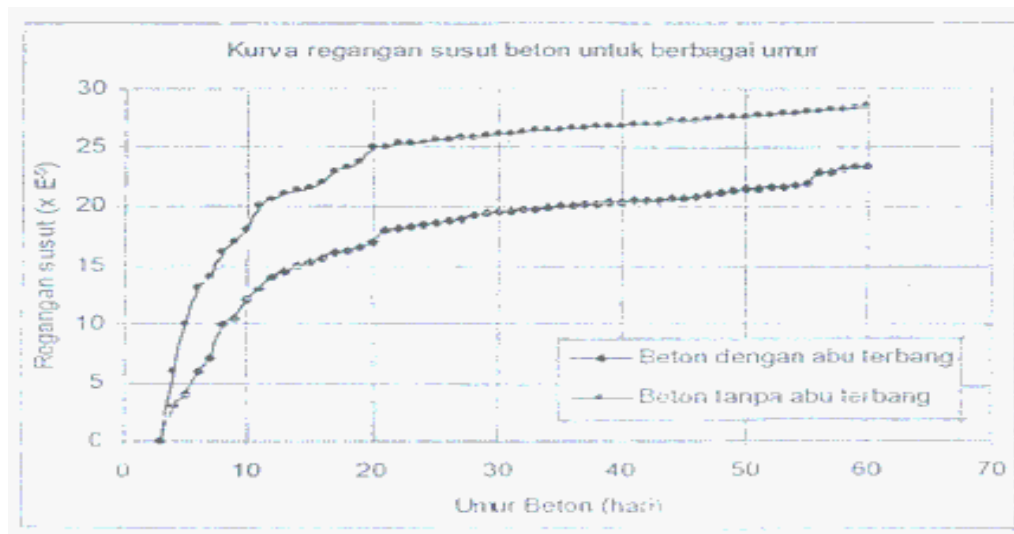


Gambar 5. Interface Transitional Zone Kelekatan Beton Lama dan Beton Abu Terbang

Suatu parameter yang penting dalam penggunaan material perbaikan adalah sifat susutnya, karena perbedaan laju susut yang berbeda antara beton lama dan beton baru akan menghasilkan retak aktif jika tidak terkontrol, oleh karena itu laju susut material perbaikan haruslah seminimal mungkin. Pengujian susut dilakukan dengan standar ASTM D-878-87 dan untuk beton dengan

substitusi abu terbang 15% menghasilkan laju sekitar 20% lebih kecil dari beton biasa seperti gambar 6.

Berkurangnya laju susut pada beton abu terbang diakibatkan oleh morfologi butiran yang abu terbang dan gradasinya yang relatif baik sehingga bidang kontak antar butiran menghasilkan efek hambat yang optimal.



Sumber: Munaf, 1995

Gambar 6. Kurva perkembangan regangan susut beton untuk berbagai umur

Kesimpulan

- Secara fisik abu terbang mempunyai bentuk bulat seperti bola, partikel yang lebih halus dari semen, dan berat jenis yang lebih kecil dari semen.
- Secara kimia abu terbang mengandung silica (SiO_2) yang dapat menimbulkan reaksi sekunder pada reaksi hidrasi semen, sehingga air yang berada di permukaan agregat kasar (*adsorbedwater*), *bleeding* air di daerah bawah agregat kasar, dan mengurangi kristal kalsium (CaO), dan dapat bereaksi kembali dengan silica membentuk trikalsium silica (C_3S) dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang terbebaskan dari proses hidrasi dan akan membentuk C-H-S kembali, sehingga beton yang dibentuknya akan lebih padat dan kuat atau mutunya bertambah dengan susut yang kecil dan hal ini sesuai untuk material perbaikan.
- Penambahan abu terbang dalam campuran beton dapat mengakibatkan adukan beton tersebut mempunyai kelecakan yang baik, mengurangi *bleeding*, kemudahan pemompaan adukan

beton di dalam pipa pengecoran, lebih mudah dalam pekerjaan *finishing*, dan pada beton setelah mengeras, maka beton tersebut menjadi meningkat kepadatan, kekuatan tekan dan tarik, daya lekat antara beton dan besi tulangan, ketahanan terhadap gaya *impact*, abrasi dan sulfat, menurunkan nilai porositas, permeabilitas, penetrasi klorida, susut, dan panas hidrasi.

Daftar Pustaka

- American Society for Testing and Materials, "Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete (ASTM C 805)", The American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985.
- American Society for Testing and Materials, "Test Method for Pulse Velocity Through Concrete (ASTM C 597)", The American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1983.

- American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Half-cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete (ASTM C 876)", The American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1980.
- Bentur, A., "Steel Corrosion in Concrete", E & FN SPON Publishing, London, 1997.
- British Standards Institution, "Testing Concrete: Method for Determinations of the Compressive Strength of Concrete Cores BS 1881: Part 120", The British Standards Institution, London, England, 1983.
- Besari, M.S, "Limbah Industri Abu Terbang Bagi Industri: Melestarikan Lingkungan Alami", Keynote Paper, Seminar Nasional Material dan Lingkungan Dalam Pembangunan Industri LIPI, Bandung, 1998.
- Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95), American Concrete Institutes.*
- Departemen Pekerjaan Umum, "Standar Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SK-SNI-T-15-1991-03)", Yayasan LPMB PU, Bandung.
- Hanafiah, "Persamaan Konstitutif Beton Kinerja Tinggi dengan Abu Terbang sebagai Substitusi Parsial Semen", Disertasi, ITB, Bandung, 1996.
- Institution of Structural Engineers, "Appraisal of Existing Structures", The Institution of Structural Engineers, London, England, 1980.
- Kay, T., "Assessment and Renovation of Concrete Structures", Longman Scientific & Technical, England, 1992.
- Munaf, dan Siahaan, F.T, "Diagnosa dan Perbaikan untuk Peningkatan Kinerja Struktur Beton", *Concrete Repair & Maintenance*, JONBI, hal. 1-33, 2003.
- Munaf, dkk, "Constitutive Model of High Performance Fly Ash Concrete", Competitive Research Grant, Laboratory of Structure and Materials ITB, 1995.
- Neville, AM., "Properties of Concrete", Fitman Publishing, Ltd., London, England, page 506, 1977.
- Raina, V K, "Concrete Bridges: Inspection, Repair, Strengthening, Testing and Load Capacity Evaluation", Tata Mc Graw-Hill, Inc., USA, 1996.