

ANALISIS PENEMPELAN BIOTA LAUT PADA BETON DAN DIFFUSIVITAS AIR LAUT PADA BETON

Henry Hartono¹, A. Hartoko², B. Suhendro³, Rochmadi⁴, Henricus Priyosulistyo⁵

¹Mahasiswa Program S3 Teknik Sipil - Fak Teknik UGM (dosen tehnik sipil UMS)

Email / HP : hartono_henry@yahoo.com / 08122615059

²Staf Pengajar FPIK Undip – Semarang

^{3,4,5}Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil & Lingkungan - Fak Teknik UGM

Email / HP : hartono_henry@yahoo.com / 08122615059

Abstrak

Berdasarkan kunjungan ke lokasi jembatan Suramadu dan dermaga kapal nelayan di wilayah Kabupaten Jepara, nampak banyak biota laut yang hidup menempel pada beton yang merupakan bangunan sipil berupa tiang pancang jembatan. Sebagian dari permukaan beton tersebut mengalami kerusakan, karena pada umur tertentu biota laut yang menempel mati, terlepas dari permukaan beton dan menyebabkan permukaan beton kasar/rusak, sehingga dapat terjadi diffusivitas air laut pada beton yang tentunya mempengaruhi kualitas beton. Oleh karena itu dipandang perlu adanya suatu penelitian tentang penempelan biota laut dan diffusivitas air laut pada Beton.

Penelitian ini juga untuk mempelajari proses difusi ion Cl^- ke dalam beton serta untuk mengetahui sejauh mana kedalaman mendifusinya ion Cl^- dalam beton dan bagaimana pengaruh dari waktu terhadap kadar ion Cl^- di dalam beton. Selain itu dalam penelitian ini juga dapat ditentukan nilai diffusivitas dari ion Cl^- di dalam beton. Cara penelitian ini dilakukan dengan membuat benda uji berupa silinder beton berukuran diameter 15 cm, tinggi silinder 30 cm, balok beton berukuran panjang 50 cm, lebar 15 cm dan tebal 15 cm, lempeng beton berdiameter 15 cm, tebal 1 cm, kemudian diiris-iris dengan lebar 1 cm. Metode campuran adukan beton untuk membuat benda uji beton menggunakan metode SNI 91, semua benda uji yang sudah dibuat direndam di daerah Splash Zone di laut, yaitu terletak di wilayah laboratorium kelautan Universitas Diponegoro di Jepara.. Rendaman tersebut berlangsung sampai dengan 20 bulan.. Tiap bulan benda uji tersebut diambil untuk diperiksa di laboratorium. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui jenis dan siklus kehidupan biota laut yang menempel pada permukaan beton, pengaruh adanya penempelan biota laut pada kualitas beton, serta pengaruh diffusivitas air laut pada beton. Hasil penelitian yang diperoleh menunjukkan jenis-jenis dan siklus kehidupan biota laut yang hidup di laut pada suatu negara yang mempunyai iklim tropis seperti negara Indonesia. Hasil penelitian juga menunjukkan juga adanya pengaruh penempelan biota laut terhadap kualitas beton. Diffusivitas air laut pada beton berkisar antara $9,996 \times 10^{-7}$ hingga $2,225 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Kata kunci : Pengaruh Biota Laut: Kualitas Beton: dan Diffusivitas Air Laut.

PENDAHULUAN

Umum

Budiono, *et al.* (2000) telah mempelajari pengaruh korosi pada tulangan pada kekuatan balok beton bertulang di laboratorium. Melalui percobaan korosi dipercepat dengan merendam balok uji yang telah berusia minimal 28 hari ke dalam bak rendam yang telah berisi larutan 3,5% NaCl, diperoleh hasil bahwa penurunan kekuatan mencapai 54,28% pada balok beton dengan mutu beton 30 MPa. Beton yang terendam pada larutan Natrium Klorida 1,5 % pada umur 28 hari, menyebabkan penurunan kekuatan sebesar 6,00%.

Selain pengaruh fisik dan kimia kandungan air laut, biota laut juga berpotensi menyebabkan korosi pada beton bertulang. Penelitian De (1999) di pantai Nhatrang yang berhubungan dengan proses korosi karbon di air laut menunjukkan, bahwa adanya organisme yang tumbuh dengan cepat pada permukaan sampel menunjukkan adanya perubahan bentuk korosi karbon baja. Biota laut (bakteri pereduksi sulfat) berpotensi menyebabkan kerusakan pada konstruksi dan mengganggu proses produksi karena menggerogoti *filter* dan menyebabkan karat.



Gambar 1. Biota laut menyerang konstruksi pondasi tiang pancang jembatan Sumber : Dokumentasi kunjungan lapangan / lokasi jembatan Suramadu (2005).

Di dermaga daerah Jepara (sumber : kunjungan lapangan pada dermaga Jepara dan Suramadu, 2005) dan jembatan Suramadu antara pulau Madura dan pulau Jawa (Gambar 1) banyak didapati biota laut yang hidup melekat dan tumbuh pada tiang pancang fondasi jembatan, yang diduga dapat mengakibatkan kerusakan struktural.

Dari uraian di atas dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimanakah mengetahui jenis, dan siklus kehidupan biota laut yang menempel pada permukaan beton.
2. Bagaimanakah mekanisme terjadinya kerusakan beton dan pengaruh adanya penempelan biota laut pada kualitas beton.
3. Bagaimanakah pengaruh difusivitas air laut pada beton.

Tujuan dan manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Mengetahui jenis, dan siklus kehidupan biota laut yang menempel pada permukaan beton.
- b. Mengetahui mekanisme terjadinya kerusakan beton dan pengaruh adanya penempelan biota laut pada kualitas beton.
- c. Mengetahui pengaruh difusivitas air laut pada beton.

Biota Laut

Biota laut yang dapat menyebabkan terjadinya korosi adalah bakteri anaerobik. Bakteri ini hanya bertahan dalam kondisi tanpa zat asam. Bakteri ini mengubah (*reducing*) garam sulfat menjadi asam yang reaktif dan menyebabkan karat atau korosi. Bakteri tersebut dinamakan *sulfate reducing bacteria* (<http://www.corrosion-doctors.org>). Cara mencegah korosi bakteri (Kajiyama dan Okamura, 1999, Widharto, 2001) adalah dengan memberi aerasi (memasukkan zat asam) ke dalam air (*Klorinasi, Tannates, dan Potassium*).

Jenis biota laut yang dapat merusak bangunan beton bertulang dan baja (Romimohtarto dan Juwana, 1999)

:

Teredo

Teredo juga disebut tiram pengebor atau cacing kapal (*Shipworm*). Walaupun namanya cacing kapal, tetapi sebenarnya bukan cacing biasa tetapi bivalvia (*Mollusca*) pelubang kayu, batu dan beton. Hidupnya pada tumpukan kayu, dermaga, galangan kapal dan bangunan batu/beton. Biota ini dapat mengebor dengan cara mengeluarkan *enzym* yang melunakkan / menghancurkan selulosa / kapur / batu. Biota ini juga mengeluarkan cairan sejenis protein untuk merekatkan hewan tersebut pada bangunan sipil yang tertempel (Ca CO_3 dan Si O_2).



Gambar 2. Teredo sedang mengebor kayu (mengakibatkan kerusakan yang parah pada dermaga dan hewan ini sanggup menancapkan tubuhnya di batu karang atau bangunan dari beton hingga dalam)

Sumber: <http://www.mesa.edu.au/friends/seashores/barnacles.html>. Akses : 1 Pebruari 2005

Difusivitas ion Cl pada beton

Difusivitas ion Cl^- dalam beton telah dipelajari oleh Chatterji (1995). Data yang digunakan berasal dari berbagai data penelitian yang menggunakan konsentrasi Cl^- terkontrol dan bukan menggunakan air laut. Zhang dan Gjorv (1996) telah mempelajari tentang migrasi ionik dari ion Cl^- di dalam beton dengan menggunakan pendekatan migrasi muatan ion. Pengaruh dari lingkungan (suhu, kelembaban relatif, *chloride binding*, dan umur beton) dan material beton terhadap kemampuan ion Cl^- masuk ke dalam struktur beton telah dipelajari oleh Oh dan Jang (2007) dengan menggunakan konsentrasi Cl^- yang terkontrol. Analisis secara multiskala terhadap difusi ion Cl^- di dalam beton juga telah dilakukan oleh Sun dkk (2011) akan tetapi dengan konsentrasi ion Cl^- yang dikontrol sehingga proses difusi ion Cl^- di dalam beton pada kondisi kenyataannya yaitu di air laut masih terbuka untuk diteliti.

Difusi molekular suatu ion A melalui suatu bahan B dapat didekati dengan Hukum Fick yang secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut (Treybal, 1981)

$$J_A = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z} = -D_{AB} C \frac{\partial x_A}{\partial z} \quad (2)$$

METODE PENELITIAN

Bahan Penelitian

1. Beton.

Benda uji penelitian yang terbuat dari beton terdiri dari :

Benda uji beton berbentuk silinder, ukuran \varnothing 15 Cm, h = 30 Cm dengan $f_c' = 30$ MPa.

Benda uji beton bertulang dengan sistem *prestressed*, berupa potongan tiang pancang dengan h = 150 Cm. \varnothing 20 Cm, dibuat core case \varnothing 5 Cm, tinggi 10 Cm.

Benda uji beton berupa balok beton ukuran 20 Cm x 25 Cm x 50 Cm.

Benda uji beton berupa lempeng \varnothing 15 Cm, tebal 1 Cm dan diiris-iris dengan ukuran lebar 1 Cm untuk di periksa kandungan Cl, SiO₂ dan CaO yang ada pada beton.

2. Air Laut.

Secara umum air laut terdiri dari banyak unsur (NaCl, KCl, MgCl dan sebagainya), namun unsur yang terbanyak kandungannya adalah NaCl (biasanya kandungan NaCl maksimum dalam air laut adalah (3-4%).

3. Biota Laut.

Biota laut yang hidup di daerah Tropis (Romimohtarto, Juwana, 1999 dan Widharto 2001) adalah : Bakteri *Anaerobik (Sulfate Reducing bacteria)*, *Teredo* dan *Barnacle*.

Jenis biota laut adalah sebagai berikut :

- a) Jamur (*Aspergillus*, *Pinicillium*, *Torula* dan lain lain).
- b) *Teredo*, jenis *Barnacles*, jenis kerang-kerangan, udang-udangan, remis dan lain-lain.

Ganggang laut, *anemon* dan lain-lain.

Perancangan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yaitu kegiatan percobaan yang bertujuan untuk mengetahui dengan tepat penyebab terjadinya kerusakan pada bangunan beton dan baja serta mengetahui mekanisme proses terjadinya kerusakan sehingga dapat diperoleh metode yang efektif untuk pencegahan dan dapat diperoleh pula teknik perbaikan yang tepat untuk mengatasi kerusakan yang terjadi.

Penelitian ini dirancang dalam lima tahap sebagai berikut :

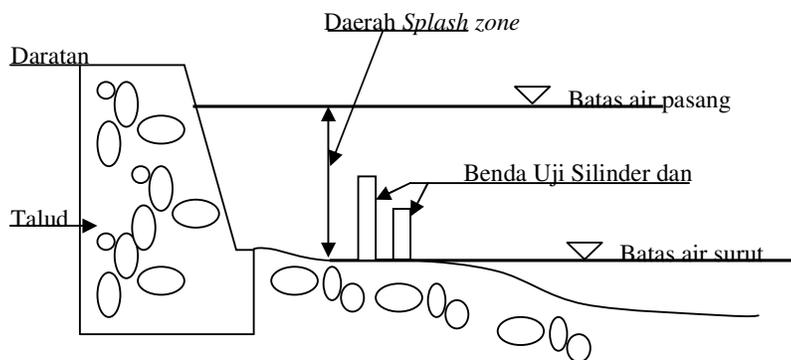
- Tahap I : Persiapan, menyusun proposal dengan mempelajari beberapa literature dan jurnal dari penelitian terkait.
- Tahap II : Mempersiapkan bahan susun beton, sekaligus merancang dan membuat benda uji berupa silinder beton, balok beton, dan lempengan beton
- Tahap III : Perendaman benda uji di laboratorium dan di laut.
- Tahap IV : Pengujian benda uji di laboratorium.
- Tahap V : Analisis data dan pembahasan hasil penelitian, sekaligus membuat kesimpulan dan saran

Jumlah Benda Uji

Tabel 1. Jenis dan jumlah benda uji penelitian

No	Jenis Benda Uji	Jumlah benda uji
1	Silinder Uji Tekan	130 buah
2	Silinder Uji Tarik	130 buah

3	Balok beton	120 buah
4	Lempeng Beton yang teriris lebar 1 cm, tebal 1 cm, panjang 3 – 15 cm	41 buah
5	Lempeng beton yang teriris lebar 1 Cm, tebal 1 cm, panjang 3,75 cm	41 buah
6	Lempeng beton Ø 15 cm, tebal 1 cm	37 buah



Gambar 3. Lokasi penempatan benda uji di daerah *Splash Zone*

Kegiatan Awal Penelitian

1. Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan pada penelitian ini:

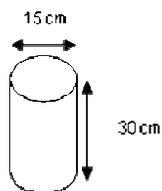
- 1). Identifikasi kerusakan struktur beton akibat air laut dan biota laut
- 2). Pelaksanaan penelitian di laut (pantai).
- 3). Waktu perendaman benda uji di laut (pantai).

2. Penyiapan bahan beton

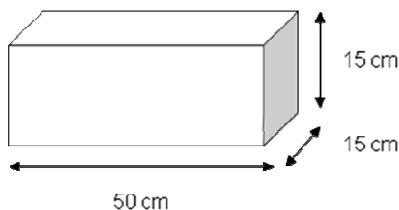
- 1). Jenis bahan penyusun beton adalah air, semen, Agregat halus (pasir), agregat kasar.
- 2). Komposisi beton (dirancang berdasarkan metode .SNI-90).
- 3). Cara Pembuatan beton (berdasarkan metode .SNI-90).
- 4). Bahan Uji Beton

Jenis Benda Uji

- a) Benda Uji Silinder Beton.



- b) Benda Uji Balok Beton Ukuran (15 cm x 15 cm x 50 cm)



Gambar 4. Benda Uji Balok Beton

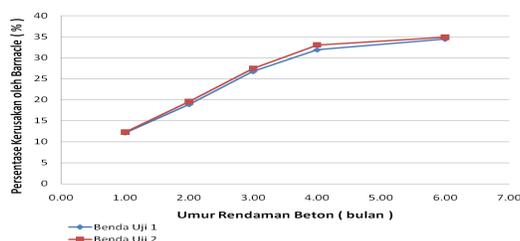
Cara perendaman dan pengujian benda uji.

- a) Perendaman benda uji di laut, dilakukan dengan menempatkan benda uji di dasar pantai pada daerah *Splash Zone*, dan pada lokasi lain ada pula dua benda uji yang digantung agar benda uji terletak pada daerah *Splash Zone*, dilakukan pemeriksaan setiap bulan 1x, kemudian direndam kembali, dan pada setiap bulan berikutnya, dilakukan pemeriksaan yang sama, selama 6 bulan.
- b) Pemeriksaan hasil perendaman / kerusakan benda uji beton dilakukan dengan menggunakan program excel melalui cara *Video Shoting* dengan memutar benda uji secara manual dan penghaparan benda uji.
- c) Uji kuat tekan beton dengan *Universal Testing Machine*.
- d) Uji kuat tarik belah beton dengan *Universal Testing Machine*.
- e) Uji Modulus Elastisitas dengan *E meter*.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

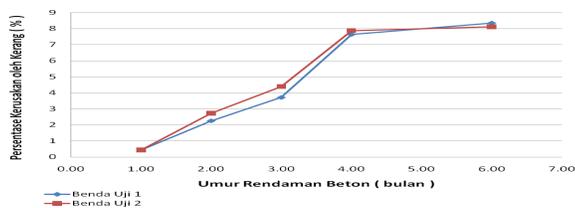
Hasil Penelitian yang dilakukan terhadap benda uji beton yang disebabkan karena pengaruh biota laut adalah sebagai berikut:

- I. Pengaruh Biota Laut *Barnacle* Terhadap Kerusakan Permukaan Beton Pengaruh tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah ini

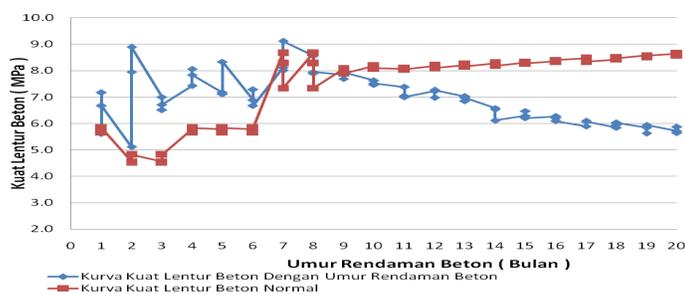


Gambar 5. Hubungan antara persentase kerusakan / permukaan beton yang ditemplei oleh *Barnacle* dan umur rendaman beton

Pada Gambar 5. Untuk benda uji 1 tampak, bahwa mulai umur satu bulan sampai dengan enam bulan, persentase kerusakan permukaan beton / persentase luas permukaan yang ditemplei oleh *Barnacle* makin meningkat. Untuk benda uji 2 tampak, seperti apa yang terjadi pada benda uji 1, makin lama umur rendaman makin banyak *Barnacle* yang menempel permukaan beton.

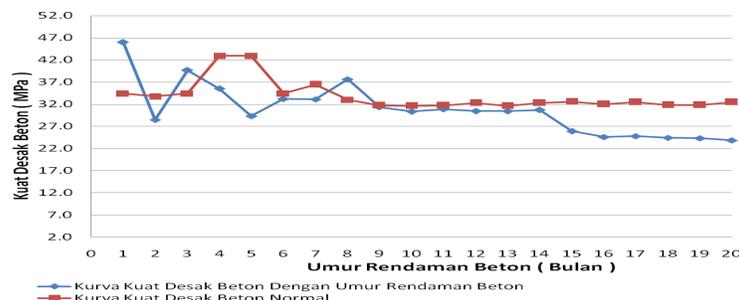


Gambar 6. Hubungan antara persentase kerusakan beton oleh Kerang dan umur rendaman beton



Gambar 7. Hubungan antara kuat lentur beton dan berbagai umur rendaman beton

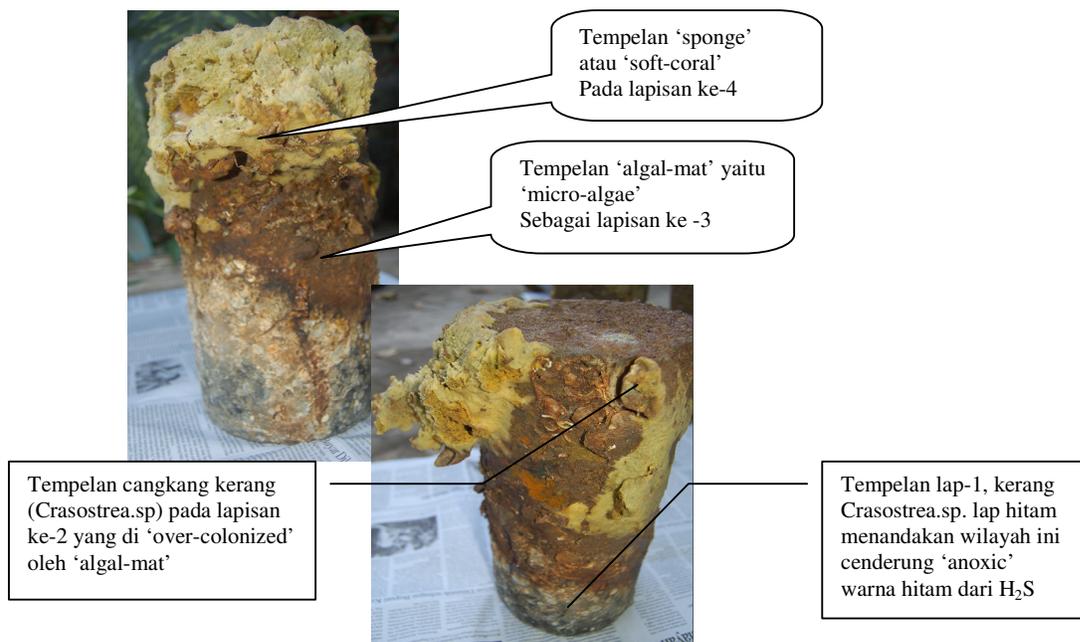
Dari Gambar 6, Untuk benda uji 1 tampak, mulai umur rendaman satu bulan sampai dengan enam bulan, kerang makin banyak yang menempel permukaan beton.
 Untuk benda uji 2, tampak bahwa pada bulan ke satu persentase kerusakan / persentase luas permukaan beton yang ditempeli kerang adalah 0.439 %, makin lama, makin meningkat persentase luas yang ditempeli kerang. Pada umur rendaman enam bulan, persentase luas permukaan beton yang ditempeli kerang adalah 8.116 %.



Gambar 8. Hubungan antara kuat desak/tekan beton dan umur rendaman beton

Difusivitas ion Cl⁻ pada beton

Hasil penelitian perendaman beton yang ditempeli air laut



Benda Uji Penelitian Diffusivitas Air Laut pada Beton



Gambar 9. Benda uji Irisan lempeng beton



Gambar 10. Benda uji Lempeng beton.

Profil kadar Cl⁻ di dalam beton pada berbagai posisi radius ditampilkan pada Gambar 2. Gambar 2 menunjukkan, meskipun hasil analisis kadar Cl⁻ terlihat kurang teliti, tetapi kecenderungan profil kadar Cl⁻ sebagai fungsi radius sesuai dengan teori.

Dapat dilihat bahwa kadar ion Cl^- di dalam beton semakin menurun dengan semakin jauh dari permukaan, atau semakin rendahnya radius ($r=0$ adalah pusat silinder). Kondisi ini menunjukkan adanya proses difusi ion Cl^- dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah. Proses difusi terjadi karena pada permukaan luar ($r=R$), beton secara langsung kontak dengan air laut yang mengandung ion Cl^- dengan konsentrasi tinggi sedangkan bagian dalam dari beton mula-mula tidak mengandung ion Cl^- sehingga menyebabkan terjadinya gradien konsentrasi antara permukaan dan bagian dalam beton. Gradien konsentrasi ini akan menjadi *driving force* yang menyebabkan terjadinya migrasi atau difusi ion Cl^- dari permukaan ke dalam beton. Kecenderungan profil konsentrasi ion Cl^- terhadap kedalaman yang sama diperoleh oleh Zhang dan Gjörv (1994); Oh dan Jang (2007); Li dkk (2012).

Selain itu, dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa ion Cl^- dapat mencapai pusat sampel yang memiliki radius sebesar 7,5 cm. Kondisi ini menunjukkan bahwa kemampuan difusi ion Cl^- cukup cepat di dalam beton. Hal ini ditunjukkan dalam waktu 3 bulan kadar ion Cl^- di pusat sampel beton mencapai 0,07% sehingga apabila dilihat dari persamaan reaksi (2) maka bagian dalam beton dapat mengalami korosi. Kondisi ini dapat dihindari dengan menambah tebal dari beton atau menambahkan senyawa ataupun komponen yang dapat memperlambat difusi ion Cl^- di dalam beton.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, maka dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Temuan ilmiah penting dari penelitian yang terkait dengan jenis, jumlah, siklus musim biota penempel pada benda uji beton diantaranya adalah (1) bahwa pada bulan ke-5 dan 6 mulai terjadi proses 'over-colonization' biota penempel seiring perubahan musim (2) jenis biota penempel dengan tutupan terbesar adalah jenis tiram/ *Crasostrea*.sp yaitu pada bulan ke-10 Oktober, dimana perairan air laut musim kemarau pada kondisi paling jernih, diperkirakan jumlah plankton maksimal sehingga pertumbuhan *Crasostrea*.sp juga maksimal; tempelan tiram/ *Crasostrea*.sp adalah yang paling merusak permukaan beton karena menempel paling kuat antara permukaan beton dan senyawa chitin dari cangkang; diperoleh pola tempelan 3-lapisan pada permukaan beton selama 4-musim, dimana lapisan-1 adalah lapisan anoxic berwarna hitam sebagai indikator H_2S dengan kondisi beton terendam air dan substrat; lapisan-2 adalah lapisan keras cangkang moluska; lapisan – 3 adalah lapisan biota lunak sponge dan makro alga. Terjadi penurunan kekuatan lentur, tarik dan desak struktur beton seiring dengan penambahan waktu umur rendaman di air laut setelah bulan ke enam.
2. Mekanisme proses terjadinya kerusakan bangunan beton diawali dengan terkelupasnya tempelan biota laut yang menempel pada bangunan beton, diikuti dengan adanya intrusi air laut, sehingga mempercepat terjadinya kerusakan struktur beton. Selain hal itu, pada kondisi awal perendaman ada suatu reaksi kimia antara bahan kimia penyusun beton dan bahan kimia yang ada pada air laut, sehingga menyebabkan kuat lentur, kuat tarik belah, maupun kuat desak/tekan beton meningkat, tetapi pada umur beton tertentu (8 bulan), reaksi bahan kimia tersebut menyebabkan kuat lentur, kuat tarik belah, maupun kuat desak/tekan beton menurun. Hal ini dikarenakan pula reaksi yang terjadi dalam air laut :
 $2NaCl + CaO / SiO_2 / Al_2O_3 / Fe_2O_3$ dan H_2O
 Larut menjadi $CaCl_2$ dan $2NaOH$, sehingga menyebabkan kuat lentur, kuat tarik belah, maupun kuat desak/tekan beton menurun, karena CaO yang mengikat komponen semen larut menjadi $CaCl_2$ dalam air laut (Komponen semen jadi keropos)
3. Kualitas beton terutama kuat tekan beton yang terendam air laut, ternyata lebih rendah dari kualitas beton yang tidak terendam air laut, karena air laut lebih jelek dari air biasa dalam mempersatukan bahan-bahan yang terkandung dalam *Portland Cement* / beton.
4. Diffusivitas air laut terhadap beton juga mempengaruhi kualitas beton yang terendam dalam laut.

SARAN

1. Bangunan sipil yang berada dilingkungan laut/terendam air laut seharusnya menggunakan semen portland jenis khusus, yaitu *Special Blended Cemet*.
2. Semua bangunan sipil yang terendam atau yang berada dilingkungan laut perlu diadakan *coating* dengan bahan kimia sejenis Epoxyresin agar bangunan tersebut terhindar dari serangan biota dan air laut.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2005. *Barnacles Reproduction and Life Cycles*. <http://www.mesa.edu>. Akses; 1 Februari 2005.
- Anonim, 2006. *Site dedicate to corrosion of all form*, <http://www.corrosion-doctors.org/>. Akses; 27 Desember 2006.
- Budiono, B.; Sugiri, S.; Munaf, D.R. dan Henry, H., 2000. Pengaruh Baja Korosi Baja Tulangan Pada Kekuatan Balok Beton Bertulang. *Jurnal Teknik Sipil* Vol 7 No. 1 Januari. pp: 21-28.
- Cormac, J. C. M. 2006. *Design Reinforce Concrete*, Clemson University.
- Chatterji, S., 1995, *On the Applicability of Fick's Second Law to Chloride Ion Migration through Portland Cement Concrete*, *Cement and Concrete Research*, 25(2): 299-303.

- Chatterji, S., 1999, *Evidence of variable diffusivity of ions in saturated cementitious materials*, Cement and Concrete Research, 29: 595-598.
- Constantinide, A. dan N. Mostoufi, 1999, *Numerical Methods for Chemical Engineers with MATLAB Applications*, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- De, V., 1999. Corrosion of Carbon Steel in Natural Seawater in Nhatrang Bay. Proceedings of the 11th Asian – Pacific Corrosion Control Conference Volume 2. 1 – 5 November 1999. Ho Chi Minh City, Vietnam. pp: 961 - 965.
- Fontana, Mars G., 1986. *Corrosion Engineering*. 3rd Ed. McGraw Hill Book Company. pp: 372-373, 499-502.
- Guimarães, A. T. C., M. A. Climent, G. d. Vera, F. J. Vicente, F. T. Rodrigues dan C. Andrade, 2011, *Determination of chloride diffusivity through partially saturated Portland cement concrete by a simplified procedure*, Construction and Building Materials, 25: 785–790.
- Hossain, K. M. A. dan M. Lachemi, 2004, *Corrosion resistance and chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar*, Cement and Concrete Research, 34: 695–702.
- Irawati N., Subarkah A., Sujoko S.U, dan Asvaliantina V., 2000. Simulasi Numerik Kawasan Pantai Dengan Adanya Struktur Bangunan Pantai. *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*, V2. n7, Oktober 2000, pp: 53-56.
- Kajijama, F dan Okamura, 1999, *Evaluating Cathodic Protection Reliability on Steel Pipe in Microbially Active Soils*. Japan : Tokyo Gas Co. Ltd. Pp. 74-79.
- Kennet, R.T.; dan Chamberlain, J., 1991. *Korosi: untuk Mahasiswa Sains dan Rekayasa*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Levenspiel, O. 1999. *Chemical Reaction Engineering*, John Wiley and Son, New York.
- Kayali, O. dan B. Zhu, 2005, *Corrosion performance of medium-strength and silica fume high-strength reinforced concrete in a chloride solution*, Cement and Concrete Composites, 27: 117-124.
- Li, L. Y., J. Xia dan S. S. Lin, 2012, *A multi-phase model for predicting the effective diffusion coefficient of chlorides in concrete*, Construction and Building Materials, 26: 295–301.
- Lu, X., 1997, *Application of the Nernst-Einstein Equation to Concrete*, Cement and Concrete Research, 27(2): 293-302.
- Montgomery, D. C., 2009, *Experimental Design*, 7th, John Wiley & Sons, New York.
- Oh, B. H. dan S. Y. Jang, 2007, *Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures*, Cement and Concrete Research, 37: 47-53.
- Parrot, L. 1992. *Design for Avoiding Damage Due To Carbonation Induced Corrosion*. April. Paper no.62 – CEN TC 104/WGI/TGI/Panel 1. Unpublished.
- Parrott, P. J., 1994, *Design for Avoiding Damage Due to Carbonation-Induced Corrosion*, **Special Publication**, 145.
- Romimohtarto, K. dan Juwana, S., 1999. *Biologi Laut: Ilmu pengetahuan tentang Biota Laut*. Jakarta: Pusat Penelitian dan Pengembangan Oseanografi – LIPI.
- Ruiz-Lopez, I. I. dan M. A. Garcia-Alvarado, 2007, *Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity*, Journal of Food Engineering, 79: 208–216.
- Sagel, Gideon H. Kusuma, dan Kole, P. 1994. *Pedoman Pengerjaan Beton*, Erlangga, Jakarta.
- Sun, G., Y. Zhang, W. Sun, Z. Liu dan C. Wang, 2011, *Multi-scale prediction of the effective chloride diffusion coefficient of concrete*, Construction and Building Materials, 25: 3820-3831.
- Taheri, A., Breugel, K.V., 1999^a. *Numerical Simulation of Chloride Penetration in Concrete Subjected to Hars Marine Environment*. Proceedings of the 11th Asian – Pacific Corrosion Control Conference Volume 2. 1 – 5 November 1999. Ho Chi Minh City, Vietnam. pp: 629 – 638.
- Taheri, A., Breugel, K.V., 1999^b. *Effect of Tropical Environment on Corrosion on steel in Marine Concrete Structures*. Proceedings of the 11th Asian – Pacific Corrosion Control Conference Volume 2. 1 – 5 November 1999. Ho Chi Minh City, Vietnam. pp: 619 – 627.
- Tjokrodimuljo, K. 1996. *Teknologi Beton*, Nafiri, Yogyakarta.
- Tong, L. dan O. E. Gjörv, 2001, *Chloride diffusivity based on migration testing*, Cement and Concrete Research 31: 973–982.
- Tosun, I., 2007, *Modeling in Transport Phenomena : A Conceptual Approach*, 2nd, Elsevier Science & Technology Books.
- Treybal, R. E., 1981, *Mass Transfer Operation*, 3rd, McGraw-Hill, Inc., Tokyo.
- Tumidajski, P. J. dan G. W. Chan, 1996, *Effect of Sulfate and Carbon Dioxide on Chloride Diffusivity*, Cement and Concrete Research, 26(4): 551-556.
- Widharto, S., 2001. *Karat dan Pencegahannya*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita. pp: 1,57-58.
- Zhang, T. dan O. E. Gjörv, 1994, *An Electrochemical Method for Accelerated Testing of Chloride Diffusivity in Concrete* Cement and Concrete Research, 24(8): 1534-1548.
- Zhang, T. dan O. E. Gjörv, 1996, *Diffusion Behavior of Chloride Ions in Concrete*, Cement and Concrete Research, 26(6): 907-917.