

## Pengaruh Penambahan *Quartz Powder* pada *Reactive Powder Concrete* terhadap Terbentuknya Kalsium - Silikat - Hidrat

**Widodo Kushartomo**

Universitas Tarumanagara, Jl. Let. Jend. S. Parman No.1 Jakarta 11440, E-mail: widodo@untar.ac.id

**Chaidir Anwar Makarim**

Universitas Tarumanagara, Jl. Let. Jend. S. Parman No.1 Jakarta 11440, E-mail: batara7@gmail.com

**FX. Supartono**

PT. Partono Fondas Engineering Consultan, E-mail: office@partonofondas.com

**Sugandar Sumawiganda**

Universitas Tarumanagara, Jl. Let. Jend. S. Parman No.1 Jakarta 11440,

### Abstrak

Penelitian yang dilakukan adalah menjelaskan mengenai penggunaan quartz powder dalam reactive powder concrete (RPC) terutama pengaruhnya terhadap struktur mikro dan kuat tekan. Dalam desain campuran RPC, selain menentukan jumlah material yang digunakan, temperatur curing divariasikan guna menjelaskan fungsi quartz powder. Perendaman, penguapan dan penguapan bertekanan tinggi merupakan teknik yang digunakan untuk melakukan variasi temperatur curing. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan difraksi sinar x (XRD) dan scanning electron microscopy (SEM). Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa quartz powder dalam RPC memiliki peranan menurunkan tingkat workabilitas campuran, memicu terbentuknya C-S-H<sub>IV</sub> dan meningkatkan kuat tekan.

**Kata-kata Kunci:** Quartz powder, RPC, Curing, Perendaman, Penguapan, Kuat tekan.

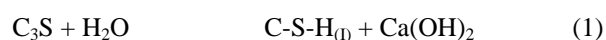
### Abstract

The objective of the research is to explain the use of quartz powder in reactive powder concrete, particularly its effect on micro structure and compressive strength. In RPC mix design, besides determining the amount of material used, curing temperature was varied to explain the role of the quartz powder. Immersion curing, steam curing and high pressure steam curing were method used to vary curing temperature. Observaton of micro structure was conducted using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). It was shown that quartz powder in RPC was able to reduce concrete mix level of workability, triggered the formation of C-S-H<sub>IV</sub> and inreased compressive strength.

**Keywords:** Quartz powder, RPC, Curing, Immersion, Steam, Compressive strength.

### 1. Pendahuluan

Semen sebagai salah satu komponen penyusun beton memiliki sifat *adesive* dan *cohesive*, artinya semen mampu mengikat benda-benda lain selain dirinya sendiri. Empat unsur utama yang menentukan sifat-sifat semen secara keseluruhan adalah C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A dan C<sub>4</sub>AF. Secara umum reaksi hidrasi pada semen dituliskan sebagai berikut:

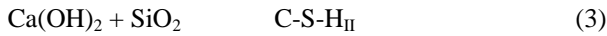


C-S-HI berikatan secara kovalen dan Ca(OH)<sub>2</sub> atau portlandite berikatan secara ionik. Reaksi ini

merupakan awal mula dipahaminya pembentukan kekuatan semen dan beton yang dihasilkan dalam reaksi ini dikenal dengan nama beton normal. Kekuatan yang dapat dicapai oleh beton normal adalah 35 MPa (Mindess 1981).

Perkembangan teknologi dalam bidang konstruksi, menuntut kebutuhan material beton yang semakin kuat. Oleh karena itu dilakukan penelitian dalam bidang teknologi beton, guna meningkatkan kekuatan serta sifat-sifat lainnya. Hasil yang dicapai pada penelitian teknologi beton adalah penggunaan material pozolanik dalam campuran beton, sehingga dapat menghasilkan beton yang semakin kuat. Pozolanik merupakan material yang mengandung SiO<sub>2</sub> aktif seperti abu

terbang, *silica fume* dan sebagainya. Material pozolanik pada umumnya mempunyai ukuran butiran jauh lebih kecil dari pada ukuran butiran semen (Taylor, 1997). Persamaan reaksi pozolanik dituliskan sebagai berikut:



Teknologi paling akhir dalam pembuatan beton adalah beton yang memiliki kinerja ultra tinggi atau sering disebut sebagai *reactive powder concrete* (RPC). *Reactive powder concrete* diketahui memiliki kinerja lebih baik bila dibandingkan dengan beton mutu tinggi (Cwirzen et al, 2008). Hingga saat ini belum ada penjelasan cukup memadai terhadap penggunaan *quartz powder* dalam RPC. Pada berbagai penelitian yang telah dilakukan, *quartz powder* digunakan dalam jumlah yang cukup besar. Penambahan *quartz powder* dapat meningkatkan kuat tekan hingga 20% (Khadiranaikar and Muralan, 2012). Ada beberapa hal yang patut dipahami terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi terbentuknya kekuatan pada *reactive powder concrete*, pemahaman ini nantinya diperlukan guna mendapatkan sebuah penjelasan yang lengkap terhadap peranan *quartz powder* dalam *reactive powder concrete*.

## 2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan untuk memperoleh penjelasan fungsi *quartz powder*, terutama dalam mekanisme pembentukan kalsium-silikat-hidrat. Secara khusus, tujuan yang ingin dicapai adalah untuk mengetahui :

1. Pengaruh temperatur *curing* terhadap struktur mikro *reactive powder concrete*.
2. Pengaruh *quartz powder* terhadap kuat tekan *reactive powder concrete*.

## 3. Prosedur Penelitian

Untuk mencapai tujuan penelitian, metode penelitian yang digunakan dalam pengumpulan data adalah penelitian eksperimental. Pembuatan benda uji, curing, pengamatan struktur mikro dan pengujian kuat tekan, dikerjakan untuk mengetahui pengaruh penggunaan *quartz powder* pada *reactive powder concrete*.

Bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan benda uji berupa semen tipe I, *silica fume*, pasir, *quartz powder* dengan ukuran butiran 40mm, superplasticizer dari jenis polycarboxylate, dengan rencana campuran seperti ditunjukkan pada **Tabel 1**. Curing dilakukan dengan teknik perendaman pada temperatur 20°C selama 28 hari, penguapan pada temperatur 90°C selama 24 jam dan penguapan bertekanan tinggi pada temperatur 200°C, 250°C, selama 12 jam. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan X-ray difractometer (XRD) dan scanning electron microscopy (SEM). Campuran diaduk menggunakan mixer berkecepatan 1800 rpm selama kurang lebih 10 menit, supaya penggunaan super plasticizer menjadi optimal dan adukan dapat tercampur secara homogen.

## 4. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Pada pembuatan *reactive powder concrete*, diperlukan semen sebanyak 700 – 900 kg/m<sup>3</sup>, penggunaan semen yang sangat banyak tersebut berdampak pada jumlah pelepasan panas selama proses hidrasi berlangsung menjadi sangat besar, terutama pada menit-menit awal proses pencampuran. Artinya bila seluruh semen terhidrasi dengan sempurna akan mengakibatkan peningkatan temperatur yang sangat besar dalam adukan. Kenaikan temperatur yang sangat tinggi dalam adukan dapat mengakibatkan terjadinya keretakan, penyusutan serta menurunkan tingkat workabilitas (Gaitero et al, 2008). Efek negatif yang muncul pada penggunaan semen dalam jumlah besar, dapat teratasi karena seluruh material penyusun berupa *powder* dengan ukuran butiran yang sangat halus berkisar antara 15mm – 450 mm. Ukuran butiran yang sangat halus dan rasio air-semen ( $f_{a/s}$ ) rendah menyebabkan volume rongga yang terbentuk dalam RPC sangat kecil sehingga menghambat terjadinya penyusutan (Uygunoglu, 2008).

Penurunan panas hidrasi terjadi disebabkan reaksi antara SiO<sub>2</sub> *silica fume* dengan salah satu produk hidrasi berupa portlandite atau kalsium hidroksida (Ca(OH)<sub>2</sub>) (Yazici et al, 2008), dengan adanya pelepasan sejumlah panas dari reaksi hidrasi semen, maka reaksi antara SiO<sub>2</sub> dengan Ca(OH)<sub>2</sub> dapat berlangsung lebih cepat. reaksi ini dikenal sebagai reaksi pozolanik seperti yang ditunjukkan dalam persamaan reaksi-3. Penambahan

**Tabel 1. Perancangan campuran contoh uji RPC**

Campuran	$f_{a/s}$	$f_{sf/s}$	$f_{qp/s}$	$f_{p/s}$	$f_{sp/s}$	Temperature Curing			
						20°C	90°C	200°C	250°C
Semen + air + QP + Pasir + SP	0,2	0,0	0,3	1,5	0,03				
Semen + air + SF + QP + Pasir + SP	0,2	0,3	0,3	1,5	0,03				

keterangan:  $f_{a/s}$  = perbandingan massa air (a) terhadap semen (s)  
 $f_{sf/s}$  = perbandingan massa *silica fume* (sf) terhadap semen (s)  
 $f_{sp/s}$  = perbandingan massa super plasticizer (sp) terhadap semen (s)  
 $f_{p/s}$  = perbandingan massa pasir (p) terhadap semen (s)  
 $f_{qp/s}$  = perbandingan massa *quartz powder* (qp) terhadap semen (s)

*silica fume* dalam campuran RPC menyebabkan panas hidrasi yang dilepaskan oleh semen diserap kembali untuk berlangsungnya reaksi pozolanik, sehingga dalam setiap pembuatan RPC penggunaan semen yang tinggi bukan merupakan masalah bagi munculnya penyusutan ataupun tegangan termal karena selalu diikuti oleh penambahan jumlah *silica fume* yang tinggi pula (Banja et al 2003), (Gaitero et al, 2008).

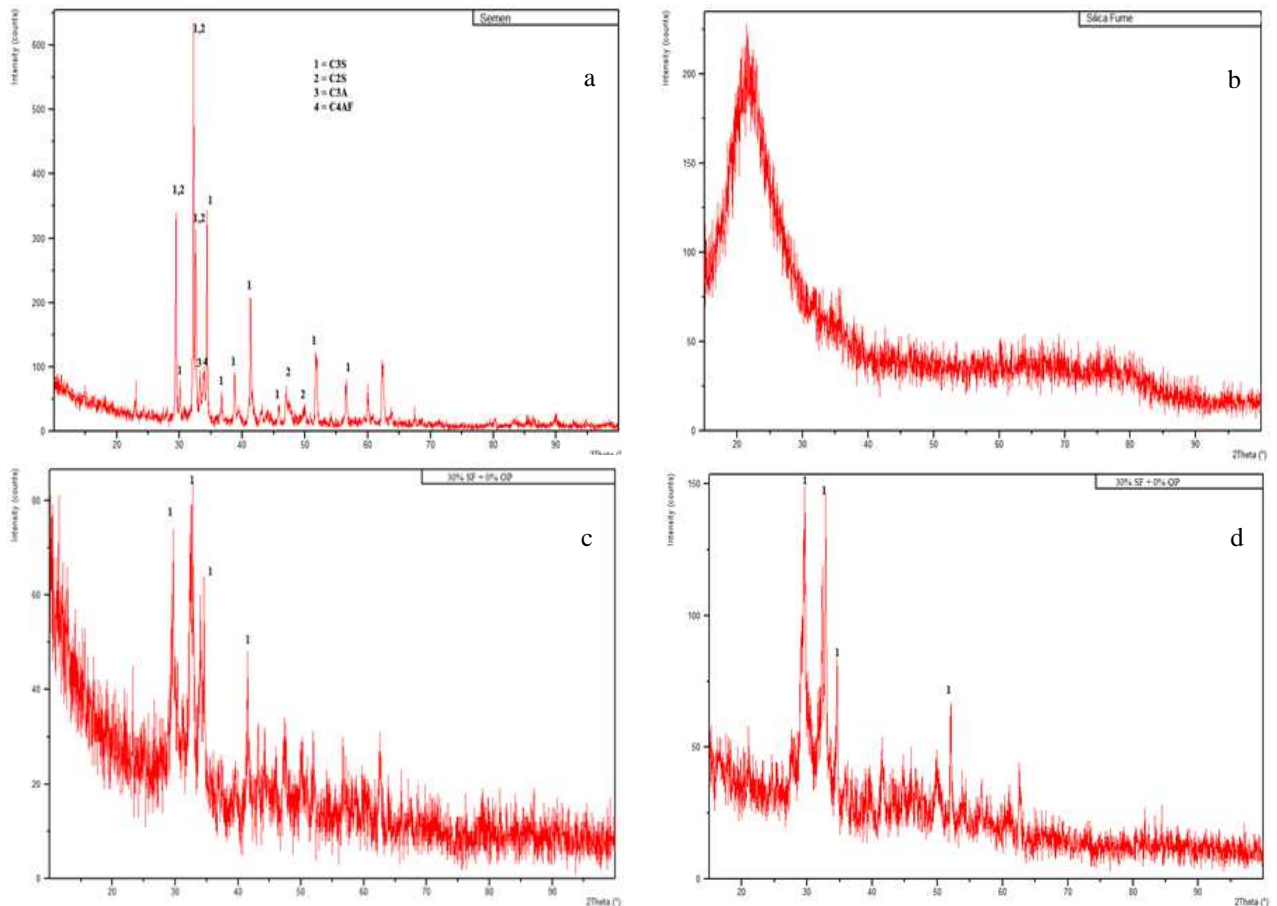
Penambahan *quartz powder* dalam campuran RPC mengakibatkan penurunan workabilitas secara signifikan, semakin banyak jumlah *quartz powder* yang ditambahkan maka semakin menurunkan workabilitas campuran. Berdasarkan contoh uji yang telah dibuat. Penurunan tingkat workabilitas campuran ini disebabkan kondisi butiran *quartz powder* yang kasar, kondisi ini menimbulkan gesekan yang terjadi antar butiran menjadi sangat tinggi, tingginya gaya gesekan antar butiran ini menyebabkan penurunan tingkat workabilitas campuran.

Pengamatan spektrum difraksi XRD contoh uji tanpa penambahan *quartz powder* dengan teknik *curing* perendaman ataupun penguapan, masih menunjukkan ditemukannya pola difraksi C3S dan C2S. Penemuan C3S dan C2S pada contoh uji menunjukkan semen

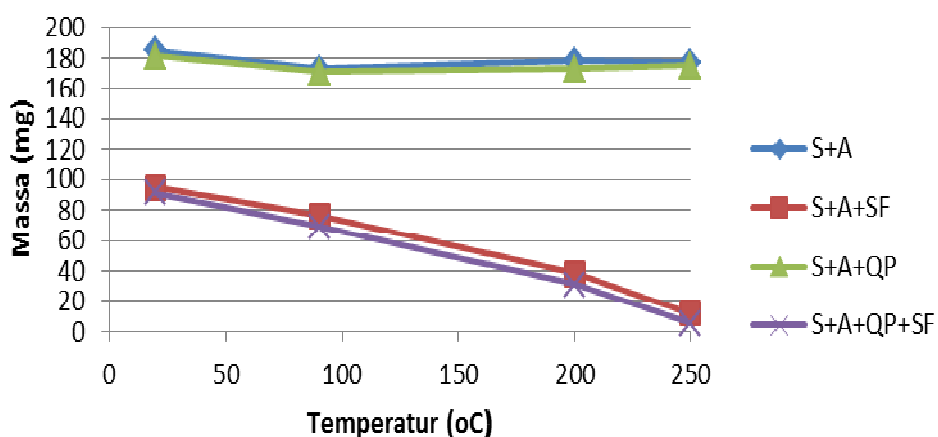
tidak dapat terhidrasi semuanya dengan sempurna. **Gambar 1** menunjukkan pola difraksi semen, *silica fume* dan contoh uji RPC tanpa *quartz powder* pada temperatur *curing* 20, 90, 200, 250°C.

**Gambar 1a** dan **1b** merupakan gambar pola difraksi semen dan *silica fume* murni, pola difraksi yang ditunjukkan oleh *silica fume* merupakan pola difraksi material SiO<sub>2</sub>amorphus. **Gambar 1c** dan **1d** memperlihatkan perbedaan intensitas *silica fume* pada RPC karena pengaruh temperatur *curing*, ini berarti pada temperatur *curing* 200 dan 250°C jumlah *silica fume* yang bereaksi dengan Ca(OH)<sub>2</sub> lebih banyak bila dibandingkan dengan temperatur *curing* 20 dan 90 °C.

Analisis ini diperkuat dengan pengukuran kadar portlandite Ca(OH)<sub>2</sub> dalam RPC pada berbagai temperatur *curing*, seperti diperlihatkan dalam **Gambar 2**. Pada **Gambar 2** menunjukkan gradasi jumlah Ca(OH)<sub>2</sub> yang terukur akibat perubahan temperatur *curing*. Semakin tinggi temperatur *curing* maka jumlah portlandite terukur semakin kecil, pengukuran ini dilakukan dengan teknik titrasi atau volumetrik. Pengukuran kandungan portlandite dengan metode titrasi, memperkuat dugaan terjadinya reaksi pozolanik seperti yang ditunjukkan dalam persamaan reaksi-3.



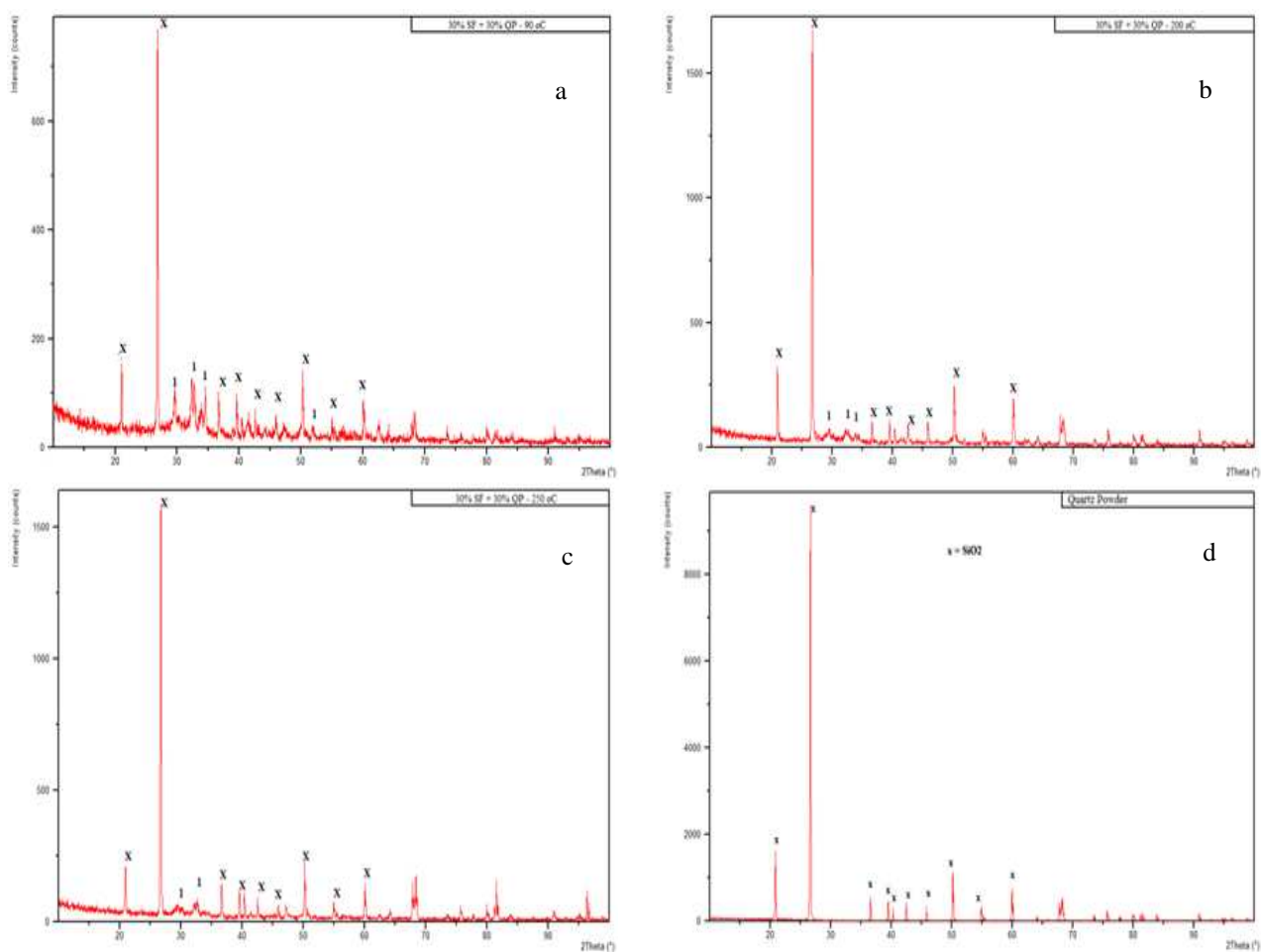
Gambar 1. Spektrum pola difraksi XRD a) semen b) *silica fume* c) RPC *curing* 20, 90° C d) 200, 250° C



Gambar 2. Pengaruh temperatur curing terhadap produksi portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$  tiap gram semen (S = semen; A = air; SF = silica fume; QP = quartz powder)

Pada contoh uji RPC dengan campuran silica fume dan quartz powder, pola difraksi quartz powder sangat dominan, hal ini menjadi jelas karena struktur kristal pada quartz powder memiliki pola spektrum yang sangat kuat seperti ditunjukkan pada Gambar 3d.

Gambar 3d merupakan spektrum pola difraksi untuk material  $\text{SiO}_2$  kristal dari quartz powder. Pengamatan pola spektrum XRD pada contoh uji RPC dengan penambahan quartz powder seperti diperlihatkan pada Gambar 3 tersebut diatas, tidak mengindikasikan adanya mineral baru yang terbentuk pada berbagai temperatur curing.

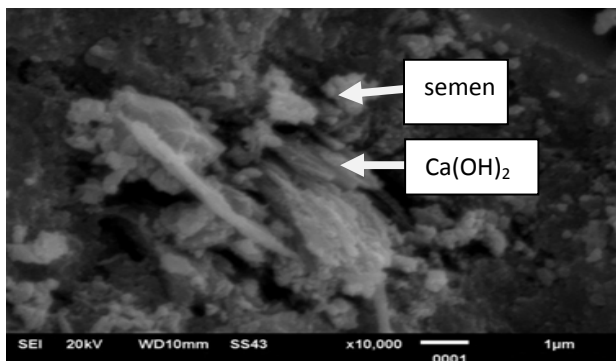


Gambar 3. Pola spektrum XRD RPC pada berbagai temperatur curing a) 20, 90 °C, b) 200°C, c) 250°C, d) quartz powder

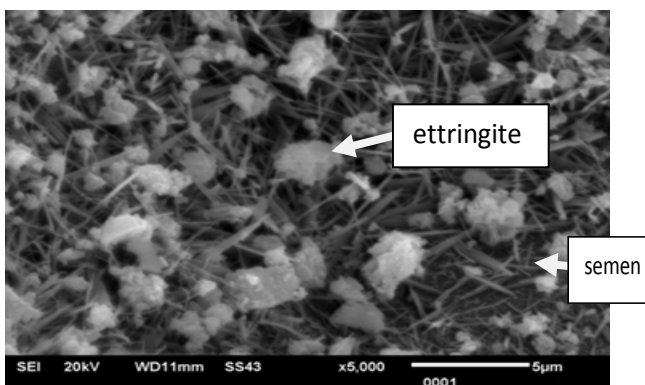
Pengamatan menggunakan SEM menghasilkan gambar hitam putih. **Gambar 4** sampai **Gambar 9** semua contoh uji masih menunjukkan adanya gumpalan-gumpalan warna putih yang diindikasikan sebagai semen, gambar ini cocok dengan atau bersesuaian dengan spektrum pola difraksi XRD **Gambar 1** dan **Gambar 3**. **Gambar 9** memiliki perbesaran yang tidak sama dengan yang lainnya, disebabkan struktur mikro yang teramati sangat halus sehingga perlu perbesaran yang lebih untuk memperjelas gambar yang dihasilkan. Pada **Gambar 5** struktur mikro yang teramati tampak jelas pada perbesaran yang lebih kecil, bila dibandingkan dengan gambar lainnya.

Pada temperatur *curing* 20, 90, 200 dan 250°C seluruh contoh uji menunjukkan beberapa gambar yang sama, yaitu terdeteksi adanya semen dan ettringite seperti diperlihatkan dalam **Gambar 5**.  $\text{Ca(OH)}_2$  terdeteksi hanya pada temperatur curing 20 dan 90°C, artinya pada temperatur 200 dan 250°C  $\text{Ca(OH)}_2$  telah bereaksi dengan  $\text{SiO}_2$  dalam reaksi pozolanik. Analisis ini cocok dengan hasil pengujian kadungan  $\text{Ca(OH)}_2$  pada **Gambar 3**. Tobermorite muncul pada temperatur pemeliharaan 90 dan 200°C.

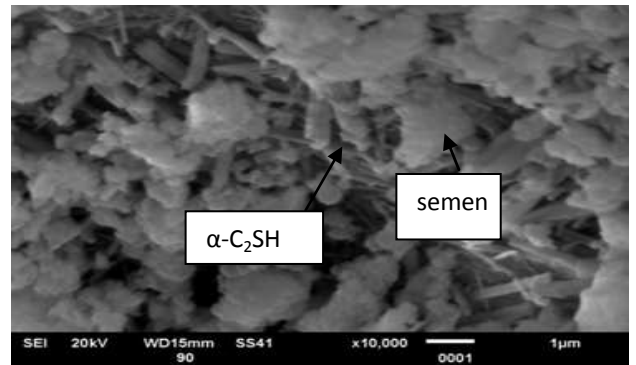
Perbedaan temperatur curing menunjukkan perbedaan strukturmikro RPC dengan *quartz powder* didalamnya, curing dengan temperature 90, 200, 250°C memuncu-



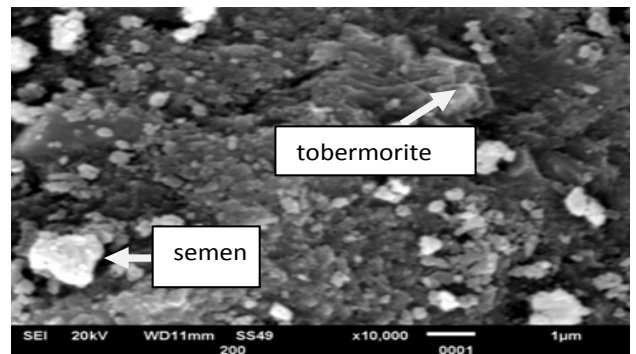
**Gambar 4.** Struktur mikro contoh uji pasta semen temperatur curing 20, 90, °C dengan  $f_{sf/s} = 0,0$  dan  $f_{qp/s} = 0,0$



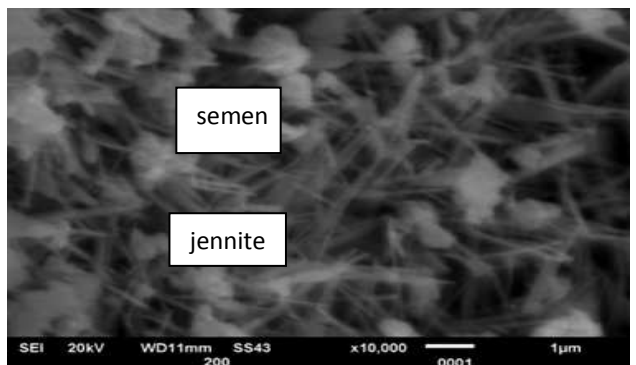
**Gambar 5.** Struktur mikro contoh uji temperatur curing 20, 90, 200, 250°C dengan  $f_{sf/s} = 0,3$  dan  $f_{qp/s} = 0,0$



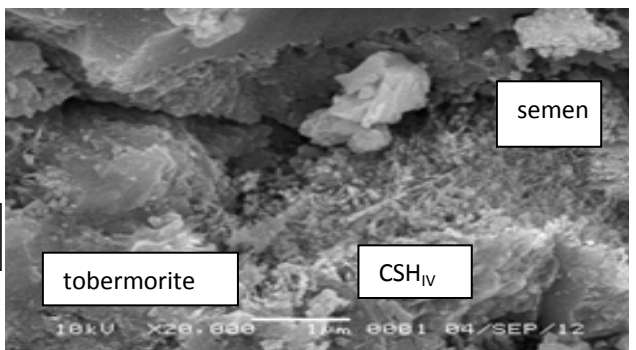
**Gambar 6.** Struktur mikro contoh uji temperatur curing 90°C dengan  $f_{sf/s} = 0,3$  dan  $f_{qp/s} = 0,3$ .



**Gambar 7.** Struktur mikro contoh uji temperatur curing 90, 200, 250°C dengan  $f_{sf/s} = 0,3$  dan  $f_{qp/s} = 0,3$



**Gambar 8.** Struktur mikro contoh uji temperatur pemeliharaan 200°C dengan  $f_{sf/s} = 0,3$  dan  $f_{qp/s} = 0,3$



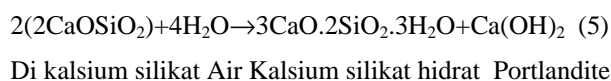
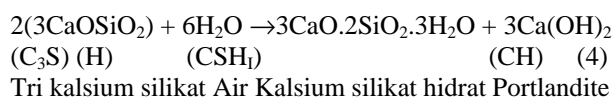
**Gambar 9.** Struktur mikro contoh uji temperatur pemeliharaan 250°C dengan  $f_{sf/s} = 0,3$  dan  $f_{qp/s} = 0,3$ .

kan tobermorite seperti diperlihatkan pada **Gambar 7**, *curing* pada temperatur 200°C selain memunculkan tobermorit juga memunculkan jennite seperti ditunjukkan pada **Gambar 8** dan *curing* pada temperatur 250°C muncul C-S-H<sub>IV</sub> yang tidak ditemukan pada temperatur *curing* lainnya. Ini menunjukkan bahwa *quartz powder* memicu terbentuknya C-S-H<sub>IV</sub> pada temperatur perawatan 250°C. Meskipun *quartz powder* merupakan SiO<sub>2</sub> kristal yang tidak reaktif, namun pada ukuran yang sangat kecil 10 mm dan temperatur *curing* 250°C, *quartz powder* dapat memicu terjadinya reaksi sekunder membentuk C-S-H<sub>IV</sub>. Secara kuantitatif C-S-H<sub>IV</sub> memang belum dapat dibuktikan dengan jelas, namun secara kualitatif keberadaan C-S-H<sub>IV</sub> ini dibuktikan dengan nilai kuat tekan contoh uji seperti diperlihatkan pada **Gambar 10**.

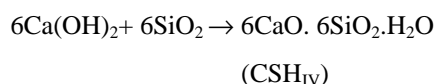
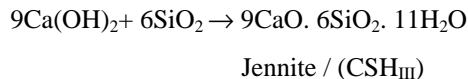
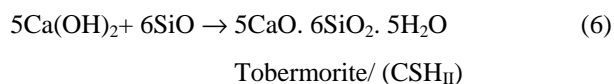
Analisis ini diperkuat dengan jumlah Ca(OH) yang terbentuk akibat pengaruh temperatur *curing* seperti ditunjukkan dalam **Gambar 2** tersebut di atas, bahwa penambahan *quartz powder* dalam pembuatan RPC, jumlah Ca(OH) yang terbentuk semakin sedikit bila dibandingkan dengan tanpa menggunakan *quartz powder*.

RPC dengan penambahan quartz powder semakin meningkat kuat tekannya bila temperatur *curing* semakin bertambah tinggi seperti di perlihatkan pada **Gambar 10**. Salah satu komponen yang memberi kontribusi terhadap kekuatan sebuah beton adalah kandungan C-S-H yang terbentuk selama proses *curing*. Semakin banyak C-S-H terbentuk maka akan semakin tinggi pula kekuatan yang mampu dicapai. Jumlah kandungan kalsium silikat hidrat dapat ditingkatkan bila *curing* beton menggunakan teknik steam *curing* atau menggunakan autoclave sebagai *high pressure steam curing*. Teknik ini dianjurkan untuk dapat menghasilkan temperatur yang tinggi (Ju Yang et al, 2009).

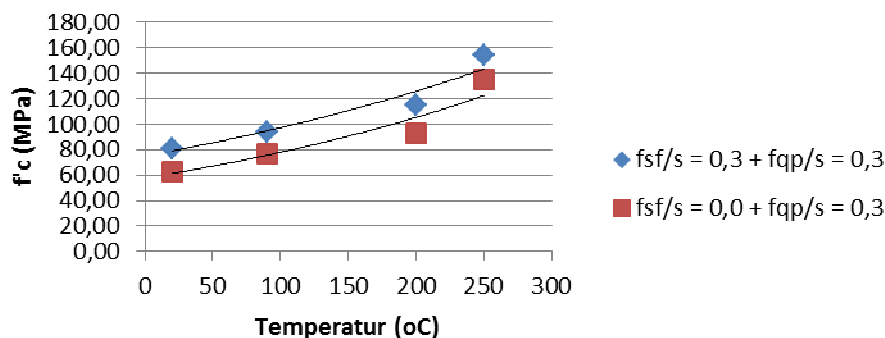
Pemahaman kekuatan yang terbentuk dalam beton dimulai dari terjadinya proses hidrasi pada semen, reaksi hidrasi yang terjadi pada semen menurut persamaan reaksi-1 dan persamaan reaksi-2 secara lengkap ditulis sebagai berikut :



Pada persamaan reaksi-1 dan reaksi -2 tersebut di atas terbentuk produk hidrasi adalah C-S-H dan CH, C-S-HI merupakan material dengan nama amorphous atau non kristalin sedangkan CH merupakan kristal. C-S-H non Kristal ini merupakan produk utama dari reaksi hidrasi, C-S-HI dari C<sub>3</sub>S terbentuk jauh lebih cepat dari yang terbentuk dari C<sub>2</sub>S (An Ming-zhe et al, 2008). Menurut Taylor, 1997 produksi C-S-H hanya sebesar 30% pada usia 28 hari dan 90% pada usia satu tahun dari seluruh jumlah C<sub>3</sub>S dan C<sub>2</sub>S yang ada. C-S-H pada persamaan reaksi-4 dan reaksi-5 tersebut diatas akan bertambah jumlahnya dengan adanya silica reaktif yang berasal silica fume, jumlah C-S-H tersebut akan semakin banyak dan padat pada temperatur *curing* tinggi. Reaksi sekunder membentuk C-S-H dengan struktur yang berbeda dari CSH pertama, seperti yang ditunjukkan dalam persamaan reaksi-3 secara lengkap ditulis sebagai berikut.



Jenis C-S-H terbentuk pada reaksi sekunder berupa mineral dengan struktur semi Kristal tergantung pada perbandingan molar Ca/Si, temperature *curing*. Pada temperature *curing* antara 50°C – 90°C jenis mineral yang terbentuk adalah tobermorit dengan perbandingan Ca/Si 1,2 pada temperature 200 °C terbentuk jennite, dan pada temperature 250°C dan tekanan lebih besar tidak terlihat adanya C-S-H<sub>IV</sub>, beberapa kemungkinan mineral C-S-H terbentuk adalah truscottite (C<sub>7</sub>S<sub>12</sub>H<sub>3</sub>),



Gambar 10. Grafik pengaruh temperatur *curing* terhadap kuat tekan RPC

gyrolite ( $C_2S_3H_2$ ), xonolite ( $C_6S_6H$ ), hillebrandite ( $C_2SH$ ) dan Jaffeite ( $C_4S_3H_3$ ) (Taylor, 1997) terlihat dengan jelas bahwa densitas dan kekerasan mineral CSH dengan *curing* 250°C jauh lebih besar dibandingkan yang dipelihara pada temperatur rendah, karena CH muncul di sela-sela C-S-H maka C-S-H yang terbentuk dari CH akan membuat struktur C-S-H semakin padat sehingga kekuatan beton yang dihasilkan juga akan lebih besar.

## 5. Kesimpulan

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

1. Penggunaan quartz powder pada RPC dapat menurunkan workabilitas campuran, mengingot permukaan *quartz powder* yang tidak rata. Semakin banyak jumlah *quartz powder* yang digunakan maka semakin berkurang tingkat workabilitas campuran.
2. Penambahan *quartz powder* pada RPC akan menurunkan jumlah portlandite  $Ca(OH)_2$ , semakin tinggi temperatur *curing* maka jumlah portlandite yang dihasilkan juga semakin sedikit.
3. Penambahan quartz powder pada RPC dengan temperatur *curing* 250°C dapat memicu terbentuknya  $CSH_{IV}$ .
4. Dalam berbagai temperatur *curing*, penambahan quartz powder akan meningkatkan kuat tekan RPC. Pada temperatur *curing* 250°C penambahan *quartz powder*, meningkatkan kuat tekan RPC hingga mencapai 154,0 MPa.

## Daftar Pustaka

- Bhanja, S., and Sengupta, B., 2003, Optimum Silica Fume Content and Its mode of action on Concret, *ACI Materials Journal Sep- Oct*.
- Cwirzen, A., Penttala, V., Vornanen, C., 2008, *Reactive Powder Based Concretes: Mechanical Properties, Durability and Hybrid Use with OPC*, *Cemen and Concrete Research* 28, pp 1217-1226, Elsevier.
- Gaitero, J.J., Campilo, I., Guerrero, A., 2008, *Reduction of Calcium Leaching rate of Cement Paste by Addition of Silica Nanoparticles*, PP. 1112 - 1118, *Cement and Concrete Research* 38, Elsevier
- Khadiranaikar, R.B., and Muralan S.M., 2012, Factors Affecting The Strength of Reactive Powder Concrete (RPC) *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, Volume 3, Issue 2, July- December.
- Ming-Zhe, A., Li-Jun, Z., Quan-Xin, Y., 2008, Size Effecon Compressivie Strength of Reactive Powder Concrete, *Journal of China University of Mining and Technology, Journal Homepage: Www.Elsevier.Com/Locate/Advengsoft*.
- Mindess, S., 1981, *Concrete*, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Taylor, H.F.W., 1997, *Cement Chemistry*, London: Thomas Thelford Publishing,
- Uygunog˘lu, T., 2008, *Investigation of Microstructure and Flexure Behavior of Steel - Fiber Reinforce Concrete*, *Material and Structure* 41, pp 1441-1449.
- Yang. J., Hong-Bin, L., Jian, C., Yu-Dan, J., Pei-Huo, P., 2009, *Toughness and Characterization of Reactive Powder Concrete with Ultra-High Strength*, *Science in China Series E: Technological Science*, Vol. 52, No. 4, pp 1000 - 1018.
- Yazici, H., Yigiter, H., Karabulut, A.S., Baradan, B., 2008, Utilization of Fly Ash and Ground Blast Furnace Slag as an Alternative Silica Source in Reactive Powder Concrete, *Fuel*, PP 2401 - 2407, *Journal Homepage :www.fuelfirst.com, Elsevier*

