

Sifat Mekanis Beton Normal dengan Campuran Tepung Marmer

***Widodo Kushartomo, Dewi Permata Sari**

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara, Jakarta
*) widodo@untar.ac.id

Received: 5 Februari 2018 Revised: 16 Juli 2018 Accepted: 20 Juli 2018

Abstract

This study is describe about the mechanical properties of normal concrete by adding of marble flour based on the mixed plan made. The compressive strength of the planned test object f_c '20.0 and f_c '30.0 MPa was prepared by using the ACI method. The addition of marble flour in a concrete mixture varies from 0%, 5%, 10%, 15%, 20% and 25% to the weight of the cement used. Concrete test specimens were made in the form of cylinders 15.0 cm in diameter, 30.0 cm in height and made in the form of concrete beams measuring 15.0 cm x 15.0 cm x 75.0 cm, the type of mechanical testing performed in the form of compressive strength tests on cylindrical specimen, split tensile strength test on cylindrical specimen and flexure test on beam specimen. Curing is done by immersion technique at 25°C and the test is done when the concrete is 28 days old. The test results show that the addition of marble flour to the normal concrete mixture can increase its mechanical properties by 26% for compressive strength, 24% for split tensile strength, and 17% for flexural strength.

Keywords: Concrete, marble, compressive strength, split tensile strength, flexural strength

Abstrak

Penelitian ini menjelaskan sifat mekanik beton normal dengan penambahan tepung marmer berdasarkan rencana campuran yang dibuat. Kuat tekan benda uji yang direncanakan f_c '20,0 dan f_c '30,0 MPa dibuat menggunakan metode ACI. Penambahan tepung marmer dalam campuran beton bervariasi dari 0%, 5%, 10%, 15%, 20% dan 25% terhadap berat semen yang digunakan. Benda uji beton dibuat dalam bentuk silinder berdiameter 15,0 cm, tinggi 30,0 cm dan dibuat dalam bentuk balok beton berukuran 15,0 cm x 15,0 cm x 75,0 cm, jenis pengujian mekanik yang dilakukan berupa tes tekan pada benda uji silinder, tes kuat tarik belah pada benda uji silinder dan tes lentur pada benda uji balok. Pemeliharaan dilakukan dengan teknik perendaman pada temperatur 25°C dan pengujian dilakukan ketika beton berumur 28 hari. Hasil pengujian memperlihatkan, penambahan tepung marmer ke dalam campuran beton normal dapat meningkatkan sifat mekaniknya sebesar 26% untuk kuat tekan, 24% untuk kuat tarik belah, dan 17% untuk kuat lentur.

Kata kunci: Beton, marmer, kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur

Pendahuluan

Marmer merupakan salah satu material penting yang digunakan dalam bangunan khususnya sebagai elemen dekoratif. Dalam industri batu ornamen, batuan jenis ini mempunyai nilai ekonomis yang sangat baik. Namun dalam proses pembuatannya untuk menjadi elemen dekoratif, 20-30% dari produk akhir hasil pengolahan dihasilkan limbah berupa pecahan batu marmer dan tepung marmer (Aliabdo *et al.*, 2014). Jika

tidak dilakukan penanganan yang tepat, limbah ini dapat menyebabkan dampak serius pada lingkungan, air tanah dan kesehatan. Jika air limbah yang tercampur dengan tepung marmer dibuang ke lingkungan tanpa diolah terlebih dahulu dapat mempengaruhi morfologi, hidrologi dan kesuburan tanah di daerah sekitar pembuangan limbah dengan mengurangi porositas dan permeabilitasnya. Sedangkan partikel udara halus dari pengolahan limbah ini bahkan bisa menimbulkan efek visual, gangguan pernafasan

dan kulit (Rana *et al.*, 2015). Penelitian penggunaan material dengan ukuran partikel sangat halus sebagai bahan penyusun beton seperti abu terbang, *silica fume*, dan tepung marmer terbukti berhasil dalam meningkatkan sifat mekanik beton normal, beton mutu tinggi dan *reactive powder concrete* (Kushartomo *et al.*, 2013).

Penelitian beton menggunakan limbah marmer sebagai pengganti pasir dilakukan oleh Kalchuri & Chandak (2015), jumlah tepung marmer yang digunakan sebagai pengganti pasir dipersiapkan dalam berbagai jumlah (5%, 10%, 20%, 30% dan 40%). Penelitian yang dilakukan menghasilkan terjadi peningkatan kuat tekan beton bila pasir diganti mencapai 20%, dan apabila jumlah pasir yang diganti melebihi 20% maka akan terjadi penurunan kuat tekan.

Susilowati (2011) meneliti pengaruh kandungan tepung marmer sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat semen. Penggantian limbah marmer terhadap sejumlah semen pada adukan beton normal dapat meningkatkan kuat tekan beton hanya pada beton marmer kadar 5%, karena kadar tersebut optimum untuk mengisi rongga/voids, sedangkan pada kadar 10% dan 15% terjadi penurunan kuat tekan.

Istiqomah & Kurnia (2013) meneliti pengaruh kandungan tepung marmer pada beton. Jumlah tepung marmer yang digunakan sebagai campuran pada beton dipersiapkan dalam berbagai jumlah (0%, 5%, 10%, 20%, 30%). Berdasarkan pengujian kuat tekan pada umur 49 hari memperlihatkan penambahan tepung marmer optimum berada diantara 10 - 20% dari berat semen. Pada penambahan tepung marmer sebesar 10 - 20% dapat menaikkan kuat tekannya sebesar 10% dari kuat tekan beton normal.

Beberapa tahun belakang ini banyak penelitian yang membuktikan penggunaan bahan tambahan berupa mineral pada beton berhasil dalam meningkatkan sifat-sifat beton baik pada beton segar maupun beton keras (Galinska & Czarnecki, 2017 dan King *et al.*, 2012). Penggunaan tepung marmer sebagai mineral bahan tambahan dalam beton belum banyak mendapat perhatian dari para peneliti. Data-data teknis yang berkaitan dengan tepung marmer dalam campuran beton masih jauh dari sempurna dan banyak parameter yang perlu dipelajari dengan lebih mendalam.

Keterbatasan data teknis penggunaan tepung marmer dalam beton berdampak pada belum adanya kesimpulan yang baik terhadap jumlah optimum tepung marmer harus digunakan untuk

menghasilkan sifat mekanik yang maksimum sebagai bahan campuran mineral dalam beton. Persentase jumlah optimum tepung marmer diperkirakan tergantung pada kadar semen, tingkat kehalusan dan metode pemeliharaan. Pemeriksaan komposisi kimia yang dilakukan terhadap tepung marmer didominasi oleh (CaO) dan juga beberapa bahan lain diantaranya (SiO_2), (Al_2O_3) dan (Fe_2O_3). Unsur-unsur tersebut merupakan bahan baku utama dalam pembuatan semen, sehingga tepung marmer mampu bekerja sebagai bahan pengikat pada beton bila terjadi reaksi pozzolanik. Demikian juga dengan ukuran butiran yang sangat halus, penambahan tepung marmer pada beton dapat berfungsi sebagai bahan pengisi pori-pori beton.

Pada umumnya limbah tepung marmer merupakan material yang tidak diinginkan, terlebih jika jumlah limbah yang dihasilkan sangat melimpah maka limbah tersebut akan berdampak negatif pada lingkungan. Pada penelitian ini akan dilakukan rangkaian pengujian dan analisis terkait komposisi kimia dan sifat mekanis beton campuran tepung marmer berupa kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur. Diharapkan penelitian ini dapat menjadi rujukan untuk membantu mengurangi pencemaran lingkungan.

Metode

Pengujian sifat mekanis beton campuran tepung marmer berupa kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur dilaksanakan di Laboratorium Konstruksi dan Teknologi Beton Jurusan Teknik Sipil Universitas Tarumanagara. Sejumlah benda uji disiapkan berupa silinder dengan ukuran diameter 15,0 cm dan tinggi 30,0 cm dan balok berukuran 15,0 cm x 15,0 cm x 75,0 cm. Rencana campuran menggunakan metode ACI 211 dengan mutu beton direncanakan f'_c 20,0 MPa dan f'_c 30 MPa. Tepung marmer yang ditambahkan pada setiap mutu dalam campuran beton divariasikan dari 0% yang digunakan sebagai kontrol, kemudian 5%, 10%, 15% 20% dan 25%.

Seluruh benda uji dipelihara dengan teknik perendaman pada temperatur 25°C selama 26 hari dan diuji ketika umurnya telah mencapai 28 hari. Selain pengujian mekanik juga dilakukan pengujian *properties* agregat, pengujian komposisi kimia dan pengujian ukuran butiran tepung marmer serta pemeriksaan mikroskopis menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM). Seluruh agregat yang digunakan diperoleh dari daerah sekitar kampus Universitas Tarumanagara dan tepung marmer diambil dari pabrik produsen batu marmer di daerah Cikarang, Jawa Barat.

Tabel 1. Sifat fisika dan kimia semen PCC (Indrawati, 2007)

Item	Satuan	Standar SNI	PCC	
			Range	Tipikal
Volume kadar udara dalam mortar	%	≤ 12,0	3,0 - 11,0	7,000
Kehalusan	m ² /kg	≥ 280	350 - 420	385,000
Ekspansi dengan:				
<i>Autoclave</i>	%	≤ 0,08	0,03 - 0,20	0,115
<i>Shrinkage</i>	%	≤ 0,20	0,10 - 0,20	0,150
Waktu pengikatan				
Awal	menit	≥ 45	110 - 150	130,000
Akhir	menit	≥ 375	260 - 350	305,000
Kuat tekan				
3 hari	kg/cm ²	≥ 125	210 - 250	230,000
7 hari	kg/cm ²	≥ 200	280 - 320	300,000
28 hari	kg/cm ²	≥ 250	390 - 430	410,000
Pengikatan semu				
Penetrasi akhir	%	≥ 50	110 - 150	130,000
<i>Specific gravity</i>	g/cm ³	-	3,00 - 3,10	3,050
Panas hidrasi, 7 hari	kal/g	-	60,0 - 70,0	65,000
Panas hidrasi, 28 hari	kal/g	-	70,0 - 85,0	77,500
SiO ₂	%		20,0 - 25,0	22,500
Al ₂ O ₃	%		5,0 - 7,0	6,000
Fe ₂ O ₃	%		3,0 - 4,0	3,500
CaO	%		55,0 - 65,0	60,000
MgO	%		1,5 - 3,0	2,250
SO ₃	%	≤ 4,0	2,0 - 2,5	2,250
<i>Free lime</i>	%		0,5 - 1,5	1,000
<i>Total alkali</i>	%		0,3 - 0,6	0,450
<i>Chloride</i>	%		0,01 - 0,02	0,015

Deskripsi material

Dalam penelitian ini semen yang digunakan berupa *portland composite cement* (PCC) dan telah memenuhi standar SNI 15-7064-2004. Sifat fisika dan kimia semen PCC yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1. Jenis semen PCC dipilih berdasarkan tingkat kemudahan dalam perolehannya dan juga produksi semen PCC lebih ramah terhadap penggunaan bahan baku alam. Agregat halus yang digunakan berasal dari daerah Rangkas sedangkan agregat kasar berasal dari daerah Sudamanik dengan *properties* seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. *Properties* agregat halus dan kasar

<i>Properties</i>	Satuan	Hasil pengujian	
		Halus	Kasar
Kadar lumpur	%	12,167	1,583
Kadar organis	-	minimum	minimum
Kadar air	%	4,750	1,500
Berat jenis	g/m ³	2,070	2,235
Penyerapan	%	20,000	1,700
Gradasi butiran	-	Zona 2	4,8 - 38
Modulus kehalusan	-	2,600	7,800

Tepung marmer diambil dari pabrik produsen batu marmer di daerah Cikarang Jawa Barat, merupakan hasil pemotongan dan penghalusan batu marmer. Tepung marmer yang diambil masih tercampur dengan air sehingga perlu dikeringkan terlebih dahulu dengan oven pada temperatur 105 ±5°C selama 24 jam, kemudian digiling menggunakan mesin *los angelos* supaya menjadi tepung. Komposisi kimia dan komposisi fisika dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4. Ukuran butiran tepung marmer ditunjukkan dalam Gambar 1.

Tabel 3. Komposisi kimia tepung marmer

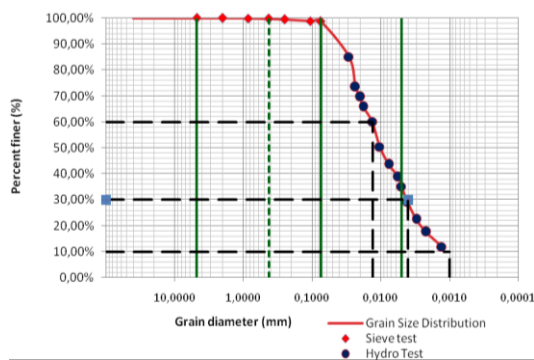
Parameter	Satuan	Hasil
CaO	%	45,24
SiO ₂	%	9,65
MgCO ₃	%	3,04
Al ₂ O ₃	%	2,85
Fe ₂ O ₃	%	1,05

Tabel 4. Komposisi fisika tepung marmer

<i>Properties</i>	Satuan	Hasil
<i>Specific gravity</i>	g/cm ³	2,760
D ₆₀	mm	0,013
Warna	-	Putih

Proporsi campuran

Sebuah campuran digunakan sebagai pengontrol (Mix-0) dan lima campuran (Mix-5 sampai Mix-25) dengan penambahan tepung marmer, disiapkan untuk pembuatan benda uji dan pengujiannya berupa kuat tekan, kuat tarik belah dan kuat lentur. Setelah penuangan kedalam cetakan, benda uji di jaga selama 24 jam, kemudian dibuka dan direndam dalam air bertemperatur 25°C selama 26 hari. Pada umur 27 hari benda uji di keluarkan dari bak perendaman dan dibiarkan kering udara untuk di tes pada umur 28 hari. Tabel 5 dan 6 memperlihatkan proporsi material untuk setiap campuran.



Gambar 1. Distribusi ukuran butiran tepung marmer

Prosedur pengujian

Setelah pemeliharaan dalam air, seluruh benda uji di tes menggunakan prosedur baku yang berlaku secara internasional.

1. Pengujian kuat tekan beton

Pengujian kuat tekan dilakukan mengikuti prosedur baku ASTM C39. Pengujian kuat tekan

beton dapat dilihat pada Gambar 2(a). Perhitungan kuat tekan beton dapat dilihat sebagai berikut:

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (1)$$

dimana f_c' adalah kuat tekan silinder (MPa), P adalah beban maksimum (N), dan A adalah luas bidang tekan (mm^2).

2. Pengujian kuat tarik belah beton

Pengujian kuat tarik belah menggunakan prosedur baku ASTM C496. Pengujian kuat tarik belah beton dapat dilihat pada Gambar 2(b). Perhitungan kuat tarik belah dapat dilihat sebagai berikut:

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi ld} \quad (2)$$

diamana f_{ct} merupakan kuat tarik belah beton (MPa), P merupakan beban maksimum yang ditunjukkan oleh mesin uji (N), l merupakan panjang spesimen (mm), dan d merupakan diameter spesimen (mm).

3. Pengujian kuat lentur beton

Pengujian kuat lentur balok menggunakan prosedur baku ASTM C78, yaitu metode pengujian kuat lentur balok (*modulus of rupture*) beton dengan beban diterapkan pada dua titik pada sepertiga dari panjang bentang (*third point loading*).

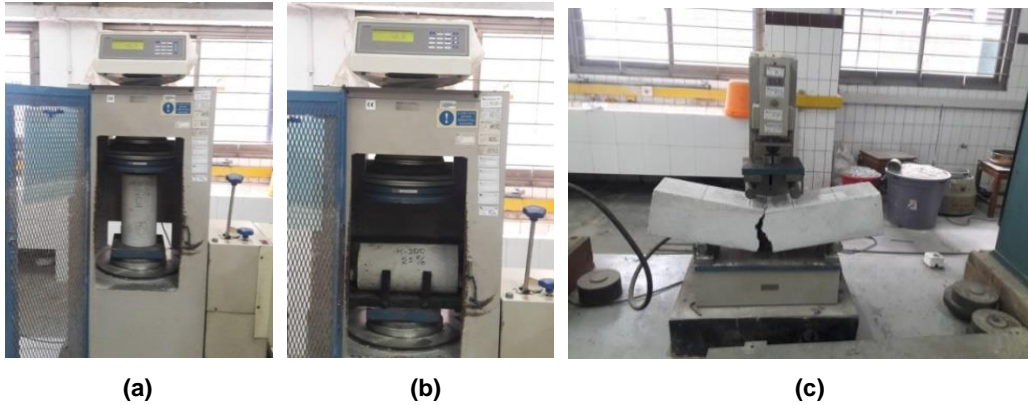
Tegangan maksimum terjadi pada bagian 1/3 bagian balok. Rekayasa pembebanan dan momen yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 3. Besarnya momen yang dapat mematahkan benda uji adalah momen akibat beban maksimum dari mesin dengan mengabaikan berat sendiri. Pengujian kuat lentur beton dapat dilihat pada Gambar 2(c).

Tabel 5. Proporsi campuran $f_c' 20,0 \text{ MPa}$ material tiap m^3

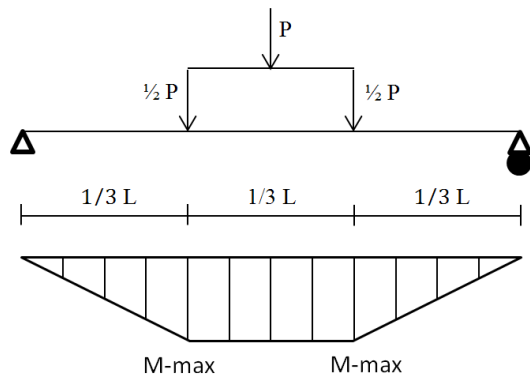
Material	Satuan	Mix-0	Mix-5	Mix-10	Mix-15	Mix-20
Semen	Kg	253	253	253	253	253,0
Air	Kg	175	175	175	175	175,0
Pasir	Kg	516	516	516	516	516,0
Kerikil	Kg	1084	1084	1084	1084	1084,0
Marmer	Kg	0	12,6	25,3	38,0	50,7

Tabel 6. Proporsi campuran $f_c' 30,0 \text{ MPa}$ material tiap m^3

Material	Satuan	Mix-0	Mix-5	Mix-10	Mix-15	Mix-20	Mix-25
Semen	Kg	324	324	324	324	324	324,0
Air	Kg	175	175	175	175	175	175,0
Pasir	Kg	552	552	552	552	552	552,0
Kerikil	Kg	995	995	995	995	995	995,0
Marmer	Kg	0	16,2	32,4	48,6	64,8	81,0



Gambar 2. Pengujian mekanis beton: (a) kuat tekan (b) kuat tarik belah (c) kuat lentur



Gambar 3. Momen akibat beban P

Besarnya momen maksimum dapat dilihat sebagai berikut:

$$M = \frac{1}{2} P \frac{1}{3} L = \frac{1}{6} PL \quad (3)$$

dimana P merupakan beban maksimum (N), L merupakan panjang bentang (mm).

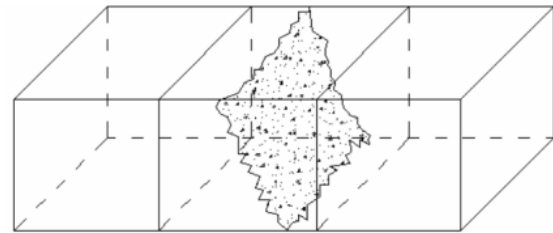
Secara umum persamaan kuat lentur balok dapat ditulis :

$$f_r = \frac{M}{S} = \frac{\frac{1}{6} PL}{\frac{1}{6} bh^2} = \frac{PL}{bh^2} \quad (4)$$

Dalam menghitung kuat lentur dibagi dalam 3 kategori sesuai dengan letak bidang patahannya. Benda uji yang digunakan berupa balok dengan ukuran 15,0 cm x 15,0 cm x 75,0 cm. Rumus-rumus perhitungan yang digunakan adalah:

Perhitungan kuat lentur dapat dilihat sebagai berikut:

1. Bidang patah terletak di daerah pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah). Daerah patahan dan pembebanannya dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5.

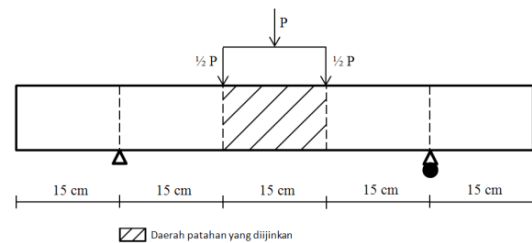


Gambar 4. Patah pada 1/3 bentang tengah (SNI 03-4431-2011)

Sesuai dengan kondisi di atas maka nilai kuat lentur balok dapat dihitung sebagai berikut:

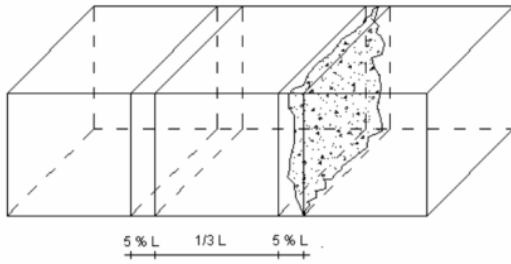
$$f_r = \frac{PL}{bh^2} \quad (5)$$

dimana f_r merupakan kuat lentur beton (MPa), P merupakan beban maksimum yang ditunjukkan oleh mesin uji (N), L merupakan panjang bentang antar perletakan (mm), b merupakan lebar benda uji (mm), h merupakan tinggi benda uji (mm).

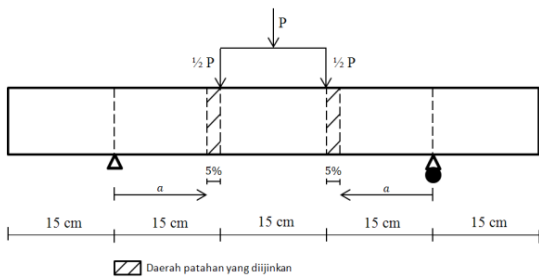


Gambar 5. Daerah patahan tipe satu pada benda uji

2. Untuk pengujian dimana patahnya benda uji ada diluar pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah), dan jarak antara titik pusat dan titik patah kurang dari 5% dari jarak antara titik perletakan maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan sebagai berikut. Daerah patahan dan pembebanannya dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7.



Gambar 6. Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada < 5% dari bentang (SNI 03-4431-2011)



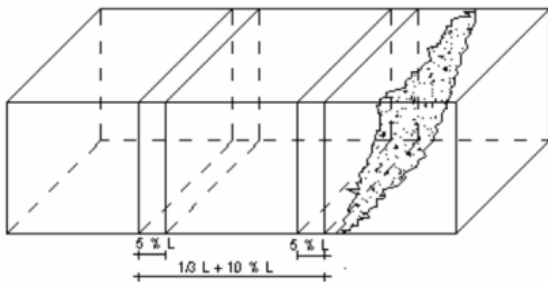
Gambar 7. Daerah patahan tipe dua pada benda uji

Sesuai dengan kondisi di atas maka nilai kuat lentur balok dapat dihitung sebagai berikut:

$$f_r = \frac{3Pa}{bh^2} \quad (6)$$

dimana f_r merupakan kuat lentur beton (MPa), P merupakan beban maksimum yang ditunjukkan oleh mesin uji (N), L jarak antara titik retak ke perletakan (mm), b merupakan lebar benda uji (mm), h merupakan tinggi benda uji (mm).

- Untuk benda uji yang patahnya di luar pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah) dan jarak antara titik pembebanan dan titik patah lebih dari 5% bentang, hasil pengujian tidak digunakan. Daerah patahan dan pembebanannya dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada > 5% dari bentang (SNI 03-4431-2011)

Hasil dan Pembahasan

Pengujian kuat tekan yang dilakukan terhadap seluruh benda uji, memiliki nilai rata-rata seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7, 8 dan 9.

Tabel 7. Nilai rata-rata kuat tekan benda uji

Kode	Satuan	Kuat tekan (MPa)	
		$f_c'_{20,0}$	$f_c'_{30,0}$
Mix-0	MPa	11,94	22,39
Mix-5	MPa	12,59	26,51
Mix-10	MPa	14,29	27,23
Mix-15	MPa	16,83	29,28
Mix-20	MPa	12,30	23,96
Mix-25	MPa	-	23,33

Tabel 8. Nilai rata-rata kuat tarik belah benda uji

Kode	Satuan	Kuat tarik belah (MPa)	
		$f_c'_{20,0}$	$f_c'_{30,0}$
Mix-0	MPa	1,66	22,39
Mix-5	MPa	1,77	26,51
Mix-10	MPa	1,98	27,23
Mix-15	MPa	2,20	29,28
Mix-20	MPa	1,69	23,96
Mix-25	MPa	-	23,33

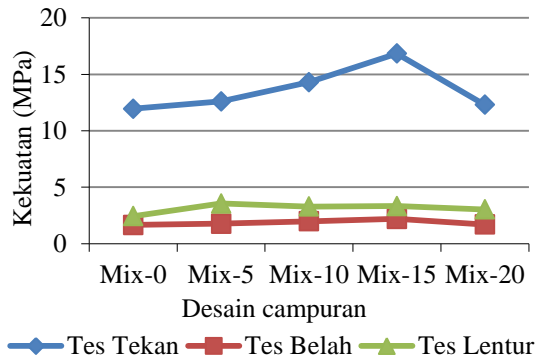
Tabel 9. Nilai rata-rata kuat lentur benda uji

Kode	Satuan	Kuat lentur (MPa)	
		$f_c'_{20,0}$	$f_c'_{30,0}$
Mix-0	MPa	4,00	22,39
Mix-5	MPa	4,17	26,51
Mix-10	MPa	4,27	27,23
Mix-15	MPa	4,50	29,28
Mix-20	MPa	3,94	23,96
Mix-25	MPa	3,80	23,33

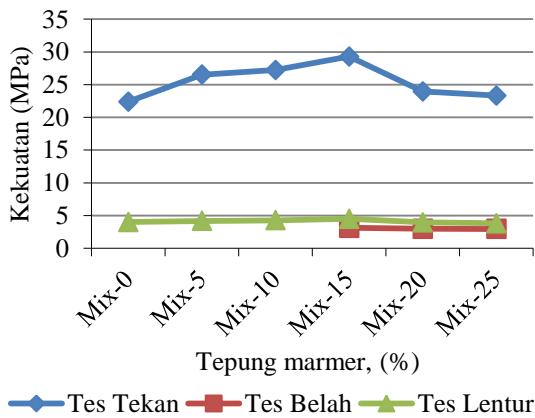
Berdasarkan pengujian yang dilakukan peningkatan kuat tekan terjadi ketika campuran beton menggunakan tepung marmer, peningkatan terjadi terus sampai penambahan tepung marmer sebanyak 15%, setelah itu baru terjadi penurunan kuat tekan ketika jumlah tepung marmer yang ditambahkan sebanyak 20% dan 25%. Namun demikian nilai kuat tekan beton yang menggunakan tepung marmer 20% dan 25% masih lebih tinggi dibandingkan dengan beton yang tidak menggunakan campuran tepung marmer, demikian juga berlaku untuk pengujian lain yaitu tes belah dan tes lentur (Gambar 9 dan 10).

Berdasarkan nilai rata-rata terhadap keseluruhan hasil pengujian, penggunaan tepung marmer dapat meningkatkan sifat mekanik beton sebesar 26% untuk kuat tekan, 24% untuk kuat tarik belah, dan 17% untuk kuat lentur. Peningkatan kekuatan mekanik beton ini dapat dijelaskan sebagai berikut, tingkat kehalusan butiran semen yang disajikan dalam Tabel 1 yaitu sebesar 385 m²/kg artinya setara dengan ukuran saringan 200 mesh atau rata-rata ukuran besar butir sebesar 0,074 mm,

sedangkan ukuran butiran tepung marmer yang terukur berdasarkan Tabel 4 rata-rata sebesar 0,013 mm.



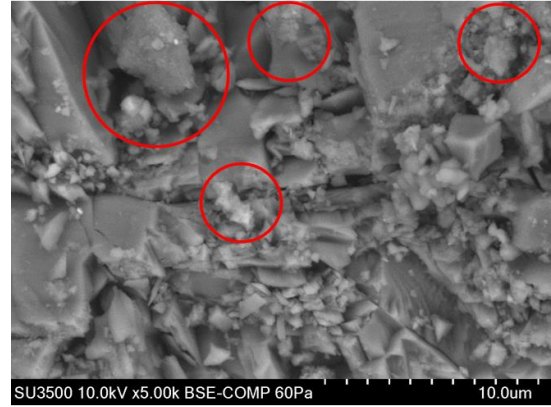
Gambar 9. Nilai rata-rata pengujian benda uji f_c' 20,0 MPa



Tabel 10. Nilai rata-rata pengujian benda uji f_c' 30,0 MPa

Berdasarkan data tersebut maka ukuran butiran tepung marmer jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan ukuran butiran semen, ini berarti tepung marmer akan mengisi *void* yang terbentuk didalam beton seperti ditunjukkan pada Gambar 11, sehingga beton menjadi semakin kompak dan berdampak pada peningkatan sifat mekanisnya.

Kekuatan mekanis tertinggi dicapai ketika jumlah tepung marmer yang dimasukkan sebesar 15%, ini menunjukkan sebagian besar *void* telah terisi oleh butiran tepung marmer, sedangkan bila jumlah tepung marmer yang ditambahkan lebih dari 15% menyebabkan terjadi penurunan nilai kekuatan mekanis. Penurunan ini diakibatkan karena jumlah tepung marmer yang berlebihan, kelebihan tepung marmer tersebut justru bertindak sebagai pengotor dalam campuran dan menghalangi pengikatan yang terjadi antara pasta semen dengan agregat.



Tabel 11. Butiran tepung marmer dalam *void* beton

Komposisi kimia tepung marmer yang menyerupai komposisi kimia semen, dalam penelitian ini belum menunjukkan peranan dalam peningkatan kekuatan mekanik. Peningkatan kekuatan beton ditinjau dari komposisi kimia dapat terjadi apabila komposisi kimia pada tepung marmer bertemu dengan material yang mengandung silika aktif seperti *pozzolanik* material yaitu *silica fume*, abu terbang atau abu vulkanik. *Pozzolanik* material memicu terjadinya reaksi *pozzolanik* antara produk hidrasi semen dengan silika aktif, reaksi tersebut menghasilkan material pengikat baru dalam beton yang disebut dengan *tobermorite* sehingga beton menjadi bertambah kuat (Kushartomo *et al.*, 2013).

Dalam penelitian ini tidak digunakan material *pozzolanik* dalam rencana campuran beton, sehingga tidak terjadi reaksi *pozzolanik*. Berdasar keterangan tersebut, komposisi kimia tepung marmer tidak berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan beton. Analisa ini dikuatkan pula dengan tidak ditemukannya gambar *tobermorite* pada struktur mikro beton seperti disajikan pada Gambar 11.

Kesimpulan

Berdasar hasil pengujian dan analisa yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa Penambahan tepung marmer ke dalam campuran beton normal dapat meningkatkan kekuatan mekanisnya sebesar 26% untuk kuat tekan, 24% untuk kuat tarik belah, dan 17% untuk kuat lentur. Peningkatan kekuatan mekanis beton normal terjadi akibat tepung marmer mengisi *void* yang terdapat dalam beton sehingga beton menjadi semakin padat dan kompak. Ukuran butiran tepung marmer yang jauh lebih kecil dari pada ukuran butiran semen, memudahkan tepung marmer mengisi setiap *void* yang terbentuk didalam beton.

Penambahan tepung marmer sebesar 15% terhadap berat semen pada campuran beton normal, menyebabkan peningkatan kekuatan mekanik beton secara maksimal. Komposisi kimia tepung marmer tidak berkontribusi pada peningkatan kekuatan mekanik beton, komposisi kimia tepung marmer akan berkontribusi pada peningkatan kekuatan beton bila menyebabkan terjadinya reaksi pozzolanik. Penggunaan tepung marmer sebagai bahan campuran beton, membantu mengurangi pencemaran lingkungan yang dihasilkan oleh limbah industri pengolahan batu marmer.

Saran

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, penulis ingin memberikan beberapa saran yaitu Perlu dilakukan pengujian sifat mekanis yang lain seperti modulus elastisitas dan sebagainya. Perlu dilakukan percobaan untuk campuran mutu beton yang lain.

Daftar Pustaka

ACI Commitee 211. (1991). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy Weight and Mass Concerete*. American Concrete Institute.

Aliabdo, A. A., Elmoaty, A. E. M. A., & Auda, E. M. (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, 50, 28-41.

ASTM Internasional. (2002). *Standar Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Speciments*, Section 4, Vol. 04.02, ASTM C39.

ASTM Internasional. (2002). *Standar Test Method for Flexural Strength of Concrete*, Section 4, Vol. 04.02, ASTM C78.

ASTM Internasional. (2002). *Standar Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Speciments*, Section 4, Vol. 04.02, ASTM C496.

Badan Standarisasi Nasional. (2011). SNI 03-4431-2011 *Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal*

dengan Dua Titik Pembebanan. Bandung: Badan Standarisasi Nasional.

Galińska, A., & Czarnecki, S. (2017, October). The Effect of Mineral Powders Derived From Industrial Wastes on Selected Mechanical Properties of Concrete. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245(3), p. 032039. IOP Publishing.

Indrawati, V. (2007). Konsep, Bahan Aditif Mineral, Karakteristik dan Pengendalian Kualitas PCC Tiga Roda. *Seminar Nasional Rekayasa Material dan Konstruksi Beton*.

Istiqomah & Kurnia, S. (2013, Oktober). Pengaruh Tepung Marmer sebagai Bahan Pengisi pada Beton. *Konferensi Nasional Teknik Sipil 7 (KoNtekS7)*, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.

King, D., Fict, H., Dip, M., & Chartered, M. C. I. M. (2012, August). The Effect of Silica Fume on The Properties of Concrete as Defined in Concrete Society Report 74, Cementitious Materials. In *37th Conference on Our World in Concrete and Structures*, Singapura .

Kalchuri, B. S., & Chandak, R. (2015). Study on concrete using marble powder waste as partial replacement of sand. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 5(4), 87-89.

Kushartomo, W., Makarim, C. A., Supartono, F. X., & Sumawiganda, S. (2013). Pengaruh penambahan quartz powder pada reactive powder concrete terhadap terbentuknya kalsium-silikat-hidrat. *Journal of Civil Engineering*, 20(3), 187-194.

Rana, A., Kalla, P., & Csetenyi, L. J. (2015). Sustainable use of marble slurry in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 94, 304-311.

Susilowati. (2011). Pemanfaatan serbuk marmer sebagai bahan alternatif pengganti semen pada campuran beton normal, *Jurnal Arsitektur Universitas Bandar Lampung*, 1(2), 16-24.