

2. STUDI PUSTAKA

2.1. Memanfaatkan limbah kaca sebagai '*green engineering*'

Selama beberapa tahun terakhir, telah diadakan penelitian untuk mengembangkan material baru, seperti agregat kaca, di dalam bahan konstruksi. Di samping itu, terdapat sejumlah alasan dari segi lingkungan, diupayakan agar limbah kaca tidak terus bertambah dan memenuhi tempat-tempat pembuangan. Limbah kaca tidak seperti limbah kertas atau limbah organik lainnya, yang bisa terdekomposisi bila dibuang di lahan-lahan terbuka. Dari penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya, dibutuhkan biaya yang cukup besar untuk mengangkut limbah-limbah kaca tersebut ke tempat pembuangan.

Unsur pokok dari kaca adalah *silica*. Terdapat indikasi bahwa terjadi pengembangan (*expansion*) pada volume beton, meskipun menggunakan *low alkali cement*. Pada beton konvensional, perubahan volume dapat terjadi pada saat sebelum maupun setelah *setting* selesai, berupa penyusutan ataupun pengembangan. Pada beton yang menggunakan agregat kaca, *shrinkage* dapat digunakan sebagai salah satu indikator mengenai penyusutan dan pengembangan yang terjadi ataupun kombinasi dari kedua fenomena tersebut. Salah satu kendala penggunaan agregat kaca pada beton adalah terjadinya *Alkali Silica Reaction* (ASR) antara pasta semen dan agregat kaca. Karena itu, perlu diberikan perhatian khusus pada ASR (*Alkali Silica Reaction*), khususnya pada beton yang menggunakan agregat kaca.

Columbia University telah melakukan riset yang menyelidiki penggunaan agregat kaca pada beton. Aspek penting dari ASR pada beton dengan agregat kaca juga telah dipelajari. Warna dari agregat kaca juga mempunyai peranan penting. Agregat kaca yang berwarna hijau ternyata tidak menyebabkan ekspansi. Spesifikasi dari produk beton dengan menggunakan kaca sebagai agregat masih dalam perkembangan, termasuk *concrete masonry blocks* dengan 10% agregat kaca yang warnanya bermacam-macam, dan 100%



Gambar 2.1. Limbah kaca yang dibuang di lahan terbuka

agregat kaca yang hanya terdiri dari satu macam warna saja, yang dipakai untuk menambah nilai segi arsitektural dan aplikasi dari segi dekoratif.

Permasalahan pembuangan limbah kaca di *New York* mendorong evaluasi ulang untuk situasi ini. Sebuah riset komprehensif dilakukan oleh *Columbia University* sejak tahun 1994 untuk mempelajari kecocokan dari campuran warna agregat kaca yang dipakai pada *concrete masonry blocks*. Aspek penting dari ASR pada beton yang menggunakan agregat kaca telah dipelajari dengan eksperimen menggunakan *standard test* ASTM C 1260 dan metode praktis untuk mengurangi efek yang berbahaya yang disebabkan ASR.

ASR membutuhkan perhatian serius, khususnya dalam industri beton karena kemungkinan terjadinya juga reaksi dengan beberapa agregat alami, dan kerugian lainnya yang terjadi setelah jangka waktu yang lama. Struktur kimia yang sederhana dan *amorphous* dari *soda-lime glass* membuatnya menjadi agregat yang ideal untuk diteliti aspek fundamental dari ASR.

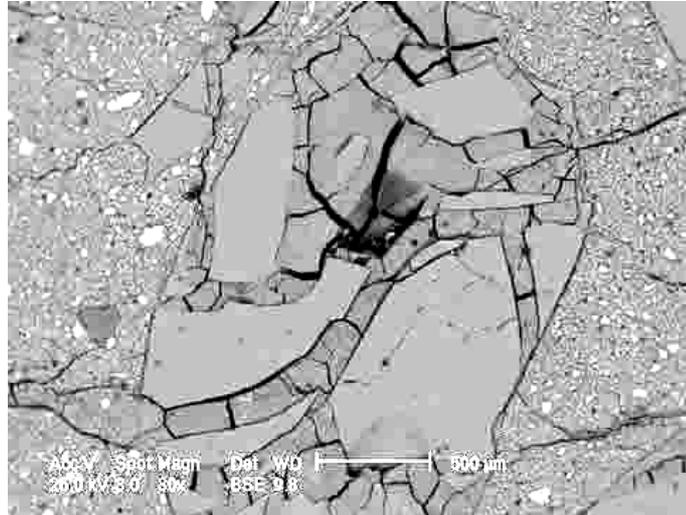
Rintangan yang utama dalam mempelajari ASR adalah sifatnya yang *long-term*. Hasil dari kerusakan yang ditimbulkan ASR membutuhkan waktu beberapa tahun untuk menunjukkan ciri-cirinya.

2.1.1. Pengaruh Ukuran Partikel

Proses ASR meliputi reaksi kimia yang heterogen antara reaksi padat dan cair. Oleh karena itu, area permukaan dari agregat dipengaruhi oleh ukurannya. Ekspansi biasanya tidak tampak hingga 3 sampai 4 hari.

Tabel Komposisi Kimia dari Jenis-Jenis Kaca

	Clear Glass	Amber Glass	Green Glass	Pyrex Glass	Fused Silica
SiO ₂	73.2 to 73.5	71.9 to 72.4	71.27	81	99.97
Al ₂ O ₃	1.7 to 1.9	1.7 to 1.8	2.22	2	-
Na ₂ O+K ₂ O	13.6 to 14.1	13.8 to 14.4	13.06	4	-
CaO+MgO	10.7 to 10.8	11.6	12.17	-	-
SO ₃	0.20 to 0.24	0.12 to 0.14	0.052	-	-
Fe ₂ O ₃	0.04 to 0.05	0.3	0.599	3.72	-
Cr ₂ O ₃	-	0.01	0.43	12.0 to 13.0	-



Gambar 2.2. ASR pada beton dilihat dengan mikroskop elektron

Komposisi kimia dari ASR gel adalah faktor penting di dalam menentukan ekspansi. Teori klasik untuk menjelaskan perilaku dari *pessimum* (ekspansi maksimum) didasarkan pada mekanisme yang berkaitan dengan perbandingan Na₂O/ SiO₂ dalam ASR *gel products*.

2.1.2. Pengaruh Kandungan Kaca

Ekspansi meningkat dengan tetap seiring dengan bertambahnya dosis dari agregat kaca.

2.1.3. Pengaruh Jenis Kaca

Ekspansi yang disebabkan *Pyrex Glass* dan *Fused Silica* adalah kelipatan dari ekspansi yang disebabkan *Clear soda-lime Glass*. Selain itu, *Fused Silica* adalah yang paling reaktif diantara jenis lainnya, diikuti oleh *Pyrex Glass* dan *Soda-lime Glass*. Reaktifitas ternyata berhubungan dengan jumlah kandungan dari *amorphous silica*. Juga tergantung kepada faktor lain, misalnya jumlah kandungan dari CaO. Tang mengkorelasikan reaktifitas dari kaca menjadi *reactivity index* yang didefinisikan dengan :

$$K = \frac{CaO + Al_2O_3}{SiO_2 + Na_2O}$$

Terlihat bahwa pengurangan kandungan CaO dan Al₂O₃ (diiringi dengan penambahan kandungan Na₂O dan SiO₂) menyebabkan peningkatan reaktifitas.

Fused Silica hampir 100% terdiri dari *amorphous silica glass*. *Pyrex* memiliki 2 fase *borosilicate* yang mengandung 80% *silica glass* dan 20% *sodium-borate glass*. Fase kedua menimbulkan *microporosity* yang lebih besar. Dan kedua fase ini diharapkan memberi reaksi pada *rate* yang berbeda di dalam *highly alkaline pore solution*. *Soda-lime Glass* mengandung silika antara 65-80%, tergantung pada komposisinya. Kaca dianggap sebagai material yang hanya memiliki 1 fase, meskipun pada beberapa jenis kaca buram (tidak tembus cahaya) memiliki 2 fase yang dapat menyebabkan *rate* reaksi yang berbeda.

Pessimum (ekspansi maksimum) tergantung kepada reaktifitas dari agregat. Agregat yang reaktif, menyebabkan turunnya *pessimum size*. Material yang *highly pozzolanic* sekalipun tidak dapat dijamin bebas dari ASR, kecuali partikel penyusunnya sangat halus.

2.1.4. Pengaruh Warna Kaca

Menurut survei di kota New York, limbah kaca terdiri dari 62% kaca bening, 19% kaca yang berwarna hijau, 14% kaca yang berwarna kekuning-kuningan dan 5% kaca lainnya. Dari penelitian yang telah dilakukan, kaca bening menyebabkan ekspansi yang lebih besar, Kaca yang berwarna hijau bukan hanya tidak reaktif, tetapi malah mengurangi ekspansi dari pasir yang agak reaktif.



Gambar 2.3. Kaca yang berwarna kekuning-kuningan sebagai agregat kasar



Gambar 2.4. Kaca berwarna hijau dapat menekan efek ASR

Kesimpulan dari penelitian tersebut adalah kaca berwarna hijau yang digiling halus, merupakan cara yang murah untuk menekan efek dari ASR. Semakin halus kaca yang berwarna hijau digiling, maka tingkat keefektifannya semakin meningkat.

Warna dari kaca didapatkan dengan menambahkan oksida tertentu dalam lelehan kaca, misalnya Fe_2O_3 untuk kaca kekuning-kuningan dan Cr_2O_3 untuk kaca hijau yang berwarna hijau. Keefektifan dari kaca yang berwarna hijau untuk menekan efek dari ASR sangat berhubungan dengan jumlah kandungan Cr_2O_3 di dalamnya. Tetapi Cr_2O_3 yang ditambahkan langsung pada campuran beton, sebaliknya meningkatkan ekspansi dan perlu diperhatikan.

2.1.5. Uraian Umum Mengenai ASR

ASR adalah proses kemofisika yang memungkinkan terjadinya kerusakan secara mekanis, pengembangan dan terjadinya ekspansi. Hal ini tergantung kepada komposisinya. Dari ekspansi yang telah diamati, hasil dari ekspansi yang elastik maupun non-elastik disebabkan oleh kumulatif dari tekanan hidrostatis, dimana tergantung kepada modul elastik dari matriks agregat, kekentalan dari ASR gel, permeability dari matriks, dan ukuran dari agregat.

Bila reaksi ini berlanjut dan tekanan internal melebihi kekuatan tarik dari matriks, akan terbentuk retak-retak di sekitar partikel agregat yang mengalami reaksi. Proses kimia dan fisika ini mempengaruhi tekanan internal (tekanan dalam), dimana akan mengakibatkan ekspansi dan *microcracking* dari beton.

2.1.6. *Concrete Masonry Blocks*

Blok bata yang terbuat dari beton cocok untuk menyerap limbah kaca dalam jumlah yang besar. *Concrete blocks* pada umumnya terdiri dari 3010 pon kerikil, 5600 pon pasir, 1000 pon semen dan 174 pon air. Dan campuran ini, dapat menghasilkan kurang lebih 250 blok beton. Diadakan pengetesan untuk 4 campuran yang berbeda. Campuran A adalah sebagai acuan/kontrol dan memiliki komposisi yang sama persis seperti di atas. Campuran B, C, D

adalah identik dengan campuran A, kecuali beberapa hal sebagai berikut, pada campuran B, 430 pon pasir digantikan dengan agregat kaca (yang lolos saringan No.30) yang memiliki warna yang bermacam-macam. Pada campuran C, 10% dari jumlah semen digantikan dengan agregat kaca (yang lolos saringan No.400). Pada campuran D, pergantian dari campuran B dan campuran C dikombinasi.



Gambar 2.5. Concrete Masonry Blocks

Hasil tes kekuatan setelah 28 hari menunjukkan :

Campuran A : 32.2 Mpa

Campuran B : 29.4 Mpa

Campuran C : 31.9 Mpa

Campuran D : 29.4 Mpa

Sekarang, paving blok dengan 100% agregat kaca telah diproduksi, dengan kekuatan yang melebihi 69 Mpa. Sedangkan untuk *drying shrinkage* menunjukkan :

Campuran A : 0.017%

Campuran B : 0.0286%

Campuran C : 0.03%

Campuran D : 0.026%

Semua hasil ini berada di bawah 0.065% dan sesuai dengan spesifikasi ASTM C90.

Apakah blok bata yang terbuat dari beton (*concrete masonry blocks*) dengan agregat kaca yang berasal dari limbah ini dapat diproduksi secara ekonomis, tergantung kepada *technical feasibility* dan *economical feasibility*. *Technical feasibility* telah ditunjukkan, tetapi memproduksi blok beton merupakan bisnis yang sangat kompetitif.

Digambarkan disini, *concrete blocks* dapat dijadikan produk komoditi, walaupun menggantikan semen dan pasir dengan agregat kaca memiliki efek ekonomis yang paling baik, tetapi disini ditawarkan kesempatan untuk menyerap limbah kaca dalam jumlah yang besar. Dengan cara demikian, dapat meringankan masalah pembuangan. Sebagai contoh, bila suatu pabrik yang dalam waktu setahun menghasilkan 5 juta *blocks* dimana menggunakan 10% agregat kaca, berarti telah menyerap 10 ribu ton limbah kaca. (10 ribu ton adalah 10% dari limbah kaca yang dihasilkan kota New York dalam setahun).

2.1.7. Produk Beton Arsitektural

Jika limbah kaca ini disortir berdasarkan warna, digolongkan berdasarkan ukuran, dicampur dengan pasta semen dan diperhalus permukaannya, maka *glascrete* merupakan material yang memiliki nilai tambah. *Glascrete* menghasilkan nilai dekoratif yang tidak terbatas dan aplikasinya dalam dunia arsitektural. Nilai tambah lainnya adalah dapat menggantikan batu-batuan alami yang lebih mahal harganya, seperti marmer/pualam dan granit. Dapat dipertimbangkan penggunaannya pada ubin lantai atau dinding, panel dinding, meja, bangku dan perabot lainnya. Juga pada bangunan untuk tumbuh-tumbuhan, vas dan paving blok.

Kekuatan tekan secara umum cukup memadai, karena untuk 6000 psi (40 MPa) dapat dengan mudah dicapai. Bila diinginkan kekuatan tarik, maka dapat diperkuat dengan fiber yang cocok.

2.1.8. Ringkasan

1. Ukuran *pessimum* (ukuran partikel yang menyebabkan ekspansi maksimum) merupakan fungsi dari tipe kaca dan warna. Seiring dengan bertambahnya reaktivitas dari kaca, maka ukuran *pessimum* bergeser ke arah ukuran partikel yang lebih kecil.
2. Ekspansi dari mortar sebanding dengan kandungan kaca.
3. Ekspansi juga sangat bergantung kepada warna dari kaca. Kaca *soda-lime* yang bening merupakan yang paling reaktif, diikuti dengan yang berwarna kekuning-kuningan. Kaca yang berwarna hijau tidak menyebabkan ekspansi yang berarti. Korelasi yang erat ditemukan antara ekspansi dan kandungan Cr_2O_3 .
4. Kaca berwarna hijau yang digiling halus, merupakan cara yang murah untuk menekan efek dari ASR.

2.2. Agregat Kasar dan Agregat Halus

Agregat kasar yang digunakan adalah batu pecah dengan ukuran 20 mm / 40 mm. Hal ini dilakukan agar proporsi dari agregat – agregat terhadap ukuran cetakan dari sample balok dapat mendekati keadaan sebenarnya di lapangan.

2.3. Agregat Kaca

Dengan bahan mentah yang banyak dan murah, kaca memiliki ketahanan terhadap abrasi serta ketahanan terhadap cuaca atau serangan kimia yang baik. Kaca biasa berbahan dasar silika-silika dioksida yang memiliki susunan kristal tetrahedral yang acak. Apabila silika didinginkan dengan kecepatan normal akan menghasilkan struktur yang *amorphous*. Hal ini mungkin bisa dianggap sebagai bentuk kristal yang sangat menyimpang dan bersifat random. Meskipun silika merupakan dasar penyusun kaca tetapi tidak digunakan dalam bentuk murni karena temperatur lelehnya yang tinggi, sekitar 1700°C . Silika kemudian dimodifikasi dengan mencampurkan sodium karbonat yang pada suhu tinggi akan berubah menjadi sodium oksida dan bereaksi lagi dengan sebagian silika menjadi sodium disilikat, yang akan

menghentikan sebagian rangkaian pembentukan silikon-oksigen yang rigid. Material yang terbentuk disebut sebagai '*soda glass*' meleleh pada temperatur yang lebih rendah, sekitar 800°C. Sayangnya, *soda-glass* ini mudah larut dalam air, sehingga ditambahkan kalsium karbonat untuk membentuk jaringan campuran baru agar membuat kaca stabil. Komposisi kaca soda-lime adalah kira-kira sebagai berikut :

SiO₂ : 75%

Na₂O : 15%

CaO : 10%

2.4. Binder

Binder adalah bahan pengikat dalam campuran beton yang terdiri dari semen dan bahan pengisi (*filler*). *Filler* berfungsi untuk meningkatkan kepadatan (*density*) beton. *Filler* dapat mengisi rongga - rongga dalam beton dikarenakan ukuran *filler* yang lebih kecil daripada semen. Kombinasi antara semen dengan *filler* akan menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (CSH) yang berfungsi mengikat campuran beton. (Muntu, dan Gunawan 13).

2.4.1. Semen Portland

2.4.1.1 Definisi Semen Portland

Semen Portland adalah semen hidraulis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak. Semen Portland, terutama terdiri dari kalsium silikat yang bersifat hidraulis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat serta boleh ditambah dengan bahan lain.

2.4.1.2 Bahan Dasar Semen Portland

Bahan dasar yang digunakan dalam pembuatan Semen Portland adalah :

- a) Batu kapur : sebagai unsur utama yang mengandung CaO.
- b) Tanah liat : sebagai sumber kandungan SiO₂, Al₂O₃ dan Fe₂O₃.
- c) Bahan tambahan : mengandung senyawa kalsium sulfat, misalnya *gypsum*.

Bila perlu, diberi bahan tambahan berupa :

- a) Pasir kuarsa atau batu silika : bila kandungan SiO_2 kurang.
- b) Pasir atau biji besi : bila kandungan Fe_2O_3 kurang.

2.4.1.3 Senyawa Utama Pada Semen Portland

Senyawa utama yang terbentuk pada Semen Portland, yaitu :

- a) C_3S : Tri kalsium silikat (58% - 69%)
- b) C_2S : Di kalsium silikat (8% - 15%)
- c) C_3A : Tri kalsium aluminat (2% - 15%)
- d) C_4AF : Tetra kalsium alumina ferrit (6% - 14%)

2.5. Shrinkage

Saat pasta semen berada pada kondisi plastis, terjadi kontraksi penyusutan volumetrik yang mana skalanya sekitar 1% lebih besar dari volume kering semen sebenarnya. Kontraksi ini dikenal sebagai *plastic shrinkage*, karena proses ini terjadi pada saat beton masih berada pada fase plastis. (A.M. Neville,p-371).

Perubahan volume juga dapat terjadi pada saat setelah *setting* selesai, dan bisa berupa penyusutan (*shrinkage*) ataupun pengembangan (*swelling*). Hidrasi yang terus menerus, karena masih ada air yang tersisa, menyebabkan terjadinya pengembangan, tetapi jika tidak ada perubahan kelembaban ke atau dari pasta, menyebabkan *shrinkage* terjadi. (A.M. Neville,p-373).

Pengetesan di lapangan dan di laboratorium bisa menjadi cukup memusingkan. Pengetesan di lapangan yang menggunakan komponen beton yang sama, dapat menghasilkan nilai yang bervariasi antara 100 – 200 % dari pengetesan di laboratorium. *Shrinkage* bisa menjadi salah satu penyebab retak. (American Concrete Institute, *Designing for Creep & Shrinkage in Concrete Structures*, 1982 p-27).

Fenomena *drying shrinkage* pada beton dimulai sesegera mungkin saat beton ditaruh. Perubahan volume selama fase plastis beton adalah penyebab utama perubahan volume yang mana secara langsung mempengaruhi tegangan tarik yang dapat menyebabkan retak. (American

Concrete Institute, Designing for Creep & Shrinkage in Concrete Structures, 1982 p-36). Gambar *cracking* pada beton dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. Retak pada beton dilihat dengan alat mikroskop elektron
(Sumber : *Reinforced Concrete: A Fundamental Approach 5th ed. p-17*)

2.6. Pengujian *shrinkage* Beton

2.6.1. Ruang Lingkup

Pengetesan ini mencakup apparatus dan peralatan yang digunakan untuk persiapan specimen untuk penentuan perubahan panjang pada pasta semen yang telah mengeras, mortar dan beton. (*ASTM C 490 – 93a p-245*).

2.6.2. Prosedur Pengetesan

2.6.2.1. Persiapan Cetakan

Join-join pada cetakan, garis kontak dari cetakan dan pelat dasar harus ditutup dengan rapat untuk mencegah kebocoran air dari specimen yang baru dicetak. Lapsi dengan tipis permukaan interior dari cetakan dengan minyak mineral. (*ASTM C 490 – 93a p-247*). Gambar cetakan dapat dilihat di gambar 2.7.



Gambar 2.7. Cetakan sampel uji *shrinkage*

2.6.2.2. Pengetesan

Pengetesan dilakukan setelah specimen terpasang pada apparatus. Prosedur pengetesan yang dilakukan adalah (*ASTM C 490 – 93a p-247*) :

- a) Letakkan posisi batang penunjuk *dial* pada suatu acuan yang sama untuk setiap spesimen yang dibandingkan pada suhu ruang yang ditetapkan.
- b) Catat pembacaan minimum dari *dial* untuk setiap perubahan yang terjadi pada pembacaan *dial*. Gambar alat uji *shrinkage* dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Alat tes *shrinkage* dengan *dial gauge*.

2.6.3. Temperatur dan kelembaban.

Temperatur ruangan harus dijaga pada suhu antara 20 °C dan 27,5 °C (68 °F dan 81,5 °F). Kelembaban relatifnya tidak boleh lebih dari 50 %. (*ASTM C 490 – 93a p-248*).