

ANALISIS KUAT TEKAN *REACTIVE POWDER CONCRETE* DENGAN VARIASI *SILICA FUME* DAN LIMBAH SERBUK MARMER PADA PERAWATAN *STEAM CURING*

^{*)}Dian Arumningsih D.P.¹, Sumina¹, Kusdiman Joko Priyanto¹, Dinda Ajeng Anindita Putri¹

¹Fakultas Teknik, Universitas Tunas Pembangunan Surakarta

^{*)} Email: dian.arumningsih@lecture.utp.ac.id

ABSTRACT

Along with technology advancement today, demand for concrete is increasing, which poses a challenge to produce high-quality concrete. Thus, high-quality concrete innovations are developed through improving concrete composition and adding additional materials. This study uses pozzolanic materials, namely silica fume and marble powder as fillers. This concrete is known as RPC, where materials used to make concrete have a nanometer size and do not use coarse aggregates. The experimental method used and cylindrical concrete measuring 10 x 20 cm were tested. This study purpose was to determine the best silica fume levels and marble powder usage with variations in 0%; 5%; 10%; 15%; 20%; 25%; 30%; 35%; 40%; 45%; and 50% levels. The study results indicate that silica fume optimal content is 15% of the total binder, and marble powder optimal content is 30% of the total fine aggregate, which produces a compressive strength of 12.74 MPa and 12.10 MPa at 7 days age. Furthermore, 16 RPC concrete samples were produced which were tested at 7, 14, 21, and 28 days ages. The test specimens were given two treatment methods, namely hot steam and immersion, to determine two treatment methods impact on RPC concrete compressive strength. Of the two treatment methods carried out, steam treatment produced high initial compressive strength, with a maximum compressive strength of 66.24 MPa at 7 days age. Meanwhile, immersion treatment can produce very high final compressive strength in RPC concrete, with the highest compressive strength recorded reaching 103.82 MPa after 28 days.

Keyword: *reactive powder concrete, silica fume, steam curing*

ABSTRAK

Seiring dengan kemajuan teknologi sekarang ini, permintaan akan beton meningkat, yang menimbulkan tantangan untuk menghasilkan beton berkualitas tinggi. Dengan demikian, inovasi beton berkualitas tinggi dikembangkan melalui peningkatan bahan penyusun beton dan penambahan bahan tambahan. Penelitian ini menggunakan material pozzolan, yaitu asap silika dan serbuk marmer sebagai bahan pengisi. Beton ini dikenal sebagai RPC, di mana bahan-bahan yang digunakan untuk membuat beton memiliki ukuran nanometer dan tidak menggunakan agregat kasar. Metode eksperimen yang digunakan dan beton berbentuk silinder dengan ukuran 10 x 20 cm yang diuji. Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan kadar terbaik pemakaian asap silika dan serbuk marmer dengan variasi kadar sebanyak 0%; 5%; 10%; 15%; 20%; 25%; 30%; 35%; 40%; 45%; serta 50%. Hasil dari penelitian mengindikasikan bahwa kadar optimal asap silika adalah 15% dari total bahan pengikat, dan kadar optimal serbuk marmer adalah 30% dari total agregat halus, yang mana menghasilkan kuat tekan sebesar 12,74 MPa dan 12,10 MPa pada umur 7 hari. Selanjutnya, dihasilkan 16 sampel beton RPC yang diuji pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari. Benda uji diberi dua metode perlakuan, yaitu uap panas dan perendaman, untuk mengetahui dampak dari kedua metode perlakuan terhadap kekuatan tekan beton RPC. Dari dua metode perawatan yang dilakukan, perawatan dengan uap menghasilkan kekuatan tekan awal yang tinggi, dengan kekuatan tekan maksimum sebesar 66,24 MPa pada usia 7 hari. Sementara itu, perawatan perendaman dapat menghasilkan kuat tekan akhir yang sangat tinggi pada beton RPC, dengan kuat tekan tertinggi tercatat mencapai 103,82 MPa setelah 28 hari.

Kata kunci: *reactive powder concrete, silica fume, pemanasan uap*

1. PENDAHULUAN

Pada zaman yang sudah mencapai era globalisasi sekarang ini, perkembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) di dunia berkembang pesat sehingga menimbulkan persaingan dimana banyak negara bersaing untuk menjadi yang terbaik dalam beberapa bidang seperti salah satunya yaitu bidang pembangunan infrastruktur. Lebih dari 60% pembangunan struktur di Indonesia memanfaatkan beton dalam proses pembuatannya. Kebutuhan beton terus meningkat memicu adanya tantangan untuk menciptakan kualitas beton yang baik, salah satunya adalah beton mutu tinggi. Namun di sisi lain, beton yang memiliki kuat tekan tinggi akan lebih memerlukan bahan pengikat (binder) yaitu semen dalam komposisi campurannya, sehingga mengakibatkan produksi semen akan meningkat. Dari data Asosiasi Semen Indonesia (ASI) total kapasitas terpasang industri semen pada tahun 2022 mencapai 119 juta ton. Kegiatan industri semen menjadi salah satu penyumbang gas emisi CO₂ yang menyebabkan pencemaran udara. Mempertimbangkan bahwa 8-10% dari total emisi CO₂ dunia berasal dari pembuatan semen (Suhendro, 2014). Selain material semen, pasir merupakan salah satu material penyusun beton, penggunaan jumlah pasir yang meningkat menyebabkan tingginya angka industri dan pertambangan ilegal menyebabkan kerusakan pada lingkungan. Oleh karena itu, inovasi beton mutu tinggi dikembangkan melalui perbaikan material penyusun beton

dan penambahan bahan tambah.

Untuk mengatasi masalah tersebut dibutuhkan inovasi material substitusi semen, umumnya adalah material *pozzolan* yaitu asap silika yang dapat digunakan sebagai *cementitious* dan juga substitusi agregat halus yaitu limbah serbuk marmer. Penambahan *silica fume*, limbah serbuk marmer dan *steel fiber* pada campuran beton diharapkan dapat mengatasi permasalahan yang ada di bidang konstruksi yaitu dapat meningkatkan mutu beton, durabilitas beton, dan mengurangi permeabilitas beton, serta dapat mengurangi dampak negatif lingkungan yang ditimbulkan dari industri semen serta penambangan pasir ilegal. Beton mutakhir yang dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan akan material konstruksi beton berkekuatan tinggi adalah beton bubuk reaktif. Beton RPC, yang juga dikenal sebagai *Ultra High Performance Concrete* (UHPC), adalah jenis material yang sangat padat dan memiliki kekuatan tekan yang dapat mencapai 800 MPa. Kekuatan yang sangat besar ini dapat dicapai karena faktor air semen (FAS) yang digunakan dalam campuran RPC memiliki nilai yang sangat rendah (0,15 – 0,26). Selain itu, dilakukan juga optimasi pada struktur mikro matriks beton dengan menggunakan material berukuran nano (nm), yang berfungsi untuk mengurangi ruang kosong di antara butiran atau partikel, sehingga menghasilkan matriks beton yang sangat padat. Karena nilai FAS yang digunakan sangat rendah, maka perlu ditambahkan superplasticizer, agar beton segar RPC dapat dikerjakan dengan baik dan lancar. (Alkhaly, Yulius R., 2013).

Beton

Berdasarkan SNI 2847-2019, beton merupakan campuran semen *portland* atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*). Hal yang harus diperhatikan dalam pembuatan beton adalah kekuatan beton, *workability*, harga ekonomis, serta keawetan. Penambahan *admixture* dapat meningkatkan kuat tekan beton, elastisitas beton, dan kuat lentur beton.

Reactive Powder Concrete (RPC)

Reactive powder concrete atau beton bubuk reaktif adalah jenis beton baru yang memiliki kuat tekan ultra tinggi. Komponen penyusunnya adalah bubuk sangat halus yang memiliki kandungan silika tinggi. Ukuran agregat yang digunakan sangat kecil yaitu berukuran nanometer sehingga didapatkan campuran yang sangat padat dan homogen (Simatupang, Partogi H., dkk., 2017). RPC termasuk jenis beton UHPC dengan sifat material yang sangat padat dan kuat, tekanannya dapat mencapai lebih dari 100 MPa dan terbuat dari material yang sangat padat. Beton RPC diciptakan untuk memenuhi kebutuhan akan bahan bangunan beton yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi. Kekuatan tekan yang sangat tinggi dapat dicapai karena rendahnya kandungan air yang digunakan dalam campuran RPC, yaitu berkisar antara 0,15 hingga 0,26. Selain itu, gradasi material yang digunakan memiliki ukuran nanometer (nm) dengan tujuan mengurangi pori-pori yang terbentuk di antara butiran, sehingga dihasilkan struktur beton yang sangat padat.

Prinsip dasar pembuatan Reactive Powder Concrete (RPC)

Adapun beberapa prinsip dasar dalam pembuatan RPC sebagai berikut (Alkhaly, Yulius R., 2013):

- Menghilangkan agregat kasar untuk meningkatkan keseragaman beton;
- Pemanfaatan asap silika dalam reaksi pozzolanik;
- Mengoptimalkan campuran material granular untuk meningkatkan kepadatan dan membentuk matriks beton yang sangat padat;
- Penerapan tekanan pada beton yang baru dicetak untuk mencapai pemadatan yang optimal;
- Perawatan dengan panas dalam waktu lama bertujuan untuk memperbaiki sifat mekanis dari struktur mikro, mempercepat proses pengecilan dan pengeringan, sehingga menghasilkan stabilitas volume, mengurangi sifat rangkak, dan membuat sifat susut menjadi tidak signifikan.
- Penggunaan serat baja berkualitas tinggi ditujukan untuk meningkatkan daktilitas dan kekuatan tarik, memperkuat ketahanan terhadap tumbukan dan keausan, serta mengatasi masalah retak-mikro dengan lebih efektif.
- Pemanfaatan faktor air semen yang sangat rendah untuk mengurangi jumlah pori-pori dan kapiler, sehingga meningkatkan impermeabilitas yang menghasilkan daya tahanan dan kekuatan yang lebih baik.
- Pemakaian superplasticizer dalam dosis tinggi untuk mencapai kelecakan atau kemudahan dalam pengerjaan yang optimal.

Rancangan campuran Reactive Powder Concrete (RPC)

Karena saat ini belum ada metode standar yang dapat dijadikan pedoman dalam merancang campuran RPC, maka komposisi campuran yang akan disusun akan didasarkan pada pendekatan eksperimen dan bersifat percobaan dengan mengacu pada komposisi yang telah diteliti oleh para peneliti sebelumnya yang juga merupakan penemu beton RPC (Richard, P., & Cheyrezy, M. H., 1995). Komposisi campuran yang digunakan pada RPC berdasarkan berat material yang berasal dari beberapa penelitian yang dilakukan dari peneliti terdahulu dapat dilihat pada tabel

berikut ini.

Tabel 1. Komposisi Campuran Beton RPC dalam Penelitian Sebelumnya

Constituent	Richard and Cheyrezy (1995)				Matte & Moranville (1999)	Habel, et. al (2006)	Louis (2010)	Tam, et.al (2012)
	Plain		Steel Fibers (13 mm)		Steel Fibers	Steel Fibers (10 mm)	Steel Fibers (13 mm)	Plain
Portland Cement	1	1	1	1	1	1	1	1
Silica Fume	0,25	0,23	0,25	0,23	0,325	0,26	0,21	0,325
Quartz Sand	1,1	1,1	1,1	1,1	1,43	0,7	-	1,43
Crushed Quartz	-	0,39	-	0,39	0,3	-	-	0,3
Glass Sand	-	-	-	-	-	-	1,032	-
Superplasticizer	0,016	0,019	0,016	0,019	0,018	0,018	0,08	0,025
Steel Fibers	-	-	0,175	0,175	0,275	0,45	0,21	-
Water	0,15	0,17	0,17	0,19	0,2	0,18	0,26	0,265
Pre-setting Pressure (MPa)	-	-	-	-	-	-	-	-
Post-setting Heat Treatment Temperature (°C)	20	90	20	90	90	20	20	27
Compressive Strength (MPa)	170 - 230				216	168	128	145

(Sumber : Richard, P., & Cheyrezy, M. H., 1995)

Material penyusun *Reactive Powder Concrete (RPC)*

1. Semen Portland

Semen berasal dari *caementum* (bahasa Latin), yang artinya "bahan perekat". Semen *portland* merupakan bubuk halus yang diperoleh dengan menggiling klinker (yang didapat dari pembakaran suatu campuran yang baik dan merata antara kapur dan bahan-bahan yang mengandung silika, alumina, dan oksid besi), dengan batu gips sebagai bahan tambah dalam jumlah yang cukup. Dari penelitian sebelumnya (Hardjasaputra, H., 2009) didapat bahwa semen terbaik untuk UHPC adalah semen *portland composite* yang mempunyai kandungan C₃A (*Tricalcium Aluminate*) paling sedikit. Hal ini dimaksudkan untuk memudahkan terjadi pembentukan kristal CSH orde kedua.

2. Agregat

Seperti halnya beton normal, UHPC dapat pula direncanakan untuk berbagai variasi penggunaan agregat. UHPC saat ini dikembangkan hanya menggunakan agregat halus yaitu pasir ukuran 0.125 – 0.5 mm [DIN 4226 - 1].

3. Air

Air pada campuran beton berfungsi sebagai pelicin antara campuran agregat dan semen dengan tujuan agar mudah dikerjakan dengan tetap menjaga tingkat *workability* campuran beton. Air juga berfungsi untuk membantu reaksi kimia yang terjadi dalam proses pengikatan. Air mengandung senyawa yang dapat mempengaruhi kualitas beton, maka diperlukan standar untuk kualitas air. Diperlukan perbandingan *water content* yang sesuai untuk menghasilkan kualitas beton yang baik.

4. Bahan Tambah

Menurut ACI (*American Concrete Institute*), bahan tambah adalah bahan yang ditambahkan ke dalam beton atau mortar, di luar air, agregat, dan semen hidrolik. Penggunaan bahan tambah harus mengikuti standar yang berlaku seperti SNI (Standar Nasional Indonesia), ASTM (*American Society for Testing and Materials*), atau ACI (*American Concrete Institute*) dan yang paling penting adalah memperhatikan petunjuk penggunaan produk yang digunakan.

a. Silica Fume/Asap Silika

Berdasarkan standar "Specification for Silica Fume for Use in Hydraulic Cement Concrete and Mortar" (ASTM. C.1240, 1995), *silica fume* adalah *pozzolan* yang berukuran sangat halus, dimana komposisinya terdiri dari silika yang dihasilkan dari tanur tinggi atau sisa produksi dari silikon atau alloy besi silikon yang dikenal juga sebagai gabungan antara asap silika dengan *microsilica*. *Silica fume* atau asap silika merupakan bahan yang mengandung kadar silika tinggi dan berfungsi sebagai pengisi (*filler*) dalam beton. Kandungan dalam asap silika berupa senyawa SiO₂ lebih dari 90% dengan ukuran sekitar 1/100 dari ukuran rata-rata partikel semen.

b. Pasir Marmer (Serbuk Marmer)

Serbuk marmer merupakan limbah dari hasil pemotongan marmer. Dalam proses pemotongan marmer, 25% dari berat awalnya akan hilang akibat dari proses pemotongan tersebut. Banyak studi yang memanfaatkan limbah dari

pemotongan marmer sebagai substitusi semen karena kemampuannya dalam mengikat (Ergun A, 2010). Namun, seluruh penelitian yang telah dilaksanakan menunjukkan bahwa limbah pemotongan marmer mengurangi kekuatan pada usia akhir akibat pengenceran pada C2S dan C3S. Tidak seperti penelitian yang menggunakan serbuk marmer sebagai pengganti agregat halus, ia menunjukkan banyak manfaat, seperti mengurangi porositas, meningkatkan kemudahan dalam pengerjaan, dan memperkuat kekuatan pada tahap awal (Demirel B, 2010). Bahar Demirel menyatakan bahwa mengganti pasir dengan serbuk marmer dapat meningkatkan kekuatan awal beton. Hal ini disebabkan oleh efek pengisi dari limbah pemotongan marmer.

c. *Superplasticizer*

Berdasarkan ASTM C494 dan Standar Inggris 5075, superplastisizer merupakan bahan kimia tambahan yang sangat efisien dalam mengurangi kandungan air. Penambahan superplasticizer dihasilkan dari adukan yang memiliki faktor air semen lebih rendah pada tingkat kekentalan yang setara, atau dapat juga diperoleh adukan yang lebih encer dengan faktor air semen yang serupa. Dengan demikian, kekuatan tekan beton meningkat lebih tinggi. Superplasticizer tipe F (pengurang air berkapasitas tinggi) adalah bahan kimia yang digunakan untuk mengurangi jumlah air hingga 12% atau lebih.

d. Serat Baja (*Steel Fiber*)

Sifat getas (*brittle*) pada beton dapat dikurangi dengan menambahkan serat baja (*steel fiber*) sehingga diperoleh struktur beton RPC dengan ukuran yang lebih tipis dan berat yang lebih ringan, kuat tekan tinggi menjadi daktail, serta mampu memikul beban berat (Hardjasaputra, H., 2009). Keuntungan penambahan *steel fiber* ke dalam campuran beton RPC yaitu dapat menambah durabilitas beton, meningkatkan kuat tarik beton hingga sampai 25 MPa, meningkatkan kuat tekan, kuat lentur, dan kuat desak beton, memperkecil kemungkinan terjadinya segregasi, mengurangi kandungan udara dan nilai *slump*, mencegah membesarnya retak rambut yang terjadi dan meningkatkan beban kejutan (*impact resistance*).

Perawatan *steam curing*

Perawatan silinder uji melalui proses pemanasan uap (*steam curing*) dilakukan dengan menempatkan beton ke dalam kotak uap setelah dua jam sejak pembuatan benda uji itu. Prosedur dalam proses pemberian steam terdiri dari langkah-langkah berikut: dua jam untuk tahap pemberian steam yang pertama, setengah jam pertama digunakan untuk menaikkan suhu hingga mencapai 70°C, kemudian dilanjutkan dengan pemberian steam pada suhu stabil 70°C selama dua jam, dan diakhiri dengan penurunan suhu selama setengah jam, menjadikan total durasi pemberian steam adalah lima jam. Selama periode penguapan yang berlangsung selama 7 jam, ditambahkan durasi tambahan pada suhu konstan selama 5 jam. Perangkat steam yang digunakan adalah timbangan laboratorium yang dilengkapi dengan pengaturan untuk tekanan dan suhu, sedangkan tekanan uap dialirkan melalui pipa boiler menuju kotak steam. (Rommel, E., 2011).

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini disusun agar tujuan yang diinginkan dalam suatu penelitian dapat tercapai dengan baik. Metode penelitian berisikan langkah-langkah penelitian suatu masalah, kasus, gejala atau fenomena dengan jalan ilmiah menghasilkan jawaban yang dapat dipertanggung jawabkan. Metode ini dapat dilaksanakan di dalam ataupun di luar laboratorium. Dalam penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimental yang dilaksanakan di dalam laboratorium maupun diluar laboratorium. Penelitian dilakukan dengan melakukan penambahan asap silika dan serbuk marmer dengan kadar 0%; 5%; 10%; 15%; 20%; 25%; 30%; 35%; 40%; 45%; serta 50% untuk mendapatkan kadar optimum penggunaan. Pengujian yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah menganalisis kuat tekan berdasarkan kadar optimum penggunaan asap silika dan serbuk marmer serta menganalisis kuat tekan beton RPC berdasarkan perbandingan metode perawatan yang dilakukan, yaitu pemanasan uap dan *curing* konvensional (perendaman).

Pengumpulan data

Tahapan persiapan mencakup kegiatan kajian pustaka dan penentuan masalah. Studi literatur mencakup serangkaian aktivitas mencari dan menganalisis sumber-sumber yang relevan serta dapat dipercaya untuk mengumpulkan materi acuan dalam penelitian ini. Literatur yang digunakan terdiri dari buku-buku dan jurnal ilmiah mengenai beton RPC yang memanfaatkan asap silika dan serbuk marmer, serta dampak metode perawatan terhadap kekuatan tekan beton. Teknik pengumpulan data dilaksanakan dengan metode eksperimen terhadap benda uji dari berbagai kondisi perlakuan yang diuji di laboratorium. Untuk beberapa hal pada pengujian bahan, digunakan data sekunder yang dikarenakan penggunaan bahan dan sumber yang sama.

Bahan uji

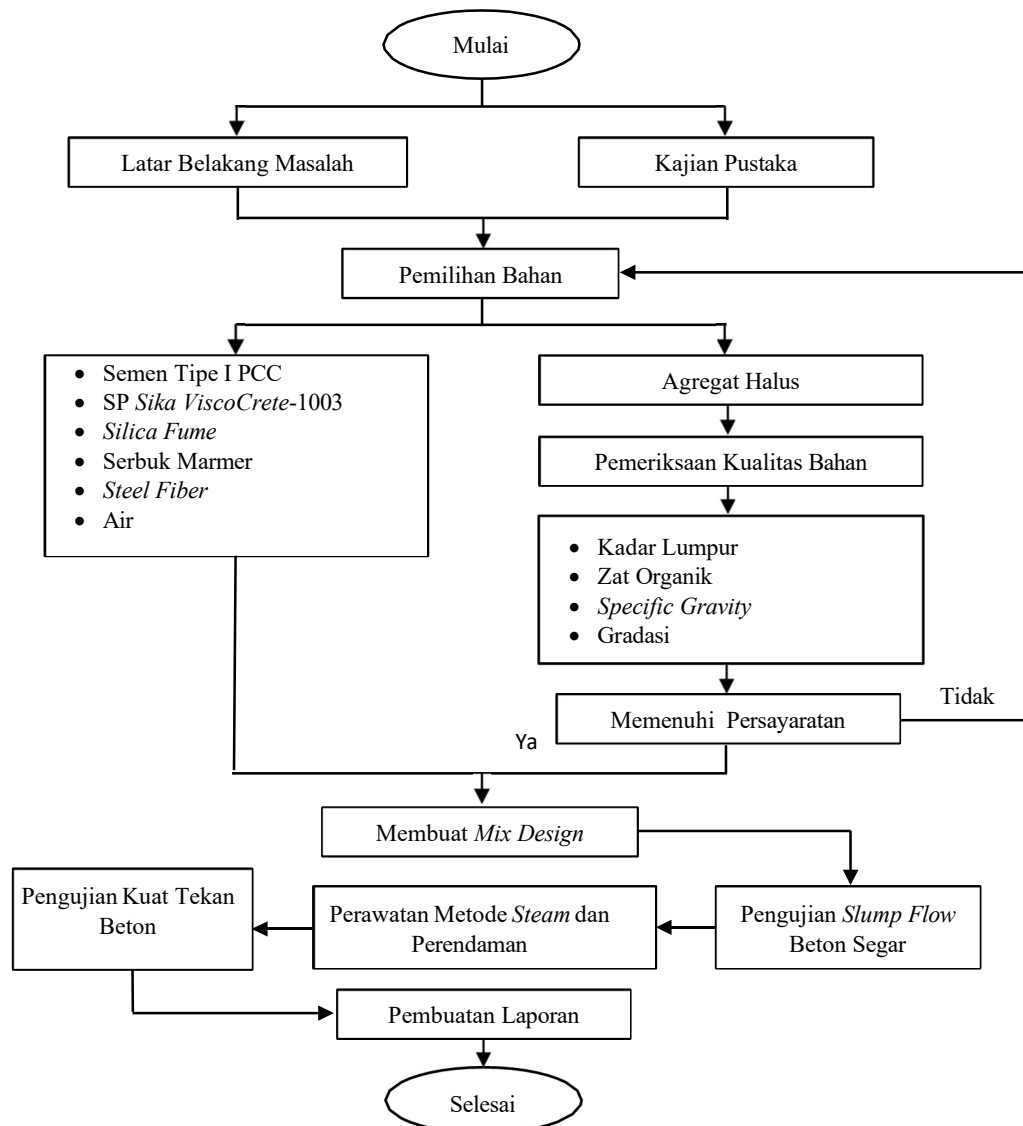
Bahan-bahan yang digunakan sebagai campuran beton antara lain:

1. *Portland Composite Cement* merk Tiga Roda;
2. Asap silika merk Sika Fume dari PT Sika Indonesia;
3. Agregat halus pasir alami lolos ayakan 4,75 mm;
4. Serbuk marmer lolos ayakan 0,075 mm (No. 200);
5. *Steel fiber* Dramix 3D dari PT Bekaert Indonesia;
6. Air PDAM;
7. *Superplasticizer* Sika ViscoCrete 1003 dari PT Sika Indonesia.

Benda uji

Benda uji pada penelitian ini dibuat dengan cetakan berbentuk silinder berdiameter 10cm dan tinggi 20cm untuk menentukan kadar optimum masing-masing inovasi yang digunakan terhadap berat dan kuat tekan beton. Pada penelitian ini menggunakan variasi asap silika antara 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, dan 50% dari total berat semen. Variasi serbuk marmer antara antara 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, dan 50% dari total berat agregat halus. Kemudian ditentukan kadar optimum asap silika dan serbuk marmer yang digunakan pada campuran beton RPC. Setelahnya, dibuat specimen untuk campuran beton RPC yang akan diuji kekuatan tekan pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari dengan dua metode perawatan, yaitu pemanasan uap dan perendaman.

Tahapan penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3. ANALISA DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian pasir

Berikut ini adalah hasil dari pengujian pasir yang digunakan sebagai agregat halus..

Tabel 2. Hasil pengujian pasir

No	Jenis Pengujian	Hasil Uji	Syarat	Standar Pengujian	Kesimpulan
1	Kandungan Lumpur	1,0 %	Maks. 5%	SNI ASTM C117:2012	Memenuhi
2	<i>Bulk Spesific Gravity</i>	2,51	-	SNI 1970:2008	Memenuhi
3	<i>Bulk Spesific Gravity SSD</i>	2,55	2,5 – 2,7	SNI 1970:2008	Memenuhi
4	<i>Apparent Spesific Gravity</i>	2,58	-	SNI 1970:2008	Memenuhi
5	<i>Absorbtion</i>	1,62 %	2 %	SNI 1970:2008	Memenuhi
6	Modulus Halus Butir	2,68	2,3 – 3,1	SNI ASTM C136-06:2012	Memenuhi

(Sumber : Hasil Penelitian, 2023)

Hasil pengujian *x-ray fluorescence silica fume*

Pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) ini bertujuan untuk mengidentifikasi senyawa kimia yang terkandung dalam *silica fume*. Berikut adalah hasil pengujian XRF asap silika sebagai *cementitious*.

Tabel 3. Analisis kuantitatif pengujian XRF pada *silica fume*

Formula	Z	Concentration	Status	Line 1
Silikon Dioksida (SiO ₂)	14	85,76 %	<i>Fit Spectrum</i>	Si KA1/EQ20
Ferri Oksida (Fe ₂ O ₃)	26	2,99 %	<i>Fit Spectrum</i>	Fe KA1/EQ20
Sulfur Dioksida (SO ₃)	16	2,83 %	<i>Fit Spectrum</i>	S KA1/EQ20
Kalium Oksida (K ₂ O)	19	2,33 %	<i>Fit Spectrum</i>	K KA1/EQ20
Kalsium Oksida (CaO)	20	1,93 %	<i>Fit Spectrum</i>	Ca KA1/EQ20
Difosfor Pentaoksida (P ₂ O ₅)	15	1,57 %	<i>Fit Spectrum</i>	P KA1/EQ20
Klorida (Cl)	17	1,44 %	<i>Fit Spectrum</i>	Cl KA1/EQ20
Senyawa lain	-	1,07 %	<i>Fit Spectrum</i>	-

(Sumber : Hasil Pengujian, 2023)

Hasil pengujian *x-ray fluorescence serbuk marmer*

Pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) ini bertujuan untuk mengidentifikasi senyawa kimia yang terkandung pada serbuk marmer. Berikut adalah hasil pengujian XRF serbuk marmer sebagai pengganti agregat halus.

Tabel 4. Analisis kuantitatif pengujian XRF pada serbuk marmer

Formula	Z	Concentration	Status	Line 1
Kalsium Oksida (CaO)	20	54,02 %	<i>Fit Spectrum</i>	Ca KA1/EQ20
Silikon Dioksida (SiO ₂)	14	14,74 %	<i>Fit Spectrum</i>	Si KA1/EQ20
Natrium Oksida (Na ₂ O)	11	9,34 %	<i>Fit Spectrum</i>	Na KA1/EQ20
Ferri Oksida (Fe ₂ O ₃)	26	6,92 %	<i>Fit Spectrum</i>	Fe KA1/EQ20
Magnesium Oksida (MgO)	12	5,85 %	<i>Fit Spectrum</i>	Mg KA1/EQ20
Aluminium Oksida (Al ₂ O ₃)	13	2,95 %	<i>Fit Spectrum</i>	Al KA1/EQ20
Kalium Oksida (K ₂ O)	19	1,52 %	<i>Fit Spectrum</i>	K KA1/EQ20
Sulfur Dioksida (SO ₃)	16	1,33 %	<i>Fit Spectrum</i>	S KA1/EQ20
Senyawa lain	-	3,33 %	<i>Fit Spectrum</i>	-

(Sumber : Hasil Pengujian, 2023)

Hasil perhitungan campuran *reactive powder concrete*

Mix design yang digunakan pada pembuatan beton RPC dengan inovasi asap silika dan serbuk marmer dibuat dengan memperhatikan komposisi peneliti terdahulu (Richard, P., & Cheyrezy, M. H., 1995). Asap silika yang digunakan sebesar 15% dari berat binder, *superplasticizer* yang digunakan sebanyak 1,9% dari berat binder dan factor air semen (FAS) sebesar 0,19. Rincian perhitungan mengenai rancang campur dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 5. Rekapitulasi Rancang Campur RPC

Material	Rasio	Volume 1 m ³		Volume Silinder			
				1 silinder		8 silinder + SF	
<i>Portland Composite Cement</i>	1	595	kg	0,893	kg	8,211	kg
<i>Silica Fume</i>	0,23	105	kg	0,158	kg	1,449	kg
<i>Pasir Alam</i>	1,1	753	kg	1,129	kg	10,387	kg
<i>Pasir Marmer</i>	0,39	291	kg	0,436	kg	4,015	kg
<i>Steel Fiber</i>	0,175	8,42	kg	0,013	kg	0,116	kg
<i>Superplasticizer</i>	0,019	5,74	lt	0,009	lt	0,079	lt
<i>Air</i>	0,19	133	lt	0,200	lt	1,835	lt

(Sumber : Hasil Penelitian, 2023)

Hasil pengujian slump flow

Salah satu parameter dari beton RPC yaitu nilai *slump flow*. Dari pembuatan campuran adukan beton akan diperoleh nilai *slump flow* yang diperlukan untuk mengetahui tingkat workabilitas campuran beton. Hasil pengujian *slump flow* dari beton RPC pada penelitian ini telah disajikan pada tabel berikut.

Tabel 6. Hasil pengujian *slump flow* beton RPC

Campuran	D1 (mm)	D2 (mm)	D _{rata-rata} (mm)	T _{rata-rata} (detik)
Ke-1	680	660	670	8,23
Ke-2	650	670	660	7,42

(Sumber : Hasil Penelitian, 2023)

Hasil pengujian kekuatan tekan beton dengan variasi silica fume

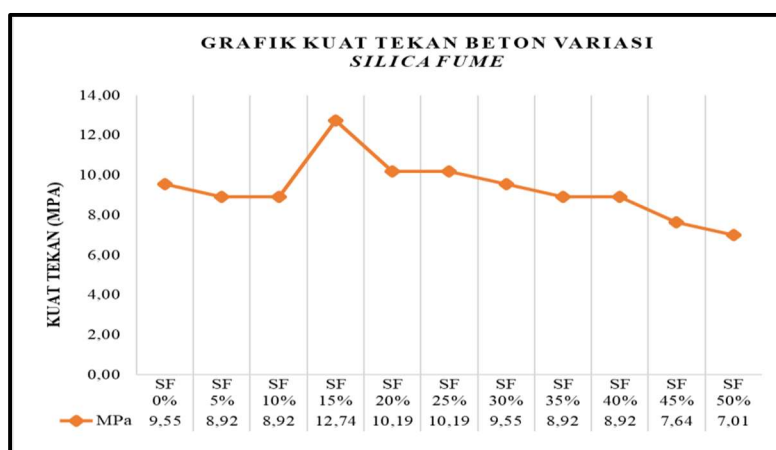
Pengujian kuat tekan beton yang dilakukan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan alat *Compression Testing Machine* (CTM) ketika beton telah mencapai umur 7 hari. Hasil pengujian kekuatan tekan beton dengan variasi asap silika yaitu 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, dan 50% dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 7. Hasil uji kuat tekan beton variasi *silica fume*

Kode Benda Uji	Kadar <i>Silica Fume</i>	Umur Pengujian (Hari)	Hasil Uji Kuat Tekan	
			kN	MPa
SF-0	Semen 100% + SF 0%	7	75	9,55
SF-5	Semen 95% + SF 5%	7	70	8,92
SF-10	Semen 90% + SF 10%	7	70	8,92
SF-15	Semen 85% + SF 15%	7	100	12,74
SF-20	Semen 80% + SF 20%	7	80	10,19
SF-25	Semen 75% + SF 25%	7	80	10,19
SF-30	Semen 70% + SF 30%	7	75	9,55
SF-35	Semen 65% + SF 35%	7	70	8,92
SF-40	Semen 60% + SF 40%	7	70	8,92
SF-45	Semen 55% + SF 45%	7	60	7,64
SF-50	Semen 50% + SF 50%	7	55	7,01

(Sumber : Hasil Penelitian, 2023)

Grafik pengujian kekuatan tekan beton dengan variasi asap silika adalah sebagai berikut:



(Sumber : Hasil Penelitian, 2023)

Gambar 2. Grafik kuat tekan beton variasi *silica fume*

Hasil pengujian kuat tekan beton variasi serbuk marmer

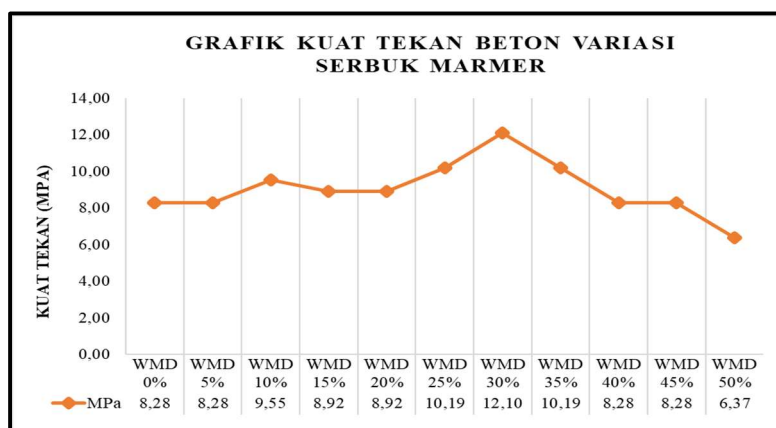
Hasil pengujian kuat tekan beton variasi serbuk marmer yaitu 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, dan 50% dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 8. Hasil uji kuat tekan beton variasi serbuk marmer

Kode Benda Uji	Kadar Serbuk Marmer	Umur Pengujian (Hari)	Hasil Uji Kuat Tekan	
			kN	MPa
WMD-0	Pasir 100% + WMD 0%	7	65	8,28
WMD-5	Pasir 95% + WMD 5%	7	65	8,28
WMD-10	Pasir 90% + WMD 10%	7	75	9,55
WMD-15	Pasir 85% + WMD 15%	7	70	8,92
WMD-20	Pasir 80% + WMD 20%	7	70	8,92
WMD-25	Pasir 75% + WMD 25%	7	80	10,19
WMD-30	Pasir 70% + WMD 30%	7	95	12,10
WMD-35	Pasir 65% + WMD 35%	7	80	10,19
WMD-40	Pasir 60% + WMD 40%	7	65	8,28
WMD-45	Pasir 55% + WMD 45%	7	65	8,28
WMD-50	Pasir 50% + WMD 50%	7	50	6,37

(Sumber : Hasil Penelitian, 2023)

Grafik pengujian kuat tekan beton variasi asap silika adalah sebagai berikut:



(Sumber : Hasil Penelitian, 2023)

Gambar 3. Grafik kuat tekan beton variasi serbuk marmer

Berdasarkan hasil pengujian terhadap kekuatan tekan beton dengan variasi penggunaan asap silika dan serbuk marmer di atas, dapat disimpulkan bahwa tingkat penggunaan asap silika yang paling optimal adalah 15% dari total berat bahan pengikat. Dengan kadar tersebut, diperoleh kekuatan tekan tertinggi sebesar 12,74 MPa pada usia 7

hari. Selanjutnya, kadar ideal serbuk marmer adalah 30% dari total berat agregat halus, yang menghasilkan kekuatan tekan maksimum sebesar 12,10 MPa setelah 7 hari. Tingkat inovasi tersebut selanjutnya diterapkan dalam campuran beton RPC.

Hasil pengujian kuat tekan beton RPC umur 7, 14, 21, dan 28 hari

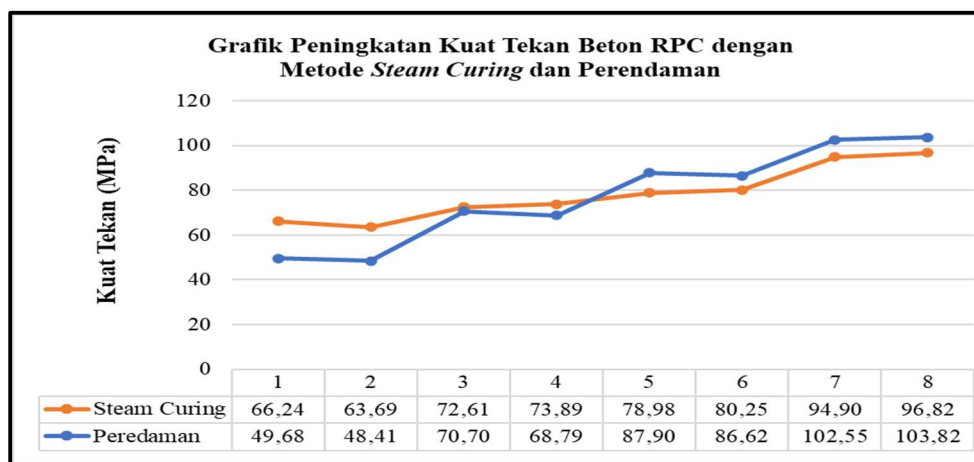
Melaksanakan pengujian kekuatan tekan pada beton sesuai dengan standar SNI 1974: 2011. Pengujian beton dilaksanakan dengan menggunakan wadah silinder yang berdiameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Uji coba kekuatan tekan dilaksanakan pada usia 7, 14, 21, dan 28 hari. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk membandingkan nilai kuat tekan dengan menggunakan dua metode perawatan yang berbeda, yaitu perawatan uap dan perendaman. Uji ini dilaksanakan dengan menggunakan Mesin Uji Kompresi. Data hasil pengujian kekuatan tekan beton diperoleh sebagai berikut.

Tabel 9. Rekapitulasi hasil uji kuat tekan beton RPC

Kode Benda Uji	Metode Perawatan	Umur Pengujian (Hari)	Hasil Uji Kuat Tekan	
			kN	MPa
S-1	Pemanasan uap	7	520	66,242
S-2	Pemanasan uap	7	500	63,694
P-1	Perendaman	7	390	49,682
P-2	Perendaman	7	380	48,408
S-3	Pemanasan uap	14	570	72,611
S-4	Pemanasan uap	14	580	73,885
P-3	Perendaman	14	555	70,701
P-4	Perendaman	14	540	68,790
S-5	Pemanasan uap	21	620	78,981
S-6	Pemanasan uap	21	630	80,255
P-5	Perendaman	21	690	87,898
P-6	Perendaman	21	680	86,624
S-7	Pemanasan uap	28	745	94,904
S-8	Pemanasan uap	28	760	96,815
P-7	Perendaman	28	805	102,548
P-8	Perendaman	28	815	103,822

(Sumber : Hasil Penelitian, 2023)

Grafik rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan beton RPC pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari adalah sebagai berikut :



(Sumber : Hasil Penelitian, 2023)

Gambar 4. Grafik yang membandingkan kekuatan tekan beton RPC menggunakan metode pemanasan uap dan perendaman

Dari hasil rekapitulasi pengujian kuat tekan beton, dapat dilihat bahwa beton RPC dengan metode perawatan pemanasan uap mempunyai kuat tekan awal yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton RPC dengan metode perawatan perendaman. Seiring dengan bertambahnya umur beton, peningkatan kuat tekan beton RPC dengan metode pemanasan uap tidak meningkat signifikan seperti halnya beton RPC dengan metode perawatan

perendaman yang mempunyai kuat tekan awal lebih rendah namun meningkat signifikan pada umur akhir dimana kuat tekan pada umur 28 hari mencapai 103,82 MPa. Secara keseluruhan, hasil pengujian terhadap kekuatan tekan menunjukkan bahwa kedua metode perawatan memiliki keunggulan masing-masing, terutama metode pengobatan uap yang dapat memberikan kekuatan awal yang tinggi. Namun, kekuatan tekan pada umur 28 hari sedikit lebih rendah dibandingkan dengan beton yang menggunakan metode perawatan konvensional. Hasil penelitian ini konsisten dengan temuan sebelumnya, dimana beton berkualitas tinggi yang diproses dengan steam selama 6 jam pada suhu 60°C menunjukkan kekuatan tekan pada umur 28 hari yang sedikit lebih rendah dibandingkan dengan beton berkualitas tinggi yang dirawat melalui cara perendaman (Rommel, E., 2011).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, asap silika dapat digunakan sebagai substitusi semen serta serbuk marmer dapat digunakan sebagai pengganti agregat halus pada campuran beton RPC. Dari hasil percobaan variasi asap silika dan serbuk marmer dengan kadar 0%; 5%; 10%; 15%; 20%; 25%; 30%; 35%; 40%; 45%; serta 50% dapat diketahui bahwa kadar optimum penggunaan asap silika adalah 15% dari berat total binder, sedangkan kadar optimum serbuk marmer sebagai *filler* adalah yang digunakan 30% dari total agregat halus. Penggunaan kadar optimum tersebut dapat dibandingkan melalui peningkatan kuat tekan dengan signifikan dan mengurangi workabilitas minimal. Dari hasil pengujian XRF serbuk marmer memiliki kandungan CaO tinggi yang dapat bereaksi dengan H₂O yang akan menghasilkan Ca(OH)₂ serta panas tambahan yang dapat bereaksi dengan SiO₂ yang terdapat pada asap silika yang membentuk gel CSH sekunder sehingga dapat membantu pengikatan beton. Selanjutnya, berdasarkan hasil pengujian kuat tekan 16 sampel beton RPC yang diberi 2 metode perawatan yang berbeda dapat diketahui bahwa beton yang mengalami perawatan dengan pemanasan uap menghasilkan kekuatan tekan awal yang lebih tinggi, dengan kekuatan tekan tertinggi mencapai 66,24 MPa pada usia 7 hari. Hal ini disebabkan oleh proses penguapan yang terjadi pada beton, yang mempercepat proses hidrasi sehingga diperoleh kekuatan awal yang tinggi. Metode perendaman berperan penting dalam mencapai kuat tekan akhir yang tinggi pada beton RPC, yang mencapai kuat tekan maksimum sebesar 103,82 MPa pada usia 28 hari. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa perendaman yang dilakukan secara berkelanjutan pada beton dapat mempertahankan proses hidrasi yang berlangsung serta mencegah hilangnya air dalam beton.

DAFTAR PUSTAKA

- Alkhaly, Yulius R. (2013). Reactive Powder Concrete dengan Sumber Silika dan dari Limbah Bahan Organik. *Teras Jurnal*, 3(2), 157-166.
- American Standard Testing and Materials (ASTM C. 1240). (1995). *Specification for Silica Fume for Use in Hydraulic Cement Concrete and Mortar*.
- Badan Standar Nasional (2011). SNI 1974-2011. *Cara Uji Kuat Tekan Beton Dengan Benda Uji Silinder*. Jakarta.
- Demirel, Bahar. (2010). The Effect of the Using Waste Marble Dust as Fine Sand on the Mechanical Properties of the Concrete. *International Journal of the Physical Sciences*, 5(9), 1372-1380.
- Ergun, Ali. (2011). Effects of the Usage of Diatomite and Waste Marble Powder as Partial Replacement of Cement on the Mechanical Properties of Concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 806-812.
- Hardjasaputra, Harianto. (2009). Ultra High Performance Concrete - Beton Generasi Baru Berbasis Teknologi Nano. Jakarta, Asosiasi Semen Indonesia. (2023). *Total kapasitas terpasang industri semen Indonesia pada tahun 2022*.
- <https://www.neraca.co.id/article/173383/konsolidasi-bumn-semen-semen-indonesia-siap-pacu-bisnis-di-proyek-ikn>
- Richard, P., & Cheyrezy, M. H. (1995). Composition of Reactive Powder Concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501- 1511.
- Rommel, Erwin. (2011). Pengaruh Pemberian Perawatan Steam Curing Terhadap Kekuatan dan Durabilitas Beton dengan Semen Pozzolan (Effect of Steam Curing on Strength and Durability Concrete with Cement Pozzolan). *Media Teknik Sipil*, 9(2), 142-154.
- Simatupang, Partogi H., Nasjono, Judi K., Mite, Kresensia G. (2017). Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Kuat Tekan Reactive Powder Concrete. *Jurnal Teknik Sipil*, 6(2), 219-229.
- Suhendro, Bambang. (2014). Toward Green Concrete for Better Sustainable Environment. *Procedia Engineering* 95(2014) 305–320