

Pengaruh Jenis Semen *Portland Composite Cement* dan *Pozzolan Portland Cement* Terhadap Faktor Konversi Kuat Tekan Beton Mutu Normal dan Tinggi

Mohammad Sigit Setyatama¹, Elvis Saputra^{1*}

¹⁾ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km. 14,5 Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, 55584

*Corresponding Author's email: elvis.saputra@uii.ac.id

Diterima : 12 Januari 2025
Direvisi : 3 Maret 2025

Disetujui : 6 Mei 2025
Diterbitkan : 30 Mei 2025

Abstract: With the advancement of concrete technology, including cement types, materials, additives, and environmental conditions, the conversion factor of concrete compressive strength differs from Indonesia Reinforced Concrete Regulation (PBI) 1971, which was based on Ordinary Portland Cement (OPC). PBI 1971 has not yet covered high-strength concrete and needs to be adjusted for Portland Composite Cement (PCC) and Pozzolan Portland Cement (PPC). This study determines the compressive strength conversion factors for normal-strength (25 MPa) and high-strength concrete (42 MPa) at the ages of 3, 7, 14, 21, and 28 days using PCC and PPC cement. The high-strength concrete mix includes 10% silica fume and 0.5% superplasticizer, with compressive strength testing using cylindrical specimens. The test results were modeled using regression to calculate the conversion factor, defined as the ratio of compressive strength at a specific age to that at 28 days. The results show that, for normal-strength concrete, PCC cement has a higher conversion factor than PBI 1971 at 3 and 7 days, while PPC cement is higher due to its pozzolanic content. For high-strength concrete, the conversion factors of PCC and PPC are relatively similar to PBI 1971, except at 3 days, where PPC is higher. Overall, the conversion factors do not significantly differ from PBI 1971; however, PPC cement is more suitable for achieving high early strength, while PCC enhances workability and accelerates concrete strength development. This applies to both normal-strength and high-strength concrete.

Keywords : conversion factor; PPC; PCC; high strength; normal strength.

Abstrak: Seiring perkembangan teknologi beton, termasuk jenis semen, material, aditif, dan kondisi lingkungan, menyebabkan faktor konversi kuat tekan beton berbeda dari Peraturan Beton Bertulang Indonesia (PBI) 1971 yang berbasis semen *Ordinary Portland Cement (OPC)*. PBI 1971 belum mencakup beton mutu tinggi dan perlu disesuaikan untuk semen *Portland Composite Cement (PCC)* dan *Pozzolan Portland Cement (PPC)*. Penelitian ini menentukan faktor konversi kuat tekan beton mutu normal (25 MPa) dan tinggi (42 MPa) pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari dengan semen PCC dan PPC. Campuran beton mutu tinggi menggunakan *silica fume* 10% dan *superplasticizer* 0,5%, dengan pengujian kuat tekan berbentuk silinder. Hasil pengujian dimodelkan dengan regresi untuk menghitung faktor konversi, yaitu perbandingan kuat tekan pada umur tertentu terhadap umur 28 hari. Hasilnya, pada beton mutu normal, semen PCC memiliki faktor konversi lebih tinggi dari PBI 1971 pada umur 3 dan 7 hari, sementara semen PPC lebih tinggi akibat kandungan pozzolan. Pada beton mutu tinggi, faktor konversi PCC dan PPC relatif sama dengan PBI 1971, kecuali pada umur 3 hari, di mana PPC lebih tinggi. Secara keseluruhan, faktor konversi tidak jauh berbeda dengan PBI 1971, namun semen PPC lebih cocok untuk kuat tekan awal yang tinggi, sementara PCC meningkatkan *workability* dan percepatan pertumbuhan beton. hal tersebut berlaku pada beton mutu normal dan mutu tinggi.

Kata kunci : faktor konversi; PPC; PCC; mutu tinggi; mutu normal.

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan karena kekuatannya, durabilitas, dan fleksibilitasnya sebagai material komposit. Beton tersusun dari agregat

kasar (kerikil), agregat halus (pasir), semen, air, dan bahan tambah (*admixtural*) yang dapat meningkatkan sifat-sifat tertentu sesuai kebutuhan. Kualitas atau mutu beton umumnya diukur berdasarkan karakteristik kekuatannya, terutama kekuatan tekan. Beton biasanya mencapai

kekuatan penuh (100%) pada usia 28 hari, sebagaimana menjadi standar internasional [1]. Namun, dalam pelaksanaan pekerjaan konstruksi, sering kali diperlukan prediksi kekuatan tekan pada usia yang lebih dini, seperti pada umur 3, 7, 14, atau 21 hari. Prediksi ini menjadi sangat penting untuk memastikan mutu beton memenuhi persyaratan desain sebelum mencapai umur 28 hari. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode atau angka konversi yang akurat untuk memprediksi kekuatan beton pada berbagai umur tersebut sehingga dapat memberikan jaminan terhadap keberlanjutan pekerjaan konstruksi dengan mutu yang sesuai standar.

Dalam Pedoman Beton Bertulang Indonesia (PBI) 1971 Pasal 4.1, telah dirumuskan faktor konversi kekuatan beton pada berbagai umur dan hingga saat ini, PBI 1971 masih menjadi acuan utama dalam menentukan faktor konversi kuat tekan beton di Indonesia [2]. Namun, terdapat sejumlah keterbatasan dalam penerapan pedoman ini. Salah satunya adalah tidak adanya nilai faktor konversi yang spesifik untuk beton mutu tinggi dengan jenis semen *Portland Composite Cement* (PCC) dan *Portland Pozzolan Cement* (PPC). Hal ini mengakibatkan kesulitan dalam memprediksi kekuatan beton pada umur tertentu secara akurat, sehingga dapat memunculkan risiko kesalahan dalam penentuan apakah kekuatan yang disyaratkan telah terpenuhi. Selain itu, PBI 1971 masih menggunakan benda uji standar berbentuk kubus, yang saat ini dianggap kurang relevan, karena berbeda dengan standar terbaru dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2847 (2019) yang menetapkan penggunaan benda uji silinder dengan ukuran 15 x 30 cm [3]. Perbedaan ini menimbulkan tantangan dalam memastikan hasil pengujian yang konsisten dan sesuai dengan standar modern, serta berpotensi memengaruhi kelayakan dan kualitas konstruksi secara keseluruhan.

Saat ini, pekerjaan konstruksi mulai banyak menggunakan semen PCC (*Portland Composite Cement*) dan PPC (*Pozzolan Portland Cement*) karena beberapa alasan utama, yaitu ketersediaannya yang melimpah serta sifatnya yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan OPC (*Ordinary Portland Cement*). Kedua jenis semen ini memiliki karakteristik unik yang membedakannya dari OPC, terutama karena adanya bahan tambahan dalam komposisinya. PCC mengandung material tambahan seperti terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozzolan, batu kapur, atau senyawa silika hingga 35% dari total massa semen komposit. Di sisi lain, PPC mengandung bahan pozzolan dengan kadar antara 6% hingga 40% dari total massa semen pozzolan [4]. Bahan tambahan pada semen PCC tidak hanya meningkatkan efisiensi

penggunaan air tetapi juga memperbaiki sifat *workability* pada beton [5]. Sementara itu, pada semen PPC Bahan pozzolan ini berperan penting dalam meningkatkan performa beton melalui reaksi pozzolanik, yang memperkuat sifat mekanis dan daya tahan terhadap lingkungan agresif [6]. Selain itu, keduanya memiliki harga yang lebih terjangkau baik dalam penjualan maupun biaya produksi dibandingkan semen OPC [7], [8].

Penelitian yang dilakukan oleh Ray dkk. (2016) menunjukkan faktor konversi kekuatan beton untuk beton mutu normal dengan kuat tekan rencana 25 MPa dan 40 MPa. Berdasarkan pengujian menggunakan benda uji berbentuk silinder, diperoleh faktor konversi pada umur beton 3, 7, 14, 21, dan 28 hari secara berturut-turut yaitu 0,37, 0,61, 0,86, 0,92, 1,00 untuk beton mutu 25 MPa, dan 0,40, 0,68, 0,91, 0,94, 1,00 untuk beton mutu 40 MPa. Hasil ini mengindikasikan adanya perbedaan signifikan dengan faktor konversi yang tercantum dalam PBI 1971, terutama pada beton mutu tinggi atau beton dengan tambahan bahan aditif [9].

Berdasarkan uraian di atas, jelas terdapat perbedaan faktor konversi kekuatan beton pada berbagai umur antara beton mutu normal dan beton mutu tinggi. Selain itu, belum tersedia pedoman spesifik yang mengakomodasi faktor konversi kekuatan beton untuk beton mutu tinggi dengan penggunaan semen PCC dan PPC. Ketiadaan pedoman ini menjadi kendala dalam memastikan akurasi prediksi dan pemeriksaan kekuatan beton pada berbagai umur, khususnya pada proyek konstruksi dengan kebutuhan mutu tinggi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan pengujian eksperimental pada beton mutu normal dan beton mutu tinggi guna menyelidiki faktor konversi kekuatan tekan beton pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam mengembangkan pedoman yang lebih relevan dan sesuai dengan kebutuhan industri konstruksi saat ini.

2. METODE PENELITIAN

Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari semen Portland, agregat halus, agregat kasar, dan air. Semen yang digunakan untuk membuat sampel beton terdiri atas dua jenis, yaitu semen PPC (*Pozzolan Portland Cement*) merek Bima dan semen PCC (*Portland Composite Cement*) merek Gresik. Untuk beton mutu tinggi, digunakan bahan tambahan berupa silica fume merek SikaFume dan *superplasticizer* merek Sika Viscocrete 1003. Silica fume berfungsi untuk meningkatkan kekuatan beton [10].

Sedangkan *superplasticizer* digunakan untuk meningkatkan *workability* tanpa menambah jumlah air pen-campur [11].

Tabel 1 Rincian benda uji

Pengujian Kuat Tekan Beton					
Mutu Beton	Sika Fume	Viscocrete 1003	Umur Benda Uji (hari)	Kode Benda Uji	Jumlah Sampel
Normal	0 %	0 %	3	P-N-3	3
	0 %	0 %	7	P-N-7	3
	0 %	0 %	14	P-N-14	3
	0 %	0 %	21	P-N-21	3
	0 %	0 %	28	P-N-28	3
	0 %	0 %	3	C-N-3	3
	0 %	0 %	7	C-N-7	3
	0 %	0 %	14	C-N-14	3
	0 %	0 %	21	C-N-21	3
	0 %	0 %	28	C-N-28	3
Tinggi	10 %	0,5 %	3	P-T-3	3
	10 %	0,5 %	7	P-T-7	3
	10 %	0,5 %	14	P-T-14	3
	10 %	0,5 %	21	P-T-21	3
	10 %	0,5 %	28	P-T-28	3
	10 %	0,5 %	3	C-T-3	3
	10 %	0,5 %	7	C-T-7	3
	10 %	0,5 %	14	C-T-14	3
	10 %	0,5 %	21	C-T-21	3
	10 %	0,5 %	28	C-T-28	3
Total Sampel Uji					60

Benda Uji

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas beton mutu normal dan beton mutu tinggi. Beton mutu tinggi dibuat dengan menambahkan bahan tambahan berupa *silica fume* sebesar 10% dan *superplasticizer* sebesar 0,5% dari berat semen, yang berfungsi untuk meningkatkan kekuatan tekan dan *workability* beton. Pengujian kuat tekan dilakukan pada masing-masing benda uji pada umur beton 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Bentuk benda uji yang digunakan adalah silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm, sesuai standar SNI 03-2847 (2019) [3]. Rincian jumlah benda uji yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada **Tabel 1**.

Tahapan Penelitian

1) Pengujian agregat

Pengujian agregat halus dan kasar dilakukan untuk mengetahui sifat dan karakteristik agregat yang nantinya digunakan pada perencanaan campuran beton. Pengujian agregat yang dilakukan sesuai SNI antara lain sebagai berikut:

- Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus.

- Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar.
- Pengujian analisa saringan agregat halus.
- Pengujian analisa saringan agregat kasar.
- Pengujian berat volume gembut dan berat padat agregat halus.
- Pengujian berat volume gembut dan berat padat agregat kasar.
- Pengujian butiran lolos ayakan no. 200.

2) Perencanaan campuran beton dan pembuatan sampel

Perencanaan campuran beton mutu normal semen PCC dan PPC mengacu pada *mix design* SNI 03-2834-2000 tentang tata cara pembuatan rencana campuran beton normal [12]. Mutu beton yang direncanakan ($f'c$) adalah 25 MPa. Perencanaan campuran beton mutu tinggi semen PCC dan PPC mengacu pada *mix design* SNI 03-6468-2000 tentang tata cara perencanaan campuran tinggi dengan semen *portland* dengan abutergang [13]. Mutu beton yang direncanakan ($f'c$) adalah 42 MPa.

3) Perawatan benda uji

Perawatan benda uji dilakukan dengan merendam dengan air. Suhu air yang digunakan untuk perawatan dalam bak perendaman berkisar 24 - 27 °C. Lama perendaman tersebut dilakukan sehari sebelum usia pengujian, lalu benda uji yang telah dikeluarkan dari rendaman air didiamkan selama ±24 jam pada suhu ruang dan selanjutnya dilakukan penimbangan serta pengukuran dimensi benda uji. Setelah itu, dilakukan capping pada permukaan atas benda uji dengan belerang kemudian dilaksanakan pengujian kuat tekan.

4) Pengujian kuat tekan

Pelaksanaan pengujian kuat tekan pada penelitian ini dilakukan berdasarkan SNI-1974-2011 [14]. Pengujian tersebut menggunakan mesin uji kuat tekan merek Controls seri AutoMax ProM dengan laju pembebanan berkisar antara 0,800 MPa/detik. Dengan setup pengujian benda uji diletakkan di tengah plat tekan yang telah dicapping belerang. Hal tersebut diterapkan kepada seluruh benda uji yang mencakup beton mutu normal PCC dan PPC serta beton mutu tinggi PCC dan PPC. Kuat tekan beton dapat dihitung menggunakan persamaan (1) sebagai berikut.

$$\text{Kuat tekan beton (f'c)} = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dimana f_c adalah Kuat tekan beton (MPa), P adalah beban maksimum (N), dan A adalah luas penampang benda uji (mm^2).

5) Uji normalitas

Uji normalitas dilakukan untuk memastikan distribusi normal dari data kuat tekan beton sebelum menghitung nilai faktor konversi kuat tekan beton. Distribusi normal adalah distribusi data berbentuk simetris dengan rata-rata, median, dan modus yang sama, menyerupai bentuk lonceng (*bell curve*) [15]. Hal tersebut dilakukan untuk menambah keakuratan hasil nilai faktor konversi beton serta untuk memastikan hasil pengujian kuat tekan beton memberikan pola yang konsisten dan dapat diandalkan, serta memvalidasi kualitas data eksperimen dengan memastikan bahwa hasil uji kuat tekan valid dan bebas dari kesalahan sistematis.

Metode uji normalitas yang digunakan pada penelitian ini adalah uji normalitas menggunakan *Shapiro-Wilk*. Penggunaan *Shapiro-Wilk* dikarenakan keandalannya dalam mendeteksi penyimpangan dari normalitas yang terjadi pada sampel uji yang berukuran kecil ($n < 50$). Menurut Jaramillo, uji Shapiro-Wilk dianggap sebagai pilihan terbaik untuk menguji normalitas data, terutama untuk ukuran sampel yang kecil hingga sedang yang memiliki banyak data ($n < 50$) [16].

6) Perhitungan angka konversi

Perhitungan angka konversi membutuhkan data hasil pengujian kuat tekan beton yang sudah dihitung nilai kuat tekan beton rata - ratanya per variasi umur pengujian. Kemudian nilai kuat tekan rata – rata beton tersebut dibagi dengan nilai kuat tekan rata – rata pada umur 28 hari. Angka konversi kuat tekan beton dapat dihitung dengan persamaan (2), persamaan tersebut juga digunakan dalam penelitian yang telah dilakukan oleh Salam (2023) serta Ibrahim (2021) [17], [18].

$$\text{Faktor konversi} = \frac{\text{Kuat tekan rata-rata x hari}}{\text{Kuat tekan rata-rata 28 hari}} \quad (2)$$

Dimana x hari adalah kuat tekan rata-rata pada umur tertentu (MPa).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Properties Agregat Halus dan Agregat Kasar

Pengujian agregat dilaksanakan untuk mengetahui serta memeriksa karakteristik dan sifat agregat yang

akan digunakan sebagai penyusun beton. Dalam pengujian agregat harus memenuhi beberapa persyaratan sebelum dilakukan perencanaan campuran (*mix design*). Adapun pengujian agregat dalam penelitian ini terbagi menjadi dua, yaitu pengujian agregat halus dan agregat kasar. Adapun hasil pengujian properties agregat halus dan kasar terangkum pada **Tabel 2**.

Tabel 2 Hasil pengujian properties agregat

Uraian	Hasil Pengujian Agregat Halus	Hasil Pengujian Agregat Kasar
Jenis material	Pasir alam asal Clereng	Batu pecah/ split asal Progo
Ukuran maks agregat	5 mm	20 mm
Analisa saringan / MHB	Daerah II / 2,53	Maks 20 mm / 6,73
Kandungan lumpur	0,70 %	-
Berat Jenis (SSD)	2,70	2,50
Penyerapan air	2,67 %	1,63 %
Berat volume padat	1,67 gram/ cm^3	1,57 gram/ cm^3
Berat volume gembur	1,49 gram/ cm^3	1,39 gram/ cm^3

Perencanaan Campuran Beton Mutu Normal

Perencanaan campuran beton mutu normal semen PCC dan PPC mengacu pada *mix design* SNI 03-2834-2000 tentang tata cara pembuatan rencana campuran beton normal. Mutu beton yang direncanakan (f'_c) adalah 25 MPa. Perencanaan campuran beton semen PCC menyesuaikan ketentuan *design* dengan rencana pembetonan di lingkungan luar ruang bangunan tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung yang termuat pada **Tabel 4** mengenai persyaratan jumlah semen minimum dan faktor air semen maksimum untuk berbagai macam pembetonan dalam lingkungan khusus yang selanjutnya disesuaikan dengan grafik 1 mengenai hubungan anatar kuat tekan dan faktor air semen dengan benda uji silinder yang termuat pada SNI 03-2834-2000. Mutu normal semen PCC didapatkan FAS 0,5 yang diperoleh dari perhitungan *mix design*. Sementara itu, pada semen PPC dilakukan hal yang sama dengan **Tabel 5** mengenai ketentuan beton yang berhubungan dengan air tanah yang mengandung sulfat dan grafik 1 pada SNI 03-2834-2000, perencanaan campuran beton PPC mutu normal menggunakan FAS 0,45 dengan rencana lingkungan dipengaruhi sulfat dan alkali dari tanah. Design rencana lingkungan tersebut diambil dikarenakan semen PPC memiliki keunggulan yang lebih baik pada lingkungan yang terpapar sulfat dan alkali. Penggunaan nilai FAS yang berbeda dikarenakan menyesuaikan fungsi atau kegunaan dari semen PCC dan PPC. Pada semen PCC dikhususkan pada penggunaan konstruksi umum. Sementara itu, semen

PPC dikhususkan pada konstruksi umum yang memerlukan ketahanan sulfat rendah hingga sedang atau lingkungan yang ekstrem.

Perencanaan Campuran Beton Mutu Tinggi

Perencanaan campuran beton mutu tinggi semen PCC dan PPC mengacu pada *mix design* SNI 03-6468-2000 tentang tata cara perencanaan campuran tinggi dengan semen *portland* dengan abutrbang. Mutu beton yang direncanakan (f'_c) adalah 42 MPa. Pada perencanaan campuran beton semen PCC dan PPC mutu tinggi menggunakan FAS 0,37. FAS tersebut diperoleh dari hasil perhitungan *mix design* SNI 03-6468-2000 dan telah disesuaikan dengan *trial mix design* agar FAS yang digunakan dapat menghasilkan beton dengan kuat tekan > 42 MPa. Bahan tambah yang digunakan berupa *superplasticizer* Sika Viscocrete – 1003 dan *silica fume* SikaFume sebanyak 0,5 % dan 10 % dari berat semen. Adapun hasil perhitungan proporsi campuran beton mutu normal dan mutu tinggi terangkum pada **Tabel 3**.

Tabel 3 Hasil rencana proporsi campuran beton tiap 1m³

Kebutuhan Material	Mutu Normal (kg)		Mutu Tinggi (kg) PCC dan PPC
	PCC	PPC	
Semen	410	455,56	531
Pasir	715,05	679,365	456
Split	1007,96	998,079	1130
Air	205	205	196,17
Silica fume	-	-	53,10
Superplasticizer	-	-	2,66

Pengujian Slump Beton Mutu Normal dan Tinggi PCC dan PPC

Pengujian *slump* dilakukan setelah campuran beton tercampur merata menggunakan *mixer*. Pengujian tersebut bertujuan untuk mengetahui tingkat kemudahan pengerjaan (*workability*) pada beton. Semakin tinggi nilai *slump* yang diperoleh, maka tingkat pengerjaan beton akan semakin tinggi (mudah dikerjakan). Hasil pengujian *slump* dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Pada beton mutu normal baik PCC dan PPC hasil *slump* telah memenuhi ketentuan pada SNI 03-2834 (2000). Perbedaan hasil pengujian *slump* antara keduanya terjadi karena penggunaan fas yang berbeda untuk PCC dan PPC yaitu 0,5 dan 0,45. Semakin rendah nilai fas maka semakin rendah juga *workability* yang dihasilkan [19].

Tabel 4 Hasil pengujian slump beton PCC dan PPC

Mutu Beton Jenis Semen	Tinggi Slump (cm)		Syarat Nilai Slump (mm)
Normal	Mixing 1	Mixing 2	60-180
PPC	9,4	8,3	Memenuhi
PCC	11,2	10,3	Memenuhi
Tinggi	Mixing 1	Mixing 2	75-100 mm
PPC	7,5	7,6	Memenuhi
PCC	7,7	8,7	Memenuhi

Pada beton mutu tinggi baik PCC dan PPC hasil uji *slump* telah memenuhi ketentuan pada SNI 6468 (2000). Pada **Tabel 4** menunjukkan bahwa nilai *slump* dari semen PPC lebih rendah ketimbang semen PCC hal tersebut terjadi akibat kandungan pozzolan pada semen PPC. Semakin banyak kandungan pozzolan pada suatu semen maka nilai *slump* (*workability*) rendah serta perbedaan nilai *slump* pada masing-masing *mixing* terjadi karena perbedaan kadar air yang terkandung pada agregat [20]. Berdasarkan SNI 15-7064 (2004) komposisi penyusun semen PCC terdiri atas campuran *portland* semen, gips, dan bahan anorganik yang berupa terak tanur tinggi (*blast furnance slag*), pozzolan, senyawa silikat, dan batu kapur dengan kadar total berada pada rentang 6 - 35 % dari berat semen *portland* komposit [21]. Sementara itu, pada semen PPC menurut SNI 0302 (2014) terdiri atas campuran *portland* semen dan material pozzolan dengan kadar pozzolan sebanyak 6 - 40 % dari berat semen pozzolan [22]. Berdasarkan pengertian dari kedua SNI tersebut maka dapat disimpulkan bahwa semen PPC mengandung lebih banyak material pozzolan yang membuat rendahnya nilai *slump* jika dibandingkan dengan semen PCC.

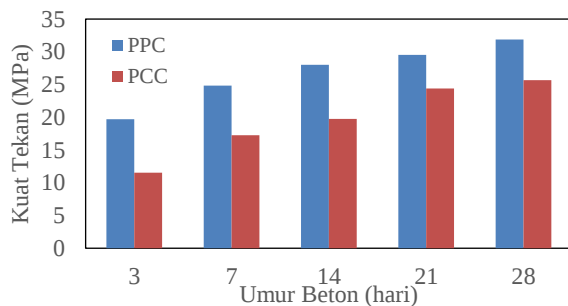
Pengujian Kuat Tekan Beton Mutu Normal Semen PCC dan PPC

Pengujian dilakukan hingga terjadi kerusakan atau retak pada sampel uji, yang berarti benda uji tidak lagi mampu menahan beban yang diberikan oleh mesin uji. Adapun hasil pengujian kuat tekan beton mutu normal dengan penggunaan semen PCC dan PPC untuk umur pengujian 3, 7, 14, 21, dan 28 hari dapat dilihat pada **Tabel 5** dan **Gambar 1**. Perbedaan kuat tekan terjadi karena pemakaian nilai fas yang rendah pada PPC yaitu 0,45 sedangkan PCC 0,5. Menurut Lin, semakin rendah nilai fas semakin tinggi kuat tekan betonnya dan begitu sebaliknya [23]. Sehingga, beton dengan nilai fas 0,45 menghasilkan nilai

kuat tekan yang lebih tinggi .

Tabel 5 Pengujian kuat tekan beton mutu normal semen PCC dan PPC

Umur Beton (hari)	PCC (MPa)	Rata-Rata PCC (MPa)	PPC (MPa)	Rata-Rata PPC (MPa)
3	11,919		21,482	
	11,270	11,535	19,965	19,693
	11,416		17,903	
	17,232		25,111	
7	16,277	17,238	24,013	24,820
	18,204		25,337	
	20,395		28,517	
	18,887	19,775	26,992	28,027
14	20,043		28,572	
	24,777		29,283	
	24,346	24,400	28,722	29,537
	24,077		30,606	
21	25,084		32,879	
	25,358	25,670	31,662	31,872
	26,568		31,074	



Gambar 1 Kuat tekan beton rata-rata mutu normal PCC dan PPC

Faktor lain yang menyebabkan kuat tekan beton pada semen PPC lebih tinggi adalah reaksi pozzolanik yang terjadi selama proses hidrasi pada semen. Menurut Annaba, reaksi pozzolanik meningkatkan kinerja beton dengan mempercepat pembentukan C-S-H (Kalsium Silikat Hidrat) dan Alumino Silikat Hidrat (CASH) baru. Kedua senyawa tersebut meningkatkan sifat mekanik, ketahanan terhadap korosi, dan kinerja thermal, terutama di lingkungan yang agresif seperti paparan klorida [24].

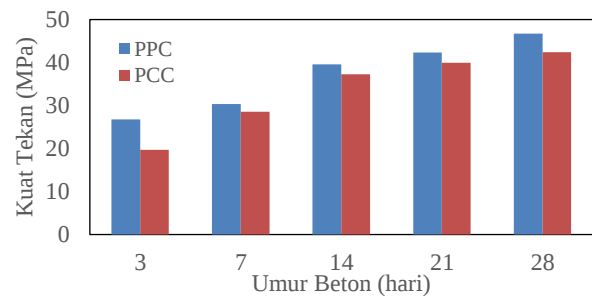
Pengujian Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Semen PCC dan PPC

Pada beton mutu tinggi diberikan bahan tambah berupa *silicafume* sebanyak 10 % dan *superplasticizer* 0,5 % dari berat semen. Adapun hasil pengujian kuat tekan beton mutu tinggi dengan penggunaan semen PCC dan PPC untuk umur pengujian 3, 7, 14, 21, dan 28 hari dapat

dilihat pada **Tabel 6** dan **Gambar 2**.

Table 6 Pengujian kuat tekan beton mutu tinggi semen PCC dan PPC

Umur Beton (hari)	PCC (MPa)	Rata-Rata PCC (MPa)	PPC (MPa)	Rata-Rata PPC (MPa)
3	21,063		27,064	
	19,774	19,698	26,707	26,747
	18,257		26,470	
	27,955		29,270	
7	27,436	28,576	29,484	30,319
	30,339		32,204	
	37,005		39,001	
	38,358	37,258	39,624	39,598
14	36,412		40,169	
	40,321		42,237	
	39,432	39,972	42,060	42,326
	40,162		42,681	
21	42,383		44,701	
	42,830	42,433	49,320	46,755
	42,086		46,244	



Gambar 2 Kuat tekan beton rata-rata mutu tinggi PCC dan PPC

Pada **Tabel 6** dan **Gambar 2** menunjukkan bahwa kuat tekan beton mutu normal semen PPC lebih unggul dibandingkan semen PCC. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Ginting (2022) yang menyatakan semen berdasarkan kuat tekannya dari urutan tinggi ke rendah adalah OPC, PPC, dan PCC [25].

Penyebab kuat tekan beton semen PPC lebih tinggi meskipun pada perencanaannya memakai fas yang sama, dikarenakan kandungan pozzolan pada semen PPC. Pozzolan merupakan material yang memiliki kandungan silika yang melimpah. Menurut SNI 03-2834 (2000) pozzolan merupakan suatu material yang kaya akan silika (SiO_2) atau alumina (Al_2O_3) yang bersifat amorf atau reaktif yang akan membentuk benda yang padat dan keras [12]. Sifat tersebutlah yang memicu terciptanya reaksi pozzolanik pada semen PPC. Menurut Ho, material pozzolan meningkatkan durabilitas terhadap penetrasi ion klorida serta serangan sulfat. Sehingga memperkuat

sifat mekanik dan ketahanannya terhadap lingkungan laut yang agresif [26].

Pozzolan dan *silica fume* merupakan bahan yang kaya akan silika (SiO_2). Menurut Davendra dan Trimurtiningrum (2022) *silica fume* berdiameter 1/100 dari diameter semen dan sangat halus [27]. Sementara itu, pozzolan umumnya memiliki ukuran partikel yang lebih halus ketimbang *portland cement*. Kedua bahan tersebut berperan dengan cara mengisi rongga-rongga mikro di dalam beton, sehingga meningkatkan kerapatan (*density*) yang menyebabkan kuat tekan beton bertambah dan menambah kuat tekan.

Penggunaan nilai FAS yang rendah membuat kuat tekan beton mutu tinggi dapat tercapai, pada penelitian ini menggunakan FAS 0,37 untuk kedua jenis semen PPC dan PCC dengan bahan tambah *superplasticizer* Sika Visconcrete-1003. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Firjatullah dkk. (2022), penggunaan *superplasticizer* memberi dampak positif pada campuran dengan FAS yang kecil agar meningkatkan kelekakan dan *workability* dari campuran beton tersebut [10].

Perbandingan Nilai Kuat Tekan dan Persentase Selisih Kuat Tekan

Berdasarkan hasil kuat tekan rata-rata yang telah didapatkan, nilai-nilai tersebut kemudian diplot menjadi grafik garis untuk membandingkan nilai kuat tekan beton antara semen PCC dan PPC. Selisih kuat tekan dapat dilihat pada **Tabel 7** untuk beton mutu normal dan beton mutu tinggi. Sementara itu, untuk grafik kuat tekan dan selisih kuat tekan dapat dilihat pada **Gambar 3** untuk mutu normal dan mutu tinggi.

Pada **Tabel 7** dan **Gambar 3** dapat dilihat bahwa beton PPC memiliki keunggulan kuat tekan pada setiap umur yang diuji. Pada umur 3 hari, beton yang menggunakan PPC menunjukkan kuat tekan sebesar 19,693 MPa, sedangkan beton PCC menunjukkan kuat tekan 11,535 MPa. Selisih nilai kuat tekan di antara keduanya mencapai 41,43%. Selisih yang cukup besar tersebut menunjukkan bahwa PPC memiliki keunggulan yang signifikan pada umur beton yang masih sangat muda.

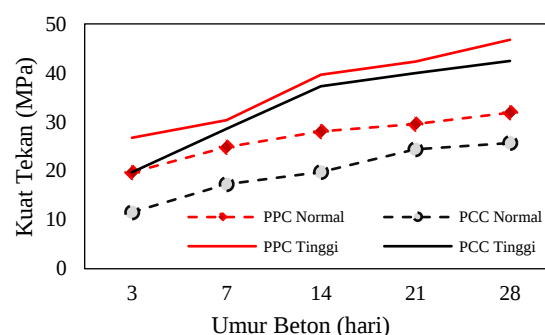
Jika diranking berdasarkan kuat tekan dari urutan tertinggi hingga terendah untuk beton mutu tinggi didapatkan jenis semen OPC, PPC lalu PCC. Hal itu sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Ginting (2022) [25].

Pada **Tabel 7** dan **Gambar 3** dapat dilihat bahwa beton yang menggunakan PPC memiliki keunggulan kuat tekan pada setiap umur yang diuji. Hal ini terjadi dikarenakan kontribusi *silica fume*, *superplasticizer*, dan pozzolan pada beton mutu tinggi semen PPC sedangkan PPC hanya didukung oleh *silica fume* dan

superplasticizer dalam kuat tekannya. Pada umur 3 hari, kuat tekan rata-rata beton mutu tinggi menggunakan PPC menunjukkan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan PCC yaitu sebesar 26,75 MPa dan 19,70 MPa. Dengan selisih nilai kuat tekan di antara keduanya mencapai 26,36 %. Selisih yang tersebut menunjukkan bahwa beton mutu tinggi semen PPC memiliki keunggulan yang signifikan pada umur beton yang masih sangat muda. Hasil kuat tekan awal yang tinggi pada beton PPC sesuai dengan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Yi (2024) [28]. Yi menyatakan material pozzolana meningkatkan laju hidrasi usai awal beton serta mengurangi penyusutan kimiawi pada semen *portland* sehingga menghasilkan peningkatan struktur mikro dan daya tahan.

Table 7 Selisih nilai kuat tekan beton antara PPC dengan PCC

Umur Beton (hari)	Mutu Beton (MPa)				Selisih Nilai Kuat Tekan (%)	
	Normal		Tinggi		Normal	Tinggi
3	19,693	11,535	26,747	19,698	41,43	26,36
7	24,820	17,238	30,319	28,576	30,55	5,75
14	28,027	19,775	39,598	37,258	29,44	5,91
21	29,537	24,400	42,326	39,972	17,39	5,56
28	31,872	25,670	46,755	42,433	19,46	9,24

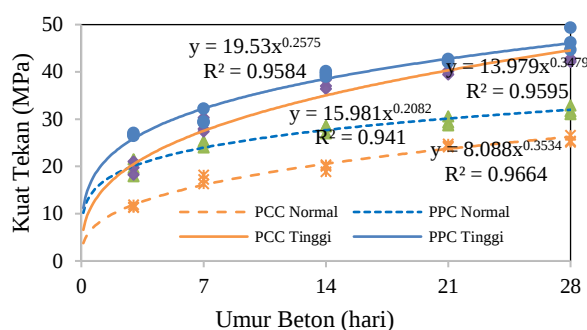


Gambar 3 Grafik perbandingan nilai kuat tekan beton PPC dan PCC

Hasil akhir kuat tekan beton pada umur 28 hari menunjukkan semen PPC lebih tinggi ketimbang PCC dengan kuat tekan rata-rata sebesar 46,755 MPa dan 42,433 MPa. Hal tersebut terjadi dikarenakan kandungan pozzolan dan reaksi pozzolanik pada beton mutu tinggi PPC. Menurut SNI 03-2834 (2000) pozzolan merupakan suatu material yang kaya akan silika (SiO_2) atau alumina (Al_2O_3) yang bersifat amorf atau reaktif yang akan membentuk benda yang padat dan keras [12]. Semen PPC memiliki kandungan pozzolan dan *silica fume*.

Hubungan Kuat Tekan Beton dengan Umur Pengujian

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan keseluruhan data, nilai-nilai tersebut kemudian diplot menjadi grafik hubungan kuat tekan beton dengan umur pengujian untuk masing - masing mutu dan jenis semen yang dapat dilihat pada **Gambar 4** untuk mutu normal dan mutu tinggi.



Gambar 4 Hubungan kuat tekan dengan umur pada semen PCC, PPC mutu normal dan tinggi

Pada **Gambar 4** grafik tersebut menunjukkan hubungan positif antara umur dengan kuat tekan beton. Hubungan tersebut menghasilkan nilai R^2 berturut – turut sebesar 0,9697, 0,9315, 0,9621, 0,9567, nilai tersebut masuk dalam kategori sangat kuat. Nilai koefisien korelasi yang dihasilkan oleh regresi tersebut sudah sesuai dengan pedoman Sugiyono (2020) yang menyatakan nilai (0,80 - 1,000) masuk pada kategori sangat kuat [29]. Dari gambar grafik tersebut juga terlihat bahwa kuat tekan beton bertambah seiring dengan umur beton dengan tren non-linier yang menunjukkan peningkatan kuat tekan awal yang signifikan pada awal umur beton lalu melambat seiring waktu. Menurut An (2023), kekuatan beton meningkat seiring dengan bertambahnya umur selama kelembapan tersedia untuk melanjutkan hidrasi. Hidrasi lebih lanjut secara signifikan meningkatkan kuat tekan dan lentur [30].

Penggunaan regresi non-linear ini digunakan untuk mencerminkan sifat eksponensial kenaikan kuat beton yang tinggi diawal lalu melambat. Dalam penelitian Peng (2023), menyatakan bahwa perkembangan kuat tekan beton seiring waktu akan meningkat, serta bagaimana model matematika seperti *power law* (hukum pangkat) digunakan untuk menggambarkan hubungan serta memprediksi kuat tekan beton. Peng mengungkapkan bahwa kuat tekan beton berkembang dengan cara yang dapat di modelkan menggunakan fungsi pangkat (*power function model*) [31].

Permodelan di atas juga menghasilkan persamaan regresi (y) yang dapat digunakan untuk menentukan perkiraan kuat tekan optimum (kuat tekan optimal pada umur tertentu). Dengan memasukkan nilai hari tertentu (x) ke dalam persamaan regresi (y) akan didapatkan perkiraan nilai kuat tekan optimum yang terjadi pada tiap variasi mutu dan jenis semen. Perkiraan gambaran nilai kuat tekan optimum tiap pengujian dapat dilihat pada **Tabel 8**.

Table 8 Nilai kuat tekan beton optimum

Umur Beton (hari)	Kuat Tekan Beton Optimum (MPa)			
	PCC Normal	PPC Normal	PCC Tinggi	PPC Tinggi
3	11,925	20,088	20,486	25,916
7	16,088	23,964	27,510	32,234
14	20,553	27,684	35,012	38,533
21	23,720	30,122	40,316	42,773
28	26,258	31,982	44,560	46,062

Pada **Gambar 4** juga menghasilkan persamaan regresi non-linier yang dapat digunakan untuk mengetahui percepatan peningkatan kuat tekan pada setiap semen dan mutu beton. Persamaan yang terbentuk adalah persamaan *power regression* atau regresi pangkat yang mempunyai bentuk persamaan $y = a \cdot x^b$, dimana y yaitu variabel dependent (bergantung pada variabel independen), x yaitu variabel independen (mempengaruhi perubahan pada variabel dependent), a yaitu koefisien konstanta (menentukan skala awal hubungan x dan y), b yaitu eksponen pangkat (menunjukkan pola atau tingkat pengaruh x terhadap y).

Persamaan yang dihasilkan antara lain sebagai berikut:

1. Semen PCC mutu normal, $y = 8,088x^{0,3534}$
2. Semen PPC mutu normal, $y = 15,981x^{0,2082}$
3. Semen PCC mutu tinggi, $y = 13,979x^{0,3479}$
4. Semen PPC mutu tinggi, $y = 19,53x^{0,2575}$

Berdasarkan persamaan regresi non-linier di atas menunjukkan semen PCC (normal dan tinggi) memiliki nilai eksponen (b) sebesar (0,3534 dan 0,3479) dibandingkan semen PPC (0,2082 dan 0,2575). Nilai eksponen (b) semen PCC lebih besar ketimbang semen PPC. Hal tersebut menunjukkan bahwa semen PCC lebih efektif

dalam mempercepat laju peningkatan kuat tekan beton dibandingkan semen PPC baik pada mutu beton normal maupun tinggi.

Sementara itu, untuk nilai koefisien konstanta (α) pada semen PPC (normal dan tinggi) didapatkan sebesar (15,981 dan 19,53) dibandingkan semen PCC (8,088 dan 13,979). Nilai koefisien konstanta (α) semen PPC lebih besar ketimbang semen PCC. Hal tersebut menunjukkan kekuatan beton umur awal PPC lebih besar baik mutu normal maupun tinggi dibandingkan dengan semen PCC.

Berdasarkan persamaan regresi non-linier dan penjelasan di atas, semen PPC memiliki keunggulan pada kuat tekan awal yang lebih tinggi ketimbang semen PCC. Kuat tekan yang tinggi pada PPC dikarenakan kandungan pozzolan dan reaksi pozzolanik. Yang menghasilkan struktur beton yang lebih rapat dan tahan lama, karena mengurangi porositas sehingga kuat tekan menjadi tinggi. Reduksi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan di ubah menjadi C-S-H membuat beton PPC lebih tahan terhadap pengaruh lingkungan seperti serangan sulfat.

Uji Normalitas *Shapiro-Wilk* Menggunakan SPSS

Pengujian *shapiro-wilk* dilakukan untuk memastikan distribusi normal dari data kuat tekan beton sebelum menghitung nilai faktor konversi kuat tekan beton. Hal tersebut dilakukan karena menambah keakuratan hasil faktor konversi, keseragaman data penelitian yaitu data tersebar secara simetris di sekitar rata-rata untuk memastikan hasil pengujian kuat tekan beton memberikan pola yang konsisten dan dapat diandalkan, serta validasi kualitas data eksperimen dengan memastikan bahwa hasil uji kuat tekan valid dan bebas dari kesalahan sistematis seperti ke tidak homogenan bahan campuran beton. Dengan data yang valid maka nilai faktor konversi yang akan dihitung lebih dapat dipercaya. Pengujian normalitas dilakukan pada tiap mutu beton baik mutu beton normal maupun tinggi dengan penggunaan semen PCC dan PPC. Hasil pengujian normalitas *shapiro-wilk* dapat dilihat pada **Tabel 9** dan **Tabel 10** untuk beton mutu normal serta **Tabel 11** dan **Tabel 12** untuk beton mutu tinggi.

Berdasarkan **Tabel 9**, **10**, **11**, dan **12** hasil uji normalitas pada data hasil pengujian kuat tekan beton PCC, PPC mutu normal dan mutu tinggi didapatkan nilai *significance* (signifikansi) untuk umur pengujian

3, 7, 14, 21 dan 28 hari lebih dari 0,05. Dari hasil signifikansi tersebut dapat disimpulkan bahwa data hasil pengujian kuat tekan PCC, PPC mutu normal dan tinggi pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari terdistribusi normal hal tersebut ditandai dengan nilai signifikansi $> 0,05$.

Berdasarkan hasil pengujian shapiro-wilk di atas didapati hasil pengujian normalitas untuk data kuat tekan beton tiap masing-masing mutu dan semen terdistribusi secara normal sehingga kuat tekan dapat digunakan. Penggunaan nilai signifikansi pada uji normalitas dengan shapiro-wilk sebesar 0,05 atau 5%, hal ini berarti bahwa toleransi kesalahan yang diizinkan sebesar 5% sedangkan sisanya 95% adalah data yang dapat dipercaya.

Nilai signifikansi 0,05 merupakan standar umum yang digunakan dibidang penelitian sebagai kontrol keseimbangan antara tingkat toleransi kesalahan dan keandalan hasil. Nilai tersebut sering digunakan karena tidak terlalu ketat yang dapat menyebabkan kesulitan mendeteksi efek nyata (perbedaan yang terjadi) dan tidak terlalu longgar yang lebih berisiko menghasilkan kesalahan. Menurut Wong (2023), bahwa pemilihan tingkat signifikansi 0,05 atau 0,01 harus dirasionalisasi dan disesuaikan dengan skenario penelitian, tetapi pemilihannya juga bergantung konsekuensi kesalahan pengambilan keputusan [32].

Perhitungan Faktor Konversi

Kuat tekan beton rata - rata berdasarkan hasil uji tekan beton pada mutu normal dan beton mutu tinggi dengan jenis semen PCC dan PPC dapat dilihat pada **Tabel 6**. Faktor konversi kuat tekan beton merupakan pembagian kuat tekan beton rata - rata pada hari ke 3, 7, 14, 21, dan 28 hari terhadap kuat tekan rata – rata pada hari ke 28, dapat dihitung menggunakan persamaan (2). Adapun hasil perhitungan nilai faktor konversi kuat tekan beton mutu normal dan mutu tinggi menggunakan semen PCC dan PCC dapat dilihat pada **Tabel 13**.

Semakin bertambahnya umur beton nilai faktor konversi kuat tekan beton semakin besar selaras dengan nilai kuat tekan yang semakin naik dan akan maksimal pada umur beton 28 hari. Nilai faktor konversi kuat tekan beton dalam dunia konstruksi secara umum digunakan untuk mengetahui mutu beton yang disyaratkan. Misalkan sebuah proyek konstruksi sebelum memulai pengecoran pasti dilakukan pengambilan contoh beton (sampel beton), dari sampel tersebut kemudian akan diuji pada umur 3, 7, 14, 21, atau 28 hari. Hasil pengujian tersebut selanjutnya akan dibagi dengan nilai faktor konversi kuat tekan beton apakah memenuhi persyaratan yang ditetapkan atau tidak.

Table 9 Hasil uji normalitas PCC mutu normal

Uji Shapiro-Wilk	Statistika	Derajat Kebebasan	Signifikansi
		n	
PCC Normal 3 hari	0,908	3	0,413
PCC Normal 7 hari	1,000	3	0,990
PCC Normal 14 hari	0,913	3	0,430
PCC Normal 21 hari	0,982	3	0,746
PCC Normal 28 hari	0,883	3	0,333

Table 10 Hasil uji normalitas PPC mutu normal

Uji Shapiro-Wilk	Statistika	Derajat Kebebasan	Signifikansi
		n	
PPC Normal 3 hari	1,000	3	0,998
PPC Normal 7 hari	0,874	3	0,306
PPC Normal 14 hari	0,776	3	0,059
PPC Normal 21 hari	0,948	3	0,562
PPC Normal 28 hari	0,961	3	0,621

Table 11 Hasil uji normalitas PCC mutu tinggi

Uji Shapiro-Wilk	Statistika	Derajat Kebebasan	Signifikansi
		n	
PCC Normal 3 hari	0,998	3	0,910
PCC Normal 7 hari	0,879	3	0,322
PCC Normal 14 hari	0,952	3	0,576
PCC Normal 21 hari	0,879	3	0,322
PCC Normal 28 hari	0,987	3	0,779

Table 12 Hasil uji normalitas PPC mutu tinggi

Uji Shapiro-Wilk	Statistika	Derajat Kebebasan	Signifikansi
		n	
PPC Normal 3 hari	0,987	3	0,778
PPC Normal 7 hari	0,804	3	0,125
PPC Normal 14 hari	0,999	3	0,926
PPC Normal 21 hari	0,942	3	0,535
PPC Normal 28 hari	0,965	3	0,638

Persamaan yang dihasilkan dari permodelan regresi pada **Gambar 5** adalah sebagai berikut.

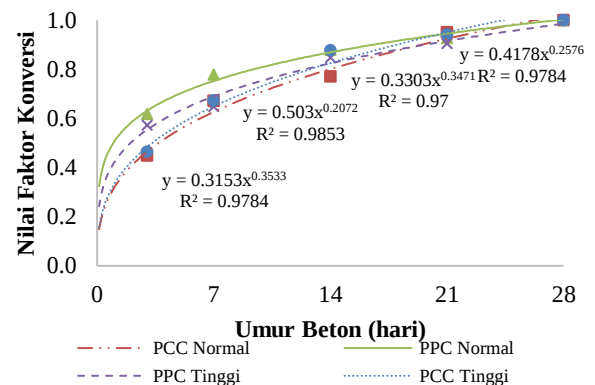
1. Semen PCC mutu normal, $y = 0,3153x^{0,3533}$
2. Semen PPC mutu normal, $y = 0,503x^{0,2072}$
3. Semen PCC mutu tinggi, $y = 0,3303x^{0,3471}$
4. Semen PPC mutu tinggi, $y = 0,4178x^{0,2576}$

Berdasarkan persamaan regresi non-linier di atas dapat digunakan untuk memperoleh prediksi nilai faktor konversi pada umur beton yang diinginkan.

Table 13 Hasil faktor konversi kuat tekan beton

Umur Beton (hari)	Faktor Konversi			
	Mutu Normal		Mutu Tinggi	
	PCC	PPC	PCC	PPC
3	0,45	0,62	0,46	0,57
7	0,67	0,78	0,67	0,65
14	0,77	0,88	0,88	0,85
21	0,95	0,93	0,94	0,91
28	1,00	1,00	1,00	1,00

Dari hasil perhitungan nilai faktor konversi kuat tekan beton di atas maka diperoleh grafik faktor konversi kuat tekan beton hasil penelitian yang dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5 Grafik faktor konversi kuat tekan beton mutu normal dan tinggi PCC, PPC

Validasi Hasil Faktor Konversi Kuat Tekan Beton

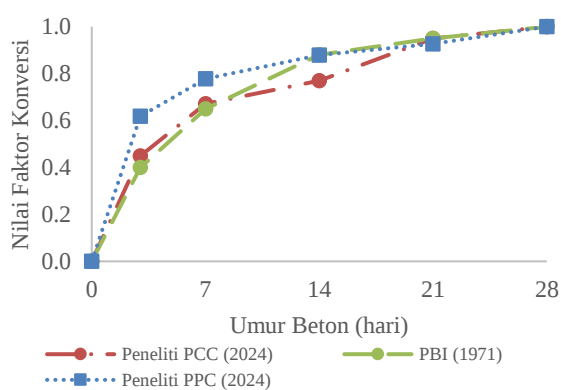
Validasi hasil faktor konversi kuat tekan beton adalah pembahasan khusus untuk membandingkan hasil faktor konversi kuat tekan beton penelitian ini. Hasil penelitian dibandingkan dengan standar teknis yang berlaku yaitu PBI 1971. Faktor konversi yang akan dibahas pada sub bab penelitian ini adalah pada umur beton 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Penggunaan jenis semen dan hasil penelitian terkait validasi faktor konversi kuat tekan beton tersebut akan dijelaskan lebih rinci pada **Tabel 14** untuk beton mutu normal PCC, PPC serta **Tabel 15** untuk beton mutu tinggi PCC, PPC. Sementara itu, untuk hasil grafik validasi nilai faktor konversi kuat tekan beton dapat dilihat pada **Gambar 6** untuk PCC, PPC mutu normal, **Gambar 7** untuk PCC serta PPC mutu tinggi.

Pada **Tabel 14** dan **Gambar 6**, faktor konversi mutu normal untuk semen PCC pada umur 3 hari berada berbeda dengan nilai standar PBI (1971) hasil penelitian menunjukkan faktor konversi beton dengan

semen PCC lebih tinggi ketimbang semen OPC. Pada umur 3, 7 hari faktor konversi hasil penelitian lebih tinggi dibandingkan dengan PBI (1971) namun hasilnya relatif sama. Pada umur 14 hari faktor konversi yang didapatkan lebih rendah dari standar PBI (1971). Lalu untuk umur 21 dan 28 hari relatif sesuai dengan standar PBI (1971). Perbedaan yang terjadi kemungkinan disebabkan karena bentuk benda uji, mutu rencana beton, penggunaan jenis semen, fas, metode pencampuran serta pelaksanaannya di lapangan, asal bahan baku (kualitas agregat dan sumber semen) meskipun berasal dari pabrik yang sama bisa saja kandungannya berbeda. Menurut Prasmewara (2022), faktor lapangan berpengaruh terhadap kualitas beton. Termasuk takaran yang tidak sesuai *design mix formula*, kualitas bahan baku, tata cara pencampuran, serta pelaksanaan dapat mengakibatkan perbedaan meskipun sumber material sama [33].

Table 14 Perbandingan faktor konversi kuat tekan beton berbagai umur untuk beton mutu normal PCC, PPC

Bentuk Benda Uji	Faktor Konversi		
	Kubus	Silinder	Silinder
Mutu Beton	Normal	Normal	Normal
Jenis Semen	OPC	PCC	PPC
Umur Beton (hari)	PBI (1971)	Peneliti (2024)	Peneliti (2024)
3	0,40	0,45	0,62
7	0,65	0,67	0,78
14	0,88	0,77	0,88
21	0,95	0,95	0,93
28	1,00	1,00	1,00



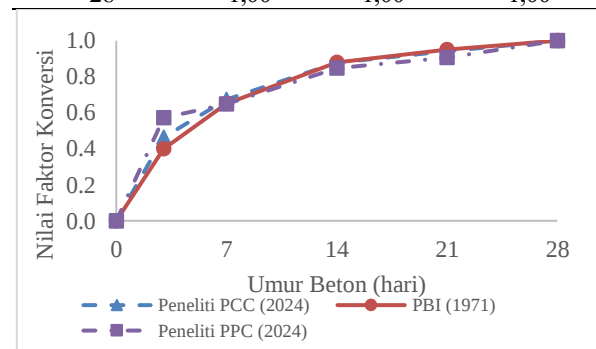
Gambar 6 Grafik perbandingan nilai faktor konversi kuat tekan beton PCC, PPC normal

Pada Tabel 14 dan Gambar 6, faktor konversi mutu normal untuk semen PPC dari hasil penelitian jika dibandingkan dengan standar teknis yang berlaku terjadi perbedaan pada umur beton saat 3 dan 7 hari yaitu berturut-turut sebesar 0,62 dan 0,78 cenderung

lebih tinggi dari standar PBI (1971). Lalu pada umur 14, 21, 28 hari relatif sama. Perbedaan yang terjadi kemungkinan disebabkan karena bentuk benda uji, mutu rencana beton, penggunaan jenis semen, fas, metode pencampuran serta pelaksanaannya, asal bahan baku (kualitas agregat dan sumber semen). Menurut Prasmewara (2022), faktor lapangan berpengaruh terhadap kualitas beton. Termasuk takaran yang tidak sesuai *design mix formula*, kualitas bahan baku, tata cara pencampuran, serta pelaksanaan dapat mengakibatkan perbedaan meskipun sumber material sama [33]. Penggunaan semen PPC meningkatkan kinerja beton bahkan diumur awal beton dan sekaligus meningkatkan durabilitasnya dalam jangka panjang. Material pozzolana bekerja meningkatkan hidrasi awal yang mempercepat reaksi kimia semen dengan air, mengurangi penyusutan, membentuk struktur internal beton yang lebih rapat sehingga meningkatkan sifat mekanik dan fisik beton [28].

Table 15 Perbandingan faktor konversi kuat tekan beton berbagai umur untuk beton mutu tinggi PCC

Bentuk Benda Uji	Faktor Konversi		
	Kubus	Silinder	Silinder
Mutu Beton	Normal	Tinggi	Tinggi
Jenis Semen	OPC	PCC	PPC
Umur Beton (hari)	PBI (1971)	Peneliti (2024)	Peneliti (2024)
3	0,40	0,46	0,57
7	0,65	0,67	0,65
14	0,88	0,88	0,85
21	0,95	0,94	0,91
28	1,00	1,00	1,00



Gambar 7 Grafik perbandingan nilai faktor konversi kuat tekan beton PCC, PPC mutu tinggi

Berdasarkan Tabel 15 dan Gambar 7, faktor konversi dari berbagai umur beton pada jenis semen PCC dan PPC untuk mutu beton tinggi jika dibandingkan dengan PBI (1971) hasilnya mendekati dan tidak terlalu signifikan perbedaannya sehingga bisa lebih meyakinkan pembaca serta bisa dijadikan pedoman yang baku.

Namun perlu perhatikan pada penggunaan semen PPC pada umur 3 hari memberikan laju kenaikan yang besar yaitu 57 % jika dibandingkan dengan PBI (1971) dan penggunaan semen PCC hasil penelitian. Menurut Ahmad (2023), material pozzolana meningkatkan kekuatan tekan, yaitu bereaksi dengan senyawa kalsium hidroksida (C-S-H) yang menghasilkan senyawa tambahan guna meningkatkan daya tahan, mengurangi retak sehingga berkontribusi pada kuat tekan beton [34]. **Tabel 15** di atas menunjukkan bahwa untuk hasil nilai faktor konversi beton mutu tinggi peneliti masih memenuhi rekomendasi yang disyaratkan pada PBI (1971).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan proses penelitian dan hasil yang telah dibahas maka dapat diambil beberapa kesimpulan. sebagai berikut. Faktor konversi kuat tekan beton untuk semen PCC beton mutu normal menghasilkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan PBI (1971) pada umur 3 dan 7 hari, namun perbedaanya tidak terlalu signifikan. Sementara itu, untuk semen PPC mutu normal menghasilkan nilai yang berbeda dan cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan PBI (1971) pada umur 3 dan 7 hari. Perbedaan tersebut dikarenakan bahan pozzolan yang ada di semen PPC.

Faktor konversi kuat tekan beton untuk semen PCC dan PPC beton mutu tinggi menghasilkan nilai yang relatif sama dengan PBI (1971) dan perbedaanya tidak terlalu signifikan. Namun perlu diperhatikan pada penggunaan semen PPC pada umur 3 hari menghasilkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan PBI (1971).

Nilai faktor konversi penelitian dapat digunakan karena hasilnya tidak berbeda jauh, hanya saja perlu memperhatikan kebutuhan konstruksi, jika ingin memperoleh kuat tekan awal yang tinggi dapat digunakan jenis semen PPC lalu PCC. Penggunaan semen PCC meningkatkan workability dan laju percepatan pertumbuhan beton dibandingkan semen PPC. Sementara itu, Semen PPC menghasilkan kuat tekan awal tinggi dan kuat tekan akhir yang tinggi dibandingkan semen PCC kedua hal tersebut berlaku pada beton mutu normal dan tinggi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Miller, N. M. Ho, N. Talebian, dan Z. Javanbakht. 2023. *Real-time monitoring of early-age compressive strength of concrete using an IoT-enabled monitoring system: an investigative study*. Innovative Infrastructure Solutions. Vol.8. No.2. Februari. doi: 10.1007/s41062-023-01043-7.
- [2] Dikrektorat Penyelidikan Masalah Bangunan. 1971. *Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971*. Cetakan ke 7. Jakarta.
- [3] Badan Standardisasi Nasional. 2019. *SNI 2847 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta.
- [4] R. R. Irawan. 2020. *Membangun Konektivitas Dengan Semen Yang Ramah Lingkungan*. Buletin Bina Marga Berkarya (Bineka). Vol. 1. Hal: 6–11, Oktober.
- [5] D. Ndahirwa, H. Zmamou, H. Lenormand, dan N. Leblanc. 2022. *The role of supplementary cementitious materials in hydration, durability and shrinkage of cement-based materials, their environmental and economic benefits: A review*. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.clema.2022.100123.
- [6] J. Ariyagounder dan V. Mangottiri. 2023. *A Compensatory Approach for Enhancing the Strength and Durability of Green Concrete Composites (GCC) with Multiple Combinations of Recyclable Pozzolanic Materials (RPM)*. 13 Desember 2023. doi: 10.21203/rs.3.rs-3725628/v1.
- [7] M. Kiptiah dan R. Bangun Giarto. 2023. *Analisis Perbandingan Kuat Tekan Beton Semen OPC Dan Semen PCC Terhadap Pemanfaatan Sikament-Nn*. Techno, Vol. 24. No. 1. Hal: 27–38. April 2023.
- [8] A. Khan, S. Rukhsar, dan M. Adnan. 2022. *Assessment Of Pozzolanic Material For Manufacturing Of Portland Pozzolana Cement (PPC) By The Comparison Of Ordinary Portland Cement (OPC)*. Acta Geodynamica et Geomaterialia. Vol. 19. No. 2. Hal: 119–126. 2022. doi: 10.13168/AGG.2022.0002.
- [9] N. Ray, D. P, dan R. D. 2016. *Studi Angka Koefisien Korelasi Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Berdasarkan Umur & Bentuk Benda Uji Standar SNI 03-2847-2002*. AGREGAT. Vol. 1. No. 1. Hal: 44–50. 2016.
- [10] B. A. Firjatullah, M. Teguh, dan E. Saputra. 2022. *Optimalisasi Penggunaan Pasir Besi Sebagai Pengganti Agregat Halus Dalam Campuran Beton Mutu Tinggi*. Teknisia. Vol. 27. No. 01. Hal: 24–33. Mei 2022.
- [11] M. Swartz, W. Mbasha, dan R. Haldenwang. 2023. *The Effect of a Blended Polycarboxylate Superplasticizer on the Rheology of Self-Compacting Concrete Paste*. Applied Sciences. Vol. 13. No. 7. April

2023. Switzerland. doi: 10.3390/app13074148.
- [12] Badan Standardisasi Nasional. 2000. *SNI 03-2834 Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. Jakarta.
- [13] Badan Standardisasi Nasional. 2000. *SNI-03-6468 Tata Cara Perencanaan Campuran Tinggi Dengan Semen Portland Dengan AbuTerbang*. Jakarta.
- [14] Badan Standardisasi Nasional. 2011. *SNI 1974 Tentang Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*. Jakarta.
- [15] X. Ya. 2024. *Unveiling the intricacies of the normal distribution: From theory to applications*. Theoretical and Natural Science. Vol. 36. No. 1. Hal: 175–179. Juli 2024. doi: 10.54254/2753-8818/36/20240617.
- [16] H. A. Luzuriaga Jaramillo, C. A. Espinosa Pinos, A. F. Haro Sarango, dan H. D. Ortiz Román. 2023. *Histograma y distribución normal: Shapiro-Wilk y Kolmogorov Smirnov aplicado en SPSS*. LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades. Vol. 4. No. 4. Oktober 2023. doi: 10.56712/latam.v4i4.1242.
- [17] D. Salam. 2023. *Penggunaan Semen Jenis OPC, PPC, Dan PCC Pada Beton Terhadap Variasi Umur Beton Dengan Metode Pengujian Destructive Dan Non-Destructive*. Prosiding Seminar Nasional Hasil Penelitian dan Pengabdian Masyarakat. Hal: 18–31. Oktober 2023. Yogyakarta.
- [18] A. Ibrahim. 2021. *Korelasi Koefisien Umur Terhadap Kuat Tekan Beton Yang Menggunakan Semen PCC (Portland Composite Cement)*. Journal of Applied Civil and Environmental Engineering. Vol. 1. No. 2. Hal: 1–8. Oktober 2021.
- [19] M. M. Alami dan T. K. Erdem. 2022. Effects of mix-design variables on the workability, rheology and stability of self-consolidating concrete. *Revista de la Construcción*. Vol. 21. No. 3. Hal: 703–716. 2022. doi: 10.7764/RDLC.21.3.703.
- [20] K. M. Mane, S. P. Chavan, S. A. Salokhe, P. A. Nadgouda, dan S. T. Patil. 2022. Predicting Slump Values of Concrete Made by Pozzolans and Manufactured Sand using ANN. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. Vol. 10. No. 5. Hal: 66–72. Januari 2022. doi: 10.35940/ijrte.D6616.0110522.
- [21] Badan Standardisasi Nasional. 2004. *SNI 15-7064 Semen Portland Komposit*. Jakarta.
- [22] Badan Standardisasi Nasional. 2014. *SNI 0302 Semen portland Pozolan*. Jakarta.
- [23] J. Lin dkk. 2024. *Impact of Water–Cement Ratio on Concrete Mechanical Performance: Insights into Energy Evolution and Ultrasonic Wave Velocity*. *Materials*. Vol. 17. No. 15. Agustus 2024. doi: 10.3390/ma17153651.
- [24] K. Annaba dkk., 2023. *Mechanical, electrochemical (EIS), and microstructural characterization of reinforced concrete incorporating natural volcanic pozzolan*. *Case Studies in Construction Materials*. Vol. 19. Desember 2023. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02620.
- [25] A. Ginting. 2021. *Increasing the Compressive Strength of Concrete Using PPC*. *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2394/1/012021.
- [26] L. S. Ho dkk., 2023. *Durability of mortar and concrete containing pozzolans as a partial cement replacement in the marine environment: a review*. *Journal of Science and Transport Technology University of Transport Technology JSTT*. Vol. 3. No. 3. Hal: 13–25, September 2023. doi: 10.58845/jstt.utt.2.
- [27] V. Davendra dan R. Trimurtiningrum. 2022. *Pengaruh Silica Fume Sebagai Bahan Tambah Terhadap Karakteristik Beton Mutu Tinggi*. *POTENSI*. Vol. 5. No. 2. Hal: 1–8, 2022. <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/potensi>
- [28] L. Yi, D. Yang, dan J. Chen. 2024. *Understanding the role of natural pozzolana in regulating the early hydration reaction process and microstructure of Portland cement*. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. Vol. 32. No. 10. Hal: 977–985, Oktober 2024. doi: 10.1080/1536383X.2024.2354761.
- [29] Sugiyono. 2020. *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Bandung: Alfabeta.CV.
- [30] M. An, Y. Liu, G. Zhang, dan Y. Wang. 2023. *Properties of Cement-Based Materials with Low Water–Binder Ratios and Evaluation Mechanism under Further Hydration Effect*. *Applied Sciences*. Vol. 13. No. 17. September 2023. doi: 10.3390/app13179946.

- [31] X. Peng, Z. Zhuang, dan Q. Yang. 2022. *Predictive Modeling of Compressive Strength for Concrete at Super Early Age*. Materials. Vol. 15. No. 14. Juli 2022. doi: 10.3390/ma15144914.
- [32] T. K. Wong dan J. Mulder. 2023. *On the Credibility of Statistical Inference Within the Neyman-Pearson Hypothesis Testing Framework*. Hal: 1–47. Desember 2023. doi: 10.31234/osf.io/kh3mu.
- [33] A. R. Prameswara, Dony, Rasiwan, dan E. Rabihati. 2022. *Evaluasi Rancangan Mutu Beton Pada Pembangunan Gedung Di Kalimantan Barat*. Construction and Material Journal. Vol. 4. No. 3. November 2022.
- [34] Z. Ahmad, M. Suleman, M. Sabtain, M. Abdur Rehman, W. ur Rahman, dan H. Bilal. 2023. *Optimum Utilization of Volcanic Rock as Pozzolana for the Maximum Compressive Strength of Mortar*. Journal of ICT. Design, Engineering and Technological Science. Vol. 7. No. 2. 2023. doi: 10.33150/jitdets-7.2.4.