

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. *Reactive Powder Concrete (RPC)***

*Reactive Powder Concrete* merupakan sebuah material berkekuatan tinggi dan komposit berdaktilitas tinggi dengan sifat mutakhir yang dikembangkan oleh perusahaan Bouygues di Prancis pada tahun 1990-an. RPC adalah beton khusus dimana mikrostrukturnya dioptimalkan oleh gradasi tepat pada semua partikel dalam campuran beton untuk menghasilkan kepadatan maksimum beton tersebut. *Reactive Powder Concrete (RPC)* terdiri dari perkuatan serat, *superplasticizers*, campuran semen dan *silica fume* dengan rasio w/c sangat rendah dan pasir kuarsa halus sebesar 0,15-0,40 mm sebagai ganti agregat biasa. Faktanya, ini bukan beton karena tidak ada agregat kasar di dalam campuran semen. Tidak adanya agregat kasar dianggap oleh para penemu sebagai kunci aspek mikro dan kinerja RPC di Indonesia untuk mengurangi heterogenitas antara matriks berbasis semen dan agregat. RPC mewakili kelas baru semen Portland dengan kuat tekan lebih dari 150 MPa. Dengan adanya *steel fiber*, RPC bisa mencapai kuat lentur tinggi yaitu sampai 30-40 MPa.

Berdasarkan penelitian Song dan Liu (2016), perusahaan Bouygues di Prancis pada tahun 1993 mengembangkan sebuah beton tipe baru dari komposit berbasis material mutu tinggi yaitu *reactive powder concrete*. Belum lama sejak kemunculannya, RPC sudah berhasil diaplikasikan di bidang konstruksi teknik hanya dalam beberapa tahun, karena sifat mekanik dan durabilitas RPC yang tinggi.

RPC adalah jenis beton berkinerja tinggi dengan kekuatan ultra tinggi dan porositas rendah. RPC menghilangkan pemakaian agregat kasar pada campurannya sebagai tujuan untuk meningkatkan kekompakan, kestabilan komponen campuran, dan meminimalkan cacat internal pada material seperti ruang pori.

RPC pada dasarnya dibagi menjadi 2 kelas yaitu RPC200 dan RPC800. Kuat tekan daripada RPC200 yaitu sebesar 17-230 MPa, sedangkan untuk kuat tarik 20-50 MPa. RPC800 memiliki kuat tekan hingga 500-800 MPa dan kuat

tarik sebesar 45-140 MPa. Sifat mekanik RPC dapat pula ditingkatkan dengan menggabungkan *steel fiber* sebagai media untuk meningkatkan energi fraktur RPC menjadi 20000-40000 J/m<sup>2</sup>.

Kekuatan dan sifat mekanik RPC jika dibandingkan dengan beton konvensional jauh lebih besar, terlebih lagi rasio w/c yang rendah menghasilkan struktur pori yang baik dan porositas rendah berkontribusi untuk daya tahan (*durability*) RPC. Mengenai komposisi campuran RPC200 dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1. Komposisi campuran RPC200 (Song dan Liu, 2015)

Materi Penyusun	Jumlah (kg/m <sup>3</sup> )
Semen	884,3
<i>silica fume</i>	221,1
Air	148,2
<i>Superplasticizer</i>	27,6
Pasir	1105,4
Serat baja	150,0

## 2.2. Material Penyusun RPC

Beton mutu tinggi tercipta akibat dari kemajuan teknologi dalam bidang konstruksi, laju pembangunan semakin luas dan menuntut kebutuhan material untuk menjadi lebih mutakhir, baik dari segi kualitas maupun kuantitasnya. Oleh karena itu dilakukan penelitian dalam bidang teknologi beton mutu tinggi, guna meningkatkan kekuatan serta sifat-sifat lainnya. Suatu pencapaian pada penelitian beton mutu tinggi sekarang adalah penggunaan material pozzolanik dan material bersifat semen (*cementitious material*) dalam campuran beton, sehingga dapat menghasilkan beton dengan mutu yang lebih baik.

Material penyusun RPC antara lain terdiri dari semen *portland*, pasir kuarsa, tepung kuarsa, *silica fume*, serat baja (*steel fiber*), dan *superplasticizer*. RPC menghilangkan penggunaan agregat kasar (*coarse aggregate*) dalam campuran betonnya dan memperbanyak penggunaan serbuk berskala mikro seperti pasir kuarsa dan tepung kuarsa. Bahan tersebut digunakan untuk menciptakan struktur RPC yang padat tanpa pori untuk meningkatkan sifat mekanik.

### 2.2.1. Semen *Portland*

*Portland cement* adalah jenis semen senyawa hidrolis yang berikatan dengan kalsium silikat dan dicampur bersama *additive*, yaitu beberapa kristal senyawa kalsium sulfat dan bahan lainnya.

Berdasarkan penelitian Bediako dan Opoku (2015), semen portland adalah semen yang paling banyak digunakan di hampir setiap proyek konstruksi. Semen portland bereaksi secara kimiawi dengan air untuk mencapai *setting* dan sifat pengerasan saat digunakan dalam proyek konstruksi. Semen *portland* dipatenkan oleh Joseph Aspdin pada tahun 1824 dan dinamai berdasarkan tempat ditemukannya yaitu di pulau Portland di Inggris.

Produk semen *portland* dibuat dengan campuran batu kapur pada suhu sekitar 1450°C. Zat kalsium oksida sebagai pembentuk semen ini berasal dari batu kapur, kapur tulis, dan kerang tiram. Sedangkan zat silikat dan alumina berasal dari tanah liat, serpihan batuan dan terak.

Komposisi kimia semen *portland* melibatkan oksida besar dan kecil. Oksida utama pada semen ini meliputi CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sedangkan oksida minor yaitu MgO, SO<sub>3</sub>, dan beberapa oksida alkali seperti K<sub>2</sub>O dan Na<sub>2</sub>O. Senyawa lain seperti P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Cl, TiO<sub>2</sub>, MnO<sub>3</sub> juga bekerja sebagai komposisi pembentuk dalam semen *portland*. Keseluruhan oksida tersebut memiliki kinerja yang unik selagi semen *portland* berikatan dengan air (*setting*) pada saat berhidrasi dalam campuran beton. Penjelasan mengenai komposisi kimia dalam semen *portland* dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Komposisi kimia semen *portland* (Bediako dan Opoku, 2015)

Komponen	Minimum	Rata-rata	Maximum
SiO <sub>2</sub>	18,40	21,02	24,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16	2,85	5,78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,10	5,04	7,56
CaO	58,10	64,18	68,00
MgO	0,02	1,67	7,10
SO <sub>3</sub>	0,00	2,58	5,35
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,24	0,78
K <sub>2</sub> O	0,04	0,70	1,66
Alkali	0,03	0,68	1,24
Kapur bebas	0,03	1,24	3,68

### 2.2.2. Pasir Kuarsa (*Quartz Sand*)

Dalam pembuatan RPC digunakan pasir kuarsa (*quartz sand*) dengan ukuran partikel 150–600  $\mu\text{m}$ . Tujuan digunakan agregat dengan ukuran kecil adalah untuk meningkatkan kerapatan atau kekompakan dan memicu terbentuknya matriks beton ultra padat sehingga beton bisa mencapai kinerja yang tinggi.

Berdasarkan penelitian Divya *et al.* (2017), material kuarsa murni memiliki ciri tidak berwarna dan transparan layaknya seperti batuan beku dan hampir semua batuan metamorf dan sedimen. Silika merupakan bahan inti dari kuarsa dengan rumus kimia  $\text{SiO}_2$  yang memiliki kekerasan sebesar 7 pada skala Mohs. Bahan inti tersebut juga membuatnya memiliki ketahanan terhadap pelapukan fisik dan kimia. Durabilitas kuarsa membuatnya menjadi mineral dominan yang ada di alam. Kuarsa dapat menjadi pengganti pasir jika pasir menjadi langka dan fungsinya sebagai *fine aggregates* juga dapat menggantikan pasir. Berdasarkan penelitian ini pasir kuarsa dijadikan sebagai alternatif atau pengganti pasir biasa dalam campuran beton konvensional.

Kuarsa disebut sebagai mineral *sand-forming* karena kemampuannya untuk bertahan dalam serangan fisik maupun kimiawi. Penggunaan pasir kuarsa dalam campuran RPC dapat memberikan sokongan terhadap keawetan (*durability*) berupa ketahanan terhadap suhu dan serangan asam sulfat. Pasir kuarsa dapat ditemukan di Florida dan perbatasan antar benua.

Berdasarkan penelitian Divya *et al.* (2017), Proporsi pasir kuarsa dapat dilihat melalui massa jenis dan kehalusannya (*fineness*). Penjelasan mengenai perbandingan proporsi dari pasir kuarsa dengan agregat sebagai pengisi (*filler*) dalam campuran beton dijelaskan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Proporsi pasir kuarsa dan agregat (Divya *et al.*, 2017)

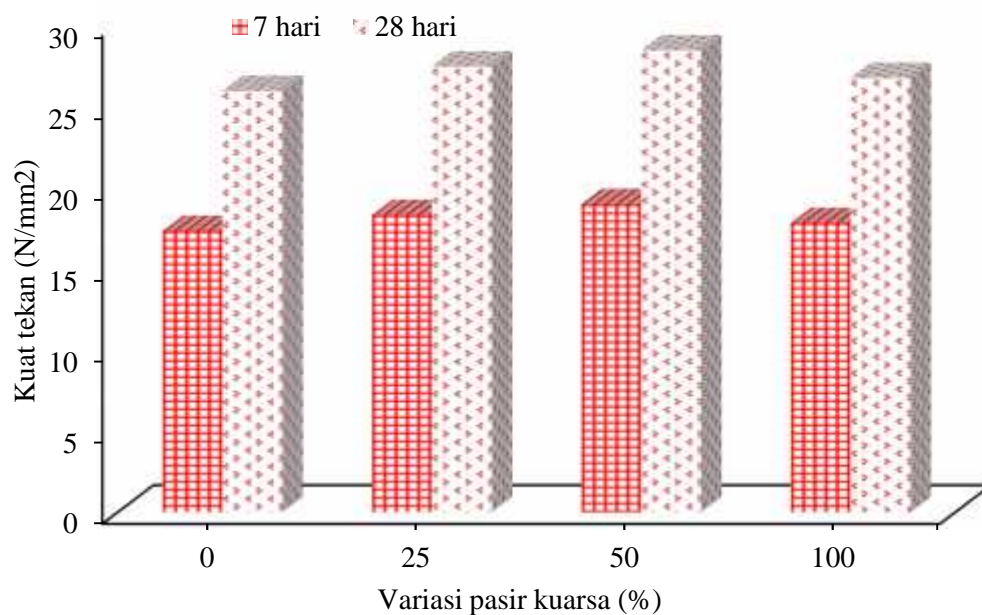
Material	Berat jenis	Daya serap air	Modulus kehalusan
Pasir kuarsa	2,45	1,98 %	4,20
Agregat halus (pasir biasa)	2,50	1,00 %	4,00
Agregat kasar (batu pecah)	2,60	0,60 %	5,94
Semen	3,10	-	-

Berdasarkan penelitian Divya *et al.* (2017), karena sifat unik dan karakteristik berbeda yang dimiliki oleh pasir kuarsa dan dilakukannya pengujian

dengan penambahan variasi pasir kuarsa pada beton konvensional maka didapatkan beberapa hasil dari pengujian mengenai pengaruh variasi pasir kuarsa terhadap sifat mekanik beton konvensional, yaitu pengujian kuat tekan, kuat lentur dan *young modulus* pada beton. Penjelasan dari pengujian kuat tekan beton yang menggunakan pasir kuarsa sebagai agregat halus (*fine aggregate*) dijelaskan pada Tabel 2.4 dan Gambar 2.1.

Tabel 2.4. Hasil uji kuat tekan terhadap variasi pasir kuarsa (Divya *et al.*, 2017)

Variasi pasir kuarsa (%)	Kuat tekan (N/mm <sup>2</sup> )	
	7 hari	28 hari
0	17,29	25,9
25	18,27	27,4
50	18,93	28,4
100	17,78	26,7

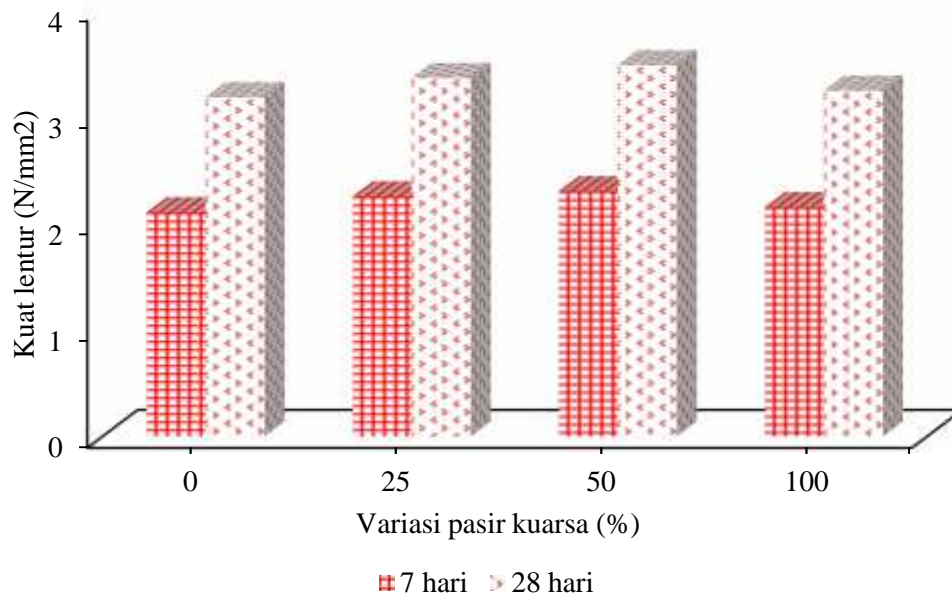


Gambar 2.1. Hasil uji kuat tekan terhadap variasi pasir kuarsa (Divya *et al.*, 2017)

Pengujian kuat lentur dilakukan untuk mendapatkan hasil daya tahan beton terhadap beban aksi yang diberikan dengan parameter dimensi beton yang digunakan serta untuk mengetahui kekuatan lentur maksimal yang dapat diterima oleh benda uji beton yang digunakan. Pengujian kuat lentur beton menggunakan pasir kuarsa dijelaskan pada Tabel 2.5 dan Gambar 2.2.

Tabel 2.5. Hasil uji kuat lentur terhadap variasi pasir kuarsa (Divya *et al.*, 2017)

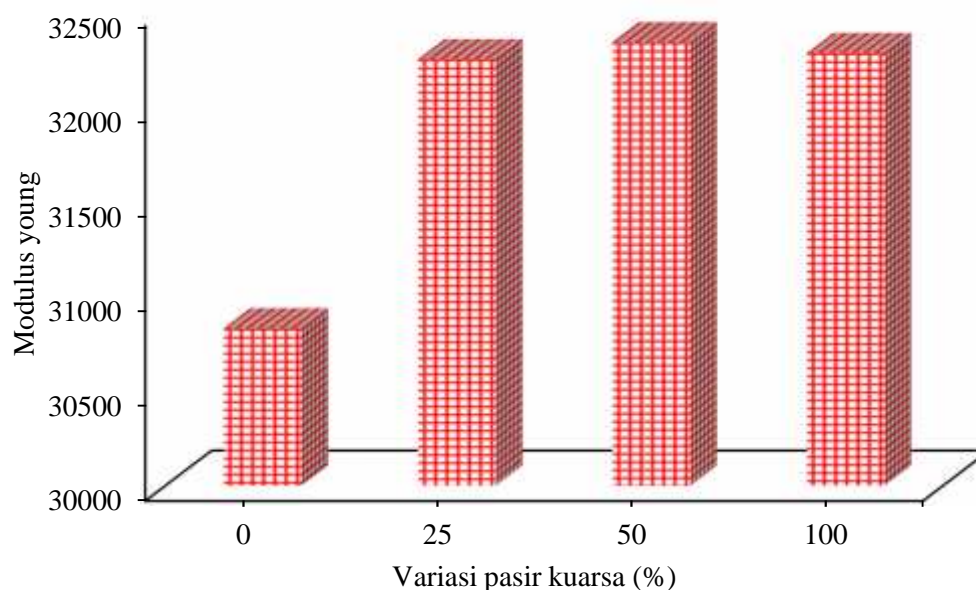
Variasi pasir kuarsa (%)	Kuat lentur (N/mm <sup>2</sup> )	
	7 hari	28 hari
0	2,10	3,18
25	2,25	3,36
50	2,30	3,48
100	2,15	3,24

Gambar 2.2. Hasil uji kuat lentur terhadap variasi pasir kuarsa (Divya *et al.*, 2017)

Hasil pengujian modulus elastisitas juga sangat dipengaruhi oleh variasi pasir kuarsa sebagai agregat halus pada beton konvensional umur 28 hari. Pengujian modulus elastisitas pengaruh variasi pasir kuarsa sebagai pengganti agregat halus (*fine aggregate*) terhadap sifat mekanik beton konvensional yang diuji saat 28 hari dijelaskan pada Tabel 2.6 dan Gambar 2.3.

Tabel 2.6. Hasil uji modulus elastisitas terhadap variasi pasir kuarsa (Divya *et al.*, 2017)

% Pasir kuarsa	Modulus Young
0	3.0827,15
25	3.2243,07
50	3.2332,12
100	3.2275,38



Gambar 2.3. Hasil uji modulus elastisitas terhadap variasi pasir kuarsa pada beton konvensional (Divya *et al.*, 2017)

Berdasarkan penelitian Zych (2014), Pasir kuarsa pada RPC dengan diameter partikel  $150\ \mu\text{m}$  -  $600\ \mu\text{m}$  memegang peranan sebagai agregat berskala mikron. Granulasi dari pasir kuarsa harus terus menerus menyediakan kekompakan pada semua partikel saat agregat mikron dicampur dengan kuarsa tanah. Pasir kuarsa yang ditambahkan dalam campuran RPC, jumlahnya hampir sama dengan fraksi semen dalam campuran beton tersebut.

### 2.2.3. Rasio air semen (*Water Cement Ratio*)

Rasio air semen merupakan indikator penting dalam perancangan campuran beton. Peranan dari rasio air semen terjadi saat proses pengikatan antara semen dan air yang menyebabkan proses hidrasi, proses hidrasi sendiri sangat dipengaruhi oleh rasio air dan semen dan memungkinkan timbulnya reaksi kimiawi yang dapat menyebabkan pengerasan dan memberikan efek lecek dalam pencampuran adukan beton. Peningkatan persentase air dalam adukan meningkatkan kelecakan dan pematatan, tetapi mereduksi daya tekan beton, menimbulkan *segregasi* dan *bleeding*, sebaliknya kecilnya jumlah air mengakibatkan kelecakan menurun dan beton sulit untuk dikerjakan.

Pada umumnya tiap partikel membutuhkan air agar plastis sehingga kelecakan meningkat. Jumlah air yang terserap pada permukaan partikel haruslah cukup dan sesuai, dan menyebabkan air tersebut mengisi ruang antar partikel. Partikel halus memiliki luas permukaan yang luas sehingga butuh persentase air yang banyak pula.

Mengenai rasio air semen pada RPC, rasio air semen yang dibutuhkan haruslah lebih dominan dikarenakan ketiadaan agregat kasar pada campurannya. Hal ini berguna agar RPC menjadi lebih kompak dan matriks beton menjadi lebih rapat sebagai peningkat kualitas dan daya tahan dari RPC. Penggunaan semen tipe 1 dan bahan *cementitious* seperti *silica fume* dan *steel fibre* dapat berfungsi sebagai pengganti agregat kasar dan menjadikan rasio air semen RPC menjadi lebih dominan, karena pada RPC yang dibutuhkan adalah rasio air semen tinggi untuk meningkatkan *workability* sedangkan sifat fisik maupun mekanis beton tetap pada performa terbaiknya.

Berdasarkan penelitian Bechtel *et al.* (2015), faktor air semen atau perbandingan antara air terhadap bahan *cementitious* pada beton segar sudah lama diketahui sebagai kunci dalam menentukan kualitas produk beton. Rasio air semen diperhitungkan melalui cara melakukan pembagian antara berat total semen dan berat air yang bebas yang digunakan dalam campuran. *Free water* atau air bebas adalah total air dikurangi air yang terserap oleh agregat. Rasio air semen memiliki implikasi pada kekuatan dan permeabilitas beton dan hal ini berpengaruh pada proses *shrinkage* yang terlihat pada proses perawatan beton.

Berdasarkan penelitian Apebo *et al.* (2013), beton meningkatkan kekuatannya dengan proses hidrasi antara air dan semen serta tambahan untuk membentuk rangkaian hidrat yang kompleks. Hidrasi awal pada beton mengubah partikel semen menjadi struktur partikel lemah dan dikelilingi oleh partikel air. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, yaitu pengaruh rasio air semen pada *compressive strength* dengan *over burnt bricks concrete*, hasil pengujian kuat tekan beton (*compressive strength test*) dengan variasi rasio air semen sebesar 0,30, 0,40, 0,50, dan 0,60 mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya rasio air semen yang diaplikasikan. Penelitian ini berkesimpulan bahwa semakin tinggi rasio air semen yang digunakan maka berat jenis dan kuat tekan pada beton



mengalami penurunan. Hasil pengujian pada penelitian ini dijelaskan pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7. Hasil uji kuat tekan beton terhadap variasi rasio air semen (Apebo *et al.*,2013)

Massa jenis (kg/m <sup>2</sup> )	Rasio air semen (w/c)	Kuat tekan beton (N/mm <sup>2</sup> )		
		7 hari	14 hari	28 hari
2.370	0,38	28,8	35,7	38,2
	0,40	25,1	27,6	30,8
	0,50	22,8	25,1	29,3
	0,60	19,4	21,0	23,1
2.320	0,40	33,8	35,6	35,9
	0,50	31,1	32,0	32,7
	0,55	21,7	23,5	24,2
	0,60	19,9	21,3	22,4
2.260	0,40	35,0	35,6	35,9
	0,50	32,5	34,3	35,4
	0,55	20,1	24,0	27,6
	0,60	18,7	22,6	24,9
2.190	0,40	29,9	33,6	34,7
	0,50	27,9	30,2	32,5
	0,55	25,2	29,3	31,3
	0,60	21,0	23,6	27,6
2.100	0,40	24,5	27,0	29,5
	0,50	20,3	25,8	28,4
	0,55	19,6	25,4	26,8
	0,60	19,2	20,3	22,4

#### 2.2.4. Tepung Kuarsa

Tepung kuarsa (*quartz powder*) yang dianjurkan untuk diaplikasikan pada beton mutu tinggi seperti RPC dan lainnya haruslah berjenis *crystalline* dengan ukuran partikel yang sangat kecil yaitu 5µm -25 µm. Berdasarkan penelitian Zych (2014), tepung kuarsa yang digunakan untuk RPC memiliki diameter ukuran berkisar antara 0,1µm -100 µm. Granulasi tepung kuarsa yang merupakan jenis bahan *cementitious* haruslah menyamai granulasi daripada semen. Tepung kuarsa yang baik adalah yang berasal dari tanah kuarsa dengan kualitas baik yang berdiameter kurang dari 5 µm dan dapat bereaksi dengan Ca<sup>2+</sup> ion. Berdasarkan penelitian Khadiranaikar and Muralan (2012), tepung kuarsa yang digunakan pada

RPC berukuran mulai dari 10  $\mu\text{m}$  sampai 45  $\mu\text{m}$ . Berat jenis tepung kuarsa adalah 2,6  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

Menurut penelitian Sarika *et al.* (2015), tepung kuarsa yang dipergunakan untuk desain campuran RPC haruslah melalui rangkaian pengujian seperti pemeriksaan temperatur (*temperature cured*) termasuk *autoclaving* pada kondisi tekanan tinggi. Penambahan silika sangat dibutuhkan untuk memodifikasi rasio senyawa CaO/SiO dalam campuran yang berikatan. Dalam kasus ini bubuk tepung kuarsa terpecah dan membelah menjadi sangat kecil dengan ukuran mikron yaitu berkisar antara 10  $\mu\text{m}$  – 15  $\mu\text{m}$  dan siap berikatan dengan campuran RPC.

### 2.2.5. Silica Fume

*Silica fume* telah lama digunakan sebagai *admixture* pada beton konvensional maupun beton mutu tinggi. *Silica fume* digunakan sebagai pengganti sebagian dari semen. *Silica fume* merupakan hasil sampingan dari produk logam silikon atau *alloy ferosilikon*. Menurut standar ASTM C1240, bahan ini merupakan material pozzolan yang halus dimana komposisi silika lebih banyak dihasilkan dari tanur tinggi atau sisa produksi silikon. Persentase penggunaan *silica fume* yang ditambahkan pada RPC biasanya berkisar 10%, 15%, 20%, 25% dan 30% sebagai pengganti penggunaan semen yang berlebihan, dikarenakan sifatnya yang menyerupai semen (*cementitious*) namun lebih baik kualitasnya. Komposisi kimia dan persyaratan fisik yang dikandung *silica fume* menunjukkan bahwa bahan ini mengandung komposisi kimia dan persyaratan fisik yang dijelaskan pada ASTM C1240. (Hassani, 2014).

Berdasarkan penelitian Sarika *et al.* (2015), kandungan pozzolan silika yang terkandung pada *silica fume* sangat reaktif bagi RPC. Hal ini sesuai dengan persyaratan yang diberikan dari ASTM dan *European Commitee for Standardisation*.

Berdasarkan penelitian Amudhavalli dan Mathew (2012), *silica fume* yang digunakan dalam beton mengacu pada ASTM-C(1240-2000), bahwa *silica fume* digunakan sebagai pengganti semen. Berikut proporsi dari *silica fume* yang dapat digunakan sebagai pengganti agregat halus yang dilihat pada Tabel 2.8.

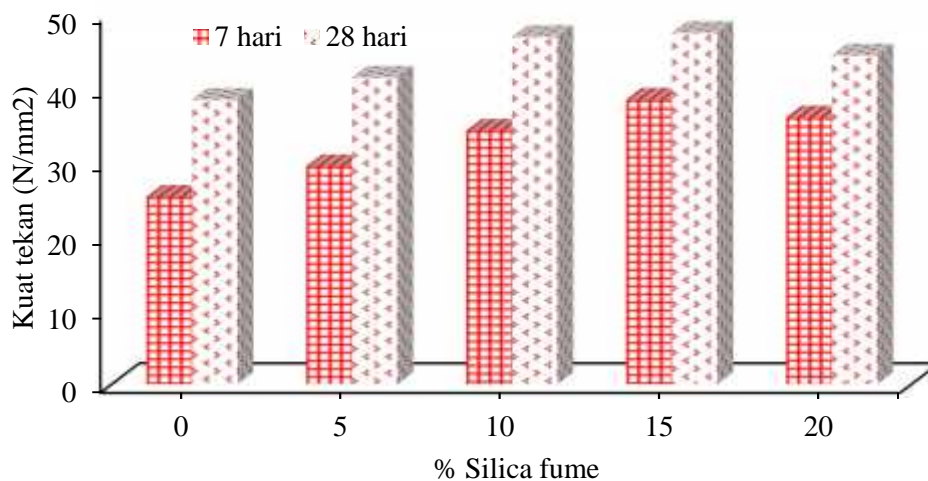
Tabel 2.8. Proporsi *silica fume* sebagai pengganti agregat halus (Amudhavalli dan Mathew, 2012)

Macam proporsi	Kandungan
Berat jenis	2,2
massa jenis padat ( $\text{kg/m}^3$ )	576
Ukuran (mikron)	0,1
Luas area ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	20,000
$\text{SiO}_2$	(90-96)%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	(0.5-0.8)%

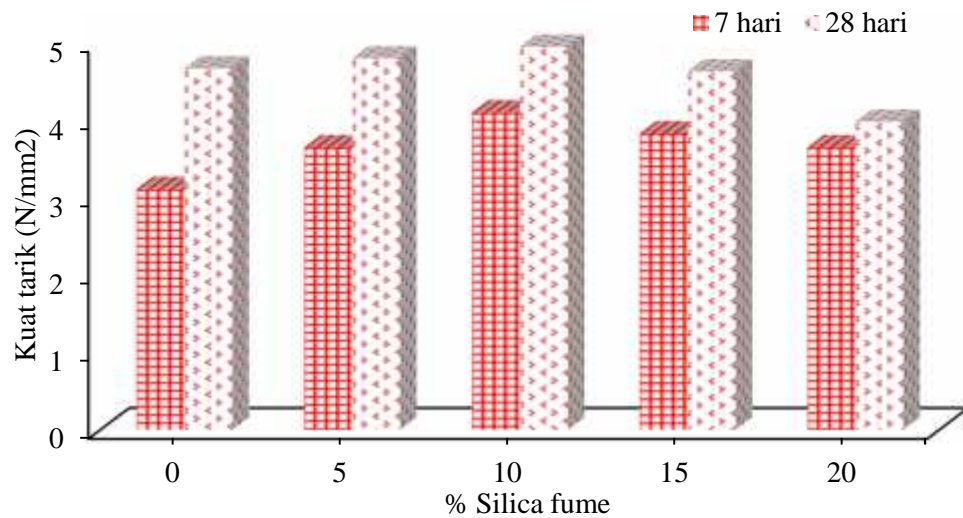
Berdasarkan penelitian Amudhavalli dan Mathew (2012), persentase *silica fume* sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik beton yaitu kuat tekan, kuat tarik dan kuat lentur. Hasil pengujian terhadap sifat mekanik disajikan pada Tabel 2.9 dan Gambar 2.4, Gambar 2.5, dan Gambar 2.6.

Tabel 2.9. Hasil pengujian kuat tekan dengan variasi *silica fume* (Amudhavalli dan Mathew, 2012)

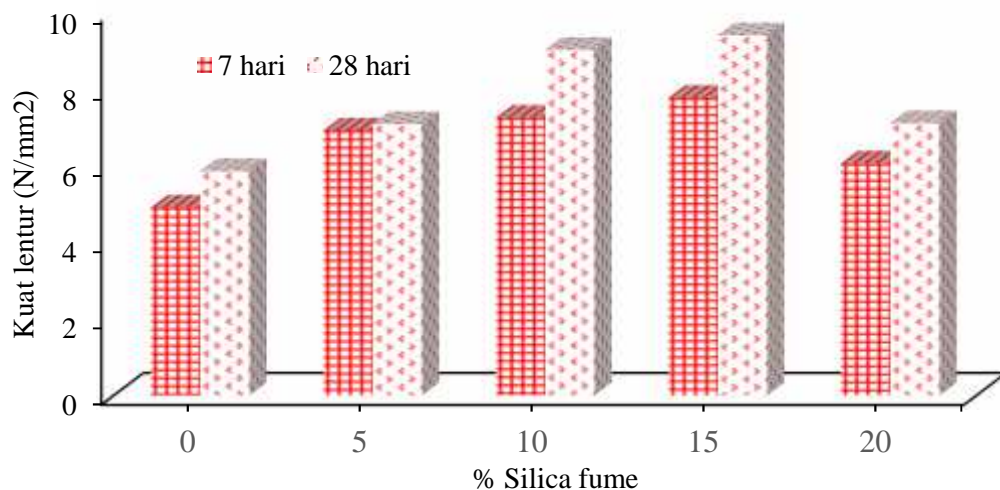
Campuran No.	silika fume (%)	Kuat tekan ( $\text{N/mm}^2$ )		Kuat tarik ( $\text{N/mm}^2$ )		Kuat lentur ( $\text{N/mm}^2$ )	
		7 hari	28 hari	7 hari	28 hari	7 hari	28 hari
1	0	25,21	38,30	3,11	4,67	4,89	5,84
2	5	29,33	41,29	3,65	4,8	6,90	7,07
3	10	34,12	46,76	4,10	4,95	7,23	9,00
4	15	38,30	47,30	3,83	4,63	7,75	9,38
5	20	35,90	44,27	3,65	3,98	6,04	7,09



Gambar 2.4. Hasil uji kuat tekan dengan variasi *silica fume* (Amudhavalli dan Mathew, 2012)



Gambar 2.5. Hasil uji kuat tarik dengan variasi *silica fume* (Amudhavalli dan Mathew, 2012)



Gambar 2.6. Hasil uji kuat lentur dengan variasi *silica fume* (Amudhavalli dan Mathew, 2012)

Berdasarkan hasil uji kuat tekan dan kuat lentur, dapat disimpulkan bahwa persentase *silica fume* dengan kuat tekan paling tinggi adalah 15 % pada umur 7 dan 28 hari. Sedangkan pada pengujian kuat tarik didapatkan persentase *silica fume* yang menimbulkan kuat lentur paling besar adalah 10 % pada umur 7 dan 28 hari. Sedangkan pada pengujian kuat lentur didapatkan persentase *silica fume* sebesar 15 % menimbulkan kuat lentur dengan nilai terbesar pada umur ke-7 dan 28 hari pengujian.

### 2.2.6. *Superplasticizer*

Superplasticizer atau nama lainnya *high range water reducer* adalah bahan kimia pengurang air pada campuran beton, baik beton konvensional maupun beton mutu tinggi seperti RPC. Dengan penggunaan *superplasticizer*, maka didapatkan adukan campuran beton dengan rasio air semen lebih rendah pada nilai viskositas adukan sehingga membuat beton mudah dikerjakan namun dengan perbandingan antara semen dan air sama, kuat tekan yang dimiliki beton justru menjadi lebih tinggi, bukan sebaliknya. Penggunaan *superplasticizer* pada RPC sangat penting, dikarenakan sulitnya beton tipe RPC untuk menjadi mortar dalam beberapa kasus pembuatan benda uji.

Berdasarkan penelitian Zych (2014), *superplasticizer* yang digunakan pada RPC digunakan dikarenakan rasio air semen pada RPC sangat rendah dan adanya serat pada beton juga dapat menurunkan kelecakan, sehingga penambahan *superplasticizer* diharapkan dapat memperbaiki kelecakan pada RPC.

Menurut ASTM C494, *Superplasticizer* adalah media pengurang air yang sangat efektif. Dengan adanya peran *Superplasticizer* ini maka didapatkan adukan dengan rasio semen dan air yang rendah terhadap nilai viskositas yang relatif sama atau bahkan dengan viskositas yang relatif *fluids* dengan rasio semen dan air yang juga sama, maka terjadi peningkatan daya tekan pada beton. Terdapat 7 jenis *admixture* yang mengacu pada klasifikasi ASTM C494-82.

#### 1. Tipe A : *Water Reducer* (WR) atau *plasticizer*

Merupakan *additive* yang digunakan sebagai media pengurang jumlah air pada campuran beton. Hasil dari penggunaannya yaitu didapatkan adukan yang memiliki rasio air semen yang lebih rendah dengan nilai viskositas sama, ataupun nilai viskositas yang lebih encer dengan rasio air semen yang sama.

#### 2. Tipe B : *Retarder*

Merupakan *additive* yang digunakan sebagai media untuk memperlambat atau menghambat proses ikatan (*setting time*) pada campuran beton. Bahan tambah ini menjadi sangat berguna saat diperlukannya rentang waktu antara proses *mixing* dengan proses bongkar muat beton. Penggunaan *retarder* juga berguna apabila rentang jangkauan *batching plant* dengan lokasi pengecoran cukup jauh untuk ditempuh, sehingga membutuhkan waktu bagi beton untuk tidak mengeras.

### 3. Tipe C : Accelerator

Merupakan *additive* yang digunakan sebagai media yang mempercepat waktu *setting* beton. Pengaplikasian *accelerator* yaitu saat memasukkan pada campuran dilakukan didaerah yang memerlukan pengerasan beton segera.

### 4. Tipe D : *Water Reducer Retarder* (WRR)

Merupakan *additive* yang memiliki 2 fungsi yaitu sebagai media pengurang persentase air dan melambatkan waktu *setting*.

### 5. Tipe E : *Water Reducer Accelerator*

Merupakan *additive* yang memiliki kegunaan yaitu dapat mengurangi persentase air dan mempercepat waktu *setting*.

### 6. Tipe F : *High Range Water Reducer* (HRWR)

Merupakan *additive* yang digunakan sebagai komponen yang berfungsi ganda, yaitu sebagai media pengurang persentase air dan meningkatkan waktu *setting* antara air+semen dan *setting* beton. *Additive* pada umumnya diaplikasikan dengan jumlah ringan jika dibandingkan dengan material campuran utama, dengan ini tingkat kesulitan dalam hal kontrol menjadi lebih tinggi dari pengerjaan beton konvensional. Hal ini bertujuan agar menghindari terjadinya kelebihan dosis pada beton, karena dosis yang berlebih bisa berimbas pada turunnya kualitas dan performa beton.

### 7. Tipe G : *Water Reducing, High Range and Retarding*

Merupakan *additive* yang digunakan sebagai media tipe G, yaitu berfungsi sebagai pengurang jumlah air yang digunakan dalam campuran beton dengan tipe tertentu serta menghambat *setting time* atau waktu ikat beton.

## 2.3. Komposisi Pembentuk RPC (*Mix Design of RPC*)

Penelitian ini menggunakan *mix design* yang mengacu pada jurnal dari penelitian terdahulu karena dari semua hasil penelitian tentang *reactive powder concrete* (RPC) yang telah dilakukan, belum ada satu pun komposisi penyusun RPC yang dijadikan acuan standar *mix design* penyusun RPC untuk skala nasional (SNI) maupun internasional (ASTM). Komposisi campuran material yang digunakan dapat dilihat pada penelitian eksperimental yang telah dilakukan Khulgadai et all (2015), mengenai peninjauan sifat mekanik dan mikrostruktur

pada RPC dengan material *ternary pozzolanic*. Pada penelitian ini digunakan komposisi campuran seperti yang tertera dalam Tabel 2.10.

Tabel 2.10. Komposisi campuran RPC (Khulgadai *et al.*, 2015)

Mix	SF25	B40	B30F10	B10F30
Semen (kg/m <sup>3</sup> )	868	773	766	752
Silika fume (kg/m <sup>3</sup> )	217	193	192	188
BF slag (kg/m <sup>3</sup> )	-	309	230	75
Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	77	226
0,3-0,5 mm kuarsa (kg/m <sup>3</sup> )	582	520	504	513
0,15-0,3 mm kuarsa (kg/m <sup>3</sup> )	174	155	153	150
0-45 $\mu$ m bubuk kuarsa (kg/m <sup>3</sup> )	174	155	153	150
Serat baja (kg/m <sup>3</sup> )	240	240	240	240
Polypropylene fiber (kg/m <sup>3</sup> )	8	8	8	8
Super-plasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	52	46	46	45
Air (kg/m <sup>3</sup> )	165	147	146	143
Rasio air semen	0,19	0,19	0,19	0,19
Rasio air pengikat	0,19	0,14	0,14	0,14
Meja alir (mm)	145	135	136	135

Berdasarkan penelitian Sarika *et al.* (2015), mengenai studi terhadap proporsi RPC menjelaskan mengenai *mix design* RPC yang memiliki variasi terhadap penggunaan agregat. Pada penelitian ini digunakan komposisi campuran RPC dengan variasi agregat yang digunakan dijelaskan pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11. Komposisi campuran RPC (Sarika *et al.*, 2015)

Material	Proporsi campuran (kg/m <sup>3</sup> )
Semen	1.000,0
Silika fume	225,0
Tepung kuarsa	252,0
Rasio air pengikat	0,2
Air	245,0
Serat baja	30,6
Superplasticizer	49,0
Agregat (2,36mm-1,18mm)	700,0
Agregat (1,18mm-600 $\mu$ )	150,0
Agregat (600 $\mu$ - 0)	100,0

Berdasarkan penelitian yang sama, prosedur pencampuran pada *job mix* yang telah direncanakan yaitu semua bahan yang terdiri dari air, semen, agregat kasar dan agregat halus dicampur dalam keadaan kering selama 2 menit, lalu

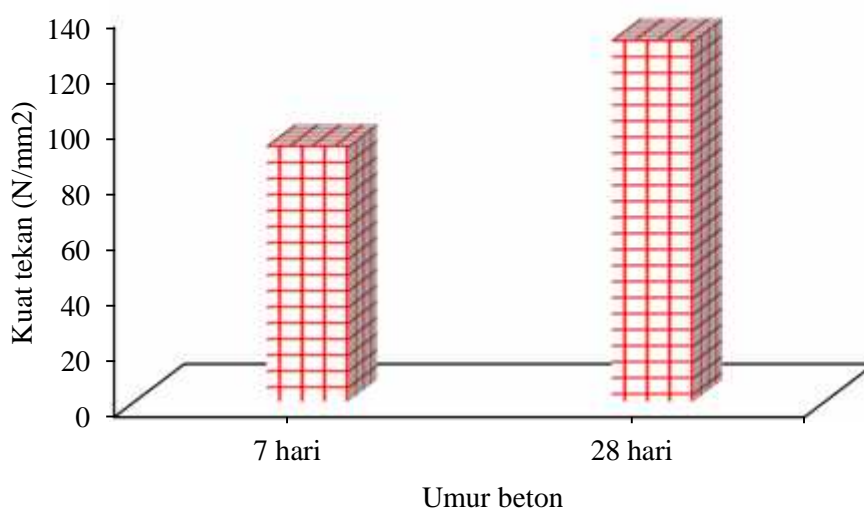
sekitar 80% air dimasukkan dan dicampur selama 3 menit, kemudian dilanjutkan dengan menambahkan 15% air dan 70% bahan *superplasticizer* dengan menggunakan *mixer* hingga kurang lebih 1 menit. Sisa air dan bahan *superplasticizer* dicampurkan dan kemudian diaduk selama 4 menit. Serat baja (*steel fibre*) ditambahkan dan dicampur selama kurang lebih 1 menit dengan distribusi pencampuran bahan desain campuran beton yang seragam. Keseluruhan tahap pencampuran memakan waktu pencampuran total selama 14 menit.

Benda uji yang masih berbentuk *fresh concrete* diuji *slump flow* untuk menganalisis seberapa encer desain campuran beton yang telah dibuat menjadi benda uji dan didapatkan diameter tumpahan sebesar 260 mm. Pengujian kuat tekan pada beton yang telah berumur 7-28 hari dijelaskan pada Tabel 2.12.

Tabel 2.12. Hasil pengujian RPC terhadap *compressive strength* pada umur 7 hari dan 28 hari (Sarika *et al.*, 2015)

Tipe beton	Kuat tekan (N/mm <sup>2</sup> )	
	7 hari	28 hari
RPC	92	130

Berdasarkan hasil uji pada Tabel 2.13, disimpulkan bahwa kuat tekan pada umur 28 hari lebih besar ketimbang saat benda uji berumur 7 hari dengan benda uji serupa.



Gambar 2.7. Hasil pengujian beton segar RPC terhadap *compressive strength* (Sarika *et al.*, 2015)



## **2.4. Pengujian Beton Segar (*Fresh Concrete*)**

Pengujian beton segar pada RPC sangat diperlukan karena sifat beton segar sangat mempengaruhi kualitas beton saat telah mencapai pengerasan sempurna. Pengujian ini bertujuan agar campuran dan sifat beton yang dihasilkan sesuai dengan desain dan rencana.

### **2.4.1. Pengujian *Slump***

*Slump test* adalah pengujian paling sederhana dan paling umum dijumpai dan digunakan karena parameter baik atau tidaknya kelecakan beton terlihat saat pengujian *slump*. Berkurangnya kelecakan akibat cuaca panas disebut sebagai *slump loss*. Pengujian *slump* merupakan metode pengujian empiris yang bertujuan untuk menentukan konsistensi kekakuan dari campuran beton segar dan nilai *workability* beton. Pengujian *slump* yang dipakai secara intensif di lapangan bertujuan untuk mengetahui keseragaman campuran beton sebelum dilakukan pencetakan benda uji mengacu pada SNI 1972-2008.

Kadar air pada campuran beton harus diperhatikan karena dapat menentukan mutu beton dan *workability*. Campuran beton memiliki banyak air menghasilkan beton mutu rendah dan waktu *setting* semakin lama. Campuran beton yang terlalu kering menyebabkan sulitnya pengerjaan atau tingkat *workability* rendah sehingga adukan tidak tercampur merata.

Berdasarkan penelitian Athulya (2016), *slump flow test* digunakan untuk menilai aliran bebas horizontal dari beton segar RPC tanpa adanya penghalang. Metode ini didasarkan pada metode uji untuk menentukan nilai kemerosotan pada campuran RPC. Diameter dari kemerosotan campuran diukur sebagai parameter kelecakan campuran.

### **2.4.2 *Setting Time***

Waktu ikatan atau *setting time* adalah waktu yang diperlukan pasta semen yaitu air dan semen untuk berikatan dan mengeras, mulai sejak air dan semen dicampurkan lalu jadilah pasta semen dan terjadilah waktu ikat hingga pasta semen cukup kaku untuk menahan beban tekan. *Setting time* merupakan suatu waktu yang dibutuhkan untuk melakukan suatu proses hidrolisis atau binding

(ikat) antara air dan semen, dimana hingga suatu waktu tertentu, beton tersebut sudah memiliki kekuatan tertentu maupun kemampuan untuk menahan tekan. Ada dua jenis waktu ikat semen dalam ASTM C191-04, yaitu:

1. Waktu *setting* awal (*initial setting time*)

Waktu saat dimana air dan semen bercampur dan berikatan, lalu menjadi pasta semen hingga sifat keplastisan campuran tersebut hilang.

2. Waktu *setting* akhir (*final setting time*)

Waktu dari saat dimana proses pembentukan pasta semen hingga proses beton mengalami perkerasan.

Pengujian *setting time* pada waktu ikat awal bertujuan untuk mengetahui rentang waktu yang dibutuhkan oleh semen dan air untuk menghasilkan campuran *binder* secara baik. Pengujian *initial setting time* pada ASTM C191-04 didapat pada penurunan 25 mm dan *final setting time* didapat pada pasta keras atau pada penurunan 40 mm.

## 2.5. Perawatan Beton (*Curing Treatment*)

*Curing* atau perawatan dapat diartikan sebagai metode perawatan beton, yang memiliki tujuan untuk menjaga beton yang baru saja mengalami waktu ikat dan mengeras agar tak segera mengalami *water loss* serta untuk membuat beton tetap pada kondisi lembab dan temperatur dan waktu ikat sudah terpenuhi saat tahap penyelesaian. Pengerjaan ini bertujuan untuk melihat kondisi reaksi hidrasi yang telah termasuk *additive* bisa bekerja langsung dengan baik hingga mendapatkan kualitas beton yang sesuai rencana dan mengurangi kemungkinan *shrinkage* pada permukaan beton akibat *water loss*.

Perawatan beton diterapkan sesaat setelah beton mengeras atau fase *hardening* yaitu setelah pelepasan beton pada cetakan saat beton berumur dengan umur yang telah ditentukan dengan maksud untuk memastikan kondisi campuran beton masih terjaga.

Berdasarkan penelitian Dashti (2015), metode perawatan pada RPC dilakukan dengan banyak cara antara lain *water curing*, *hot curing*, dan *steam curing* dengan temperatur perawatan berbeda. Ketiga metode perawatan tersebut dilakukan untuk melihat hasil perbedaan sifat mekanik pada RPC. Perawatan

dengan metode *hot* dan *steam curing* menunjukkan proses hidrasi aktif pada waktu yang lama. Reaksi pozzolanik juga dipercepat oleh suhu pengeringan yang tinggi dan secara langsung mempengaruhi kuat tekan RPC. Kuat tekan RPC dengan metode *hot* dan *steam curing* lebih tinggi daripada perawatan dengan metode *water curing* dan komposisi C-H-S juga berubah seiring berubahnya temperatur perawatan.

## **2.6. Pengujian Beton Keras**

Sifat-sifat mekanik beton segar (*fresh concrete*), umumnya berkaitan dengan kemudahan pengerjaan atau kelecakan, yang biasanya ditunjukkan dengan nilai slump beton segar melalui pengujian dengan kerucut. Sifat beton segar lainnya seperti waktu yang digunakan beton segar untuk melakukan *setting time* (waktu ikat) dan pengujian lain yang diukur saat beton masih belum mengalami *setting*.

Setelah beton mengalami *setting*, sesuai standar *setting* biasanya pada umur 28 hari, dilakukan pengujian terhadap sifat mekanis seperti *compressive strength*, *splitting strength*, *flexural strength* dan *young modulus*. Sifat mekanik juga sangat bergantung pada kondisi saat beton masih dalam keadaan *fresh* yaitu saat pencampuran, pengadukan dan proses perawatan.

### **2.6.1. Pengujian Kuat Tekan (*Compressive Strength Test*)**

Komposisi campuran, kualitas dari material yang digunakan, serta prosedur pengerjaan dan tenaga kerja yang benar dan rapi berpengaruh langsung pada *compressive strength* pada beton. *Compression strength test* pada penelitian ini dilakukan dengan memakai media silinder berukuran 20x10 cm dengan kondisi beton telah mengeras dan diuji pada umur 28 hari. Pengujian kuat tekan dilakukan setelah dilakukan perawatan pada benda uji.

Pada pengujian kuat tekan pada penelitian ini menggunakan ASTM C 39, dengan parameter luas penampang dari benda uji dengan kuat tekan maksimum yang dapat dipikul benda uji. Pengujian dilakukan hingga benda uji mengalami *crack* atau hingga *crush* (pecah). Perhitungan kekuatan tekan beton dengan perumusan sebagai berikut.

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

dimana:

- $f_c'$  = kuat tekan (N/mm<sup>2</sup>)  
 P = gaya (N)  
 A = luas permukaan (mm<sup>2</sup>)

### 2.6.2. Pengujian Kuat Tarik Belah (*Splitting Tensile Strength Test*)

Pada pengujian kuat tarik belah pada penelitian ini menggunakan ASTM C 496–96, dengan parameter yaitu dimensi benda uji dan beban maksimum yang dapat dipikul oleh benda uji. Perhitungan kekuatan tarik belah beton jika dijabarkan dalam rumus yaitu.

$$f_t = \frac{2P}{f \cdot L_s \cdot D} \quad (2.2)$$

dimana:

- $f_t$  = kuat belah (N/mm<sup>2</sup>)  
 P = beban max yang diberikan (N)  
 D = diameter cetakan (mm)  
 Ls = tinggi cetakan (mm)

### 2.6.3. Pengujian Kuat Lentur (*Flexural Strength Test*)

*Flexural strength test* merupakan pengujian yang menilai besarnya kuat tarik tak langsung yang berasal dari benda uji yang berbentuk balok dengan pemberian pembebanan pada titik sentrik beton tersebut. Parameter yang digunakan dalam pengujian tersebut berkaitan dengan dimensi benda uji dan beban aksi yang diberikat saat pengujian. Proses pembebanan yaitu dengan meletakkan benda uji secara vertikal terhadap meja *compressing*, lalu mesin menekan dan hasil bacaan dapat dilihat.

Pengujian terhadap sampel beton untuk mendapatkan nilai tegangan lenturnya dilakukan mengacu pada standar ASTM C 78–02, adalah uji kuat lentur menggunakan metode *third point loading*.

$$f_r = \frac{P \times L}{(b \times d^2)} \quad (2.3)$$

dimana:

$f_r$  = kuat lentur (kg/cm<sup>2</sup> atau N/mm<sup>2</sup>)

$P$  = gaya tekan (kg atau N)

$L$  = panjang balok (cm atau mm)

$b$  = tinggi balok (cm atau mm)

$d$  = tebal Balok (cm atau mm)

## 2.7. Pengujian Ketahanan Sulfat RPC

Keawetan (*durability*) adalah daya tahan beton untuk menghadapi berbagai macam kondisi dimana beton tersebut direncanakan dan ditempatkan, tetapi tanpa mengalami kerusakan yang berarti selama jangka waktu layanannya (*servicing time*). Keawetan beton dapat dipengaruhi oleh faktor fisik maupun kimia. Pengaruh fisik diakibatkan oleh perubahan iklim dan cuaca pada lokasi penempatan beton, sedangkan pengaruh kimia disebabkan oleh penetrasi bahan kimiawi seperti larutan atau senyawa kimia yang masuk ke dalam beton dan merusak komposisi material yang ada di dalamnya. Terkhusus saat kondisi lingkungan dan iklim yang sangat ekstrem seperti pada pabrik nuklir, kondisi wilayah gurun maupun laut dengan kadar garam tinggi.

Struktur beton yang kontak langsung dengan senyawa tersebut dapat memunculkan sedikit demi sedikit kegagalan pada perubahan fisik akibat dari proses kimia dan fisika yang pada akhirnya menimbulkan efek retak (*crack*) pada permukaan dan struktur dalamnya.

*Crack* pada beton meningkatkan *permeabilitas* beton dengan masuknya air kedalam beton yang telah mengeras, dan juga menimbulkan jejak aliran yang otomatis membuat *permeabilitas* beton. *Crack* yang semakin besar dapat memungkinkan penetrasi air atau serangan ion kimia yang berbahaya masuk ke dalam struktur beton tersebut.

Kegagalan atau kerusakan pada beton sering dijumpai akibat perpindahan senyawa kimia yang mengandung kadar garam tinggi yang menimbulkan tingkat korosi pada beton hingga dapat merusak tulangan beton atau bahkan beton itu

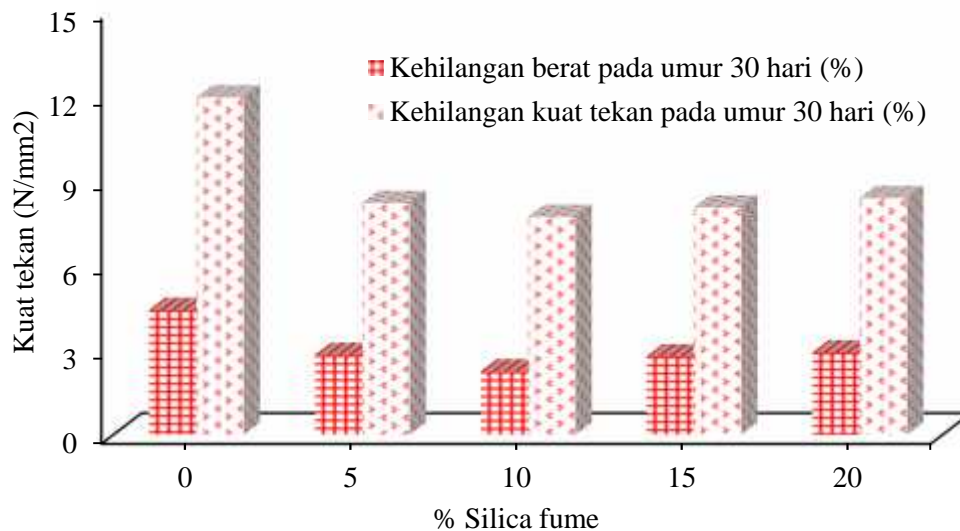
sendiri. Akibat tidak sempurnanya proses ikatan antara semen-air dan adanya penyerapan berlebih pada beton, akhirnya beton memiliki tingkat porositas tinggi pada bagian permukaan dan sistem pori yang lebih kasar ketimbang bagian inti beton sendiri yang memungkinkan cairan kimia dapat masuk dengan mudah ke dalam struktur beton. Sulfat adalah salah satu bentuk senyawa kimia yang sering menyerang beton. Pabrik kertas dan reaktor nuklir merupakan contoh nyata dimana bangunan berstruktur beton bersentuhan langsung dengan limbah kimia yang mengandung senyawa sulfat didalamnya.

Untuk mengetahui mengenai bagaimana pengujian terhadap ketahanan sulfat pada struktur beton, harus berdasarkan beberapa penelitian terdahulu dikarenakan masih sedikitnya penelitian yang berkaitan dengan ketahanan terhadap berbagai jenis asam terutama asam sulfat. Berikut adalah salah satu contoh penelitian mengenai pengaruh *silica fume* terhadap kekuatan dan durabilitas terhadap beton konvensional.

Berdasarkan penelitian Amudhavalli *et al.* (2012), pengaruh asam pada beton disebabkan adanya konversi senyawa kalsium menjadi garam kalsium yang mengandung asam dan dapat menghancurkan struktur beton. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, persentase kehilangan daya tekan beton menjadi 11,91%, 8,18%. Dengan demikian penggunaan *silica fume* ternyata dapat meningkatkan daya tahan terhadap serangan asam. Hal ini dipicu karena silika yang terdapat pada *silica fume* yang dikombinasikan dengan kalsium hidroksida dan mengurangi partikel beton yang rentan terhadap serangan asam. Berikut adalah data tabulasi mengenai efek dari serangan asam terhadap berat dan kuat tekan beton, yang dijelaskan pada Tabel 2.13 dan Gambar 2.8.

Tabel 2.13. Efek dari serangan asam terhadap berat dan kuat tekan beton (Amudhavalli *et al.* 2012)

Sl.No	Silika fume %	Kehilangan berat (%) pada umur 30 hari	Kehilangan kuat tekan (%) pada umur 30 hari
1	0	4,4	11,91
2	5	2,81	8,18
3	10	2,23	7,69
4	15	2,76	8,02
5	20	2,9	8,35



Gambar 2.8. Efek dari pengaruh asam terhadap berat dan kuat tekan beton (Amudhavalli *et al.*, 2012)

### 2.7.1. Perubahan Berat

Kondisi berat pada benda uji beton yang direndam dalam cairan sulfat mengalami perbedaan dari berat awal, hal ini dikarenakan cairan sulfat berpenetrasi masuk ke dalam celah atau pori dari beton sehingga merusak keseimbangan campuran beton dan berpengaruh langsung pada penurunan berat dan kuat tekan beton.

Berdasarkan penelitian Ramasamy (2011), penurunan berat pada benda uji beton yang dipenetrasi dengan cara direndam di dalam cairan sulfat dapat dilihat berdasarkan parameter berapa lama benda uji tersebut direndam dalam cairan sulfat. Penelitiannya dilakukan dengan cara melakukan perendaman berkala selama 60 hari dan 90 hari. Durasi perendaman tersebut sangat berpengaruh terhadap kuat tekan, dan berubahnya berat pada beton. Semakin lama benda uji direndam, maka perubahan semakin terlihat jelas, yang diakibatkan dengan semakin lamanya waktu penetrasi dari cairan sulfat yang menembus pertahanan benda uji dan merusak keseimbangan proporsi campuran dan mikrostruktur benda uji. Dalam penelitian ini menjelaskan perubahan berat yang terjadi pada benda uji yang direndam dalam cairan sulfat yang dilakukan selama 60-90 hari dengan *superplasticizer* dan tanpa *superplasticizer* untuk merekam kehilangan berat pada benda uji akibat sulfat.

### 2.7.2. Perubahan Kuat Tekan

Selain perubahan pada berat, dijelaskan pula perubahan yang terjadi pada kuat tekan benda uji beton, hal ini terjadi akibat dari penetrasi cairan sulfat yang masuk menembus lapisan beton dan merusak kestabilan proporsi beton sehingga membuat kuat tekan berkurang.

Berdasarkan penelitian Salman *et al.* (2017), serangan sulfat merupakan faktor serius yang berperan penting dalam perubahan sifat mekanik dan degradasi kapasitas struktur beton, terutama pada beton yang secara langsung terpapar dengan air tanah dan laut. Berdasarkan penelitiannya mengenai efek serangan sulfat terhadap sifat mekanik HFRPC, HFRPC diuji dengan dua metode perawatan yaitu perendaman dengan air biasa dan magnesium sulfat. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, didapatkan komposisi campuran HFRPC yang digunakan pada penelitian ini seperti pada Tabel 2.14.

Tabel 2.14. Komposisi campuran HFRPC (Salman *et al.*, 2017)

Material penyusun	Komposisi
Semen (S) (kg/m <sup>3</sup> )	1000
Pasir (P) (kg/m <sup>3</sup> )	1000
Kerikil (K) (kg/m <sup>3</sup> )	-
<i>Silica fume</i> (SF) (kg/m <sup>3</sup> )	150
Super-plasticizer (SP) tipe Glenium (%)	6
Air (W) (kg/m <sup>3</sup> )	200
Rasio air semen (W/C)	0,2
Serat baja (SB) (%)	1
Polypropylene fiber (PPF) (%)	0,15
Total volume serat (%)	1,15
Komposisi berdasarkan berat (S:P:SF)	1:1:1,15

Penelitian ini menggunakan dua metode perawatan yaitu metode perawatan dilakukan dengan air biasa dan MgSO<sub>4</sub>. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, didapatkan hasil perbedaan kuat tekan HFRPC antara *water curing* dan *sulphate curing* yang menggunakan larutan Mg<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pada umur 28-180 hari seperti pada Tabel 2.15.



Tabel 2.15. Efek metode perawatan terhadap kuat tekan HFRPC (Salman *et al.* 2017)

Hari	Tipe perawatan	
	Air(MPa)	MgSO <sub>4</sub> (MPa)
28	115,05	111,42
90	125,33	113,78
180	128	114,35

### 2.7.3 Mikrostruktur

Berdasarkan penelitian Yang *et al.* (2015), Efek dari serangan sulfat pada mikrostruktur beton dapat diselidiki secara sistemik dengan metode seperti analisis pori, metode penyerapan air dan pengujian SEM (*scanning electron microscope*). Efek dari serangan sulfat dapat merusak komposisi campuran pada beton dan membuat beton menjadi rapuh. Kerusakan terbesar dalam pengujian sulfat terhadap mikrostruktur adalah terjadinya *microcracks* pada campuran beton dan mengubah susunan campuran beton yang sudah kompleks. Produk beton lainnya menunjukkan hasil yang berbeda yaitu hilangnya kekuatan beton seiring dengan rapuhnya struktur campuran di dalam beton.

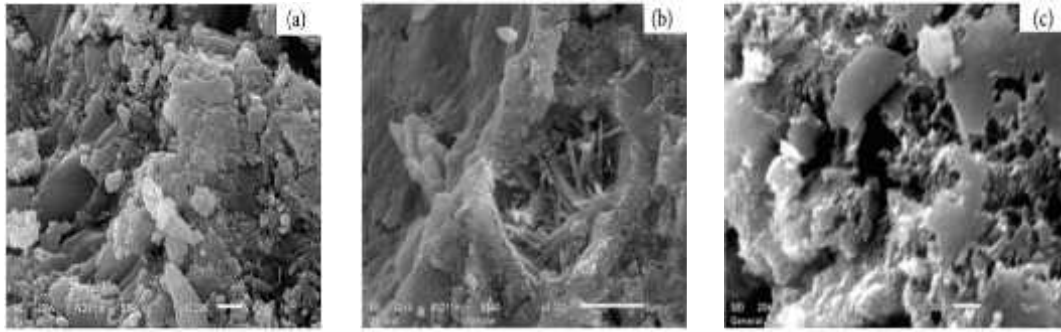
Dampak negatif dari serangan sulfat dapat dicegah dengan mengurangi kadar C<sub>3</sub>A pada semen, menurunkan persentase air semen, dan penggunaan bahan tambah (*additive*) seperti *silica fume*, abu sekam padi dan *fly ash*. Volume pori pada struktur beton perlahan berkurang seiring dengan meningkatnya derajat proses hidrasi. Sampel pengujian SEM diambil setelah dilakukannya pengujian kuat tekan pada beton.

Berdasarkan penelitian tersebut didapati bahwa kandungan terak (*slag*) memiliki peran penting dalam pertahanan terhadap serangan sulfat. Komposisi campuran beton dalam penelitian tersebut dijelaskan pada Tabel 2.16.

Tabel 2.16. Komposisi campuran beton konvensional (Yang *et al.* 2015)

Sampel	w/c	<i>fly ash</i> (%)	<i>Slag</i> (%)	Semen (%)	<i>Slump</i> (mm)	Kandungan udara (%)	Kuat tekan umur 28 hari
1	0,4	0	0	100	13	5,4	37,93
2	0,4	20	0	80	38	3,5	36,88
3	0,4	0	20	80	40	5,4	38,29

Berdasarkan hasil penelitian tersebut didapatkan kesimpulan bahwa setelah dipenetrasi dengan sodium sulfat, kandungan *ettringite* dalam beton lebih panjang dan lebar. Gambar hasil dari pengujian SEM (*scanning electron microscope*) dijelaskan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Hasil pengujian SEM setelah diberi larutan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (Yang *et al.* 2015)