

APLIKASI MIKROBA DALAM AGREGAT BUATAN UNTUK MENINGKATKAN KUAT TARIK BELAH BETON MENGANDUNG FLY ASH

**Imam Junaidi¹, Januarti Jaya Ekaputri^{1,*}, Sidiq Purnomo², Ign. Harry Sumartono²,
Winda Agustin², Widi Astuti³**

¹Departemen Teknik Sipil, FTSPK, ITS, Surabaya

²PT. Wijaya Karya Beton Tbk, DKI Jakarta

³Pusat Riset Teknologi Mineral - BRIN, Lampung

*Corresponding author: januartije@gmail.com

Abstract: In the tension zone, reinforcement in concrete plays a major role. However, the tensile stress can cause a potential for corrosion due to the cracks. This paper discusses microbes' application in concrete to increase the tensile strength of concrete. In addition, the application of artificial aggregate (AB) is proposed. It contained microbes to replace natural aggregate (AN) in the concrete in the tension zone. Microbes in liquid form were used in the range of 400-6000 ml/m³ for concrete or aggregate mixture. AB performance was analyzed using cylindrical concrete specimens for the compressive strength and split tensile strength. The addition of microbes increased the compressive strength by 12% and split tensile strength by 26% at the 100% AN variation. It was found that the use of AB decreased the compressive strength of concrete but increased the split tensile strength of 6.4% at a variation of 50% AB. Precipitation of CaCO₃ in the pores of the concrete as well as the presence of hyphae produced by microbial action increased the matrix bonding in the concrete. It was also proved that the bacterial colonies in the concrete continued to increase which contributed to the increase in the density of the concrete.

Keywords: Split Tensile Strength, Fly Ash, Microbes, Artificial Coarse Aggregate.

Abstrak: Pada daerah tarik, tulangan di dalam beton memiliki peranan yang sangat penting. Meskipun demikian, tegangan tarik yang terjadi ini bisa saja menyebabkan rentannya tulangan karena retak berpotensi menyebabkan korosi akibat terbukanya celah pada tulangan. Pada makalah ini, cairan mikroba yang terdiri dari bakteri dan jamur bersamaan digunakan untuk meningkatkan kemampuan tarik beton. Selain itu, diusulkan juga penggunaan pemanfaatan agregat kasar buatan (AB) yang mengandung mikroba untuk menggantikan agregat kasar natural (AN) dalam campuran beton pada daerah tarik beton. Cairan mikroba ditambahkan ke dalam campuran beton maupun AB sebanyak 400 hingga 6000 ml/m³. Pengujian kinerja AB dilakukan dengan menggunakan spesimen silinder untuk pengujian kuat tekan beton dan pengujian kuat tarik belah beton. Penambahan cairan mikroba terbukti dapat meningkatkan kuat tekan beton sebesar 12% dan kuat tarik belah beton sebesar 26% pada variasi AN 100%. Didapatkan hasil bahwa substitusi material AB dalam campuran beton dapat menurunkan kuat tekan beton, akan tetapi dapat meningkatkan kuat tarik belah sebesar 6,4% pada variasi 50% AB. Pengendapan mineral kalsium karbonat pada pori-pori di dalam beton serta adanya kapang akibat kerja jamur adalah penyebab meningkatnya lekatan pada matriks di dalam beton. Dibuktikan juga bahwa koloni bakteri bertambah di dalam beton terus bertambah yang berkontribusi pada peningkatan kepadatan beton.

Kata kunci: : Kuat Tarik Belah, Fly Ash, Mikroba, Agregat Kasar Buatan.

PENDAHULUAN

Pemanfaatan teknologi beton banyak diterapkan dalam pembangunan infrastruktur seperti jalan tol, jembatan, MRT, dsb. Kelebihan material beton ialah memiliki kuat tekan yang tinggi, mudah dibentuk, lebih murah dari material baja, dll. Akan tetapi, kelemahan utama beton terletak pada kuat tarik yang rendah dan bersifat getas.

Kuat tarik yang rendah dapat menyebabkan beton mudah retak di daerah tarik, sehingga ion penyebab korosi pada tulangan beton mudah masuk melalui celah retak. Korosi pada tulangan beton dapat mempersingkat umur layan struktur beton. Salah satu solusi yang mungkin dilakukan untuk meningkatkan ketahanan retak awal dan mengurangi sifat getas pada beton ialah dengan cara menambahkan serat fiber dalam campuran

beton (Kawulusan dkk., 2019; Wariyatno dan Haryanto, 2013). Kekurangan pemanfaatan serat fiber ialah biaya yang dikeluarkan relatif mahal dan proses pengerjaan lebih sulit dari beton biasa, sehingga dibutuhkan metode lain yang lebih efisien.

Alternatif lain yang paling murah ialah dengan mensubstitusikan *supplementary cementitious materials* (SCM) yang dapat bersifat pozolanik (Bharati dan Kumar, 2017; dan Irawan, 2013). Material pozolan yang paling banyak ditambahkan dalam campuran beton ialah Fly Ash (FA) yang kaya akan kandungan mineral silika alumina dengan kelebihan dapat mengurangi biaya produksi beton, mengurangi panas hidrasi awal, meningkatkan *workability* pada beton segar, meningkatkan ketahanan terhadap serangan asam-sulfat, dan meningkatkan kuat tekan di umur akhir (ACI 232.2R-96, 1986; Chen dkk., 2019; Chindasiriphan dkk., 2020; Roskos dkk., 2011; Samani dkk., 2018). Penerapan pemanfaatan FA di Indonesia diketahui hanya sebesar 10-12% dengan pengolahan 73% di pulau Jawa dan di bawah 30% di luar pulau Jawa (Ekaputri dan Al Bari, 2021).

Untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi sirkular, perlu didorong upaya pemanfaatan FA sebanyak mungkin sebagai substitusi binder pada beton. Selain itu, ada alternatif lain, yaitu pemanfaatan FA dalam pembuatan agregat buatan (AB). Diketahui ketersediaan agregat kasar alami (AN) yang digunakan dalam campuran beton seringkali tidak bisa memenuhi kebutuhan pembangunan infrastruktur di suatu daerah dan akan mengancam kondisi lingkungan jika dieksploitasi terus menerus (Riyadharshini dkk., 2012). Penggunaan agregat kasar buatan (AB) dapat menyelesaikan dua masalah yaitu melestarikan lingkungan dari polusi dan mencegah sumber daya alam agregat kasar alam (AN) habis di suatu daerah tertentu. Hal inilah yang menjadi dasar pentingnya pemanfaatan FA sebagai bahan pembuatan AB dan campuran di dalam beton. AB dibentuk menyerupai bentuk asli agregat kasar alami di lapangan melalui proses penghancuran pasta dengan mesin *stone crusher*. Tujuan utama proses penghancuran ialah agar didapatkan permukaan kasar seperti permukaan AN di lapangan dan diharapkan *interlock* antara AB yang menyamai AN.

Pemanfaatan FA dalam campuran beton memberikan kepadatan yang lebih bagus

daripada beton normal. Hal ini terjadi karena FA dapat mengurangi pori akibat produk sampingan hidrasi seperti *portlandite* ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Mineral *portlandite* yang berada di dalam matriks beton dapat bereaksi dengan senyawa silika alumina dalam kandungan FA untuk membentuk *Calcium Silicate Hydrate* (CSH) lanjutan (ACI 211.1-91, 2002), sehingga beton memiliki pori lebih sedikit dan matriks beton semakin padat. Diketahui bahwa lekatan matriks beton pada *Interfacial Transition Zone* (ITZ) campuran yang mengandung pozolan lebih bagus daripada beton normal yang tidak mengandung pozolan (Sadrumontazi dkk., 2018).

Walaupun demikian, agregat buatan dari bahan substitusi FA terhadap binder yang mengandung semen menyebabkan kelemahan dalam kepadatan produk, yang disebabkan oleh reaksi pozolanik membutuhkan waktu lebih lama (Chahal dkk., 2012), sehingga perlu dilakukan pemadatan lebih baik pada hasil produk artifisial agregat dengan FA. Salah satunya adalah dengan penambahan mikroba untuk mengisi rongga mikro dengan pengendapan *Calcium Carbonate* (CaCO_3). Pengendapan mineral ini dihasilkan oleh mikroba yang memproduksi enzim urease bereaksi dengan air untuk melakukan proses pengendapan di dalam pori-pori matriks dan membuat matriks beton semakin padat (Chahal dkk., 2012; Purnama, 2020; Rahmadina, 2020; Wulandari dkk., 2018). Diketahui bahwa mikroba dapat bertahan hidup pada lingkungan kering tanpa makanan hingga 50 tahun lebih, sehingga membuat material AB dan beton semakin berkelanjutan/*sustainable* (Jonkers, 2011). Kelemahan mikroba ini hanya di ketahanannya terhadap panas hidrasi yang tinggi. Hal ini bisa diantisipasi dengan aplikasi FA dalam beton untuk menurunkan panas hidrasi (Muhammad dkk., 2021; W. Wang dkk., 2017).

Pada studi ini, digunakan *mix design* beton dengan kuat tekan rencana minimal 50 MPa dan FA yang digunakan berasal dari PLTU Paiton 5-6. Kebutuhan kuat tekan rencana mengikuti persyaratan kuat tekan rata-rata produk beton (infrastruktur) PT.Wijaya Karya Beton, Pasuruan (WIK) Diharapkan hasil ini dapat menjadi acuan pemanfaatan mikroba dalam beton dan agregat kasar buatan untuk meningkatkan kuat tarik produk beton di skala industri. Secara tidak langsung, studi ini telah mendukung upaya pemanfaatan FA di Indonesia

dan meminimalisir penggunaan agregat kasar alami. Selain itu, studi ini merupakan upaya awal untuk memanfaatkan agregat kasar buatan lokal menjadi *self healing agent* pada retak beton (Jonkers, 2011).

Karakterisasi Bahan Agregat Buatan

Pengujian karakterisasi material binder yang dilakukan pada studi ini meliputi uji berat jenis sesuai ASTM C188, *X-Ray Flourence* (XRF) dan uji lolos saringan 45 µm sesuai ASTM C618-19, 2019. Pada studi ini, material FA Paiton digunakan sebagai substitusi material binder. Hasil uji komposisi kimia, berat jenis dan uji kehalusan dari material *Ordinary Portland Cement* (OPC) dan FA dirangkum pada Tabel 1. FA yang digunakan dalam studi ini masuk dalam kelas C berdasarkan ASTM C618-19, 2019. Hasil pengujian berat jenis menunjukkan bahwa berat jenis FA lebih rendah daripada semen OPC. Pada SNI dan ASTM tidak dijelaskan syarat maksimal dan minimal berat jenis material binder yang dapat digunakan dalam campuran beton. Sutar dkk., (2021) menjelaskan bahwa berat jenis semen OPC berkisar 3,1-3,16 gram/cm³ dan pada studi Rahmadina, (2020) didapatkan berat jenis semen OPC sebesar 3,16 gram/cm³. Pengujian kehalusan ditujukan untuk melihat distribusi partikel yang lolos saringan no.325 atau 45 µm. Pada SNI 15-3500-2004, maksimal persentase tertahan semen ialah 24% dan lolos 76%, sedangkan pada ASTM C618-19, maksimal persentase tertahan pozolan 34% dan lolos 66%. Dapat disimpulkan bahwa semen OPC lolos uji kehalusan semen dan material FA lolos uji kehalusan material pozolan.

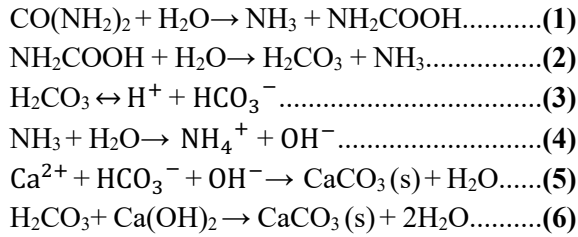
Tabel 1. Rekapitulasi Pengujian Binder

Senyawa (%)	OPC	FA
SiO ₂	19,19	39,97
Al ₂ O ₃	5,42	13,41
Fe ₂ O ₃	3,11	14,35
CaO	63,08	18,13
MgO	1,77	7,91
Na ₂ O	0,22	2,22
K ₂ O	0,57	1,15
TiO ₂	-	0,66
MnO ₂	-	0,17
Cr ₂ O ₃	-	0,01
P ₂ O ₅	-	0,19
SO ₃	1,54	1,43
C ₃ S	59,23	-

C ₃ A	9,13	-
C ₄ AF	9,44	-
C ₂ S	10,43	-
LOI	5,94	0,4
Berat Jenis (gr/cm ³)	3,10	2,86
Lolos 45 µm (%)	98,2	91,3
Tertahan 45 µm (%)	1,8	8,8

Agregat Kasar Buatan (AB)

Metode pembuatan AB dalam studi ini menggunakan substitusi *High Volume Fly Ash* (HVFA) terhadap *Ordinary Portland Cement* (OPC) sebesar 50% dengan perbandingan OPC dan FA ialah 1:1. FA yang digunakan berasal dari PLTU Paiton 5-6. Penambahan mikroba penghasil enzim urease diberikan dengan rentang 400–6.000 ml/m³ dengan tujuan memperbaiki sifat mekanik dan *properties* binder pasta. Mikroba yang digunakan adalah konsorsium bakteri penghasil enzim urease dan jamur *R. oligosporus*. Mikroba utama yang dominan adalah *Bacillus subtilis*. Tujuan utama pemanfaatan mikroba ialah untuk mengisi pori-pori pada binder AB dengan presipitasi *Calcium Carbonate* agar lebih padat (Chahal dkk., 2012; Purnama, 2020; Rahmadina, 2020; Wulandari dkk., 2018). Proses presipitasi *Calcium Carbonate* di dalam matriks beton dimulai ketika mikroba menghasilkan enzim urease yang jika bertemu dengan air menghasilkan asam karbonat dan amonia seperti pada Persamaan (1). Pertemuan antara senyawa amonia dengan air membentuk senyawa amonium dan ion OH⁻ seperti pada Persamaan (4). Bikarbonat didapatkan dari pemecahan senyawa asam karbonat seperti Persamaan (3). Reaksi selanjutnya ialah pertemuan antara bikarbonat dengan ion Ca²⁺ yang terlarut pada pasta membentuk senyawa CaCO₃ seperti pada Persamaan (5). Pengendapan juga dapat terjadi ketika asam karbonat bereaksi dengan *Portlandite* seperti pada Persamaan (6) (Gat dkk., 2014). *Portlandite* merupakan produk sampingan dari reaksi hidrasi semen (Saleh dan Eskander, 2020). *Mix design* pasta pada studi ini untuk AB dapat dilihat pada Tabel 2. PCC adalah *Portland Cement Composite* yang digunakan untuk pembuatan agregat maupun dalam campuran beton.



Tabel 2. *Mix Design* Agregat Kasar Buatan (AB)

Material	Kebutuhan untuk 1 m ³
PCC	840 kg
FA	840 kg
Air	504 kg
Mikroba	400 – 6000 ml
Rasio Air Binder	0,30

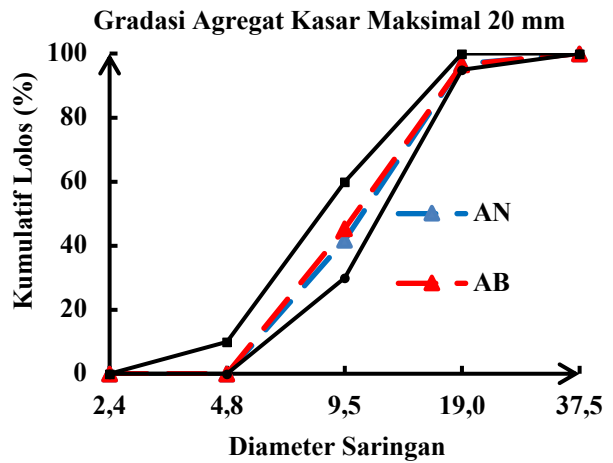
Urutan pencampuran pasta ialah dengan mencampurkan binder dengan air sampai merata. Setelah campuran homogen, maka mikroba dimasukkan di akhir pengadukan dan dicetak berbentuk setengah bola. Pasta dirawat dengan sistem *moist curing*. Setelah berumur minimal 28 hari, dilakukan proses *crushing* dan diayak sesuai kebutuhan ukuran agregat kasar rencana. Pada studi ini digunakan maksimal agregat kasar lolos saringan 19,5 mm. Contoh AB dapat dilihat pada Gambar 1. Tujuan utama proses *crushing* pada AB ialah agar didapatkan permukaan kasar seperti permukaan AN di lapangan dan diharapkan permukaan kasar tersebut memiliki *interlock* yang hampir serupa seperti AN.



Gambar 1. Agregat Kasar Buatan (AB)

Karakterisasi Agregat

Pengujian karakterisasi agregat kasar dilakukan sesuai prosedur ASTM dan SNI. AN dan agregat halus yang digunakan berasal dari Pasuruan. Agregat halus dalam campuran beton adalah pasir alam dengan berat jenis 2,71 gr/cm³. Dalam hal ini tidak ada penggantian agregat halus dengan AB. Pengujian Gradasi AN dan AB disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Gradasi AN dan AB

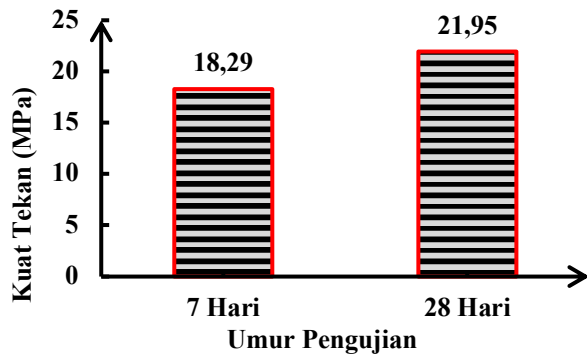
Pada Gambar 2 terlihat bahwa AN dan AB yang digunakan dalam campuran beton masuk dalam spesifikasi agregat kasar maksimal 20 mm sesuai SNI 03-2834, 2002, sehingga dapat disimpulkan bahwa AN dan AB layak digunakan dalam campuran beton. Rekapitulasi hasil pengujian AN dan AB dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Pengujian AN dan AB

Pengujian	Agregat Kasar		Metode Pengujian
	AN	AB	
Gradasi Agregat Kasar max.20 mm	Terpenuhi	Terpenuhi	SNI 03-2834
<i>Fine modulus</i>	6,61	6,58	ASTM C33
Kadar air (%)	1,17	13,85	SNI 1971
Berat jenis (gr/cm ³)	2,7	2,09	ASTM C127
Penyerapan (%)	1,25	16,87	ASTM C127
Berat volume (gr/cm ³)	1,40	0,97	ASTM C29
Keausan (%)	9,53	35	ASTM C131

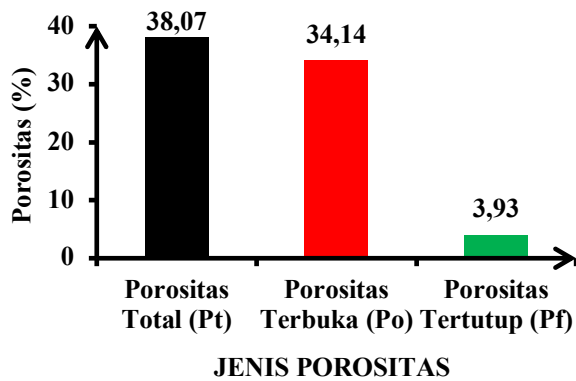
Pada Tabel 3 terlihat bahwa berat jenis AB 1,29 kali lebih kecil dan nilai penyerapan 13,49 kali lebih besar dari nilai AN. Diketahui bahwa penambahan mikroba menyebabkan penurunan resapan AB. Penurunan penyerapan terjadi karena di dalam matriks beton, mikroba melakukan presipitasi kalsium karbonat, sehingga pori pada AB berkurang (Chahal dkk., 2012; Purnama, 2020; Rahmadina, 2020; Wulandari dkk., 2018). Substitusi AB di dalam campuran beton direncanakan 50% dan 100% terhadap volume kebutuhan AN dalam beton. Hal ini ditujukan untuk mengoptimalkan pemanfaatan FA sebanyak mungkin. Pengujian

lanjutan yang dilakukan meliputi kuat tekan dan porositas. Hasil pengujian kuat tekan AB di umur 28 hari untuk studi ini dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Hasil Kuat Tekan AB

Pada Gambar 3 terlihat bahwa hasil pengujian kuat tekan AB di umur 7 hari sebesar 18,29 MPa dan di umur 28 hari sebesar 21,95 MPa. Di dalam ASTM C330 syarat minimal kuat tekan agregat kasar ringan untuk struktur beton sebesar 17 MPa, sehingga dapat disimpulkan bahwa AB pada studi ini layak digunakan sebagai campuran beton. Hasil pengujian porositas AB di umur 28 hari dapat dilihat pada Gambar 4 .



Gambar 4. Grafik Hasil Pengujian Porositas AB

Pada Gambar 4 terlihat bahwa porositas total studi ini sebesar 38,07%, porositas terbuka sebesar 31,14% dan porositas tertutup sebesar 3,93%. Semakin banyak pori-pori di dalam pasta, maka semakin kecil kuat tekannya (Ekaputri dan Triwulan, 2013; Wulandari dkk., 2018). Menurut Ekaputri dkk (2013) porositas total ialah penjumlahan dari porositas terbuka

dan tertutup. Porositas terbuka ialah pori-pori yang dimiliki binder yang bersifat permeabel yang dapat ditembus partikel air dan udara, sedangkan porositas tertutup ialah pori-pori yang bersifat impermeabel yang tidak ditembus oleh partikel air dan udara. Meskipun demikian, dimungkinkan sebagian pori terbuka terkonversi menjadi pori tertutup akibat pengendapan mineral karena metabolisme bakteri. Di umur yang lebih lama, proses pengendapan ini bisa terjadi terus menerus dan memadatkan beton, selama bakteri masih beraktifitas.

Mix Design Beton

Target rencana kuat tekan yang digunakan dalam studi ini minimal 50 MPa dengan menggunakan metode ACI 211.4R, 2008. Dalam ACI 363-11, 2011 klasifikasi kuat tekan 50 MPa termasuk dalam kategori beton mutu normal. Substitusi material FA di dalam campuran beton disarankan sebesar 15-25% untuk FA kelas F dan 15-35% untuk kelas C (ACI 211.1-91, 2002). Dari studi Bharati dkk (2017) didapatkan kesimpulan bahwa substitusi FA terhadap binder beton paling optimal dari rentang 0–20% ialah substitusi sebesar 15%, sehingga pada studi ini digunakan substitusi material FA sebesar 15% terhadap semen OPC. Digunakan satu variasi kontrol yang terdiri dari 100% AN yang diaplikasikan pada campuran beton (AN100). Variasi kedua adalah pemanfaatan AB sebesar 100% menggantikan AN (AB100). Variasi ketiga adalah komposisi AB sama banyak dengan AN (AB50). Ketiga variasi ini kemudian diberi mikroba dalam campuran beton segarnya dan dibandingkan dengan yang tanpa mikroba. Kode M digunakan untuk variasi yang menggunakan penambahan mikroba di dalam campuran beton. Variasi beton ditampilkan pada Tabel 4, sedangkan komposisi material beton per 1 m³ dapat dilihat pada Tabel 5. Spesimen yang digunakan adalah silinder dengan diameter 10 cm dengan tinggi 20 cm.

Tabel 4. Modifikasi Komposisi *Mix Design* Beton

Komposisi <i>Mix Design</i>	AN100	AB100	AB50	Total
Original	10 Buah	10 Buah	10 Buah	
Original+ Mikroba (M)	10 Buah	10 Buah	10 Buah	60

Tabel 5. *Mix Design* Beton f'c 50 MPa per m³

Material	BJ (kg/m ³)	AN100 (Kontrol)	AB100	AB50	AN100M	AB 100M	AB50M
PCC (kg)	3070	400,0	400,0	400,0	400,0	400,0	400,0
FA (kg)	2400	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0
Pasir (kg)	2720	827,0	827,0	827,0	827,0	827,0	827,0
Agregat Alam (kg)	2740	1075	0,00	538,0	1075,0	0,0	538,0
Agregat Buatan (kg)	2090	0,00	820,0	410,0	0,00	820,0	410,0
Superplasticizer (l)	1050	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5,0
Air (l)	1000	139,0	139,0	139,0	134,0	134,0	134,0
Mikroba (ml)	1056	0,0	0,0	0,0	400-6000	400-6000	400-6000
Rasio Air sementius	-	0,296	0,296	0,296	0,285	0,285	0,285
Slump (cm)	-	19,00	19,30	19,20	18,00	17,00	18,00

Pada Tabel 5 didapatkan bahwa hasil slump beton segar mengandung mikroba tidak terlalu signifikan. Akan tetapi, penggunaan mikroba menyebabkan penggunaan air berkurang. Hal ini disebabkan mikroba menghasilkan gas CO² yang menyebabkan adanya gelembung udara berukuran mikro yang sedikit meningkatkan workabilitas pada beton segar. Faktor yang paling berpengaruh terhadap penurunan slump ialah penggunaan AB. Variasi yang menggunakan AB cenderung memiliki nilai slump lebih kecil daripada menggunakan AN. Hal ini terjadi karena penyerapan AB lebih besar daripada penyerapan AN (Purnama, 2020; Rahmadina, 2020). Pada studi Purnama, (2020) dan Rahmadina, (2020) diketahui bahwa penambahan mikroba memberikan penurunan nilai slump sebesar 1 cm, sedangkan pemanfaatan AB juga memberikan penurunan nilai slump 1 cm, sehingga dapat disimpulkan bahwa penurunan nilai tersebut sejalan dengan studi ini. Setelah pengujian slump dilakukan, maka proses selanjutnya ialah *casting* benda uji silinder berukuran Ø10 cm x 20 cm. Cetakan benda uji dilepas setelah beton mengeras dan dirawat dengan metode *moist* menggunakan penutup kain yang basah. Kondisi *moist* merupakan kondisi perawatan paling optimal daripada terendam di dalam air (Akinwumi dan Gbadamosi, 2014; Naderi dkk., 2002).

Pengujian di Laboratorium

Setelah beton mencapai umur pengujian, dilakukan proses pemindahan dari tempat *curing* satu hari sebelum pengujian dengan tujuan menghilangkan kelebihan kelembaban di dalam

beton yang bisa mempengaruhi tekanan internal dalam beton pada saat pengujian. Pengujian mekanik yang dilakukan di Laboratorium Beton, Material Maju dan Komputasi Mekanik, ITS, meliputi uji kuat tekan dan uji kuat belah. Pengujian lain adalah analisa *Scanning Elektron Microscope* (SEM) pada AB dan analisa jumlah koloni bakteri pada AB sebelum dan sesudah digunakan di dalam beton. Pengujian SEM dilakukan di Pusat Riset Teknologi Mineral - BRIN, Lampung, sedangkan pengukuran koloni bakteri dilakukan di Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan, ITS, Surabaya.

Kuat tekan beton didefinisikan sebagai besaran beban aksial yang dapat diterima benda uji hingga mengalami kegagalan/hancur dengan dibagi luasan. Pengujian kuat tekan didapatkan dengan mengikuti ASTM C39, (2010). Persamaan nilai kuat tekan seperti pada Persamaan (7). Dimensi benda uji yang digunakan dalam pengujian kuat tekan ialah silinder dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm.

$$f'c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (7)$$

Keterangan:

- f'c = Kuat Tekan (MPa)
- P = Beban Aksial Maksimum (kN)
- A = Luas Penampang (mm²)

Kuat tarik belah merupakan parameter penting yang berhubungan dengan kemampuan tarik beton. Pengujian ini dipilih karena kemudahan pelaksanaannya di laboratorium dengan menggunakan alat dan fasilitas yang ada. Nilai kuat tarik beton diperoleh melalui pengujian

tekan dengan pembebanan secara lateral hingga benda uji hancur terbelah menjadi dua bagian. Pada makalah ini, pengujian kuat tarik belah beton mengikuti ASTM C 496-96. Perumusan nilai kuat tarik belah beton dirumuskan seperti pada Persamaan (8). Dimensi benda uji yang digunakan dalam pengujian kuat tarik belah ialah silinder dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm.

$$T = \frac{2P}{\pi ld} \dots \dots \dots (8)$$

Keterangan:

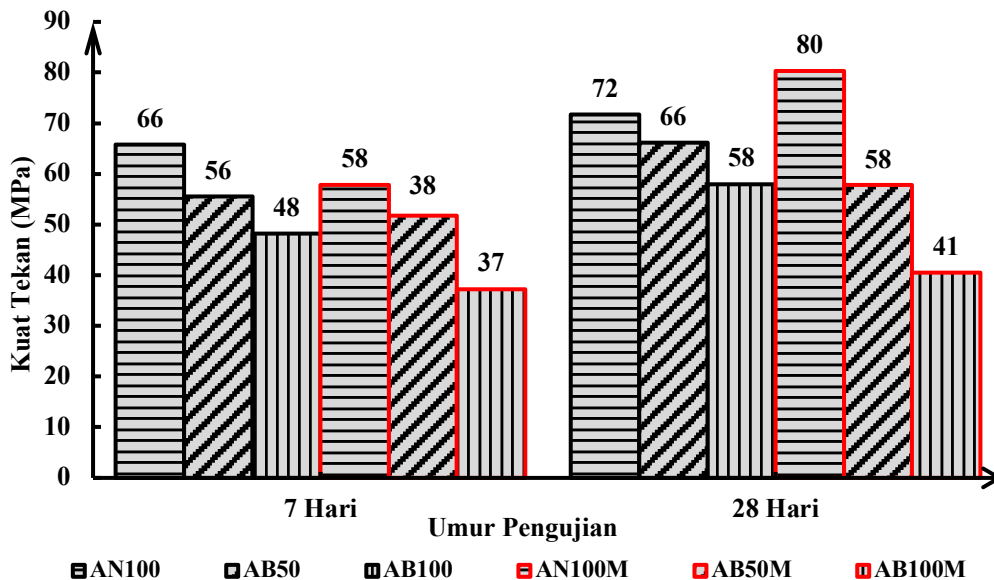
- T = Kuat Tarik Belah (MPa)
- P = Beban Aksial Maksimum (kN)
- l = Panjang Benda Uji (mm)
- d = Diameter Benda Uji (mm)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisa pengujian kuat tekan dan uji kuat tarik belah dilakukan dalam skala laboratorium. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7 dan 28 hari dengan menggunakan 4 silinder di setiap pengujian, sedangkan pengujian kuat tarik belah dilakukan pada umur 28 hari dengan menggunakan 2 silinder.

Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan beton untuk setiap variasi dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Rekapitulasi Pengujian Kuat Tekan Beton

Pada Gambar 5 terlihat bahwa kuat tekan seluruh variasi kecuali AB100M telah melebihi kuat tekan rencana sebesar 50 MPa di umur 28 hari. Hal ini terjadi karena mikrostruktur dan kekerasan material AB tidak sebaik AN. Dapat disimpulkan bahwa semakin banyak substitusi AB, maka semakin besar penurunan kuat tekan yang didapatkan. Pada penelitian Kockal dkk, (2011) didapatkan hasil penurunan kuat tekan beton sebesar 20,6 MPa dengan menggunakan 100% AB terbuat dari Fly Ash terhadap beton normal. Penurunan terjadi karena AB memiliki pori-pori yang lebih tinggi, kekuatan yang lebih rendah, resapan AB lebih besar dan berat jenis lebih rendah daripada AN (Abdullah dkk., 2015; Kockal dan Ozturan, 2011; Purnama, 2020; Rahmadina, 2020). Hal ini tidak bisa digantikan

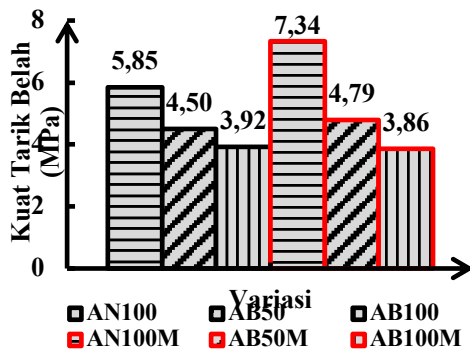
oleh peran bakteri yang mampu mengisi pori-pori agregat buatan.

Penambahan mikroba secara signifikan tidak memberikan efek positif terhadap kuat tekan pada variasi beton dengan AB. Pada variasi AB100M didapatkan penurunan kuat tekan sebesar 17 MPa, sedangkan variasi AB50M didapatkan penurununan kuat tekan sebesar 8 MPa. Akan tetapi, penambahan mikroba pada AN100M memberikan efek peningkatan kuat tekan paling tinggi dari semua variasi sebesar 12% terhadap variasi kontrol (AN100). Peningkatan terjadi karena mikroba penghasil enzim urease melakukan proses pengendapan CaCO₃ di dalam pori-pori beton, sehingga membuat beton semakin padat (Chahal dkk.,

2012) yang berbanding lurus dengan meningkatnya berat volume benda uji sebesar 36–214 kg/m³. Peningkatan kuat tekan sebesar 13,5% didapatkan oleh Muhammad dkk., (2021) dengan aplikasi FA sebesar 20% menggantikan semen pada beton AN 100% yang mengandung mikroba. Dari hasil pengujian kuat tekan didapatkan kesimpulan bahwa penambahan mikroba paling optimal ditambahkan pada variasi yang menggunakan 100% AN.

Kuat Tarik Belah Beton

Rekapitulasi hasil pengujian kuat tarik belah beton dapat dilihat pada Gambar 6.

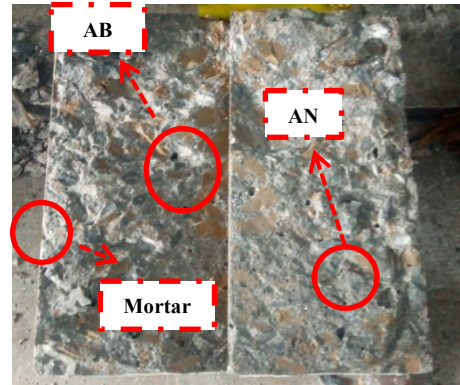


Gambar 6. Grafik Pengujian Kuat Tarik Belah

Pada Gambar 6 terlihat bahwa kuat tarik belah terendah didapatkan oleh variasi AB100M dengan penurunan sebesar 34% dari variasi kontrol (AN100), sedangkan kuat tarik belah tertinggi diperoleh variasi AN100M dengan peningkatan sebesar 26% dari variasi kontrol (AN100). Dapat disimpulkan bahwa semakin banyak substitusi AB, maka semakin besar penurunan kuat tarik belah yang didapatkan. Efek penambahan mikroba pada AB memberikan kontribusi peningkatan kuat tarik belah pada beton. Penambahan mikroba pada beton dalam studi ini terlihat tidak memberikan efek positif terhadap variasi AB100M dengan penurunan kuat tarik belah sebesar 29%. Disisi lain, penambahan mikroba pada campuran beton AN100M dan AB50M memberikan efek peningkatan kuat tarik belah. Peningkatan paling besar terjadi pada variasi AN100M sebesar 26%, sedangkan pada variasi AB50M memberikan peningkatan sebesar 6,4%. Studi yang dilakukan Muhammad dkk., (2021) menunjukkan kenaikan kuat tarik belah sebesar 12% pada beton AN 100% dengan substitusi FA 20% menggantikan semen yang mengandung mikroba. Dari hasil pengujian kuat tarik belah didapatkan

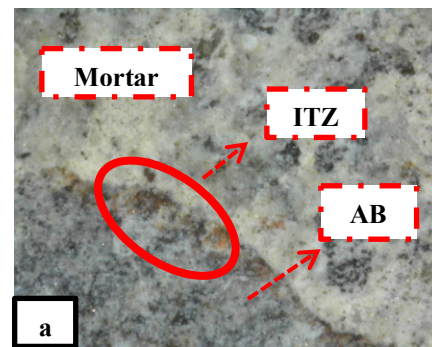
kesimpulan bahwa penambahan mikroba paling optimal adalah pada variasi AN100M dan AB50M.

Contoh distribusi AB di dalam campuran beton dapat dilihat pada hasil pengujian kuat tarik belah di Gambar 7 dan terlihat *interlock* antar AB dan AN.

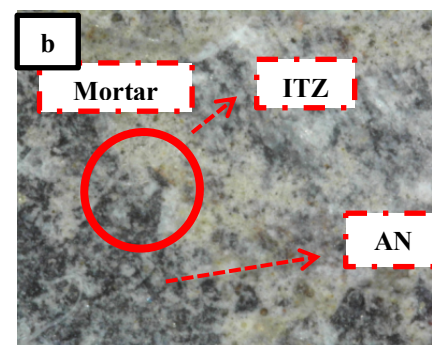


Gambar 7. Distribusi AB di dalam Matriks Beton

Terlihat distribusi AB merata di dalam campuran beton. Dari distribusi AB dan AN di dalam beton, lekatan antara AB dengan mortar di daerah *Interface Transition Zone* (ITZ) dapat diamati dengan menggunakan kamera pembesaran 250 x seperti pada Gambar 8 dan 9.



Gambar 8. ITZ pada AB



Gambar 9. ITZ pada AN

Dihasilkan lekatan AB (Gambar 8) menyerupai lekatan AN (Gambar 9). Hal ini terjadi karena

bentuk permukaan material AB sengaja dibentuk menyerupai AN. Meskipun demikian maksimum aplikasi AB pada beton yang disarankan pada studi ini adalah 50% menggantikan volume AN.

Hubungan Kuat Tarik Belah dan Kuat Tekan Beton

Persamaan umum untuk mendapatkan prediksi hasil kuat tarik belah beton pada umur 28 hari didapatkan dengan menggunakan Persamaan (9) pada ACI 318-14. Umumnya kuat tarik belah beton berkisar 10% dari kuat tekannya. Grafik korelasi perbandingan kuat tarik belah pengujian dan prediksi dapat dilihat pada Gambar 9.

$$f_{ct} = k\sqrt{f'c} \dots\dots\dots (9)$$

$$k = \frac{f_{ct}}{\sqrt{f'c}} \dots\dots\dots (10)$$

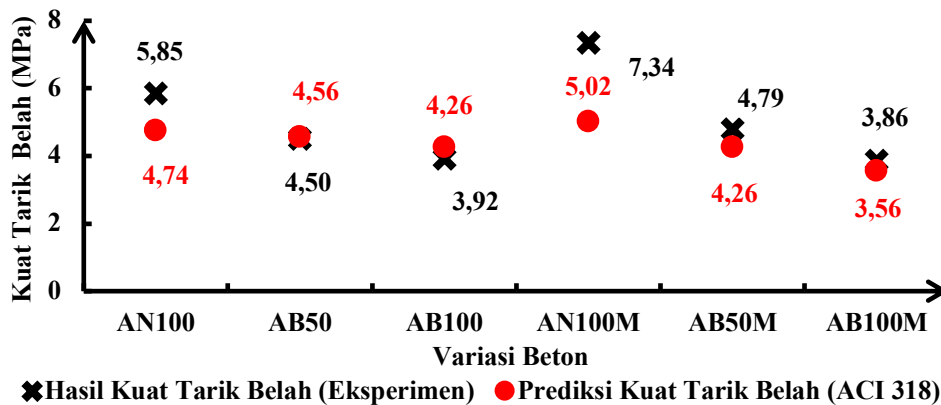
Keterangan:

- f'c = Kuat Tekan (MPa)
- fct = Kuat Tarik Belah (MPa)
- k = Koefisien (0,56)

Pada Gambar 10 terlihat bahwa variasi AN100, AN100M, AB50M dan AB100M memiliki nilai kuat tarik belah melebihi prediksi, sedangkan variasi AB50 dan AB100 memiliki nilai kuat tarik belah dibawah prediksi. Hasil nilai rasio $f_{ct}/f'c$ beton dengan menggunakan AB tanpa penambahan mikroba mengalami penurunan sebesar 1,4%, sedangkan nilai rasio $f_{ct}/f'c$ pada variasi dengan menggunakan penambahan mikroba pada AN dan AB mengalami kenaikan sebesar 0,13–1,35%.

Hasil tersebut sejalan dengan perhitungan nilai koefisien (k) dengan menggunakan Persamaan 10.

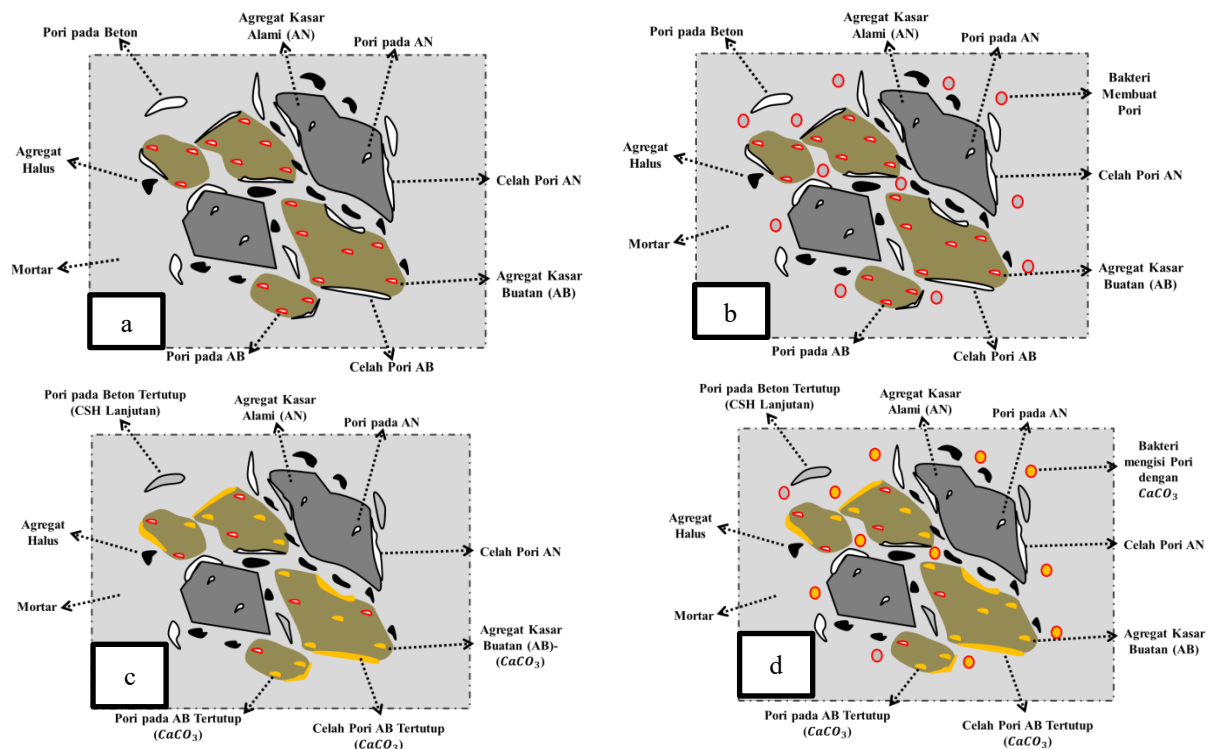
Didapatkan nilai koefisien dengan menggunakan AB tanpa penambahan mikroba mengalami penurunan sebesar 0,01–0,05, sedangkan nilai koefisien variasi dengan penambahan mikroba mengalami peningkatan sebesar 0,05–0,26 terhadap koefisien kontrol (0,56).



Gambar 10. Grafik Perbandingan Hasil Kuat Tarik Belah dan Prediksi

Peningkatan dan penurunan nilai koefisien pada beton sangat mempengaruhi nilai prediksi kuat tarik belah sesuai Persamaan 9. Didapatkan hasil bahwa kuat tarik belah beton dengan menggunakan AB tanpa penambahan mikroba menghasilkan nilai di bawah prediksi kuat tarik belah beton, sedangkan variasi dengan menggunakan penambahan mikroba menghasilkan nilai di atas prediksi kuat tarik belah beton. Secara garis besar peningkatan koefisien kuat tarik belah menunjukkan bahwa penambahan mikroba dapat memperkuat ikatan

antar matriks beton (Chahal dkk., 2012; Jonkers, 2011; Rahmadina, 2020). Hal ini terjadi karena mikroba penghasil urease melakukan proses pengendapan $CaCO_3$ pada pori-pori beton dan silika pada material FA bersama $Ca(OH)_2$ terlibat dalam reaksi pozolanik yang menghasilkan *Calcium Silicate Hydrate* lanjutan, sehingga pori-pori beton semakin padat dan ikatan antara agregat semakin kuat (Brown, 1999; Chahal dkk., 2012; Sargent, 2015). Mekanisma pengisian pori-pori di dalam campuran beton diilustrasikan di Gambar 11.



Gambar 11. Model Sebaran Pori di dalam Beton a). Pori-pori di dalam Beton tanpa Penambahan Mikroba , b). Proses Pembentukan $CaCO_3$ dan CSH lanjutan di dalam Beton tanpa Penambahan Mikroba, c). Pori-pori di dalam beton dengan penambahan Mikroba, dan d). Proses Pembentukan $CaCO_3$ dan CSH lanjutan di dalam Beton dengan Penambahan Mikroba

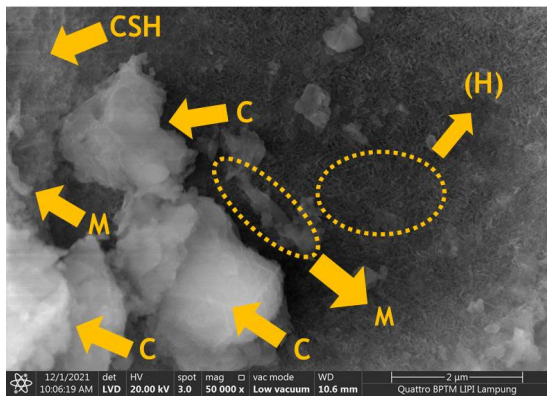
Pada Gambar 11 a, matriks beton mengandung pori tertutup maupun terbuka. Selain di dalam beton, AB yang ditambahkan ke dalam campuran beton memiliki pori-pori yang lebih besar daripada AN. Akan tetapi, pori-pori di dalam AB dapat tertutup karena pengendapan $CaCO_3$ seperti pada studi Chahal dkk (Chahal dkk., 2012) dan Rahmadina (Rahmadina, 2020) dari hasil uji SEM. Mikroba sengaja ditanam di dalam AB dengan tujuan menutupi pori-pori. Selain itu, penutupan pori-pori di dalam beton terjadi karena reaksi pozolanik dengan bantuan material FA di dalamnya (Brown, 1999; Sargent, 2015) seperti pada Gambar 11 b. Penambahan mikroba di dalam campuran beton memberikan efek penambahan sedikit ruang pori yang ditempati oleh mikroba seperti pada Gambar 11 c. Studi terdahulu menunjukkan bahwa penambahan mikroba memberikan efek positif terhadap beton dengan cara mengendapkan $CaCO_3$ pada pori-pori beton (Özbay dkk., 2016; Samani dkk., 2018; Seifan dkk., 2016) seperti pada Gambar 11 d, sehingga membuat pori terbuka bertransformasi menjadi pori tertutup. Mekanisme ini membuat beton menjadi padat dan menambah kekuatan mekanik.

Hasil Pengujian SEM pada AB

Pada Gambar 12 terlihat bahwa mineral yang terkandung di dalam AB adalah Kalsium karbonat (C), *Calcium Silicate Hydrate* (CSH), mikroba (M), dan kapang hasil metabolisme jamur (*Hyphae*, H). Mineral $CaCO_3$ terbentuk dari proses presipitasi mikroba dan proses karbonasi (Shih dkk., 1999; Gat dkk., 2014; Seifan dkk., 2016). Bentuk visual mineral kalsium karbonat menyerupai gumpalan yang melekat pada permukaan retak dan terlihat tidak lebih keras daripada CSH (Wang, ., 2014; Alghamri ., 2016; dan dkk., 2019). Mineral *Calcium Silicate Hydrate* (C-S-H) terbentuk dari proses hidrasi semen (Saleh dan Eskander, 2020) dan reaksi pozolanik (Brown, 1999; Sargent, 2015). Bentuk visual mineral C-S-H menyerupai permukaan batuan padat dan terlihat keras (Alghamri dkk., 2016; dan Vijay dkk., 2017). Secara visual mikroba yang digunakan dalam studi ini menyerupai *Bacillus Subtilis* (Seifan dkk., 2016). Bakteri *B. subtilis* ditemukan pada studi ini, melakukan simbiosis dengan baik bersama kapang dari jamur *R. oligosporus* yang berbentuk seperti serat mikro. Hal ini sejalan dengan studi

terdahulu yang dilakukan pada pasta geopolimer yang mengandung fly ash 100% (Wulandari dkk., 2018). Serat ini juga mengeras karena dilingkupi oleh pengendapan CaCO_3 dalam AB sehingga diprediksi secara mikrostruktur berkontribusi pada meningkatnya kemampuan tarik pada beton.

Hasil analisa SEM ini menegaskan perubahan sifat dan morfologi permukaan AB dengan penambahan *B. subtilis* dan jamur *R. oligosporus*. Hasil yang disajikan ini sangat dimungkinkan merupakan awal dari aktivitas *self-healing* pada beton, yang akan sangat menarik untuk dianalisa lebih lanjut.



Gambar 12. Hasil SEM *Artificial Aggregate* dengan Pembesaran, 50.000x

Hasil Pengukuran Jumlah Koloni Bakteri pada AB

Jumlah mikroba yang dimasukkan pada saat awal pembuatan AB adalah 2500×10^5 CFU/mL. Kemudian dilakukan konversi ke dalam satuan gram untuk membandingkan nilai perkembangbiakan mikroba setelah dicampurkan ke dalam campuran AB. Didapatkan jumlah koloni awal dalam bentuk cairan sebesar $5,981 \times 10^5$ CFU/gram. Dalam waktu sekitar 200 hari setelah AB diaplikasikan pada beton, proses perhitungan dilakukan kembali pada spesimen AB. Didapatkan hasil bahwa koloni bakteri berkembang biak lebih dari 390 kali lipat dengan jumlah sebesar 2338×10^5 CFU/gram. Hal ini membuktikan bahwa *B. subtilis* masih hidup dan berkembang biak dalam pori agregat buatan.

Kombinasi kinerja mikroba dengan pozolan dalam studi ini menghasilkan sebuah fenomena yang menarik. Kelanjutan dari studi ini adalah

potensi untuk menghasilkan teknik *autohealing* dan *autonomous* agar retak mikro pada beton bisa sembuh dengan sendirinya. AB yang sifat mekaniknya lebih rendah daripada AN memungkinkan retak terjadi dan memecah agregat buatan yang mengandung mikroba dan pozolan ini. Hal ini memungkinkan udara masuk ke celah retak dan mengaktifasi mikroba yang bersifat aerob seperti pada studi ini. Adanya mekanisme pengendapan CaCO_3 menunjukkan potensi penutupan retak pada celah beton.

KESIMPULAN

Kesimpulan hasil studi ini diuraikan sebagai berikut:

1. Agregat kasar buatan memiliki sifat penyerapan yang lebih besar dan berat jenis yang lebih kecil daripada agregat kasar alami. Hal ini menyebabkan semakin banyak pemanfaatan agregat kasar buatan terhadap *mix design* beton, maka kekuatan yang didapatkan semakin menurun.
2. Potensi pemanfaatan agregat kasar buatan di lapangan disarankan maksimal 50% terhadap kebutuhan agregat kasar alami di dalam campuran beton.
3. Penggunaan mikroba aerob penghasil enzim urease direkomendasikan untuk ditambahkan ke dalam campuran beton yang menggunakan 100% agregat kasar alami maupun yang mengandung 50% agregat kasar buatan.
4. Penambahan mikroba secara umum terbukti memberikan peningkatan hasil kuat tarik belah yang lebih tinggi daripada perumusan kuat tarik belah ACI 318-14.
5. Mikroba yang dimasukkan ke dalam agregat AB terbukti menghasilkan serat mikro hasil kerja jamur yang mengeras bersamaan dengan adanya pengendapan CaCO_3 dalam beton. Hal ini memungkinkan kontribusi serat mikro dari mikroba yang meningkatkan kuat tarik beton berbahan mikroba.
6. Bakteri masih dapat hidup dan bertambah populasinya di dalam pori-pori beton yang berkontribusi pada meningkatnya kepadatan beton.

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah, A., Ku Yin, K. A. R., M., Hussin, K., & Tran, M. Van. (2015). Comparison of Mechanical Properties of Fly Ash Artificial

- Geopolymer Aggregates with Natural Aggregate. *Applied Mechanics and Materials*, 754–755, 290–295. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/am.m.754-755.290>
- ACI 211.1-91. (2002). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. In *Neftyanoe khozyaysivo - Oil Industry*.
- ACI 211.4R. (2008). Guide for Selecting Proportions for High-strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials. In *ACI Committee 211*.
- ACI 232.2R-96. (2002). Use of Fly Ash in Concrete. *American Concrete Institute*, 96(Reapproved), 1–34.
- ACI 318-14. (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete. In *American Concrete Institute*.
- ACI 363-11. (2011). Guide to Quality Control and Assurance of High-Strength Concrete (ACI 363.2R-11). In *American Concrete Institute*.
- Akinwumi, I. I., & Gbadamosi, Z. O. (2014). Effects of Curing Condition and Curing Period on the Compressive Strength Development of Plain Concrete. *International Journal of Civil and Environmental Research (IJCER)*, 1(2), 83–99. <https://www.researchgate.net/publication/264276085>
- Alghamri, R., Kanellopoulos, A., & Al-Tabbaa, A. (2016). Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 910–921. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.143>
- ASTM C 496-96. (1996). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. In *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C188. (2009). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. In *ASTM International*.
- ASTM C330. (2009). Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. *ASTM International*, 552(18), 4. <https://doi.org/10.1520/C0330>
- ASTM C39. (2010). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *Annual Book of ASTM Standards*, 04(C), 1–7.
- ASTM C618-19. (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use. *Annual Book of ASTM Standards*, C, 3–6. <https://doi.org/10.1520/C0618-19.2>
- Bharati, P. K., & Kumar, S. (2017). Effect of Flyash on the Properties of Concrete and Construction Materials. *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS)*, VI(Iv), 59–72.
- Brown, P. W. (1999). Hydration behavior of calcium phosphates is analogous to hydration behavior of calcium silicates. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1167–1171. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00051-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00051-4)
- Chahal, N., Siddique, R., & Rajor, A. (2012). Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), 351–356. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.042>
- Chen, H. J., Shih, N. H., Wu, C. H., & Lin, S. K. (2019). Effects of the loss on ignition of fly ash on the properties of high-volume fly ash concrete. *Sustainability (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/su11092704>
- Chindasiriphan, P., Yokota, H., & Pimpakan, P. (2020). Effect of fly ash and superabsorbent polymer on concrete self-healing ability. *Construction and Building Materials*, 233, 116975. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.11.6975>
- Ekaputri, J. J., & Al Bari, M. S. (2021). Perbandingan Regulasi Fly Ash sebagai Limbah B3 di Indonesai dan Beberapa Negara. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 26(2), 150–162. <https://doi.org/10.14710/mkts.v26i2.30762>
- Ekaputri, J. J., & Triwulan, T. (2013). Sodium sebagai Aktivator Fly Ash, Trass dan Lumpur Sidoarjo dalam Beton Geopolimer. *Jurnal Teknik Sipil*, 20(1), 1. <https://doi.org/10.5614/jts.2013.20.1.1>
- Gat, D., Tsesarsky, M., Shamir, D., & Ronen, Z. (2014). Accelerated microbial-induced CaCO₃ precipitation in a defined coculture of ureolytic and non-ureolytic bacteria. *Biogeosciences*, 11(10), 2561–2569. <https://doi.org/10.5194/bg-11-2561-2014>
- Irawan, R. R. (2013). *Semen Portland di Indonesia untuk Aplikasi Beton Kinerja Tinggi (Pertama)*. Kementerian Pekerjaan Umum Puslitbang Jalan dan Jembatan.
- Jonkers, H. M. (2011). Bacteria-based self-healing concrete. *HERON*, 56(1), 1–12.
- Kawuluan, J. A., Manalip, H., & Dapas, S. O. (2019). Pemeriksaan kuat tarik belah beton serat kawat bendrat dengan variasi sudut tekuk pada kedua ujungnya. *Jurnal Sipil Statik*, 7(5), 513–526.
- Kockal, N. U., & Ozturan, T. (2011). Durability of lightweight concretes with lightweight fly ash aggregates. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1430–1438. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09>

022

- Muhammad, A. R., Ekaputri, J. J., & Basoeki, M. (2021). The Effect of Microbes and Fly Ash to Improve Concrete Performance. *Journal of Advanced Civil and Environmental Engineering*, 4(2), 60. <https://doi.org/10.30659/jacee.4.2.60-69>
- Naderi, M., Sheibani, R., Shayanfar, M. A., Azad, T., & Student, P. G. (2002). Comparison of Different Curing Effects on Concrete Concrete Strength. *International Conference on Concrete & Development*, 507–516.
- Özbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. I. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties - A review. *Construction and Building Materials*, 105, 423–434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153>
- Purnama, A. C. (2020). *Penggunaan Fly Ash sebagai Agregat Buatan Pengganti Agregat Alami pada Campuran Beton* (Vol. 0, Issue March). Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Rahmadina, A. (2020). *Kombinasi Mikroba dan Pozzolan untuk Self-Healing Beton*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Riyadharshini, P. P., Anesh, G. M. O. G., & Anthi, A. S. S. (2012). A Review on Artificial Aggregates. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 05(04), 540–546.
- Roskos, C., Cross, D., Berry, M., & Stephens, J. (2011). Identification and Verification of Self-Cementing Fly Ash Binders for “ Green ” Concrete. *2011 World of Coal Ash (WOCA) Conference*. <http://www.flyash.info/>
- Sadrmomtazi, A., Tahmouresi, B., & Khoshkbiari, R. K. (2018). Effect of fly ash and silica fume on transition zone, pore structure and permeability of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 70(10), 519–532. <https://doi.org/10.1680/jmacr.16.00537>
- Saleh, H. M., & Eskander, S. B. (2020). Innovative cement-based materials for environmental protection and restoration. In *New Materials in Civil Engineering*. INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818961-0.00018-1>
- Samani, Z.-M., Mokhtari, S. P., & Raji, F. (2018). Effects of Fly Ash on Mechanical Properties of Concrete. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 8(2), 35–40. <https://doi.org/10.2478/jaes-2018-0016>
- Sargent, P. (2015). The development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation. In *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9781782422884.4.555>
- Schwantes-Cezario, N., Porto, M. F., Sandoval, G. F. B., Nogueira, G. F. N., Couto, A. F., & Toralles, B. M. (2019). Effects of *Bacillus subtilis* biocementation on the mechanical properties of mortars. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 12(1), 31–38. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000100005>
- Seifan, M., Samani, A. K., & Berenjjan, A. (2016). Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(6), 2591–2602. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7316-z>
- Shih, S. M., Ho, C. S., Song, Y. S., & Lin, J. P. (1999). Kinetics of the reaction of Ca(OH)₂ with CO₂ at low temperature. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 38(4), 1316–1322. <https://doi.org/10.1021/ie980508z>
- SNI 03-2834. (2002). Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. In *Badan Standarisasi Nasional*.
- SNI 15-3500-2004. (2004). Semen Portland Campur. *Standar Nasional Indonesia*, 11.
- Sutar, S. N., Patil, P. V., Chavan, R. V., & Maske, M. M. (2021). Study and Review of Ordinary Portland Cement. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, 1(1), 49–52.
- Vijay, K., Murmu, M., & Deo, S. V. (2017). Bacteria based self healing concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 152, 1008–1014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040>
- Wang, J. Y., Soens, H. Verstraete, W., & De Belie, N. (2014). Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement and Concrete Research*, 56, 139–152. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.009>
- Wang, W., Lu, C., Li, Y., & Li, Q. (2017). An investigation on thermal conductivity of fly ash concrete after elevated temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 148, 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.068>
- Wariyatno, N. G., & Haryanto, Y. (2013). Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Sebagai Nilai Estimasi Kekuatan Sisa pada Beton Serat Kasa Aluminium Akibat Variasi Suhu. *Dinamika Rekayasa*, 9(1), 21–28.
- Wulandari, K. D., Jaya Ekaputri, J., Triwulan, Fujiyama, C., & Setiamarga, D. H. E. (2018). Effects of microbial agents to the properties of fly ash-based paste. *MATEC Web of Conferences*, 195, 12–15. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819501012>