

SIFAT PERMEABILITAS PADA REACTIVE POWDER CONCRETE (RPC) DENGAN MENGGUNAKAN LIMBAH KACA (GREEN CONCRETE)

Widodo Kushartomo, Santa Fransiska, Rendra Wijaya

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tarumanagara

widodok@ft.untar.ac.id

ABSTRACT

Construction material submerged in water must have impermeable property. RPC (Reactive Powder Concrete) use quartz powder, is a new concrete technology. In this research, glass powder was used to replace quartz powder. The use of glass powder at RPC, will produce concrete that is environmentally friendly (green concrete). RPC durability against water penetration observed with water permeability test according to DIN 1048 and RPC resistance to penetration of chlorine ion penetration experiment studied with chlorine ions accelerated method (RCPT) based on ASTM C1202. Permeability to water test results concluded that there was no water penetration. RPC can be used in building construction related or submerged in water with high salt content (> 1500 ppm). RCPT test concluded that RPC with glass powder is resistant to chlorine ions which are categorized in negligible classes. Replacement of quartz flour with glass powder does not affect the permeability properties.

Keywords: RPC, green concrete, glass powder, chlorine ions, permeability.

ABSTRAK

Bahan konstruksi untuk bangunan yang terendam air harus bersifat impermeable. RPC (Reactive Powder Concrete) menggunakan tepung kwarsa, merupakan teknologi beton terbaru. Dalam penelitian ini dipelajari permeabilitas RPC menggunakan limbah kaca sebagai pengganti tepung kwarsa. Penggunaan limbah kaca sebagai pengganti tepung kwarsa pada RPC, akan menghasilkan beton yang ramah terhadap lingkungan (green concrete). Ketahanan RPC terhadap penetrasi air diteliti dengan tes permeabilitas air berdasarkan DIN 1048 dan ketahanan RPC terhadap penetrasi ion klorin diteliti dengan percobaan penetrasi ion klorin metode dipercepat (RCPT) berdasarkan ASTM C1202. Hasil tes permeabilitas terhadap air menyimpulkan bahwa tidak terjadi perembesan air sedikit pun ke dalam RPC. RPC kedap air ini dapat digunakan pada konstruksi bangunan yang berhubungan atau terendam air dengan kandungan garam sangat tinggi (> 1500 ppm). Pengujian RCPT menyimpulkan bahwa RPC dengan limbah kaca tahan terhadap ion klorin yang dikategorikan dalam kelas negligible. Penggantian tepung kwarsa dengan tepung kacapada RPC tidak mempengaruhi sifat permeabilitas.

Kata kunci: RPC, green concrete, limbah kaca, ion klorin, permeabilitas

PENDAHULUAN

Beton adalah campuran bahan dari agregat, pengikat (biasa digunakan semen Portland), air dan bahan tambahan lainnya. Umumnya penggunaan beton dalam konstruksi bangunan masih menjadi pilihan utama, hal ini dikarenakan beton mudah diproduksi dan dibentuk. Sejalan dengan perkembangan teknologi bahan bangunan, beton saat ini telah memiliki banyak variasi. Salah satunya adalah *Reactive Powder Concrete* (RPC). RPC adalah beton tanpa agregat kasar, memiliki homogenitas campuran yang baik sehingga menghasilkan beton dengan kekuatan tekan yang sangat

tinggi. RPC pertama kali dikembangkan pada awal tahun 1990 oleh P. Richard dan M. Cheyrezy [1], pada Laboratorium Bouyques, Lafarge Group, di Perancis. Selanjutnya, guna pemasaran RPC hasil riset tersebut, RPC telah diproduksi secara komersial dengan merek industri Ductal®. Kuat tekan RPC komersial ini dapat mencapai lebih-kurang 150 MPa [2].

Ada beberapa prinsip yang menjadi dasar dikembangkannya RPC [3], yaitu:

a. Memperbaiki homogenitas campuran. Pada dasarnya beton merupakan material yang heterogen yang terdiri dari beberapa unsur penyusun yang berbeda jenis dan ukuran butiran agregat. Pada

- RPC homogenitas campuran diperbaiki dengan mengganti agregat kasar dan agregat halus dengan kuarsa.
- b. Meningkatkan kerapatan kepadatan kering. Pengembangan kepadatan yang utama adalah pengurangan kadar air, tetapi kadar air menentukan kemudahan pengerjaan dalam beton. Pada beton normal kepadatan dapat ditingkatkan dengan penambahan partikel pengisi seperti *fly ash*, *silica fume* dan penggunaan *superplastizicer*. Penggunaan partikel pengisi seperti *silica fume* yang optimal 25% dari berat semen. Cara lain untuk meningkatkan kepadatan kering adalah dengan memberikan tekanan pada beton segar selama waktu *setting*, dengan tujuan untuk meminimalkan gelembung-gelembung udara, menghindari adanya air yang terjebak di dalam beton serta mengurangi terjadinya susut beton selama *setting time*. Dengan memberi tekanan ini akan meningkatkan kepadatan sebesar 5-6%
 - c. Memperbaiki mikro struktur. Reaksi *Pozzolanik* dari *silica fume*, yang akan menambah terbentuknya CSH, dapat diaktifkan dengan pengaturan suhu, maka untuk mendapatkan kuat tekan yang tinggi pada RPC digunakan curing dengan suhu tinggi.
 - d. Meningkatkan daktilitas. Semakin tinggi kuat tekan beton, pada umumnya akan mengalami keruntuhan getas. Hal ini sangat tidak diinginkan, karena akan sangat berbahaya. Pada RPC, untuk mengimbangi kuat tekan yang ada dengan penambahan *fiber steel*. Penambahan *fiber steel* juga akan meningkatkan kuat lentur hingga 50-102 MPa dan energi fraktur antara 10.000-40.000 J/m². Hal ini sangat tergantung pada curing yang dilakukan.

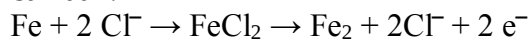
RPC pada umumnya menggunakan tepung kwarsa sebagai pengganti atau tambahan agregat. Tepung kwarsa memiliki kandungan silika yang tinggi sama halnya dengan tepung kaca, sehingga tepung kaca

dapat menjadi substitusi tepung kwarsa dalam pembuatan RPC. Kaca adalah material transparan yang diproduksi dari peleburan silika, soda dan CaCO₃ pada suhu tinggi kemudian didinginkan sehingga menjadi padat. Kaca banyak ditemui sebagai limbah dalam bentuk botol, pecahan kaca, alat-alat rumah tangga, dan tabung vakum (tabung TV). Limbah kaca merupakan *non-biodegradable* (tidak dapat terurai) yang menimbulkan masalah sebagai limbah padat dan tidak ramah lingkungan. Penggunaan tepung kaca dalam campuran beton memberikan dampak baik pada sifat-sifat mekanis dan durabilitas beton. Sementara itu, apabila limbah kaca digunakan untuk agregat halus, akan menghasilkan kemudahan kerja (*workability*) yang lebih baik [4]. Dengan penggunaan limbah kaca sebagai substitusi tepung kwarsa pada beton, akan menghasilkan beton yang ramah terhadap lingkungan (*green concrete*).

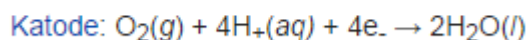
Beton merupakan material bahan konstruksi yang memiliki kuat tarik yang kecil, sehingga pada aplikasinya beton diberikan perkuatan (*reinforced*) menggunakan tulangan baja yang disebut beton bertulang. Namun beton ini memiliki banyak kekurangan dalam ketahanannya terhadap isu lingkungan, salah satunya adalah beton sulit kedap air secara sempurna, sehingga permeabilitas beton merupakan hal yang penting untuk dikaji terlebih pada bangunan di dekat atau di dalam air seperti bangunan air, jembatan antar sungai atau laut.

Permeabilitas beton merupakan kemampuan beton untuk menghambat pergerakan air atau fluida lainnya yang melewati beton. Pada umumnya pergerakan air atau fluida ikut membawa zat reaktif lain sehingga dibutuhkan nilai permeabilitas yang tinggi pada beton yang digunakan. Pada faktanya, permeabilitas beton menentukan tingkat di mana agen agresif seperti gas (CO₂, SO₃), cairan (hujan asam, air laut, air sulfat, salju/ air yang mengandung garam, air tanah, dll) berpenetrasi ke dalam beton [5]. Agen

agresif ini akan merusak struktur beton bertulang apabila zat tersebut telah berpenetrasi dan bereaksi terhadap tulangan beton. Tulangan besi dalam beton sebenarnya tahan terhadap korosi, karena sifat alkali dari beton (pHnya sekitar 12-13), sehingga di permukaan tulangan dalam beton terbentuk sebuah lapisan pasif yang menyebabkan besi terlindung dari pengaruh luar. Proses karbonisasi (*carbonation*) dan intrusi ion-ion klorida (Cl_2) ke dalam beton adalah dua faktor utama yang menyebabkan rusaknya lapisan pasif tersebut dan berlanjut pada terkorosinya tulangan di dalam beton (Siregar, 2006) [6]. Korosi atau proses pengkaratan merupakan proses elektro kimia. Difusi ion Cl^- di dalam beton dapat menyebabkan terjadinya korosi pada beton bertulang sesuai dengan reaksi pada persamaan:



Korosi akibat dari difusi ion Cl^- di dalam beton dapat menyebabkan beton berpori dan menjadi keropos. Tulangan juga akan mengalami karat. Karat merupakan hasil korosi, yaitu oksidasi suatu logam. Besi yang mengalami korosi membentuk karat dengan rumus $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$. Pada proses pengkaratan, besi (Fe) bertindak sebagai pereduksi dan oksigen (O_2) yang terlarut dalam air bertindak sebagai pengoksidasi. Persamaan reaksi pembentukan karat sebagai berikut:



Gambar 1 Reaksi Pembentukan Korosi
(Sumber: Wikipedia) [7]

Karat akan mengakibatkan kegagalan struktur, sehingga penetrasi ion klorin terhadap beton sangat diperlukan untuk dikaji secara mendalam.

TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini memiliki tujuan untuk mendapatkan pengkajian mengenai permeabilitas atau ketahanannya terhadap

intrusi ion klorin pada RPC berbahan dasar tepung kaca serta menjadi dasar teoritis pengaplikasian secara efektif RPC berbahan dasar tepung kaca di dunia konstruksi.

TINJAUAN PUSTAKA

ACI *Committee* 201 mendefinisikan durabilitas beton dengan semen Portland sebagai kemampuan beton untuk menahan cuaca, serangan kimia, abrasi, atau proses pengrusakan lain. Dengan demikian durabilitas beton akan mempertahankan bentuk asli, kualitas, dan kemampuan layan saat terekspos di lingkungan. Menurut Newmann dan Choo [8] durabilitas tidak hanya sekedar berhenti pada terminologi ‘baik’ atau ‘lebih baik’. Durabilitas bukanlah sifat (*properties*), melainkan perilaku (*behaviour*) yang menyatakan kinerja beton saat terekspos dengan lingkungan.

Masa layan didefinisikan sebagai waktu selama beton memenuhi persyaratan kinerjanya dengan pemeliharaan yang ditentukan. Struktur beton harus mampu menghadapi kondisi lingkungan di mana beton tersebut harus ditempatkan tanpa mengalami kerusakan yang bisa mempengaruhi kekuatan struktur hingga jangka waktu yang ditentukan. Durabilitas beton akan menurun terhadap waktu servis [9].

Durabilitas beton sangat dipengaruhi oleh berbagai hal, antara lain permeabilitas beton, kerusakan alamiah (fisik) dan kerusakan kimia, pengaruh cuaca, serta korosi pada tulangan baja yang tertanam di dalam beton. Lingkungan yang bersifat agresif sangat berperan dalam menurunkan kinerja durabilitas beton.

Seperti yang dijelaskan di atas, permeabilitas beton mempengaruhi durabilitas beton tersebut. Permeabilitas beton merupakan kemampuan beton untuk menghambat pergerakan air atau fluida lainnya yang melewati beton. Permeabilitas beton, menurut zat lewatnya dibagi menjadi 2 (dua), yaitu:

- 1) Permeabilitas terhadap gas/udara

2) Permeabilitas terhadap zat cair

Semakin tinggi nilai permeabilitas beton itu, maka beton itu akan semakin kedap terhadap udara atau zat cair yang melewatinya. Terdapat hal-hal yang mempengaruhi nilai permeabilitas beton. Faktor-faktor yang mempengaruhi permeabilitas beton itu antara lain:

- 1) Faktor air-semen
- 2) Agregat yang digunakan
- 3) Pemadatan adukan beton
- 4) Perawatan beton
- 5) Umur beton
- 6) Bahan aditif yang digunakan

Faktor utama yang mempengaruhi permeabilitas beton adalah faktor air-semen. Faktor air semen yang tinggi dalam campuran beton dapat menyebabkan kelebihan air dalam beton. Air digunakan untuk menambah kelecakan beton. Jumlah air yang dibutuhkan untuk proses hidrasi jumlahnya relatif sedikit, yaitu 20% dari jumlah semen dan sisanya akan menguap. ACI 318-08 [9] menetapkan nilai rasio air-semen maksimal 0.4 untuk beton yang mengalami kontak air laut, air asin, air payau dan garam organik. Pada saat air menguap dan keluar dari beton, maka akan timbul pori-pori yang saling berhubungan hingga mencapai permukaan beton. Pori-pori inilah yang nantinya akan menjadi jalan masuk gas atau zat cair dalam beton.

Perilaku aliran air melalui beton bukan aliran laminar, sebagaimana umumnya. Aliran yang terjadi dapat dikategorikan sebagai aliran difusi permukaan/ *surface diffusion*. Tetapi secara pendekatan, jumlah aliran ini dapat didekati dengan hukum Darcy. Untuk aliran viskos walaupun dalam hal ini, viskositas tidak dianggap sebagai suatu konstanta tetapi sebagai fungsi dari ukuran pori rata-rata. Persamaan dasar tersebut adalah:

$$Q = K i A \dots \dots \dots (1)$$

Dengan:

Q : total volume zat cair dalam waktu, [cm³] (pengaliran air untuk dapat

menembus beton dilakukan dengan bantuan tekanan udara

K : koefisien permeabilitas [Darcy atau cm/detik]

I : gradien hidraulis atau beda energi aliran di dua titik di sepanjang aliran

A : luas penampang benda yang diberi aliran, [m²]

Nilai 'i' pada persamaan 1, menunjukkan energi yang hilang akibat pengaruh viskos sebagaimana terjadi pada aliran cairan di sekeliling partikel yang melalui alur konsol tidak beraturan. Pengaruh kecepatan diabaikan. 'i' juga dapat dipandang sebagai kekuatan pendorong, terutama bila fenomena seperti pengaruh kapiler diabaikan.

Persamaan 2 dapat disajikan dalam bentuk:

$$Q = K A \frac{H}{L} T \dots \dots \dots (2)$$

Dengan:

$\frac{H}{L}$: Gradien hidraulis

H : tinggi tekanan hidraulis, [cm]

L : tebal benda uji [cm]

T : waktu, detik

Modifikasi persamaan 2

$$\frac{dq}{dt} \frac{1}{A} = K \frac{\Delta h}{L} \dots \dots \dots (3)$$

Dengan:

$\frac{dq}{dt}$: kecepatan aliran, m³/s

$\frac{\Delta h}{L}$: gradien hidraulis

A : luas penampang, [m²]

Δh : beda tekanan udara, m

L : tebal benda uji [cm]

K : koefisien permeabilitas [cm/s]

Ion Klorin dapat berpenetrasi terhadap beton dalam peristiwa penyerapan kapiler, tekanan hidrostatik dan difusi. Metode yang paling familiar adalah difusi. Difusi adalah peristiwa mengalirnya/ berpindahannya suatu zat dalam pelarut dari bagian berkonsentrasi tinggi ke bagian yang

berkonsentrasi rendah. Perbedaan konsentrasi yang ada pada dua larutan disebut gradien konsentrasi. Modus dari transportasi atau perpindahan ion ke dalam beton ini umumnya terjadi pada beton yang sepenuhnya tenggelam. Beton adalah susunan berpori yang memiliki dua komponen, yaitu komponen padat dan cair. Difusi melalui bagian padat dari susunan diabaikan bila dibandingkan dengan laju difusi melalui struktur pori jadi percepatan atau laju difusi tidak hanya dikendalikan oleh koefisien difusi melalui struktur pori tetapi juga karakteristik fisik dari struktur pori kapiler. Tingkat ketahanan beton dipengaruhi oleh kemampuan beton mengikat klorida melalui penggunaan bahan tambah dan semen. Beton relatif tidak berdaya terhadap klorida dalam pori.

Klorida berdifusi ke dalam beton, seperti proses difusi lainnya yang dikontrol oleh hukum Fick, di mana di situasi 1 dimensi biasanya di anggap:

$$J = -D_{eff} \frac{dc}{dx} \dots \dots \dots (4)$$

Dengan J adalah fluks dari ion klorin, D_{eff} adalah koefisien efektif difusi, C adalah konsentrasi ion klorin dan x adalah variabel posisinya. Dalam istilah praktis, persamaan ini hanya berlaku setelah kondisi *steady-state* sudah dicapai, contohnya tidak ada lagi perubahan konsentrasi terhadap waktu. Persamaan ini digunakan untuk menurunkan persamaan dalam kondisi *non-steady*, diturunkan menjadi hukum kedua Fick:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \dots \dots \dots (5)$$

Persamaan tersebut memasukkan efek dari perubahan konsentrasi terhadap waktu. Dapat diselesaikan dengan syarat batas $C_{(x=0, t > 0)} = C_0$ (konsentrasi permukaan adalah konstan C_0), kondisi awal $C_{(x > 0, t=0)} = 0$ (konsentrasi awal di dalam beton adalah 0) dan kondisi titik tak terhingga $C_{(x=\infty, t > 0)} = 0$ (sangat jauh dari permukaan, konsentrasi akan selalu 0).

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = 1 - \text{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4D_{eff}t}} \right) \dots \dots \dots (6)$$

Dengan erf(y) adalah fungsi error, konstruk matematika dalam tabel matematika atau sebagai fungsi dalam *spreadsheet* komputer umum.

Prosedur Penelitian

Untuk mencapai tujuan penelitian, metode penelitian yang digunakan dalam pengumpulan data adalah penelitian eksperimental dan hasil percobaan jenis beton lain yang telah dilakukan sebelumnya dari referensi untuk perbandingannya.

Bahan yang digunakan dalam pembuatan benda uji berupa *Portland Cement Composite (PCC)*, pasir silika, *silica fume*, tepung kwarsa dengan ukuran butiran 40mm, limbah kaca yang dijadikan tepung kaca lewat saringan ASTM no.200, *superplasticizer* viscocrete-10, *steel fiber* dan air, dengan rencana campuran seperti yang ditunjukkan tabel 1. Curing dilakukan dengan metode *steam* selama 8 jam. Kemudian benda uji didiamkan di ruangan sampai berumur 28 hari.

Tabel 1. Mixed Design

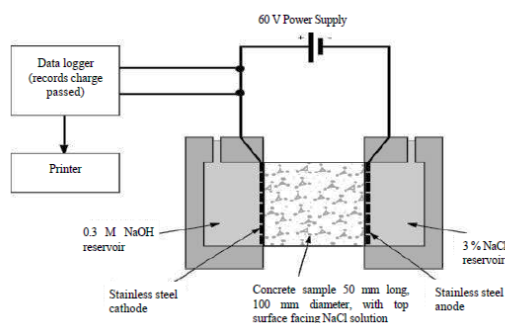
	sampel 1	sampel 2
Faktor air semen	0.2	
Tepung kwarsa	30%	-
Tepung kaca	-	30%
Pasir silika	110%	
<i>Silica Fume</i>	25%	
<i>Superplasticizer</i>	3%	
<i>Steel Fiber</i>	1.50%	

nb : persentase dibandingkan dengan massa semen

Water Permeability Test dilaksanakan di laboratorium beton Universitas Indonesia berdasarkan DIN 1048 [10]. Spesimen yang telah dirapatkan dengan *seal*, dikenai air dengan tekanan 5 atm selama 3 hari, kemudian spesimen dibelah dan diukur kedalaman penetrasi air yang berhasil melewati spesimen tersebut.

Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) dilaksanakan di laboratorium rekayasa struktur dan bahan Institut Teknologi Bandung berdasarkan ASTM

C1202 [11]. Spesimen beton dalam keadaan *water-saturated*, tebal 50 mm, diameter 100 mm dikenakan pada voltase DC sebesar 60 V selama 6 jam menggunakan peralatan seperti pada Gambar 2. Salah satu reservoir diisi dengan larutan NaCl 3.0% dan reservoir lainnya diisi dengan larutan NaOH 0.3 M. Total ion yang lewat terukur dan dinilai dengan kriteria berdasarkan Tabel 2.

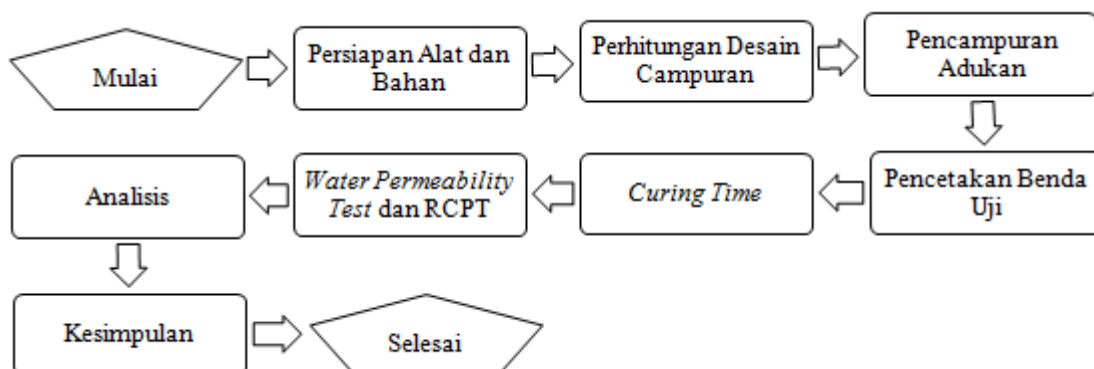


Gambar 2. RCPT System

Tabel 2. RCPT Ratings

Charge Passed (coulombs)	Chloride Ion Penetrability
> 4,000	High
2,000-4,000	Moderate
1,000-2,000	Low
100-1,000	Very Low
< 100	Negligible

Prosedur pelaksanaan penelitian ini dapat dilihat pada diagram alur pada Gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. Diagram Alur Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian *Water Permeability Test* terdapat pada tabel 3. Angka nol mengartikan bahwa pada keempat benda uji yang telah diteliti, tidak terjadi perembesan air sama sekali ke dalam benda uji saat air dipenetrasi dengan alat *water permeability test*. Air tidak dapat menembus permukaan

keempat benda uji. Sehingga koefisien permeabilitas dari *reactive powder concrete* (RPC) baik yang menggunakan tepung kwarsa maupun yang menggunakan tepung kaca, dimasukkan ke dalam persamaan Darcy pada persamaan 2, adalah nol.

Tabel 3. Hasil Water Permeability Test

Sampel 1				Sampel 2			
KW 1		KW 2		KC 1		KC 2	
<i>First Half</i>	<i>Second Half</i>	<i>First Half</i>	<i>Second Half</i>	<i>First Half</i>	<i>Second Half</i>	<i>First Half</i>	<i>Second Half</i>
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Sample Average</i>	0.00	<i>Sample Average</i>	0.00	<i>Sample Average</i>	0.00	<i>Sample Average</i>	0.00

Hal ini menjelaskan bahwa *reactive powder concrete* (RPC) baik yang menggunakan tepung kwarsa maupun yang menggunakan tepung kaca, sama-sama menunjukkan ketahanan yang sangat baik terhadap penetrasi air. Berdasarkan SNI 03-2914-1992 mengenai beton kedap air ini termasuk ke dalam kategori beton kedap air agresif kuat, karena setelah diuji dengan tekanan air, tembusnya air kedalam beton tidak lebih atau sama dengan 30 mm. Air agresif kuat yang dimaksudkan adalah air yang mengandung garam-garam agresif minimal 1500 ppm, dengan kata lain *reactive powder concrete* (RPC) baik yang menggunakan tepung kwarsa maupun yang menggunakan tepung kaca mampu tahan terhadap penetrasi air yang mengandung garam agresif >1500 ppm. Sehingga untuk aplikasi beton ini pada konstruksi, beton ini dapat digunakan sebagai material pada pembangunan di daerah atau didalam air laut. Air laut adalah air dengan kadar garam agresif lebih dari 1000 ppm.

Salah satu faktor yang menyebabkan *reactive powder concrete* (RPC) baik yang menggunakan tepung kwarsa maupun yang menggunakan tepung kaca mampu tahan terhadap penetrasi air agresif kuat adalah nilai rasio air -semen yang sangat rendah (ekstrim) yaitu sebesar 0,2, sedangkan menurut peraturan ACI 318-08 menetapkan nilai rasio air-semen maksimal 0,4 untuk beton yang mengalami kontak air laut, air asin, air payau dan garam organik. Pada sampel penelitian, peneliti menggunakan

rasio air –semen sebesar 0,2 diakibatkan karena jumlah air yang dibutuhkan untuk proses hidrasi yaitu hanya sebesar 20% dari jumlah semen dan sisanya akan menguap. Pada saat air menguap dan keluar dari beton, maka akan timbul pori-pori yang saling berhubungan hingga mencapai permukaan beton. Pori-pori inilah yang nantinya akan menjadi jalan masuk gas atau zat cair dalam beton. Namun dampak dari desain rasio air-semen yang bernilai ekstrim rendah tersebut, pada saat *mixing*, pasta beton yang dikerjakan bersifat sangat kental atau *workabilitasnya* rendah. Hal ini menyebabkan sulitnya pekerjaan pada saat pencetakan pasta ke dalam bekisting. Sehingga vibrasi pada saat pencetakan memiliki peran penting untuk kasus *mixed design* penelitian ini.

Faktor lainnya yang menyebabkan *reactive powder concrete* (RPC) baik yang menggunakan tepung kwarsa maupun yang menggunakan tepung kaca mampu tahan terhadap penetrasi air agresif kuat lainnya adalah material yang bersifat *pozzolanic* yang sangat halus yang digunakan pada sampel. Material tersebut adalah *silica fume*, tepung kwarsa dan tepung kaca. Dari reaksi pozzolanik yang terjadi, menjadikan pori- pori beton menjadi sangat sedikit dan butiran pozzolan yang sangat halus akan mengisi pori- pori pada beton sehingga mikrostruktur RPC baik yang menggunakan tepung kwarsa maupun yang menggunakan tepung kaca menjadi sangat rapat.

Tabel 4. Hasil RCPT

Time (min) Specimens		Current (Ampere)												
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
KW 1		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
KW 2		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
KC 1		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
KC 2		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabel 4 menunjukkan hasil penelitian RCPT. Terlihat bahwa benda uji KW 1, tercatat nilai arus yang ditunjukkan oleh amperemeter adalah nol kecuali pada menit ke 270, 300, 330 dan 360 yang adalah sebesar 0.01 Ampere. Hal yang sama juga ditunjukkan pada benda uji KC 1. Pada benda uji KW 2 dan KC 2, tercatat nilai arus yang ditunjukkan oleh amperemeter

adalah nol dari 30 menit pertama pengetesan hingga menit ke 360. Dari nilai arus yang ditunjukkan oleh amperemeter pada benda uji yang dites, nilai *charge passed* atau total ion yang lewat dan terukur bisa didapatkan. Nilai *Charge Passed* dalam Coulomb dapat ditentukan dengan persamaan:

$$Q = 900 (I_0 + 2 \cdot I_{30} + 2 \cdot I_{60} + 2 \cdot I_{90} + 2 \cdot I_{120} + 2 \cdot I_{150} + 2 \cdot I_{180} + 2 \cdot I_{210} + 2 \cdot I_{240} + 2 \cdot I_{270} + 2 \cdot I_{300} + 2 \cdot I_{330} + I_{360}) \dots \dots \dots (7)$$

Sehingga didapatkan nilai *Charge Passed* masing-masing benda uji dan digambarkan pada **tabel 5** berikut ini.

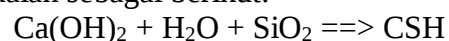
Tabel 5. RCPT Rating (ASTM C1202) Benda Uji

Sampel	Benda Uji	Charge Passed (Coulomb)	Rata - Rata	Chloride Ion Penetrability
Sampel 1	KW 1	63	31.5	Negligible
	KW 2	0		
Sampel 2	KC 1	63	31.5	Negligible
	KC 2	0		

Seperti yang bisa dilihat pada tabel 5, penetrasi ion klorida pada beton RPC yang berbahan tepung kwarsa maupun tepung kaca sangat kecil, yaitu dalam kategori *negligible*. Hal ini diakibatkan karena adanya penggunaan material *pozzolan* (*silica fume*) yang sangat halus dan faktor air semen yang kecil.

Penggunaan material *pozzolan* dan material semen yang optimum dapat mengurangi jumlah pori-pori pada beton sehingga mengurangi transportasi ion klorida ke dalam beton. Peningkatan dalam pengikatan antara pasta semen dengan agregat yang diperantarai reaksi pozzolanik juga memainkan peranan yang penting

dalam mengurangi permeabilitas klorida. Dalam percobaan ini, material pozzolan yang dipakai adalah *silica fume*. *Silica fume* memiliki sifat yang tahan terhadap aliran listrik sehingga mampu mengurangi reaksi elektrokimia dalam proses korosi. *Silica fume* juga mengandung material silika yang sangat tinggi sehingga material ini juga sangat baik dalam meningkatkan kuat tekan beton. Adapun reaksi pozzolan yang terjadi adalah sebagai berikut.



Pembentukan produk hidrasi ini mempengaruhi *microstructure* pada beton yang pada akhirnya akan mempengaruhi kekuatan beton dan durabilitas beton.

Ketahanan terhadap ion klorida adalah salah satu cara yang secara tidak langsung mengukur durabilitas beton.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan maka diambil kesimpulan:

- 1) *Reactive Powder Concrete* (RPC) menggunakan tepung kaca memiliki tingkat permeabilitas yang sangat rendah (*impermeable*) baik terhadap air maupun ion klorin.
- 2) Limbah kaca dapat digunakan sebagai pengganti tepung kwarsa pada pembuatan RPC karena tidak mempengaruhi sifat permeabilitas RPC tersebut.
- 3) RPC dengan menggunakan limbah kaca dapat diaplikasikan pada bangunan yang berhubungan dengan ion klorin seperti air laut ataupun yang terendam air.
- 4) Material penyusun RPC bersifat *pozzolanic* yang sangat halus, seperti *silica fume*, tepung kwarsa, dan tepung kaca serta rasio air – semen yang sangat rendah menjadi faktor utama yang menyebabkan RPC ini menjadi bersifat *impermeable*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Richard, Piere; Cheyrezy, Marcel, *Composition of Reactive Powder Concrete*, Cement and Concrete Research, vol 25, no 7, pp 1501-1511, Pergamon. (1995).
- [2] Lee, N.P., dan Chisholm, D.H., *Study Report Reactive Powder Concrete*. No. SR 146, BRANZ; Ltd., Judgeford, New Zealand.. (2006).
- [3] Naibah, Pio Ranap Tua, (2013). Perilaku Hubungan Balok-Kolom Eksterior Beton Normal, Mutu Tinggi, dan Bubuk Reaktif dengan Beban Lateral Siklik (104S). Konferensi Nasional Teknik Sipil 7 (KoNTekS 7) Universitas Sebelas Maret (UNS) - Surakarta, 24-26 Oktober 2013.
- [4] Safiuddin, Md., *Review: Utilization of Solid Wastes in Construction Materials*. International Journal of the Physical Sciences Vol. 5: 1952-1963. (2010).
- [5] Tarun R. Naik, Member ASCE, Shiw S. Singh dan Mohammad M. Hossain, *Permeability of High-Strength Concrete Containing Low Cement Factor*. Journal of Energy Engineering Vol. 122 No. 1: pp. 21-39. (1996).
- [6] Siregar, Artur P.N., Laju Korosi Tulangan pada Mutu Beton yang Berbeda, Jurnal SMARTek, Vol 4, No. 2 Mei, pp. 67-76. (2006).
- [7] Artikel non-personal, Karat, Wikipedia Bahasa Indonesia, <http://id.wikipedia.org/wiki/Karat>, diakses 20 September 2012.
- [8] Newmann, John dan Ban Seng Choo, *Advanced Concrete Technology – Concrete Properties*. Elsevier, Ltd. Burlington, MA. (2003).
- [9] Thomas, M.D.A., Pantazopoulou, S.J., dan Martin-Perez, B., *Service Life Modelling of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides-A Literature Review, Prepared for the Ministry of Transportation*. Ontario : University of Toronto. (1995).
- [10] Deutche Industrie Norm, *Testing Concrete : Testing of Hardened Concrete (Specimena Prepared in Mould)*. DIN 1048 Part 5, June. (1991).
- [11] ASTM International *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Designation : C 1202-97. (2002).