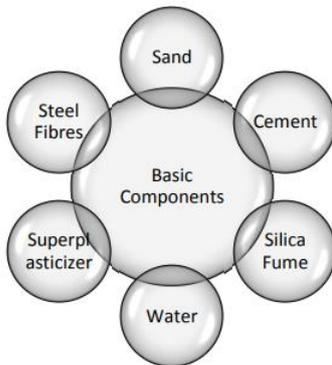


## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Lower Bound Ultra High Performance Concrete

*Lower bound ultra high performance concrete* adalah beton dengan kuat tekan yang tinggi dengan kuat tekan 120-150 MPa (Azmeem & Shafiq, 2018). Gambar 2.1 menunjukkan material-material dasar penyusun UHPC berupa pasir, semen, *silica fume*, air, *superplasticizer*, dan *steel fiber*. UHPC dapat diproduksi dengan meminimalisir porositas komposit butiran melalui penghilangan agregat kasar dan penambahan *Supplementary Cementitious Materials* (SCMs) seperti *fly ash* dan *silica fume*, optimasi ukuran butiran sehingga dapat mengurangi *w/b ratio*, penambahan *superplasticizer* pada UHPC untuk mengurangi *w/b ratio*, dan penambahan *steel fibres* dengan kuat tarik 200-2600 MPa untuk mencegah berkembangnya *crack* dan menambahkan kuat tekan pada UHPC (Xue et al., 2020). Sedangkan *lower bound* UHPC dapat diproduksi seperti UHPC konvensional dengan tidak menggunakan *steel fiber*. UHPC sering disebut juga dengan *reactive powder concrete* (RPC) dikarenakan materialnya yang sangat halus.

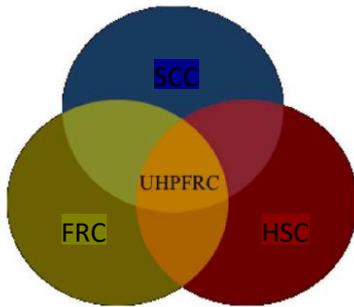


Gambar 2. 1 Bahan-bahan dasar UHPC

Sumber: Bajaber & Hakeem (2021). *UHPC Evolution, Development, and Utilization in Construction: A Review*. Journal of Materials Research and Technology, p.8.

Teknologi beton UHPC memiliki 3 sifat karakteristik yaitu memiliki *workability* yang sangat tinggi dan tidak terjadi segregasi pada agregat dari adukan beton, yang sering disebut dengan *self compacting concrete* (SCC). Kedua, kuat tekan yang sangat tinggi dan memiliki *durability* yang sangat panjang yang sering disebut *high performance concrete* (HPC). Ketiga, peningkatan daktilitas dan kekuatan dari beton dengan menggunakan fiber yang disebut *fiber reinforced concrete* (FRC). Gambar 2.2 menunjukkan bahwa ketiga jenis beton digabungkan

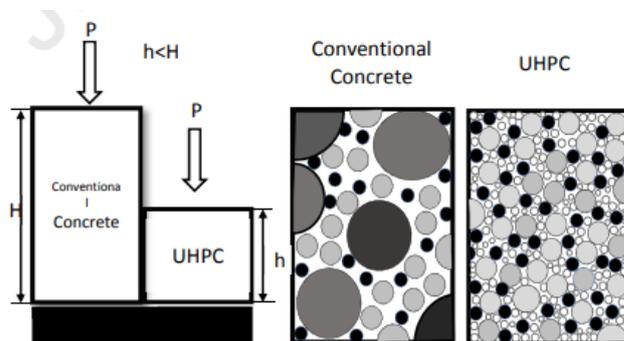
menjadi *ultra-high-performance fiber-reinforced concrete* (UHPFRC) yang biasa disebut dengan UHPC (Akhnoukh & Buckhalter, 2021).



Gambar 2.2 UHPFRC merupakan penggabungan sifat SCC, FRC, dan HPC

Sumber: Akhnoukh & Buckhalter (2021). *Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges*. Case Studies in Construction Materials, p.2.

Kandungan dari campuran UHPC mempunyai kandungan material pengikat yang cenderung lebih tinggi dan *water to cement ratio* (*w/c*) rendah (Azmee & Shafiq, 2018). Gambar 2.3 menunjukkan perbedaan material pengisi dari UHPC dan beton konvensional. Untuk mencapai kepadatan yang tinggi, UHPC diproduksi dengan menggunakan agregat halus dan menghilangkan agregat kasar. Agregat halus ini didistribusikan pada ruangan yang tidak bisa dilewati oleh agregat kasar. Hal tersebut dapat menambah kapasitas kekuatan dan performa UHPC (Bajaber & Hakeem, 2021).



Gambar 2.3 Perbedaan beton konvensional dengan UHPC

Sumber: Bajaber & Hakeem (2021). *UHPC Evolution, Development, and Utilization in Construction: A Review*. Journal of Materials Research and Technology, p.6.

### 2.1.1 OPC

OPC (*Ordinary Portland Cement*) merupakan material yang berperan penting sebagai pengikat agregat pada campuran. Ketika air ditambahkan ke dalam campuran semen, proses kimiawi yang disebut hidrasi akan berlangsung (Nugraha & Antoni, 2004). Proses hidrasi inilah yang dapat membuat semen dapat mengikat dengan agregat sehingga beton dapat mengeras. Kandungan OPC dalam proses pembuatan UHPC jauh lebih tinggi dibandingkan dengan beton biasa berkisar antara 600-100 kg/m<sup>3</sup> (Bajaber & Hakeem, 2021). Penggunaan OPC dalam jumlah tinggi tersebut bertujuan untuk dapat meningkatkan kekuatan lekatan agregat dan kekuatan tekan dari campuran UHPC.

### 2.1.2 Fly Ash

*Fly ash* (abu terbang) merupakan material sisa pembakaran batu bara yang tidak terpakai dimana pembakaran batu bara kebanyakan digunakan dalam pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). *Fly ash* ini berbentuk serbuk halus dan merupakan material dengan sifat pozzolan (Nugraha & Antoni, 2007). Oleh karena itu penggantian sebagian semen dengan fly ash pada campuran UHPC sudah umum digunakan. Menurut Bahedh & Jaafar (2018) seiring penambahan *fly ash* dari 0% - 40%, *workability* juga akan semakin bertambah baik, dan penggantian *fly ash* pada campuran UHPC juga dapat meningkatkan kekuatan final dari UHPC tersebut seiring dengan bertambahnya *fly ash*.

Sifat fisik *fly ash* ditentukan oleh berat jenis, kehalusan, luas permukaan dan distribusi partikel untuk mengidentifikasi reaktivitas *fly ash* dengan semen. Sifat kimia *fly ash* ditentukan dari komposisi kimia, jenis mineral dan fase amorf dalam *fly ash* (Ekaputri et al., 2013). Komponen kimia utama *fly ash* adalah SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, yang dapat bereaksi dengan Ca(OH)<sub>2</sub> (Amnadnua et al., 2013). Kualitas *fly ash* dapat diketahui dengan *rapid indicator* seperti pH, permintaan *superplasticizer* dan persentase tertahan pada saringan 45 µm (Antoni et al., 2015).

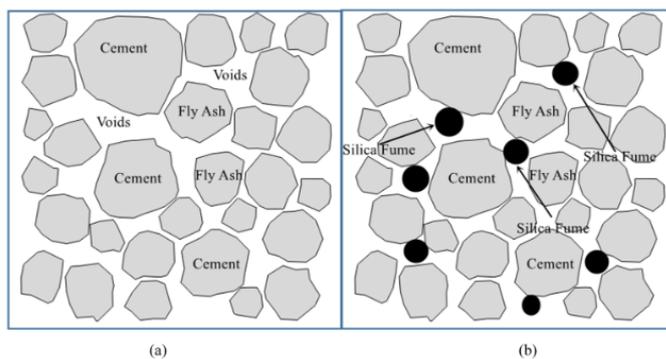
### 2.1.3 Pasir

Pada pembuatan UHPC, pasir yang digunakan memiliki butiran pasir yang halus. Ukuran pada butiran ini umumnya digunakan semen dengan ukuran pasir yang lebih kecil dari 1 mm. Pasir digunakan untuk menambah kekuatan pada beton (Tayeh et al., 2019). Pasir yang dapat digunakan sebagai agregat dalam UHPC berupa pasir silika, pasir kuarsa, atau pasir alami dari alam (Mishra & Singh, 2019).

#### 2.1.4 Silica Fume

*Silica fume* atau mikro silika adalah limbah dari tungku produksi logam silikon dan paduan ferro silikon (Li et al., 2018). *Silica fume* memiliki partikel berbentuk bulat yang berdiameter rata-rata 0.15  $\mu\text{m}$  dan sebagian besar kurang dari 1  $\mu\text{m}$  (Das et al., 2020). Penambahan *silica fume* dapat meningkatkan kuat tekan pada campuran UHPC. Penggunaan *silica fume* dalam range 0-15% *total binder* dengan interval 5% dapat meningkatkan kekuatan tekan dari UHPC secara eksponensial hingga 20% (Bajaber & Hakeem, 2021). Dalam penelitian Hunchate et al. (2014) penambahan kadar *silica fume* hingga 15% bisa menambah kekuatan UHPC, namun penambahan kadar lebih dari 15% justru mengurangi kekuatan tekan UHPC (ElNemr, 2019).

Penggunaan *silica fume* mampu mengurangi kebutuhan air tanpa menurunkan fluiditas campuran. Campuran partikel semen dan *fly ash* mengisi rongga antar pasir namun masih memiliki rongga kosong yang diisi oleh air. Penambahan *silica fume* mampu mengisi rongga kosong yang sebelumnya diisi oleh air sehingga porositas pada campuran semakin berkurang setiap penambahan *silica fume*. Bentuk bulat dari *silica fume* mampu mengisi rongga seperti bola sehingga mampu melepas air yang sebelumnya mengisi rongga kosong pada campuran seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Mekanisme *silica fume* meningkatkan fluiditas: (a): semen-*fly ash*; (b): semen-*fly ash-silica fume*

Sumber: Ma et al., 2022. Hydration reaction and compressive strength of small amount of silica fume on cement-fly ash matrix. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00989>

### **2.1.5 Superplasticizer**

Menurut ASTM C494, *superplasticizer* merupakan bahan kimia tambahan atau *admixture* yang berguna untuk mereduksi kebutuhan air, menambah kemudahan pengerjaan beton, dan meningkatkan *slump* campuran mortar ataupun pada beton. Penambahan *superplasticizer* pada campuran menghasilkan kekentalan yang lebih encer dengan faktor air semen yang sama sehingga kuat tekan yang dihasilkan menjadi lebih tinggi. Penambahan *superplasticizer* pada campuran mortar atau beton mampu mengurangi kebutuhan air pada beton, akan tetapi dapat memperlambat waktu pengikatan awal atau *initial setting time*.

Penggunaan *superplasticizer* harus dilakukan pada dosis yang tepat. Apabila penambahan *superplasticizer* berlebihan dapat mengurangi kuat tekan pada campuran. Penggunaan kadar *superplasticizer* di dalam campuran perlu diperhatikan. Penambahan *superplasticizer* yang berlebihan tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap *workability* dari campuran beton maupun mortar (Sathyan et al., 2018). Penambahan dosis yang berlebihan juga dapat menyebabkan mortar atau beton menjadi segregasi dan *bleeding* (Nugraha & Antoni, 2007).

## **2.2 Aktivasi Mekanis**

Aktivasi mekanis merupakan proses yang membuat suatu material *pozzolanic* menjadi aktif atau lebih reaktif (Hela & Orsakova, 2013). Aktivasi mekanis biasanya dilakukan pada material *pozzolanic* seperti semen dan *fly ash*. Proses aktivasi mekanis ini terdiri dari beberapa cara yaitu *sieving*, *air-separation*, *magnetic separation*, dan *grinding*.

### **2.2.1 Sieving & Air Separation**

Dari proses pemisahan (*separation*) bisa didapatkan beberapa fraksi ukuran *fly ash* yang berbeda-beda. Proses pemisahan ini biasanya mulai dilakukan semenjak dari PLTU dimana di dalam proses pembakaran, asap sisa pembakaran akan melewati beberapa fase penyaringan yaitu dengan gravitasi, penyaring berbahan tekstil, dan penyaringan elektronik (Hela & Orsakova, 2013). Proses penyaringan yang berbeda-beda akan menghasilkan material tersaring yaitu *fly ash* dengan ukuran dan karakteristik butiran yang berbeda-beda. Selain itu pemisahan dapat dilakukan dengan proses ayakan, proses ayakan ini biasanya menggunakan ayakan dengan ukuran 90, 200, dan 325 mm. Tujuan dari metode ini adalah menyaring material *fly ash* yang kurang reaktif (ukuran relatif besar) sehingga menyisakan partikel-partikel *fly ash* yang reaktif (Hela & Orsakova, 2013).

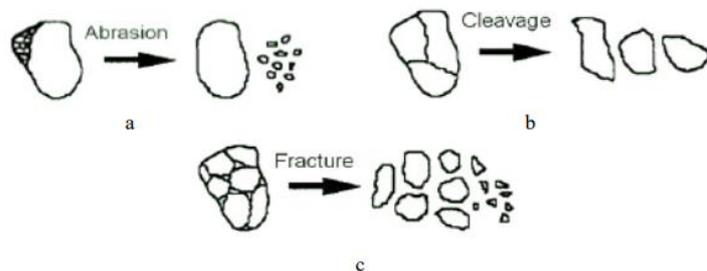
### 2.2.2 Grinding

*Grinding* atau penggilingan merupakan salah solusi dalam optimasi pemakaian semen terutama pada partikel yang berukuran kasar dimana partikel kasar akan terpecah menjadi partikel yang lebih halus yang mengakibatkan kebutuhan kadar air yang lebih rendah dan reaktivitas yang lebih tinggi (Hela & Orsakova, 2013). Hal tersebut membuat material *fly ash* yang tergiling memiliki reaktivitas *pozzolanic* yang lebih tinggi. Proses penggilingan pastinya membutuhkan alat penggiling, alat penggiling yang biasa dipakai adalah *ball mill*, *hammer mill*, *attrition mill*, *jet mill*, dan *vibro-energy mill*. *Ball Mill* merupakan alat dan metode giling yang paling umum digunakan.

Alat *Ball mill* secara garis besar terdiri dari tabung silinder (berbentuk seperti tangki) yang didudukkan di atas motor pemutar yang akan memutar isi dari tabung tersebut yang berisi media giling dan material yang akan digiling (Monov et al., 2012). Proses berputarnya tabung akan memutar media giling bersama material, hal ini mengakibatkan material dengan media giling saling bertumbukan sehingga material lama kelamaan akan pecah menjadi material yang berukuran lebih kecil/halus. Media giling umumnya terbagi menjadi 3 tipe yaitu bola baja/bola logam lainnya, logam berbentuk silinder yang biasa disebut *cylpebs*, dan bola keramik dengan berat jenis normal dan tinggi (Monov et al., 2012). Bola baja/bola logam lainnya ini biasanya digunakan sebagai media dengan diameter 10-150 mm. *Cylpebs* biasanya berukuran 8x8 atau 45x45 mm, bentuk *cylpebs* ini didesain untuk memaksimalkan efisiensi penggilingan. Bola keramik dengan berat jenis normal biasanya terbuat dari material keramik sedangkan bola keramik berberat jenis tinggi terbuat dari material *high alumina oxide* yang lebih sulit terkikis (abrasi) oleh material yang digiling.

Proses penggilingan juga dibedakan berdasar kecepatan rotasi yaitu rotasi lambat (*cascading*), rotasi cepat (*catracting*), dan rotasi sangat cepat (*centrifugation*) (Monov, 2012). Kecepatan penggilingan sangat berpengaruh pada pergerakan media giling dan material yang digiling yang sangat berpengaruh hasil giling. Hasil giling yang terpengaruh dengan kecepatan tumbukan umumnya terbedakan menjadi tiga jenis yaitu *abrasion*, *cleavage*, dan *fracture* yang diilustrasikan dalam Gambar 2.4. *Abrasion* terjadi pada saat partikel mendapat tekanan/tumbukan dengan intensitas rendah yang menghasilkan partikel halus yang terkikis dari partikel besar. *Cleavage* terjadi pada saat partikel mendapat tekanan/tumbukan berkecepatan rendah dan cenderung intens yang menghasilkan partikel yang berukuran 50-80%

partikel sebelumnya. Sedangkan *Fracture* terjadi pada saat partikel mendapat tekanan/tumbukan yang keras akibat proses penggilingan berkecepatan tinggi yang menghasilkan *PSD* yang cukup luas.



Gambar 2.5 *Abrasion*, *Cleavage*, dan *Fracture* yang terjadi pada material tergilang

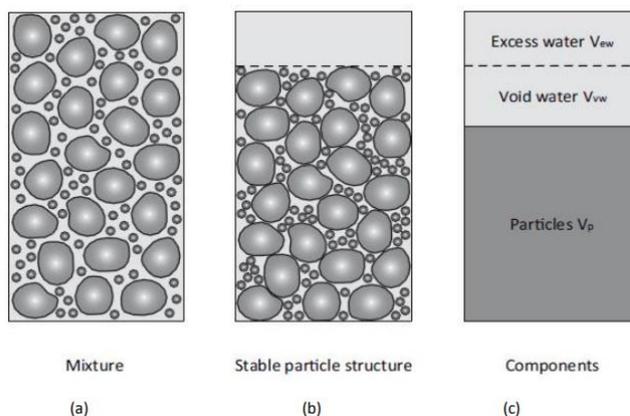
Sumber: Monov, (2012). *Grinding in Ball Mills: Modeling and Process Control*. Cybernetics and Information Technologies Volume 12, No. 2., p.54.

### 2.3 *Particle Packing*

Agregat mempunyai peranan yang sangat penting dalam pembentukan beton yang padat. Sebagian besar volume beton diisi oleh material agregat, sama halnya pada mortar dimana sebagian besar volume mortar diisi oleh pasir. Pada dasarnya optimasi penggilingan semen dan *fly ash* dengan konsep *particle packing* merupakan usaha yang dilakukan untuk membuat campuran pada mortar menjadi lebih padat, yakni dengan melakukan penggilingan material semen dan *fly ash* hingga mencapai distribusi ukuran tertentu yang menghasilkan kepadatan yang optimal. Dengan kepadatan yang optimal maka kekuatan tekan sampel mortar UHPC pasti optimal juga. Kepadatan yang optimal bisa terjadi jika distribusi ukuran partikel yang digunakan dalam campuran bisa menyebabkan rongga udara semakin sedikit dengan cara mengisi rongga antar partikel dengan partikel yang lebih kecil.

*Packing density* merupakan rasio perbandingan antara volume material padat per *unit volume*. *Packing density* yang lebih tinggi menyebabkan *void ratio* yang lebih kecil, hal ini menyebabkan berkurangnya kebutuhan pasta semen yang bisa diimplementasikan juga dalam pembuatan *low cement concrete* (Kwan & Mora, 2001). Konsep *Particle Packing* ini membuat rongga antar partikel semakin sempit yang menyebabkan *w/c ratio* yang semakin rendah sehingga membuat beton mortar menjadi semakin kuat (Fennis & Walraven, 2012). Akan tetapi perlu diketahui juga ada perbedaan antara *packing density* dari struktur partikel stabil dengan volume partikel yang ada pada campuran asli. Gambar 2.6 (a) merupakan ilustrasi campuran

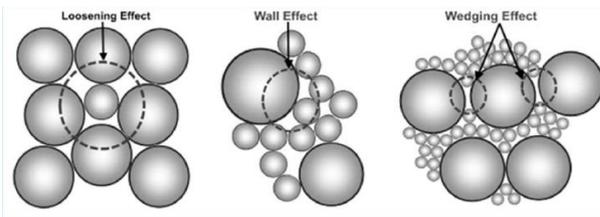
beton, sedangkan pada Gambar 2.6 (b), terlihat semua partikel padat bersentuhan satu sama lain membentuk struktur partikel yang stabil sehingga menyisakan sisa air (*excess water*). Dalam campuran mortar dan beton sebagian air digunakan untuk mengisi rongga antara partikel (*void water*) dan bereaksi dengan semen, dan sisa air dianggap sebagai kelebihan air (*excess water*). *Excess water* ini memiliki peran dalam memberikan *workability* yang semakin tinggi akan tetapi menurunkan kekuatan campuran. Oleh karena itu konsep *particle packing* ini bila digunakan dalam membuat UHPC yang perlu dilakukan adalah memadatkan campuran, mengurangi volume *void water*, dan mengganti *excess water* dengan *superplasticizer* untuk membuat campuran dengan *w/c ratio* yang lebih rendah dengan *workability* yang bagus.



Gambar 2.6 Volume dari *flowable mixture* dibandingkan dengan volume yang diisi oleh partikel yang stabil

Sumber: Fennis, S., & Walraven, J., (2012). *Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design* (Vol. 57, Issue 2), p. 76.

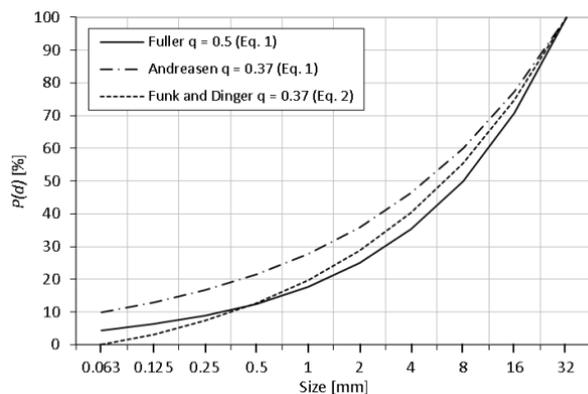
Dalam campuran mortar dan beton makin tingginya kandungan agregat akan mengakibatkan meningkatnya friksi antar material agregat. Hal ini dapat mengurangi *workability* dari campuran beton tersebut yang memiliki dampak buruk pada kekuatan tekan beton (Chang, 2004). Walaupun makin padat, ukuran partikel yang kurang bervariasi juga mampu mengurangi kekuatan tekan beton karena masih akan ada celah rongga di dalam campuran tersebut seperti dapat dilihat pada Gambar 2.7. Maka dari itu perlu adanya penyeimbangan antara *particle packing* ini dengan kuat tekan beton agar mencapai titik optimalnya.



Gambar 2.7 Contoh Skematis Interaksi Antar partikel

Sumber: Abu-Lebdeh et al., 2022. A Ternary Model for Particle Packing Optimization. *Journal of Composites Science*, p. 5.

Pada tahun 1907, Fuller dan Thompson menemukan suatu konsep *Particle Packing Models* yang disebut *Fuller-Thompson curve*, yang membandingkan antara faktor penyebaran partikel ( $q$ ) dan ukuran partikel terbesar ( $D$ ) dalam sebuah grafik berbasis pangkat dengan  $q$  optimum sebesar 0.5 (T. de Grazia et al., 2019). Penelitian yang dilakukan oleh Andreasen pada tahun 1930 menyatakan bahwa menggunakan agregat yang bersudut lebih baik dalam menghasilkan faktor penyebaran partikel optimum dengan rasio 0.37 (Andreasen & Andersen, 1930). Penelitian yang dilakukan oleh Funk dan Dinger pada tahun 1980 yang menyatakan bahwa Fuller-Thompson curve seharusnya tidak memperhatikan ukuran maksimum partikel namun ukuran minimum partikel juga harus diperhatikan dan menghasilkan  $q$  optimal sebesar 0.37 (Funk & Dinger, 1980).



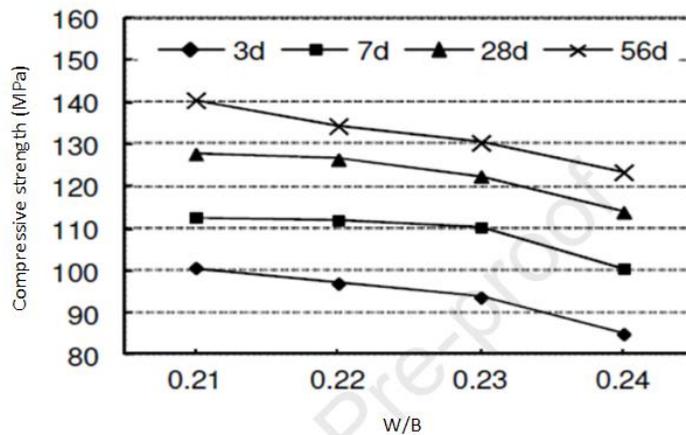
Gambar 2.8 Perbandingan ukuran penyebaran partikel berdasarkan ukuran agregat

Sumber: Fennis & Walraven, 2012. *Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design* (Vol. 57, Issue 2), p. 76.

## 2.4 Hubungan Aktivasi Mekanis dan *Particle Packing* terhadap kuat tekan

Aktivasi mekanis dengan metode *grinding* dapat memecah partikel besar menjadi partikel yang lebih kecil yang mengakibatkan *w/c ratio* yang lebih rendah dan reaktivitas yang

lebih tinggi (Hela & Orsakova, 2013). Konsep *Particle Packing* membuat rongga antar partikel semakin sempit karena partikel kecil yang tergilir bisa mengisi ruang antara partikel besar. Hal ini yang menyebabkan *w/c ratio* yang semakin rendah sehingga membuat beton mortar menjadi semakin kuat (Fennis & Walraven, 2012). Menurut penelitian Yang, et al. (2015) semakin rendah *w/b ratio* campuran mortar maka semakin tinggi kuat tekan mortar seperti yang dijelaskan dalam Gambar 2.5.



Gambar 2.9 Hubungan antara kuat tekan dengan *water:binder (w/b) ratio*

Sumber: Yang et al., 2014. *Mechanical properties and durability of ultra-high performance concrete incorporating coarse aggregate*, Key Engineering Material, Vol. 629-630, pp. 96-103.