

Effek Ukuran Butiran Maksimum terhadap Nilai *Modulus of Rupture* Reactive Powder Concrete

*Widodo Kushartomo, Dewi Linggasari, Arianti Sutandi

Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara, Jakarta

*widodo@untar.ac.id

Received: 23 Agustus 2019 Revised: 19 Desember 2019 Accepted: 3 Februari 2020

Abstract

Modulus of rupture (R) is a measurement of a tensile strength of a concrete beam. The value of R is affected by the size of fine aggregate grain, the density of the concrete beam and the water-cement ratio. The unit of R is MPa expressing the tensile strength of the concrete beam without reinforcement to withstand a buckling failure. The distance between the supports of the concrete beam should not be less than three times of the height of the beam. In this research the size of the concrete beam specimen was 100 mm x 100 mm x 350 mm, the maximum fine aggregate size was varied (300 μ m, 425 μ m, and 600 μ m) and the water-cement ratio was also varied (0.25, 0.22 and 0.20). All specimens were cured by steam curing and were tested after seven days. The results show that the larger the size of the fine aggregate grain and the higher the water-cement ratio, the smaller the R.

Keywords: *Modulus of rupture, aggregates, tensile, strength, beam*

Abstrak

Modulus of rupture (R) merupakan ukuran untuk kuat tarik balok beton. Nilai R dipengaruhi oleh besarnya ukuran butiran agregat halus, kepadatan balok beton dan perbandingan kadar air terhadap semen. R dinyatakan dengan satuan MPa yang menyatakan besarnya kuat tarik balok beton tanpa besi penulangan untuk menahan kegagalan tekuk. Jarak titik tumpuan balok beton pada pengujian R tidak boleh kurang dari tiga kali tinggi balok. Pada penelitian ini benda uji balok beton dibuat dengan ukuran 100 mm x 100 mm x 350 mm, besar butir agregat halus maksimum divariasikan (300 μ m, 425 μ m, dan 600 μ m) dan perbandingan kadar air terhadap semen sebesar (0,25; 0,22; 0,20). Seluruh benda uji dipelihara dengan penguapan dan di uji pada umur tujuh hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar ukuran butiran agregat halus dan semakin tinggi nilai perbandingan air terhadap semen maka nilai R akan semakin mengecil.

Kata kunci: *Modulus of rupture, agregat, tarik, kekuatan, balok*

Pendahuluan

Beton merupakan material heterogen dengan kekuatan tekan tinggi dan kekuatan tarik sangat rendah, sehingga dalam aplikasi struktur ditambahkan besi penulangan di dalam beton untuk meningkatkan kekuatan tarik. Perkembangan terkini dalam teknologi beton adalah *reactive powder concrete* (RPC).

RPC menjadi sebuah pilihan yang dapat digunakan untuk menggantikan beton biasa dalam segala hal penggunaan di bidang konstruksi. RPC merupakan material beton komposit yang memiliki kekuatan

dan keuletan tinggi serta porositas rendah. RPC tersusun atas semen, air, *silica fume*, tepung kuarsa, pasir kuarsa dan serat baja. Selain komposisi material dan kualitas material penyusun, faktor utama yang menunjang kekuatan RPC adalah volume pori-pori. Jumlah porositas semakin besar maka kekuatannya juga akan semakin rendah. Dengan mengeliminasi agregat kasar sehingga seluruh komponen penyusunnya berupa tepung, RPC dapat tersusun secara kompak dan homogen, jauh lebih baik bila dibandingkan dengan beton biasa maupun dengan beton berkinerja tinggi (*high performance concrete*) (Hiremath & Yaragal, 2018).

Namun demikian ukuran butiran maksimum berpengaruh pada volume pori-pori. Volume pori-pori yang semakin banyak berakibat fungsi kekuatan menjadi kurang maksimal (Jang *et al.*, 2016), beban yang dipikul pada RPC didistribusikan secara merata pada komponen-komponennya, sehingga pada setiap komponen tersebut mengalami tegangan dan regangan yang berdampak pada *fracture strength* dan kuat tekan material komposit tersebut. Dengan memperhatikan uraian tersebut di atas perlu dilakukan pengkajian terhadap pengaruh ukuran butiran maksimum pasir dan perbandingan faktor air semen terhadap R RPC.

Metode

Untuk dapat mencapai tujuan dan menjawab pertanyaan pada penelitian yang dikerjakan ini, metode penelitian yang digunakan dalam pengumpulan data adalah penelitian eksperimental di mana sejumlah pengujian, perawatan dan metode karakterisasi dikerjakan untuk menentukan pengaruh ukuran butiran maksimal terhadap nilai R RPC dengan langkah-langkah sebagai berikut:

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan untuk membuat RPC dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Semen, semen digunakan sebagai bahan pengikat antar partikel penyusun RPC, Semen yang digunakan dalam penelitian ini merupakan semen *portland* tipe 2 produksi PT. Indocement Tunggal Prakarsa, Tbk.

Pasir, pasir yang digunakan sebagai bahan pengisi dalam beton berkinerja ultra tinggi mempunyai ukuran butiran yang halus antara 150 μm – 2400 μm guna meningkatkan homogenitas dan kompaktilitas beton. Pemilihan pasir untuk pembuatan beton berkinerja ultra tinggi ini didasarkan pada, gradasi butiran, kadar lumpur dan kadar organik sehingga pada penelitian ini pasir yang digunakan adalah pasir kuarsa dengan bentuk butiran bersudut, permukaannya kasar, keras dan tajam serta banyak dijumpai di pasaran lokal. Tepung marmer, tepung silika merupakan bahan dengan komposisi utama CaCO_3 . Tepung marmer berfungsi sebagai bahan pengisi penutup pori-pori RPC, diproduksi dari PT. Citatah di daerah Karawang Jawa Barat.

Silica fume, *silica fume* yang digunakan dalam pembuatan beton berkinerja ultra tinggi mempunyai tiga fungsi, pertama mengisi rongga diantara partikel-partikel yang berukuran besar, biasanya ukuran butirannya antara 0,1 – 0,2 μm ,

kedua mempunyai fungsi seperti pelumas karena bentuk butirannya sangat bulat sehingga dapat meningkatkan kinerja campuran yang ketiga adalah bereaksi dengan produk kedua hidrasi semen yaitu *portlandite* (CH) menghasilkan *tobermorit* (CSH) sebagai hasil utama hidrasi (Mohamed, 2011). Parameter yang digunakan untuk mengkarakterisasi *silica fume* adalah jumlah kandungan silika, jumlah impuritas dan ukuran partikel. Dalam penelitian ini digunakan *silica fume* produksi PT. SIKKA berwarna *greyish* (abu-abu putih) dengan kandungan SiO_2 98%, kehalusan 20.000 m^2/kg dan densitas 2.200 kg/m^3 .

Super plasticizer, *superplasticizer* digunakan untuk meningkatkan *workability* adukan, *superplasticizer* ini harus mampu mendispersi adukan dengan baik mengingat faktor air semen yang digunakan antara 0,18 – 0,20, sehingga SP yang cocok untuk penelitian ini adalah dari jenis polimer yaitu polykarboksilat produksi SIKKA dengan nama dagang *viscocrete* 10 memiliki berat jenis 1200 kg/m^3 .

Peralatan.

Peralatan utama yang digunakan dalam menunjang penelitian ini untuk membuat dan melakukan karakterisasi contoh uji, dan peralatan tersebut sebagian tersedia di Laboratorium Teknologi Beton Jurusan Teknik Sipil Universitas Tarumanagara, beberapa tersedia di Laboratorium PUSPITEK Serpong.

Adapun peralatan-peralatan tersebut adalah (1) Cetakan, cetakan digunakan untuk membuat contoh uji prisma berukuran 100,0 mm x 100,0 mm x 350,0 mm. (2) *Mixer*, mixer digunakan untuk mencampur bahan-bahan penyusun beton berkinerja ultra tinggi supaya homogen dan mempunyai kecepatan putar 1800 rpm dengan kekuatan dua PK agar *superplasticizer* dapat bekerja dengan sempurna. (3) *Steam generator*, alat ini digunakan untuk melakukan pemeliharaan contoh uji dengan sistem penguapan bertemperatur tinggi dan bertekanan normal agar reaksi pozolanik terjadi dengan cepat dan sempurna. Alat ini biasa digunakan dalam pembuatan beton pracetak. (4) Mesin uji lentur, mesin uji lentur digunakan untuk mengukur R pada benda uji RPC. Mesin yang digunakan buatan England dengan Tipe ADR 3000 Merek ELE kapasitas tekan maksimum 3000 KN, seperti diperlihatkan pada Gambar 1.

Untuk pengumpulan data dalam pekerjaan penelitian ini dibagi menjadi dua tahap yaitu:

1. Pemeriksaan *properties* bahan dan mengujian mekanis



Gambar 1. Mesin uji lentur ADR 3000

Properties material

Periksa data teknis atau spesifikasi bahan untuk pembuatan contoh uji RPC seperti diameter butiran, berat jenis, berat isi dan gradasi butiran.

Membuat rencana campuran seperti berikut:

$$V_a + V_s + V_{sf} + V_m + V_p + V_{sp} = 1 \quad (1)$$

di mana V merupakan volume, s merupakan semen, sf merupakan *silica fume*; m merupakan tepung marmer, p merupakan pasir, sp merupakan *superplasticizer*.

Detail perbandingan komposisi bahan yang digunakan untuk pembuatan contoh uji disajikan pada Tabel 1. Perbandingan komposisi bahan merupakan perbandingan berat.

2. Pembuatan benda uji.

Benda uji untuk pengujian dibuat dalam bentuk balok dengan ukuran 10,0 mm x 10,0 mm, x 350,0 mm. Setiap ukuran butiran pasir dibuat sebanyak lima buah demikian juga untuk setiap perbandingan jumlah air semen atau $f_{a/s}$. Pemeliharaan perendaman dilakukan pada temperature 25°C Selama tiga hari dilanjutkan dengan pemeliharaan menggunakan *steam generator* selama empat jam pada temperature 90°C – 95°C.

Pengujian dilakukan kepada seluruh contoh uji pada umur tujuh hari. Pengujian ini ditujukan untuk mencari nilai maksimum kuat lentur akibat pengaruh ukuran butiran maksimum dan pengaruh $f_{a/s}$ pada RPC.

Kajian pustaka

Densified mixture design algorithm (DMDA) merupakan metode perencanaan campuran beton yang mengutamakan kepadatan (Phuoc & Lung, 2018). Metode ini memanfaatkan material penyusun beton dengan ukuran butiran sangat halus seperti *silica fume*, tepung marmer dan agregat halus sehingga diperoleh beton dengan tingkat kepadatan yang tinggi.

Dua parameter yang harus diperhatikan dalam merencanakan beton menggunakan metode DMDA yaitu parameter alfa (α) dan parameter beta (β) (Chang, 2004). Parameter alfa merupakan perbandingan antara *silica fume* dengan tepung marmer, parameter beta merupakan campuran *silica fume* dengan tepung marmer yang berkepadatan tinggi dicampur dengan agregat halus sesuai dengan ukuran butiran yang digunakan.

$$\alpha = \frac{W_m}{W_m + W_{sf}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\beta = \frac{(W_m + W_{sf})}{(W_m + W_{sf}) + W_p} \times 100\% \quad (3)$$

Volume rongga antar butiran yang terbentuk dihitung dengan:

$$V_v = 1 - \sum \frac{W_i}{\rho_i} \quad (4)$$

di mana W merupakan massa (kg), V merupakan volume (m^3), dan ρ merupakan massa jenis (kg/m^3) Jumlah volume rongga atau pori-pori yang terbentuk berkaitan dengan kekuatan pada RPC. Seperti disajikan pada Persamaan 5 (Mindess dan Young, 1981) berikut:

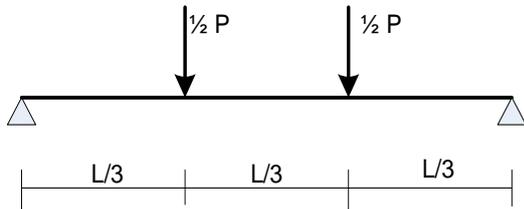
$$S = S_0 e^{-kP} \quad (5)$$

Di mana S merupakan kekuatan, S_0 merupakan kekuatan jika porositasnya 0, k merupakan konstanta dan P merupakan jumlah porositas.

Tabel 1. Perancangan campuran contoh uji RPC dalam perbandingan berat

Material	C1-1	C1-2	C1-3	C2-1	C2-2	C2-3	C3-1	C3-2	C3-3
Semen	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Air	0,25	0,25	0,25	0,22	0,22	0,22	0,20	0,20	0,20
<i>Silica fume</i>	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Tepung marmer	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Pasir	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
<i>Super plasticizer</i>	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Diameter pasir (μm)	300,00	425,00	600,00	300,00	425,00	600,00	300,00	425,00	600,00

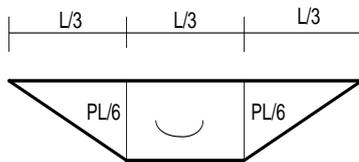
Proses terjadinya keretakan saat pengujian lentur yang menandakan kuat lentur balok RPC adalah apabila sebuah balok mendapat gaya seperti di tunjukkan pada Gambar 2, maka gaya yang bekerja pada balok menimbulkan momen dan bidang momen yang terjadi di tunjukkan pada Gambar 3.



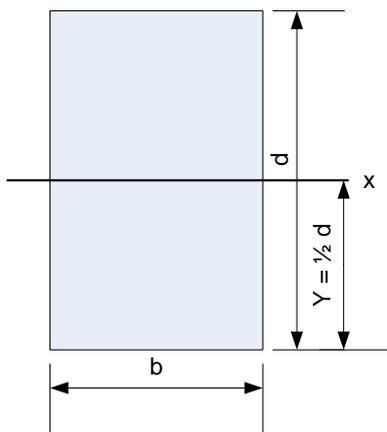
Gambar 2. *Third point loading* pada balok

Tegangan lentur akibat M yang terjadi pada balok secara umum dituliskan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (6)$$



Gambar 3. Bidang momen



Gambar 4. Penampang melintang balok

Pada saat balok mengalami retak pertama (*rupture*) maka tegangan yang terjadi disebut *modulus of rupture* (R) yang didefinisikan sebagai perbandingan antara momen (M) saat terjadi retak pertama terhadap momen tahanan / *modulus of section* (W).

Momen merupakan hasil perkalian antara gaya yang bekerja dengan jarak antara titik tangkap gaya dengan sumbu putar. Berdasarkan Gambar 2 dan 3 besarnya momen pada Persamaan 4 adalah

$M = \frac{PL}{6}$, sedangkan W merupakan perbandingan antara momen inersia balok terhadap titik beratnya (I_x) dengan setengah tinggi balok (Y), yang digambarkan seperti tampak pada Gambar 4.

Momen inersia (I_x) untuk penampang seperti pada Gambar 4, adalah $I_x = \frac{bd^3}{12}$, sehingga W dapat dituliskan sebagai berikut:

$$W = \frac{bd^2}{6} \quad (7)$$

sehingga tegangan lentur dapat dituliskan sebagai Persamaan 8:

$$\sigma = \frac{PL}{bd^2} \quad (8)$$

Pada Persamaan 8, jika gaya P yang bekerja pada balok menyebabkan terjadinya retak pertama maka tegangan lentur disebut sebagai f_r atau R dan juga di sebut sebagai kuat lentur.

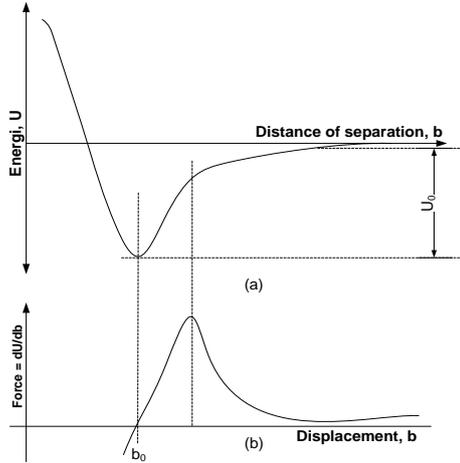
Keretakan yang muncul pada balok beton identik dengan kekuatannya (Ibrahim, 2018). Pada benda padat kekuatannya bergantung pada ikatan antar atom, sehingga bila membicarakan besarnya kekuatan lentur pada balok maka yang di bicarakan adalah interaksi antar dua atom pada balok tersebut. Setiap Atom mempunyai energi dasar (U_0) yang merupakan fungsi jarak antar atomnya (b), untuk merubah jarak antar atom dari kondisi dasarnya (b_0) ke jarak yang baru diperlukan sejumlah gaya (F) yang digambarkan seperti ditunjukkan pada Gambar 5a. Gambar 5b memperlihatkan gaya maksimum yang diperlukan untuk membuat jarak antar atom maksimum (b_{mak}), artinya pada F maksimum mulai terbentuk keretakan yang pertama.

Retak merupakan suatu takikan elips dengan sumbu panjang agak besar (panjang retak) dan sumbu pendek sama dengan nol. Kegagalan pada sebuah material termasuk didalamnya beton dimulai dengan munculnya sebuah keretakan yang sangat kecil. Penjalaran keretakan dapat terus terjadi karena adanya beban statis atau beban dinamis yang dipikul oleh material beton. Beban dinamis dapat memunculkan keretakan jenis rangkak (*creep*) dan beban dinamis memunculkan keretakan jenis kelelahan (*fatigue*). Kedua jenis keretakan tersebut sering menyebabkan terjadinya kegagalan pada elemen struktur beton bertulang terutama pada pelat dan balok.

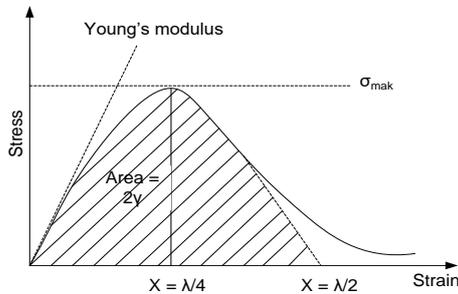
Gambar 6 menggambarkan kurva tegangan regangan di tingkat atomik. Luasan di bawah kurva menggambarkan kerja yang harus dilakukan untuk menyebabkan terjadinya keretakan. Kekuatan ikatan secara teoritis antar atom dituliskan pada Persamaan 11 sebagai σ_{mak} .

$$\sigma_{mak} = \left(\frac{E\gamma_s}{b_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

di mana γ_s merupakan energi permukaan.



Gambar 5. a. Kurva energi ikat antar atom sebagai fungsi jarak antar atom. b. Kurva hubungan gaya terhadap pergeseran jarak antar atom (Mindess & Young, 1981)



Gambar 6. Kurva tegangan-regangan tingkat atomik (Mindess & Young, 1981)

Untuk mengatasi gaya ikat antar atom diperlukan sejumlah energi (U). Energi merupakan hasil perkalian antara gaya (P) terhadap besarnya pergeseran atau displacement (b). Gaya yang bekerja pada balok tiap satuan luas merupakan tegangan (Persamaan 8). Tegangan yang terjadi saat keretakan pertama muncul disebut kuat lentur atau modulus of rupture (Persamaan 10).

Hasil dan Pembahasan

Kuat lentur merupakan ukuran kemampuan beton menahan gaya yang bekerja tegak lurus sumbu memanjang batang pada tengah-tengah bahan yang di tumpu pada kedua ujungnya tanpa terjadi perubahan bentuk yang tetap (Al-Tikrite & Hadi, 2017). Kuat lentur menunjukkan kekuatan beton dalam menahan gaya yang bekerja perlahan-lahan, sedangkan kuat lentur kejut adalah kuat lentur beton dalam menahan gaya yang bekerja secara

mendadak. Beton merupakan material yang mudah patah, untuk meningkatkan kekuatan lentur didalam beton ditambahkan besi penulangan atau serat kedalam beton tersebut. volume besi penulangan maupun serat yang ditambahkan sangat ditentukan oleh perencanaan struktur.

Kuat lentur beton merupakan salah satu sifat terpenting dalam kualitas beton (Jang *et al.*, 2016; Hou *et al.*, 2017). Pada beton yang tidak menggunakan besi penulangan atau serat, kuat lentur beton berkorelasi pada kuat tekan beton. Semakin tinggi mutu betonnya maka betonnya akan semakin getas atau mudah patah. Dengan kata lain semakin tinggi kuat tekan beton maka kuat lenturnya semakin rendah. Banyak faktor yang mempengaruhi kekuatan tekan beton. Kekuatan tekan beton dipengaruhi oleh pengaturan perbandingan semen terhadap air (Fa/s), kualitas agregat, komposisi agregat, gradasi agregat, perencanaan campuran dan orang yang terlibat dalam proses produksi beton.

Gradasi agregat memegang peranan penting untuk menentukan kualitas beton. Keaneka ragam butiran, ukuran butiran, diameter maksimum berpengaruh terhadap densitas dan volume pori-pori yang terbentuk (Kang & Weibin, 2018). Apabila agregat mempunyai ukuran butiran yang lebih halus dan dengan ukuran yang bervariasi, maka volume pori beton menjadi kecil. Susunan butiran yang baik dapat menghasilkan kepadatan tinggi dan porositas minimum. Butiran yang lebih kecil akan mengisi pori butiran yang lebih besar, sehingga pori-porinya menjadi sedikit dan beton memiliki kepadatan yang tinggi (Vilane & Sabelo, 2016).

Rumus perhitungan yang digunakan dalam metode pengujian kuat lentur beton dengan tiga titik pembebanan dituliskan sebagai berikut (ASTM C78, 2012):

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (10)$$

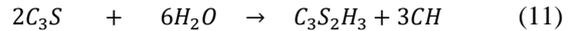
di mana R merupakan modulus of rupture (MPa), P merupakan beban maksimum (kN), L merupakan panjang jarak titik tumpuan (mm), b merupakan lebar benda uji (mm), d merupakan tinggi benda uji (mm). Hasil pengujian yang disajikan pada Gambar 7, menunjukkan pengaruh ukuran butiran maksimum dan perbandingan faktor air semen terhadap R beton. Gambar 7 tersebut mengatakan bahwa semakin besar ukuran butiran maksimum agregat halus, semakin kecil nilai R beton.

Demikian juga semakin besar nilai perbandingan air terhadap semen, nilai R beton semakin kecil. Ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

Beton yang menggunakan agregat halus dengan ukuran agregat halus semakin kecil, akan lebih banyak menyerap air dibandingkan dengan beton yang menggunakan agregat halus dengan ukuran lebih besar. Ini disebabkan ukuran agregat semakin kecil maka luas permukaan agregat secara keseluruhan semakin besar, sehingga diperlukan lebih banyak air untuk membasahi permukaan agregat tersebut, sebagai akibatnya jumlah air bebas yang tersedia tidak memadai untuk terjadinya reaksi hidrasi pada semen. Apabila reaksi hidrasi tidak berjalan dengan sempurna produksi jumlah C-S-H semakin kecil. C-S-H merupakan kunci utama pembentukan ikatan pada semen atau dengan kata lain C-S-H merupakan faktor utama kekuatan pada beton. Bila jumlah C-S-H yang diproduksi dalam reaksi hidrasi berkurang atau sedikit berdampak pada penurunan nilai kekuatan beton. Terlebih lagi, bila persentase jumlah pasir yang digunakan lebih banyak, kebutuhan jumlah air yang digunakan untuk meningkatkan kinerja beton menjadi lebih banyak pula.

Dalam merencanakan campuran beton perlu sekali menghitung dengan akurat kadar air dan penyerapan agregat, ini diperlukan untuk memperkirakan kebutuhan air bebas yang digunakan untuk terjadinya reaksi hidrasi. Bila air bebas yang diberikan kelebihan atau kekurangan berdampak pada penurunan nilai kuat tekan beton. Bila nilai perbandingan air/semen semakin tinggi dapat memperbanyak jumlah pori-pori yang terbentuk sehingga nilai kekuatan beton menjadi semakin lemah dan sebaliknya bila nilai perbandingan air/semen semakin rendah nilai kekuatan beton semakin tinggi, dalam hal ini diperlukan super plasticizer untuk meningkatkan kinerja beton.

Seperti ditunjukkan pada Persamaan 5 semakin banyak *volume* pori-pori yang terbentuk maka nilai kuat material semakin menurun. Persamaan 2, 3 dan 4 menjelaskan tingkat kepadatan RPC terkait dengan ukuran butiran maksimum. Semakin besar ukuran butiran maksimum agregat halus (600 μm) maka volume pori-pori yang terbentuk semakin besar dan berakibat nilai kekuatan RPC akan mengalami penurunan kuat lenturnya. Penjelasan ini sesuai pada Gambar 2 yang memperlihatkan bila ukuran butiran semakin besar maka nilai kuat lenturnya juga semakin kecil. Apabila diperhatikan nilai perbandingan Faktor air semen ($F_{a/s}$), pada Gambar 7 menunjukkan nilai R RPC semakin menurun bila perbandingan nilai faktor air semen RPC semakin membesar. Hal ini bisa dijelaskan sebagai berikut:



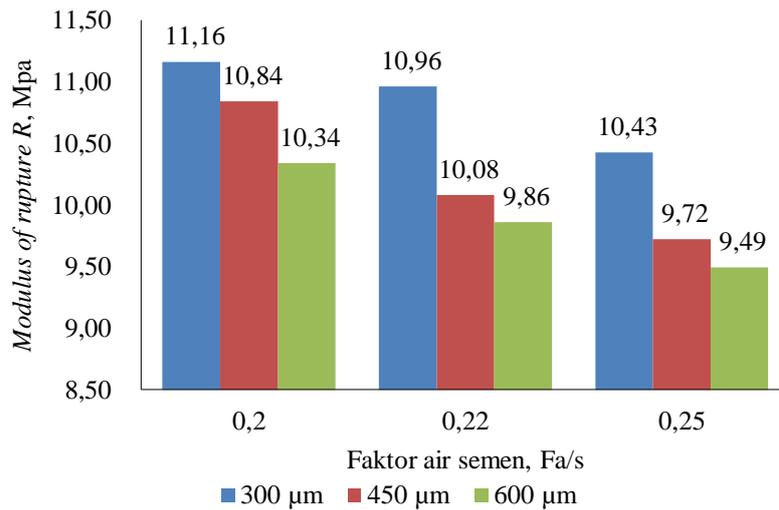
di mana C_3S adalah *trikalsium silikat*, H_2O adalah air, $C_3S_2H_3$ adalah C-S-H dan CH adalah *kalsium hidroksida*.

Volume C-S-H yang terbentuk dipengaruhi oleh nilai perbandingan jumlah air dan semen atau faktor ($F_{a/s}$). Gambar 8 memberikan gambaran volume produk hidrasi yang terbentuk dikaitkan dengan faktor air semen. Semakin besar nilai faktor air semen maka volume pori-pori yang terbentuk juga semakin banyak. Hal ini yang menyebabkan mengapa terjadi penurunan nilai kuat lentur RPC terhadap kenaikan nilai faktor air semen seperti diperlihatkan pada Gambar 7. Artinya bila faktor air semen semakin besar maka volume pori-pori yang terbentuk semakin banyak berakibat pada penurunan nilai kuat lentur RPC (Almayah & Latief, 2018), (Hiremath & Yaragal, 2017).

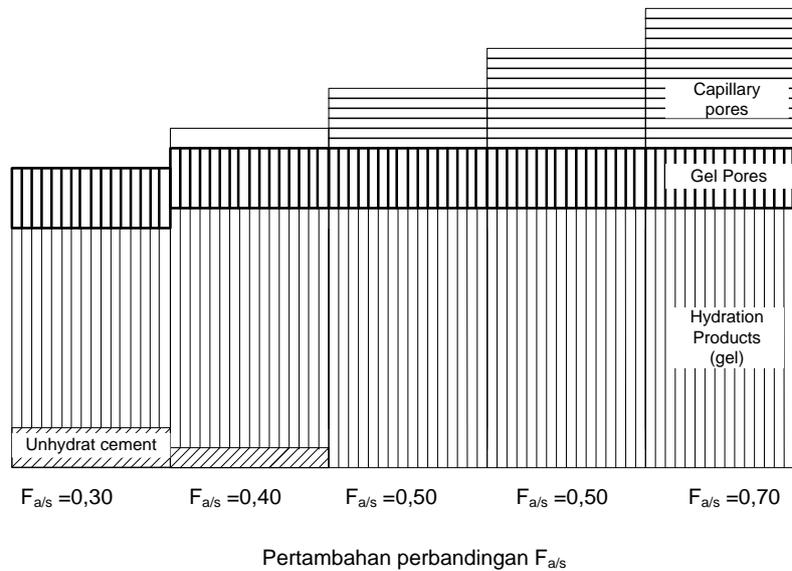
Persamaan 11 merupakan reaksi hidrasi yang terjadi apabila semen berhubungan dengan air (Neville, 2011). Salah satu komponen utama semen yaitu trikalsium silikat (C_3S) akan bereaksi dengan air (H_2O) membentuk produk hidrasi berupa gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) dan kalsium hidroksida (CH). Gel kalsium silikat hidrat ini yang berfungsi sebagai material pengikat agregat pada beton. Apabila kandungan gel C-S-H yang terbentuk semakin banyak maka kualitas beton akan semakin baik, kuat lentur dan kuat tekan meningkat. Bertambahnya jumlah produksi C-S-H sangat dipengaruhi oleh kadar air yang digunakan seperti diperlihatkan pada Gambar 8. Semakin banyak air yang digunakan dalam proses pencampuran beton atau dengan kata lain semakin tinggi perbandingan jumlah $F_{a/s}$, maka jumlah produksi C-S-H yang terbentuk juga semakin banyak, hal ini disebabkan karena seluruh butiran semen dapat semuanya terhidrasi. Namun sebagai akibatnya semakin banyak jumlah air yang digunakan jumlah pori-pori yang terbentuk juga semakin besar (Chen *et al.*, 2013), penambahan jumlah pori-pori yang terbentuk ternyata tidak sebanding dengan jumlah produksi C-S-H, makanya semakin tinggi nilai $F_{a/s}$ nya nilai kekuatan mekanis beton juga semakin menurun yang dalam hal ini adalah nilai kuat lentur beton seperti di tunjukkan pada Gambar 7. Seperti disajikan pada Persamaan 5 (Mindess dan Young, 1981) berikut:

$$S = S_0 e^{-kP} \quad (5)$$

di mana S merupakan kekuatan, S_0 merupakan kekuatan jika porositasnya 0, k merupakan konstanta dan P merupakan jumlah porositas.



Gambar 7. Pengaruh ukuran butiran dan faktor air semen terhadap nilai *modulus of rupture reactive powder concrete*



Gambar 8. Korelasi perbandingan kadar air semen ($F_{a/s}$) dengan volume produk hidrasi (Mindess & Young, 1981)

Salah satu keuntungan penggunaan nilai $F_{a/s}$ tinggi adalah kemudahan beton untuk diaduk, diangkut dan dituang. Gambar 7 juga memperlihatkan peningkatan nilai R RPC bila nilai perbandingan $F_{a/s}$ semakin kecil. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut, dengan nilai $F_{a/s}$ yang semakin kecil maka produksi pori-pori juga kecil baik itu pori-pori gel maupun pori-pori kapiler sedangkan jumlah produksi C-S-H sangat besar seperti diperlihatkan pada Gambar 8, yang berakibat nilai kekuatan mekanik beton RPC menjadi semakin besar yang dalam penelitian ini dinyatakan sebagai nilai R .

Penggunaan nilai perbandingan $F_{a/s}$ kecil memang berdampak pada peningkatan sifat mekanis RPC, namun penggunaan nilai perbandingan $F_{a/s}$ yang

kecil juga berakibat penurunan kinerja beton. Oleh karena itu untuk meningkatkan kinerjanya disarankan menggunakan *superplasticizer*.

Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan bahwa besar butiran maksimum agregat halus dan perbandingan faktor air semen pada perencanaan campuran RPC mempengaruhi nilai kuat lentur RPC.

Volume pori-pori yang terbentuk pada perencanaan campuran RPC dipengaruhi oleh ukuran butiran maksimum agregat halus. Semakin besar ukuran butiran agregat halus maka jumlah volume pori-pori yang terbentuk juga semakin

besar, semakin besar volume pori-pori yang terbentuk maka nilai R menjadi semakin kecil dan sebaliknya.

Nilai $F_{a/s}$ mempengaruhi produksi volume C-S-H, volume pori-pori gel dan volume kapiler. Semakin besar nilai $F_{a/s}$ produksi volume C-S-H, volume pori-pori gel dan volume kapiler juga semakin besar. Semakin besar nilai volume pori-pori gel dan volume kapiler maka nilai R menjadi semakin kecil dan sebaliknya.

Retak pertama yang muncul pada proses pembebanan balok RPC menyatakan nilai kuat lentur atau R RPC.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Tarumanagara, yang telah membiayai penelitian ini sehingga dapat menghasilkan sebuah produk ilmiah yang sangat bermanfaat bagi penulis.

Daftar Pustaka

Al-Tikrite, A., & Hadi, M. N. (2017). Mechanical properties of reactive powder concrete containing industrial and waste steel fibres at different ratios under compression. *Construction and Building Materials*, 154, 1024-1034.

Almayah, A. & Latief, H. S. (2018). Mechanical properties of reactive powder concrete (RPC) with various combinations of fibers and ultrafine. *International Journal of Science and Engineering Research*, 9(12), 33-39.

ASTM C78. (2012). *Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)*. Concrete and Agregates (04.02). ASTM International, US.

Chang, P. K. (2004). An approach to optimizing mix design for properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(4), 623-629.

Chen, X., Wu, S., & Zhou, S. W. (2013). Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 40, 869-874.

Hiremath, P., & Yaragal, S. C. (2017). Investigation on mechanical properties of reactive powder concrete under different curing regimes. *Materialstoday: proceedings*, 4(9), 9758-9762.

Hiremath, P. N., & Yaragal, S. C. (2018). Performance evaluation of reactive powder concrete with polypropylene fibers at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 169, 499-512.

Hou, X., Abid, M., Zheng, W., & Waqar, G. Q. (2017). Evaluation of residual mechanical properties of steel fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to high temperature using nondestructive testing. *Procedia Engineering*, 210, 588-596.

Ibrahim, Y. E. (2018). Assessment of a cracked reinforced concrete beam: *Case study, Case Studies in Construction Materials*, 9, e00179.

Jang, H. S., So, H. S., & So, S. (2016). The properties of reactive powder concrete using PP fiber and pozzolanic materials at elevated temperature. *Journal of Building Engineering*, 8, 225-230.

Kang, M., & Weibin, L. (2018). Effect of the aggregate size on strength properties of recycled aggregate concrete. *Hindawi Advances in Materials Science and Engineering*, Retrieved 2018 from <https://doi.org/10.1155/2018/2428576>

Mindess, S., & Young, J. F. (1981). *Concrete*. Prentice-Hall, New Jersey: INC,

Mohamed, H. A. (2011). Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions. *Ain Shams Engineering Journal*, 2(2), 79-86.

Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Prentice-Hall, New Jersey: INC.

Phuoc, H. T., & Lung, H. C. (2018). An assessment of characteristics of densified high-performance concrete incorporating high volume fly ash. *Material Science Forum*, 923, 109-109.

Vilane, B. R. T., & Sabelo, N. (2016). The effect of aggregate size on compressive strength of concrete. *Journal of Agricultural Science and Engineering*, 2(6), 66-69.