BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Pengujian pada Kultur Bakteri

Pengujian konsentrasi kultur *Bacillus subtilis* pada media jagung dilakukan sebanyak dua kali untuk memastikan bahwa kultur yang akan digunakan sebagai bahan substitusi sebagian air dalam batako memiliki jumlah sel yang sesuai dengan target penelitian. Pengujian kultur dilakukan menggunakan metode Angka Lempeng Total (ALT) dengan acuan standar ISO 4833-1:2013 Amd 1:2022 pada laboratorium Saraswati Indo Genetech (SIG). Hasil pengujian disajikan sebagaimana pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1 Hasil pengujian konsentrasi kultur *Bacillus subtilis*

Pengujian	Konsentrasi Bakteri (sel/mL)	Parameter
I	$1{,}3 \times 10^8$	Angka Lempeng Total (ALT)
II	$1{,}1 \times 10^8$	Angka Lempeng Total (ALT)
Rata-rata	$1{,}2 \times 10^8$	

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.1**, diperoleh bahwa konsentrasi kultur *Bacillus subtilis* pada pengujian pertama sebesar $1{,}3 \times 10^8$ sel/mL, sedangkan pada pengujian kedua sebesar $1{,}1 \times 10^8$ sel/mL. Perbedaan hasil antara kedua pengujian menunjukkan adanya variasi jumlah sel yang masih berada pada rentang konsentrasi yang sama, yaitu 10^8 sel/mL. Secara umum, kedua hasil tersebut menunjukkan bahwa kultur bakteri telah berhasil mencapai konsentrasi target penelitian, yaitu rentang 10^6 sel/mL hingga 10^8 sel/mL seperti yang disampaikan oleh (Gul & Shaheen, 2026).

Dengan demikian, berdasarkan dua kali pengujian laboratorium dapat disimpulkan bahwa kultur *Bacillus subtilis* yang digunakan dalam penelitian telah memenuhi konsentrasi yang direncanakan sehingga layak digunakan sebagai bahan substitusi sebagian air pencampur pada pembuatan batako *self-healing*.

Besaran jumlah bakteri yang dimasukkan dalam satu buah batako akan disajikan pada **Tabel 4.2** berikut.

Tabel 4.2 Jumlah bakteri yang terdapat pada satu buah batako setiap variasi

Variasi Batako *Self-Healing* (BSH)	Volume Substitusi Air (mL)	Konsentrasi Bakteri (sel/mL)	Jumlah Bakteri Per Batako (sel)
0%	0	$1{,}2 \times 10^{8}$	0
5%	48		$5{,}8 \times 10^{9}$
10%	96		$1{,}2 \times 10^{10}$
15%	145		$1{,}7 \times 10^{10}$

4.2 Analisis Pengujian Material

4.2.1 Agregat Halus

Pengujian analisis saringan dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran agregat halus sehingga dapat ditentukan gradasi pasir yang digunakan dalam penelitian. Distribusi ukuran butiran berpengaruh terhadap tingkat kepadatan campuran, kebutuhan pasta semen, kemudahan pengerjaan (*workability*), serta sifat mekanis batako yang dihasilkan.

1. Pengujian Gradasi Agregat Halus

   Pengujian analisis gradasi agregat halus difungsikan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran pasir yang digunakan sebagai salah satu material penyusun batako yang didasari pada SNI 03-1968-1990. Melalui pengujian ini akan diketahui butiran agregat halus yang tertahan serta dapat dianalisis nilai persentase butiran yang lolos pada setiap butiran saringan. Hasil dari pengujian analisis gradasi agregat halus akan disajikan pada **Tabel 4.3.**

Tabel 4.3 Data pengujian gradasi agregat halus

Ukuran Saringan (mm)	Berat Tertinggal (gr)
9,5	0
4,75	3
2,36	91,9
1,18	119,6
0,6	329,1
0,3	135,5
0,15	261,7
0,075	20,3
PAN	36,2
Jumlah	997,3

Berdasarkan pengujian gradasi agregat halus dapat dianalisis dengan perhitungan hasil pengayakan sebagai berikut:

1) Berat tertahan (%) $= \frac{\text{berat tertahan}}{\text{berat total}} \times 100\%$

$= \frac{3}{997,3} \times 100\%$

$= 0,3\%$

2) Berat tertahan kumulatif (%) = Persentase berat tertahan + Persentase berat tertahan sebelumnya

$= 0,3\% + 0\%$

$= 0,3\%$

3) Lolos kumulatif (%) = 100% - Persentase berat tertahan

$= 100\% - 0,3\%$

$= 99,7\%$

4) Modulus kehalusan FM $= \frac{\sum \text{Jumlah saringan diatas 0,15 mm}}{100}$

$= \frac{153,93}{100}$

$= 1,54$

5) Persentase kehilangan berat (%) $= \frac{\text{berat awal-berat akhir}}{\text{berat awal}} \times 100\%$

$= \frac{1000 - 997,3}{1000} \times 100\%$

$= 0,27\%$

Perhitungan analisis pengayakan dilakukan secara berulang untuk setiap ukuran pada saringan. Perbedaan berat setelah dilakukan penyaringan dengan berat awal sebelum penyaringan dapat disebabkan karena butiran agregat halus yang tidak sengaja jatuh maupun tertinggal selama proses pengayakan. Hal tersebut diperbolehkan selama persentase kehilangan tidak melebihi 1% dari berat awal. Hasil perhitungan gradasi agregat halus akan disajikan pada **Tabel 4.4**.

Tabel 4.4 Hasil pengujian gradasi agregat halus

Ukuran Saringan (mm)	Berat Tertinggal (gr)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persentase Lolos Kumulatif (%)
9,5	0	0	0	100.00
4,75	3	0,30	0,30	99.70
2,36	91,9	9,21	9,52	90.79
1,18	119,6	11,99	21,21	88.01
0,6	329,1	33,00	44,99	67.00
0,3	135,5	13,59	46,59	86.41
0,15	261,7	26,24	39,83	73.76
0,075	20,3	2,04	28,28	97.96
PAN	36,2	3,63	5,67	96.37
Jumlah	997,3	100,0		

2. Pengujian Berat Jenis

Pengujian berat jenis agregat halus berfungsi untuk mengetahui karakteristik fisik material pasir yang digunakan dalam campuran batako. Berat jenis digunakan untuk menggambarkan perbandingan antara massa agregat terhadap volume butir agregat tanpa memperhitungkan volume pori yang terdapat di antara butiran. Hasil pengujian berat jenis selanjutnya digunakan untuk mengetahui karakteristik agregat halus yang digunakan dalam penelitian serta sebagai dasar dalam mengevaluasi kesesuaian material terhadap kebutuhan campuran batako. Data hasil pengujian berat jenis agregat halus akan disajikan pada **Tabel 4.5**.

Tabel 4.5 Pengujian berat jenis agregat halus

No	Pengujian Agregat Halus		Hasil (gram)
1.	Berat benda uji kering permukaan jenuh	SSD	500
2.	Berat benda uji kering oven	BK	481,7
3.	Berat piknometer di isi air 25°C	B	698,3
4.	Berat piknometer + benda uji SSD + air 25°C	Bt	1000

Berdasarkan data pengujian agregat pada **Tabel 4.4** tersebut akan diperoleh perhitungan berat jenis agregat halus sebagai berikut:

$$\text{Berat permukaan jenuh (SSD)} = \frac{500}{(B + 500 - Bt)}$$

$$= \frac{500}{(698{,}3 + 500 - 1000)}$$

$$= 2{,}52 \text{ gr/cm}^3$$

Berdasarkan perhitungan, berat jenis agregat yang digunakan memperoleh nilai sebesar 2,52 gr/cm^3. Nilai tersebut berada pada rentang standar yang telah ditetapkan oleh SNI 1970:2008 yaitu berkisar 1,6 gr/cm^3 hingga 3,3 gr/cm^3. Oleh karena itu, agregat halus tersebut dapat digunakan sebagai bahan pembuatan batako.

3. Pengujian Kadar Lumpur

Pada penelitian ini, pengujian kadar lumpur berfungsi untuk mengetahui tingkat kebersihan pasir sebelum digunakan sebagai material penyusun benda uji. Hasil pengujian dinyatakan dalam bentuk persentase kadar lumpur terhadap berat awal sampel. Nilai tersebut selanjutnya digunakan untuk menilai kondisi agregat halus dan kesesuaiannya dengan persyaratan material yang digunakan dalam pembuatan batako. Hasil pengujian kadar lumpur akan disajikan pada **Tabel 4.6** untuk menunjukkan besaran nilai lumpur yang terdapat pada agregat halus yang akan digunakan.

Tabel 4.6 Hasil pengujian kadar lumpur agregat halus

Keterangan	Tinggi Lumpur + Pasir (cc)	Tinggi Pasir (cc)
Hasil	140	135

Berdasarkan pengujian kadar lumpur pada agregat halus yang telah dilakukan, diperoleh hasil dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Persentase kadar lumpur} = \frac{\text{tinggi lumpur}}{\text{tinggi pasir + lumpur}} \text{ x } 100\%$$

$$= \frac{140\text{-}135}{140} \text{ x } 100\%$$

$$= 3{,}57\%$$

Hasil analisis kadar lumpur pada agregat halus yang akan digunakan yaitu sebesar 3,57%. Nilai tersebut memenuhi syarat pada SK-SNI-S-04-1989-F yang menetapkan kadar lumpur maksimum pada agregat halus sebesar 5%.

4.3 Pemeriksaan Benda Uji

4.3.1 Analisis Pengujian *Self-Healing* pada Retakan Batako

Analisis *self-healing* pada retakan batako berfungsi untuk mengevaluasi potensi dari bakteri *Bacillus subtilis* untuk memperbaiki dan menutup retakan dengan mandiri setelah perlakuan *healing*, baik secara visual maupun menggunakan *image analysis*. Hal ini dilakukan dengan membandingkan dengan variasi BSH-R0 (beton normal yang diretakkan) dengan variasi BSH-R5 hingga BSH-R15 (beton *self-healing* yang diretakkan). Berikut ini akan ditunjukkan data analisis luas retakan pada benda uji batako dari umur ke-0 hingga ke-28 yang ditampilkan pada **Tabel 4.7**.

Tabel 4.7 Luas area retakan

Variasi Material		Area (mm^2)					
		Hari ke-0	Hari ke-3	Hari ke-7	Hari ke-14	Hari ke-21	Hari ke-28
BSH-R0	A	65,28	65,18	64,94	64,81	64,76	64,23
	B	100,14	99,72	99,22	98,84	98,43	98,05
	C	46,61	46,43	46,32	46,20	45,95	45,24
BSH-R5	A	65,41	59,59	34,63	32,07	25,07	19,98
	B	73,26	67,99	52,74	44,80	32,51	28,75
	C	64,19	58,67	48,94	32,15	28,93	23,78
BSH-R10	A	55,87	30,01	22,97	17,68	15,48	12,43
	B	76,72	60,86	41,05	24,62	20,11	16,65
	C	66,89	34,06	28,34	24,46	20,53	16,19
BSH-R15	A	53,39	31,76	24,96	20,28	17,78	14,04
	B	51,29	34,33	27,37	23,20	18,35	15,26
	C	64,77	47,60	30,04	25,35	21,05	17,64

Selanjutnya akan ditampilkan persentase penutupan kumulatif yang terjadi pada analisis retakan yang akan disajikan pada **Tabel 4.8**.

Tabel 4.8 Persentase penutupan retakan kumulatif

Variabel Material		Persentase Penutupan Kumulatif (%)					
		Hari ke-0	Hari ke-3	Hari ke-7	Hari ke-14	Hari ke-21	Hari ke-28
BSH-R0	A	0	0,16	0,53	0,73	0,80	1,61
	B	0	0,43	0,92	1,31	1,71	2,09

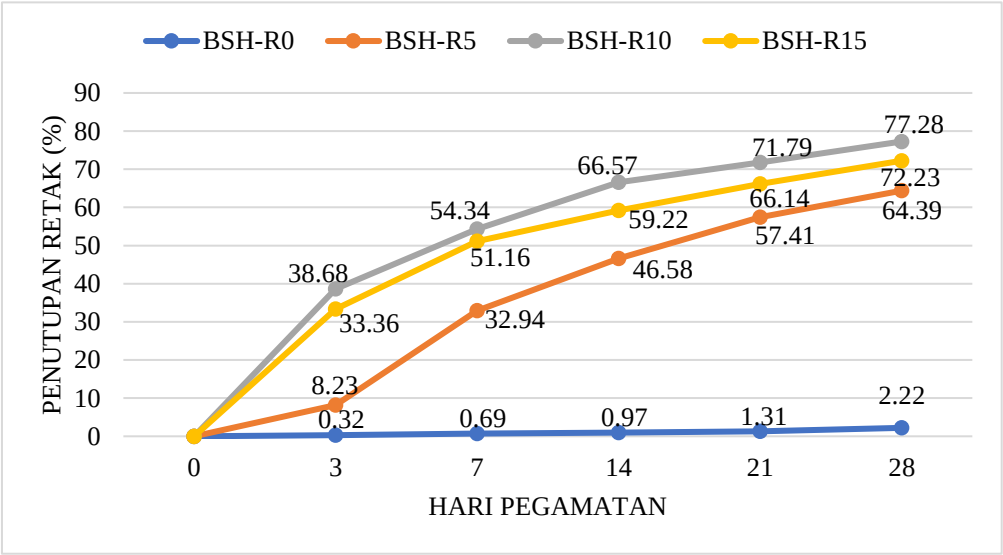
Variabel Material		Persentase Penutupan Kumulatif (%)					
		Hari ke-0	Hari ke-3	Hari ke-7	Hari ke-14	Hari ke-21	Hari ke-28
	C	0	0,39	0,62	0,88	1,42	2,94
BSH-R5	A	0	8,89	47,05	50,97	61,68	69,46
	B	0	7,20	28,01	38,85	55,63	60,76
	C	0	8,60	23,75	49,91	54,93	62,95
BSH-R10	A	0	46,28	58,89	68,36	72,29	77,74
	B	0	20,67	46,49	67,91	73,79	78,29
	C	0	49,08	57,62	63,43	69,30	75,80
BSH-R15	A	0	40,51	53,25	62,01	66,69	73,70
	B	0	33,06	46,63	54,76	64,22	70,24
	C	0	26,52	53,62	60,87	67,50	72,76

Dari hasil pada **Tabel 4.8** akan didapatkan nilai rata-rata penutupan kumulatif yang terjadi pada masing-masing variasi yang akan disajikan pada **Tabel 4.9** berikut.

Tabel 4.9 Rata-rata penutupan retakan kumulatif

Variabel Material	Rata-Rata Penutupan Kumulatif (%)					
	Hari ke-0	Hari ke-3	Hari ke-7	Hari ke-14	Hari ke-21	Hari ke-28
BSH-R0	0	0,32	0,69	0,97	1,31	2,22
BSH-R5	0	8,23	32,94	46,58	57,41	64,39
BSH-R10	0	38,68	54,34	66,57	71,79	77,28
BSH-R15	0	33,36	51,16	59,22	66,14	72,23

Berikut ini akan ditampilkan **Gambar 4.1** mengenai grafik penutupan retakan yang diakibatkan adanya proses *self-healing.*



Gambar 4.1 Grafik penutupan retakan

Berdasarkan grafik pada **Gambar 4.1**, seluruh variasi benda uji yang menggunakan agen *self-healing* menunjukkan peningkatan persentase penutupan retakan seiring bertambahnya umur pengamatan. Pada hari ke-28, persentase penutupan retakan rata-rata BSH-R5 mencapai 64,39%, BSH-R10 mencapai 77,28%, dan BSH-R15 mencapai 72,23%, sedangkan BSH-R0 hanya mencapai 2,22%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa BSH-R10 menghasilkan persentase penutupan retakan rata-rata tertinggi dibandingkan BSH-R5 dan BSH-R15. Pada BSH-R0, penutupan retakan yang relatif kecil tetap dapat terjadi tanpa penambahan agen bakteri karena adanya mekanisme *autogenous self-healing* pada material berbasis semen, yang dapat terjadi melalui hidrasi lanjutan pada material semen yang belum terhidrasi dan pengendapan produk hidrasi pada bagian retakan (Jaf, 2023; Roig-Flores dkk., 2021).

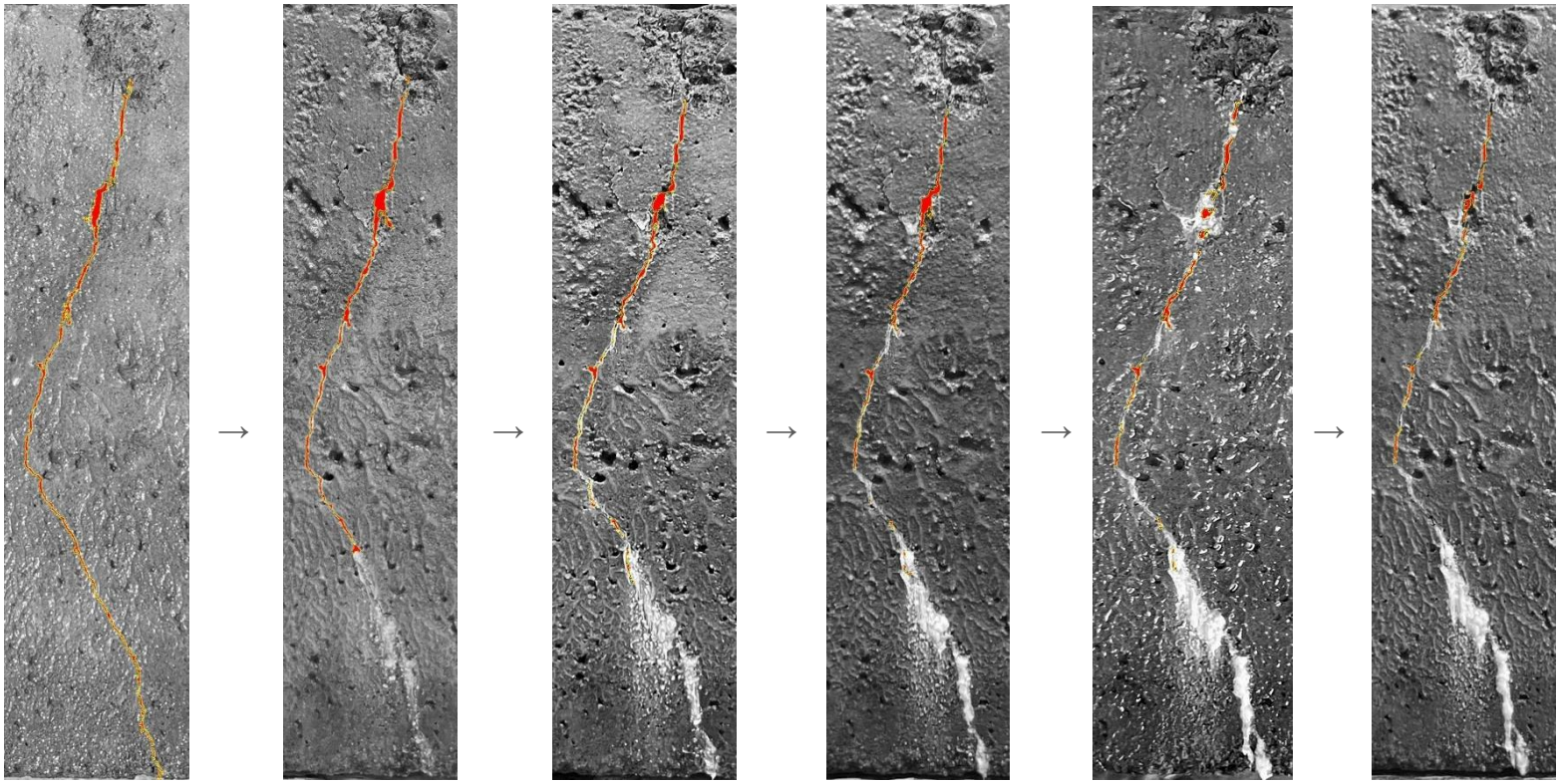
Sementara itu, penutupan retakan yang pada variasi BSH-R5, BSH-R10, dan BSH-R15 menunjukkan adanya kontribusi agen *self-healing* dalam proses penutupan retakan melalui mekanisme *Microbially Induced Calcite precipitation* (MICP), yaitu proses pembentukan dan pengendapan kalsium karbonat yang dapat mengisi bagian retakan (Bagga dkk., 2022). Perbedaan hasil antara ketiga variasi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi agen bakteri tidak secara langsung menghasilkan peningkatan persentase penutupan retakan secara proporsional. Dalam penelitian ini, kondisi tersebut terlihat dari BSH-R10 yang menghasilkan penutupan retakan sebesar 77,28%, lebih tinggi dibandingkan BSH-R15 sebesar 72,23%, meskipun konsentrasi agen bakteri pada BSH-R15 lebih tinggi. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi dari 10% menjadi 15% tidak menghasilkan peningkatan penutupan retakan pada kondisi penelitian ini. Dengan demikian, berdasarkan parameter penutupan retakan dan rentang konsentrasi yang diuji, BSH-R10 merupakan variasi yang menunjukkan persentase penutupan retakan rata-rata tertinggi pada umur 28 hari.

Pola penutupan retakan meningkat dari 5% menuju 10%, lalu mengalami penurunan pada variasi 15%. Tren nonlinier serupa dilaporkan oleh Choi dkk. (2025), menguji mortar pada substitusi air dengan variasi 0%, 5%, 10%, 15%, dan

20% dengan menggunakan bakteri *Lysinibacillus fusiformis*. Penelitian Choi dkk. (2025) menyampaikan bahwa variasi 10% yang tertinggi dalam menunjukkan aktivitas peningkatan penutupan retakan. Walaupun jenis bakteri dan materialnya berbeda, pola ini mendukung adanya kadar optimum campuran dan menunjukkan bahwa penambahan proporsi larutan kultur tidak selalu meningkatkan penutupan retak secara proporsional. Hal ini disampaikan juga pada penelitian Gul & Shaheen (2026), dengan menggunakan benda uji beton dengan substitusi air menggunakan variasi 2,5%, 5%, dan 10% dengan bakteri *Bacillus subtilis*. Pada penelitian tersebut menghasilkan bahwa variasi 10% adalah variasi tertinggi dalam penutupan retakan. Pola ini mendukung adanya kadar optimum campuran dan menunjukkan bahwa penambahan proporsi larutan kultur tidak selalu meningkatkan penutupan retak secara proporsional. Diperkuat juga oleh penelitian Costa dkk. (2026), menggunakan bakteri *Bacillus thuringiensis* dengan variasi 0; 3,75; 7,5; dan 15. Di antara variasi tersebut, variasi 7,5 menunjukkan efisiensi penutupan pori tertinggi dibandingkan variasi 15. Variasi 15 menunjukkan biomineraliyang lebih sedikit.

Penurunan penutupan retakan pada BSH-15 dibandingkan dengan BSH-10 dapat disebabkan dengan biomassa bakteri yang berlebihan. Konsentrasi bakteri yang berlebihan, yaitu melebihi 10–12%, berpotensi mengurangi kemampuan kerja bakteri serta menyebabkan hasil yang diperoleh menjadi kurang seragam (Gul & Shaheen, 2026). Melalui penelitian Alidekyi dkk. (2026), pada pemodelan *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP), menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi bakteri dapat meningkatkan kuat tekan sekaligus menyebabkan distribusi endapan kalsium karbonat (kalsit) menjadi semakin tidak homogen. Hal tersebut menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi bakteri tidak selalu menghasilkan distribusi endapan yang merata pada seluruh bagian material pengujian (Alidekyi dkk., 2026). Kemungkinan distribusi endapan kasium karbonat yang kurang merata pada area retakan dapat menyebabkan pengisian retakan di permukaan tidak seoptimal variasi 10%. Meskipun demikian, distribusi endapan pada batako variasi 10% dan 15% dalam penelitian ini belum dapat dipastikan secara langsung karena tidak dilakukan pengujian pada mikrostruktur.

Berikut akan ditampilkan **Gambar 4.2** yang merupakan perubahan penutupan retakan yang terjadi akibat adanya proses MICP pada batako.



(a) Variasi 10% A Hari ke-0 (b) Variasi 10% A Hari ke-3 (c) Variasi 10% A Hari ke-7 (d) Variasi 10% A Hari ke-14 (e) Variasi 10% A Hari ke-21 (f) Variasi 10% A Hari ke-28

Gambar 4.2 Perubahan retakan benda uji variasi 10%A (a) hari ke-0, (b) hari ke-3, (c) hari ke-7, (d) hari ke-14 (e) hari ke-21, dan (f) hari ke-28

Berdasarkan **Gambar 4.2**, terlihat perubahan kondisi retakan pada benda uji BSH-R10A selama masa pengamatan dari hari ke-0 hingga hari ke-28. Pada hari ke-0, retakan terlihat jelas pada permukaan benda uji sebagai kondisi awal sebelum proses *self-healing* berlangsung. Seiring bertambahnya umur pengamatan, bagian retakan secara bertahap mengalami perubahan berupa berkurangnya luas retakan yang terlihat pada permukaan benda uji. Perubahan tersebut semakin terlihat pada hari ke-7, ke-14, ke-21, hingga hari ke-28, ketika sebagian bagian retakan telah tertutup dibandingkan dengan kondisi awal. Perubahan visual tersebut menunjukkan adanya proses penutupan retakan selama periode pengamatan pada benda uji yang menggunakan agen *self-healing*. Hasil pengamatan visual selanjutnya dianalisis secara kuantitatif menggunakan perangkat lunak Fiji/ImageJ untuk memperoleh persentase penutupan retakan pada setiap umur pengamatan.

4.3.2 Analisis Pengujian Daya Serap Air

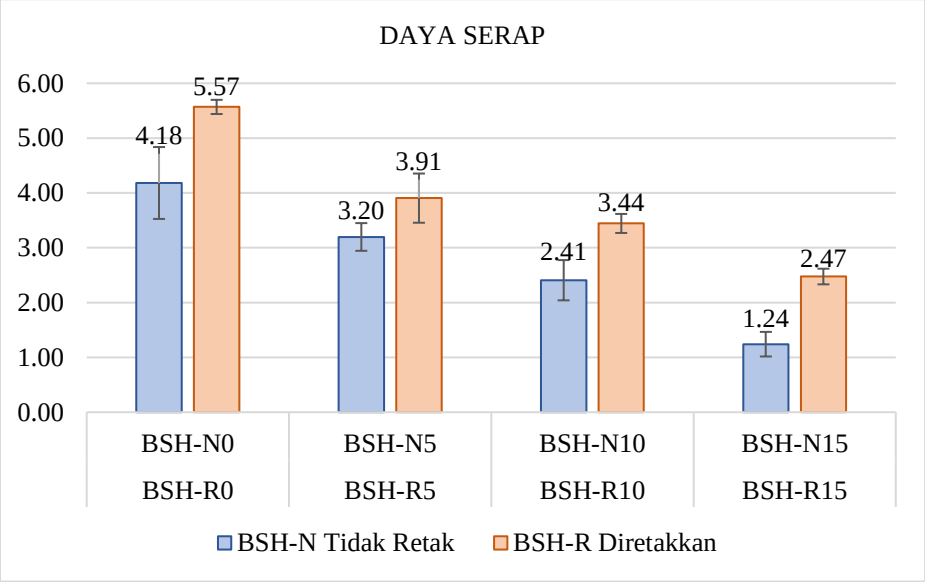
Pengujian daya serap air dilakukan agar diketahui tingkat porositas yang dimiliki oleh benda uji dan juga kemampuan dalam menahan dan menyerap air yang masuk pada pori-pori benda uji. Dalam hal ini, untuk mengetahui daya serap pada batako *self-healing* dibandingkan batako normal. Penelitian ini menggunakan delapan variasi dengan masing-masing variasi terdiri dari tiga benda uji dengan pelaksaan pengujian pada batako umur 28 hari. Berikut ini akan ditunjukkan data analisis pengujian daya serap air pada benda uji batako umur 28 hari yang ditampilkan pada **Tabel 4.10**.

Tabel 4.10 Analisis hasil pengujian daya serap air pada batako

Variasi	Kode Benda Uji	Berat Basah (gr)	Berat Kering (gr)	Hasil Penyerapan Air (%)	Rata-Rata Penyerapan Air (%)
BSH-N0	A	9045	8655	4,51	4,18
	B	8960	8565	4,61	
	C	9055	8755	3,43	
BSH-N5	A	9170	8900	3,03	3,20
	B	9050	8745	3,49	
	C	9070	8800	3,07	
BSH-N10	A	9165	8960	2,29	2,41
	B	9170	8980	2,12	
	C	9115	8865	2,82	

Variasi	Kode Benda Uji	Berat Basah (gr)	Berat Kering (gr)	Hasil Penyerapan Air (%)	Rata-Rata Penyerapan Air (%)
BSH-N15	A	9080	8965	1,28	1,24
	B	9150	9020	1,44	
	C	9105	9015	1,00	
BSH-R0	A	9350	8845	5,71	5,50
	B	9140	8660	5,54	
	C	9280	8800	5,45	
BSH-R5	A	9015	8700	3,62	3,91
	B	9035	8715	3,67	
	C	9090	8705	4,42	
BSH-R10	A	9070	8785	3,24	3,44
	B	9100	8790	3,53	
	C	9020	8710	3,56	
BSH-R15	A	9080	8855	2,54	2,47
	B	8970	8745	2,57	
	C	9075	8870	2,31	

Berikut ini akan ditampilkan **Gambar 4.3** mengenai grafik pengujian daya serap air pada batako utuh dan batako yang diretakkan dan telah mengalami proses *self-healing.*



Gambar 4.3 Grafik pengujian daya serap batako

Berdasarkan **Gambar 4.3** nilai daya serap air beton umur 28 hari pada variasi BSH-N0, BSH-N5, BSH-N10, dan BSH-N15 berturut-turut sebesar 4,18%, 3,20%, 2,41%, dan 1,24%. Dibandingkan dengan BSH-N0, terjadi penurunan daya serap

berturut-turut sebesar 23,44%, 42,34%, dan 70,33% pada BSH-N5, BSH-N10, dan BSH-N15. Sehingga didapatkan hasil daya serap terendah pada variasi BSH-N15 sebesar 1,24%. Dengan demikian, pada rentang yang diuji, semakin besar persentase substitusi bakteri, maka semakin rendah daya serap air yang dihasilkan.

Kecenderungan pada kelompok tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Durga dkk. (2023), menggunakan variasi bakteri dengan konsentrasi 10^8 dan 10^9 dengan *Bacillus subtilis*. Penelitian oleh Durga dkk. (2023), menunjukkan tren penurunan daya serap seiring bertambahnya substitusi bakteri. Hal itu disampaikan juga oleh Riad dkk. (2025) dengan menggunakan variasi 2,5%, 5%, 7.5%, dan 10% dengan bakteri *Bacillus sphaericus.* Penelitian oleh Riad dkk. (2025) menunjukkan bahwa pada benda uji yang tidak diretakkan, didapatkan hasil penurunan laju penyerapan air seiring bertambahnya substitusi bakteri. Pada penelitian yang dilakukan oleh Cahyati dkk. (2024) menggunakan variasi 0%, 5%, 10%, dan 15% dengan bakteri *Bacillus subtilis.* Cahyati dkk. (2024) menyebutkan bahwa menyebutkan bahwa pada benda uji yang tidak diretakkan, didapatkan hasil penurunan penyerapan dengan seiring bertambahnya substitusi bakteri. Dengan demikian, kedua penelitian tersebut mendukung hasil penelitian ini bahwa peningkatan persentase kultur bakteri dalam rentang yang diuji berkaitan dengan penurunan daya serap air benda uji tanpa retak.

Selanjutnya daya serap air pada batako yang diretakkan, nilai rata-rata pada setiap variasi BSH-R0, BSH-R5, BSH-R10, dan BSH-R15 berturut-turut sebesar 5,50%, 3,91%, 3,44%, dan 2,47%. Dibandingkan dengan BSH-R0, terjadi penurunan sebesar 28,91% pada BSH-R5, 37,45% pada BSH-R10, dan 55,09% pada BSH-R15. Sehingga didapatkan hasil terendah pada variasi BSH-R15 sebesar 2,47%. Pola tersebut menunjukkan kecenderungan penurunan daya serap air tetap terjadi meskipun benda uji telah mengalami proses peretakan dan proses *self-healing*.

Kecenderungan hasil pada penelitian ini sejalan dengan Durga dkk. (2023), menggunakan variasi bakteri dengan konsentrasi 10^8 dan 10^9 dengan *Bacillus subtilis*. Penelitian oleh Durga dkk. (2023), menunjukkan bahwa benda uji yang telah diretakkan dan menjalani proses *healing* akan mengalami penurunan daya

serap air seiring bertambahnya jumlah *Bacillus subtilis* pada benda uji. Penurunan daya serap air pada benda uji setelah proses *self-healing* dapat dikaitkan dengan aktivitas bakteri dalam menghasilkan presipitasi kalsium karbonat ($CaCO_3$) yang mengisi sebagian pori dan area retak sehingga jalur masuk air berkurang (Durga dkk., 2023; Riad dkk., 2025). Dengan demikian, hasil penelitian ini didukung oleh penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa penambahan bakteri tidak hanya berkaitan dengan penurunan daya serap air pada benda uji yang tidak diretakkan, tetapi juga dengan penurunan daya serap air pada benda uji yang telah mengalami peretakan dan kemudian menjalani proses *self-healing*.

4.3.3 Analisis Pengujian Kuat Tekan

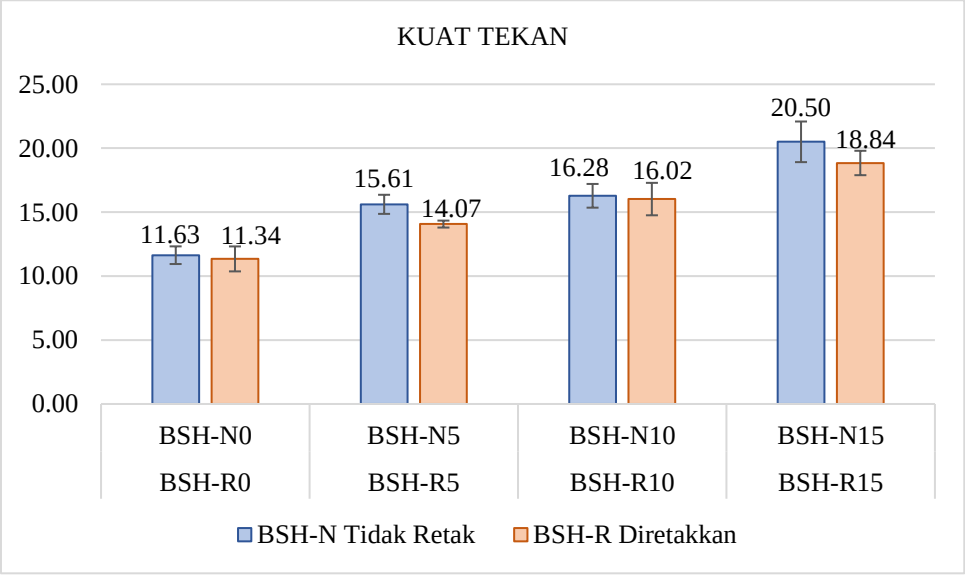
Pelaksanaan pengujian kuat tekan pada benda uji batako dilakukan pada Laboratorium Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro. Pada pelaksanaannya menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM) dengan tiga benda uji pada setiap variasi untuk mendapatkan nilai kuat tekan rata-rata. Nilai kuat tekan masing-masing benda uji dihitung menggunakan perbandingan beban maksimum yang diterima benda uji terhadap luas bidang tekan. Berikut ini akan ditunjukkan data analisis pengujian kuat tekan pada benda uji batako umur 28 hari yang ditampilkan pada **Tabel 4.11.**

Tabel 4.11 Hasil pengujian kuat tekan batako umur 28 hari

Variasi	Kode Benda Uji	Beban Maksimum (kN)	Luas Bidang Tekan (mm^2)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
BSH-N0	A	361	30000	12,03	11,63
	B	366		12,20	
	C	320		10,67	
BSH-N5	A	477	30000	15,90	15,61
	B	469		15,63	
	C	459		15,30	
BSH-N10	A	488	30000	16,27	16,28
	B	507		16,90	
	C	470		15,67	
BSH-N15	A	641	30000	21,37	20,50
	B	628		20,93	
	C	576		19,20	
BSH-R0	A	352	30000	11,73	11,34
	B	307		10,23	
	C	362		12,07	

Variasi	Kode Benda Uji	Beban Maksimum (kN)	Luas Bidang Tekan (mm^2)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
BSH-R5	A	429	30000	14,30	14,07
	B	413		13,77	
	C	424		14,13	
BSH-R10	A	511	30000	17,03	16,02
	B	438		14,60	
	C	493		16,43	
BSH-R15	A	595	30000	19,83	18,84
	B	563		18,77	
	C	538		17,93	

Berikut ini akan ditampilkan **Gambar 4.4** mengenai grafik pengujian kuat tekan air pada batako utuh dan batako yang diretakkan dan telah mengalami proses *self-healing.*



Gambar 4.4 Grafik hasil pengujian kuat tekan batako

Berdasarkan **Gambar 4.5**, kuat tekan batako umur 28 hari pada variasi BSH-N0, BSH-N5, BSH-N10, dan BSH-N15 berturut-turut sebesar 11,63 MPa, 15,61 MPa, 16,28 MPa, dan 20,50 MPa. Dibandingkan BSH-N0, terjadi peningkatan kuat tekan sebesar 34,19% pada BSH-N5, 39,92% pada BSH-N10, dan 76,2% pada BSH-N15. Sehingga didapatkan hasil tertinggi pada variasi BSH-N15 sebesar 20,50 MPa. Dengan demikian, pada rentang yang diuji, semakin besar persentase

substitusi kultur *Bacillus subtilis* berbasis media jagung, maka semakin tinggi juga kuat tekan yang dihasilkan.

Kecenderungan pada kelompok tersebut sejalan dengan penelitian (Helal dkk., 2024) menggunakan variasi 0%, 0,25%, 1%, dan 2,5% dengan bakteri *Bacillus sphaericus*. Tren yang didapatkan menunjukkan peningkatan kuat tekan dengan seiring bertambahnya substitusi bakteri. Hal itu disampaikan juga oleh Abdelfattah dkk. (2025) menggunakan variasi 0%, 1% dan 2,5% dengan bakteri *Bacillus sphaericus* dan *Bacillus megaterium*. Abdelfattah dkk. (2025) menyebutkan bahwa pada benda uji yang tidak diretakkan, didapatkan hasil peningkatan kuat tekan dengan seiring bertambahnya substitusi bakteri. Pada penelitian yang dilakukan oleh Cahyati dkk. (2024) menggunakan variasi 0%, 5%, 10%, dan 15% dengan bakteri *Bacillus subtilis.* Cahyati dkk. (2024) menyebutkan bahwa menyebutkan bahwa pada benda uji yang tidak diretakkan, didapatkan hasil peningkatan kuat tekan dengan seiring bertambahnya substitusi bakteri. Dengan demikian, kedua penelitian tersebut mendukung hasil penelitian ini bahwa dengan peningkatan persentase kultur bakteri dalam rentang yang diuji berkaitan dengan peningkatan kuat tekan benda uji tanpa retak.

Selanjutnya, kuat tekan rata-rata benda uji BSH-R0, BSH-R5, BSH-R10, dan BSH-R15 yang telah mengalami peretakan dan pses *self-healing* selama 28 hari memiliki rata-rata kuat tekan berturut-turut sebesar 11,34 MPa, 14,07 MPa, 16,02 MPa, dan 18,84 MPa. Dibandingkan BSH-R0, terjadi peningkatan kuat tekan sebesar 24% pada BSH-R5, 41,23% pada BSH-R10, dan 66,11% pada BSH-R15. Sehingga didapatkan hasil tertinggi pada variasi BSH-R15 sebesar 18,84 MPa. Pola tersebut menunjukkan kecenderungan peningkatan kuat tekan tetap terjadi meskipun benda uji telah mengalami proses peretakan dan proses *self-healing.*

Hasil pada penelitian ini sejalan dengan Helal dkk. (2024) menggunakan variasi 0%, 0,25%, 1%, dan 2,5% dengan bakteri *Bacillus sphaericus.* Penelitian oleh Helal dkk. (2024), menunjukkan bahwa benda uji yang telah diretakkan dan dirawat pada air akan meningkatkan kuat tekan seiring bertambahnya substitusi bakteri pada benda uji.

Hal yang sama dilaporkan juga oleh Abdelfattah dkk. (2025) menggunakan variasi 0%, 1% dan 2,5% dengan bakteri *Bacillus sphaericus* dan *Bacillus megaterium*. Penelitian oleh Abdelfattah dkk. (2025) menunjukkan bahwa benda uji yang diretakkan dan telah mengalami proses *self-healing* akan meningkatkan kuat tekannya seiring bertambahnya substitusi bakteri. Peningkatan kuat tekan pada benda uji setelah proses *self-healing* dapat dikaitkan dengan aktivitas bakteri dalam menghasilkan presipitasi kalsium karbonat ($CaCO_3$) yang mengisi sebagian pori pada area retak sehingga matriks menjadi lebih rapat (Abdelfattah dkk., 2025; Helal dkk., 2024). Dengan demikian, hasil penelitian ini didukung oleh penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa penambahan bakteri tidak hanya berkaitan dengan peningkatan kuat tekan pada benda uji yang tidak diretakkan, tetapi juga dengan peningkatan kuat tekan pada benda uji yang telah mengalami peretakan dan kemudian menjalani proses *self-healing*.

4.3.4 Analisis Perbandingan Biaya

Anggaran biaya dihitung dari jumlah material yang digunakan dalam penelitian ini. Material yang dihitung mencangkup pasir, semen, dan kultur *Bacillus subtilis* dengan media jagung. Data pengambilan harga diperoleh dari lokasi dan *e-commerce* tempat pembelian barang pada setiap bahan yang digunakan. Harga yang digunakan yaitu data aktual di lapangan untuk setiap material yang digunakan. Berikut ini akan disajikan **Tabel 4.12** yang menjelaskan tentang perolehan material untuk penelitian.

Tabel 4.12 Lokasi memperoleh material

No	Nama Toko	Satuan	Harga Satuan		Keterangan
1	TB. Lancar, KH. Sirojudin	Kg	Rp	400,00	Pasir
2	TB. Lancar, KH. Sirojudin	Kg	Rp	1.435,00	Semen
3	Kios Pakan Burung Pak Sidiq, Mulawarman	Kg	Rp	10.000,00	Jagung pipil
4	March Gallery	L	Rp	9000,00	Isolat Bakteri *Bacillus subtilis*
5	Alpha Medika Semarang	L	Rp	9.600,00	*Aquadest*
6	Pandaitani	Kg	Rp	12.000,00	Urea
7	Chemical Supply	Kg	Rp	10.000,00	Kalsium klorida
8	Tristanlab	mL	Rp	3,00	Amilase
9		L	Rp	500	Air

Analisis perbandingan biaya hanya dilakukan pada variasi benda uji tanpa diretakkan, karena pada benda uji yang diretakkan memiliki komposisi yang sama seperti benda uji tanpa diretakkan. Berikut ini akan ditampilkan **Tabel 4.13** mengenai analisis harga per buah dalam pembuatan batako konvensional dengan menggunakan harga satuan yang tertera pada **Tabel 4.12**.

Tabel 4.13 Analisis harga batako konvensional

Variasi	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Harga Satuan	Total Harga
BSH-N0	Semen	2,754	Kg	Rp 1.325,00	Rp 3.591,99
	Pasir	9,077	Kg	Rp 400,00	Rp 3.630,80
	Air	0,964	L	Rp 500,00	Rp 482,00
		Total			Rp 8.064,79

Dengan demikian, berdasarkan **Tabel 4.13**, harga batako konvensional dalam satu buah yaitu Rp8.064,79 dengan menggunakan harga satuan material yang tertera pada **Tabel 4.12**.

Pada penelitian ini menggunakan kultur *Bacillus subtilis* dengan media jagung dengan kadar berbeda setiap variasinya. Sehingga, harga dalam pembuatan kultur *Bacillus subtilis* dengan media jagung berbeda juga antarvariasi. Berikut ini akan ditampilkan **Tabel 4.14**, mengenai rekapitulasi harga satuan pembuatan kultur *Bacillus subtilis* dengan media jagung antarvariasi.

Tabel 4.14 Analisis harga satuan kultur *Bacillus subtilis* dengan media jagung antarvariasi

Variasi	Bahan Kultur	Kebutuhan	Satuan	Harga Satuan	Total Harga
BSH-N5	Bakteri + *Aquadest*	0,0480	L	Rp18.600,00	Rp 892,80
	Jagung	0,0096	Kg	Rp10.000,00	Rp 96,00
	Amilase	2,4	mL	Rp 3,00	Rp 7,20
	Urea	0,00086	Kg	Rp12.000,00	Rp 10,37
	Kalsium klorida	0,00029	Kg	Rp10.000,00	Rp 2,88
	Total Biaya				Rp1.009,25
BSH-N10	Bakteri + *Aquadest*	0,0960	L	Rp18.600,00	Rp1.785,60
	Jagung	0,0192	Kg	Rp10.000,00	Rp 192,00
	Amilase	4,8	mL	Rp3,00	Rp 14,40
	Urea	0,00173	Kg	Rp12.000,00	Rp 20,74
	Kalsium klorida	0,00058	Kg	Rp10.000,00	Rp 5,76
	Total Biaya				Rp2.018,50
BSH-N15	Bakteri + *Aquadest*	0,1450	L	Rp18.600,00	Rp2.697,00
	Jagung	0,0290	Kg	Rp10.000,00	Rp 290,00

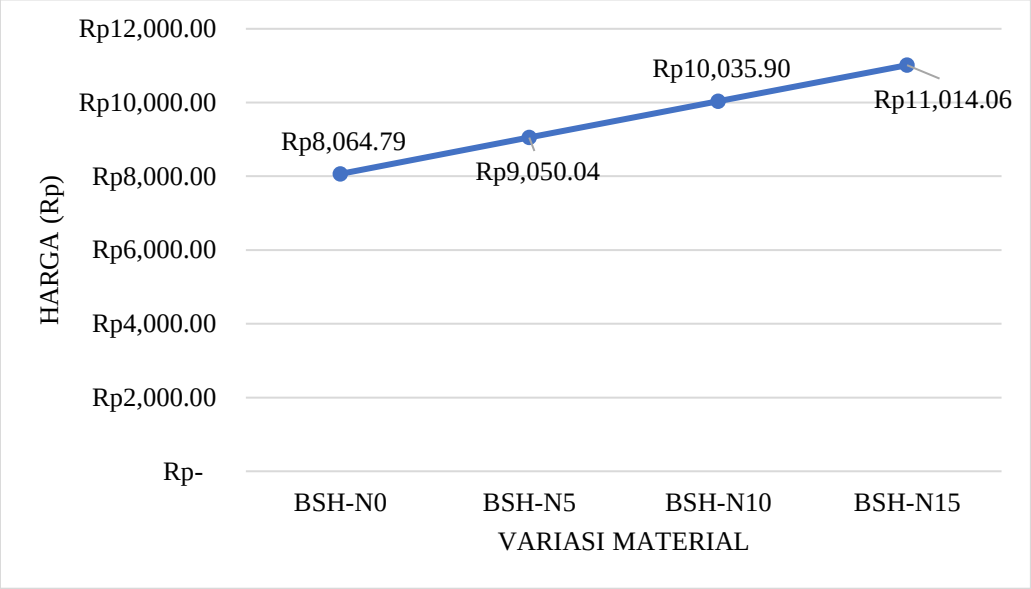
Variasi	Bahan Kultur	Kebutuhan	Satuan	Harga Satuan	Total Harga
	Amilase	7,25	mL	Rp3,00	Rp 21,75
	Urea	0,00261	Kg	Rp12.000,00	Rp 31,32
	Kalsium klorida	0,00087	Kg	Rp10.000,00	Rp 8,70
	Total Biaya				Rp3,048,77

Berdasarkan **Tabel 4.13** mengenai perhitungan kultur, kebutuhan antarvariasi disesuaikan dengan *job mix* yang telah dibuat sebelumnya. Pada perhitungan harga pada batako *self-healing* akan ditambahkan harga pembuatan kultur sesuai dengan variasinya. Selanjutnya pada **Tabel 4.15** akan dihitung biaya pembuatan batako antarvariasi dalam per buah.

Tabel 4.15 Analisis harga batako *self-healing* antarvariasi

Variasi	Bahan Baku	Jumlah	Satuan	Harga Satuan	Total Harga
BSH-N5	Semen	2,754	Kg	Rp 1.435,00	Rp 3.951,99
	Pasir	9,077	Kg	Rp 400,00	Rp 3.630,80
	Air	0,916	L	Rp 500,00	Rp 458,00
	Kultur Bakteri				Rp 1.009,25
	Total Biaya				Rp 9.050,04
BSH-N10	Semen	2,754	Kg	Rp 1.435,00	Rp 3.951,99
	Pasir	9,077	Kg	Rp 400,00	Rp 3.630,80
	Air	0,868	L	Rp 500,00	Rp 434,00
	Kultur Bakteri				Rp 2.018,50
	Total Biaya				Rp10.035,90
BSH-N15	Semen	2,754	Kg	Rp 1.435,00	Rp 3.951,99
	Pasir	9,077	Kg	Rp 400,00	Rp 3.630,80
	Air	0,819	L	Rp 500,00	Rp 409,00
	Kultur Bakteri				Rp 3,048,77
	Total Biaya				Rp11.014,06

Berdasarkan **Tabel 4.15** menunjukkan pasir dan semen memiliki harga yang sama karena tidak ada substitusi pada material tersebut. Sedangkan yang nilai membedakan terletak pada harga air dan kultur bakteri. Harga tertinggi terletak pada penggunaan semen yaitu sebesar Rp3.951,99 per satu buah batako. Sehingga, perbandingan harga antarvariasi batako *self-healing* yang dibandingkan dengan variasi kontrol dapat dilihat pada **Gambar 4.5**.



Gambar 4.5 Grafik harga batako antarvariasi

Berdasarkan **Gambar 4.5**, mempunyai kecenderungan kenaikan harga dengan bertambahnya penambahan kultur *Bacillus subtilis* dengan media jagung. Pada variasi kontrol BSH-N0, harga batako sebesar Rp8.064,79 per buah. Selanjutnya, harga meningkat seiring bertambahnya substitusi menjadi Rp9.050,04 pada BSH-N5, Rp10.035,90 pada BSH-10, dan Rp11,014,06 pada BSH-N15. Jika dibandingkan dengan variasi kontrol, peningkatan BSH-N5, BSH-N10, dan BSH-N15 masing-masing sebesar 12,22%, 24,44%, dan 36,57%. Kenaikan tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase substitusi kultur, semakin besar biaya yang diperlukan dalam pembuatan batako. Dengan demikian, variasi BSH-N0 memiliki harga terendah, sedangkan BSH-N15 memiliki harga tertinggi. Hasil ini menunjukkan adanya konsekuensi dari segi ekonomi dengan adanya penambahan kultur *Bacillus subtilis* dengan media jagung tersebut.

4.4 Analisis Pengujian

Berikut akan dijabarkan mengenai hasil pengamatan *self-healing*, pengujian daya serap, kuat tekan, dan pemeriksaan biaya pada setiap variasi pada batako. Analisis pengujian ini digunakan untuk mengetahui variasi mana yang memiliki nilai optimum dari sifat fisik, mekanik, dan harga. Berikut ini akan disajikan **Tabel 4.16**

mengenai rekapitulasi hasil pengujian yang telah dilakukan pada setiap variasi batako.

Tabel 4.16 Rekapitulasi rata-rata hasil pengujian

Variasi	Penutupan Retak Rata-Rata Hari Ke-28 (%)	Daya Serap Rata-Rata (%)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)	Harga 1 Per Satu Buah
0%	2,22	4,18	11,63	Rp 8.064,79
5%	64,39	3,20	15,61	Rp 9.050,04
10%	77,28	2,41	16,28	Rp10.035,90
15%	72,23	1,24	20,50	Rp11.014,06

Setiap variasi batako yang telah dilakukan memiliki hubungan terhadap besaran penutupan retak (*self-healing*), daya serap, kuat tekan, dan harga produksi. Dengan demikian, memerlukan analisis keseluruhan aspek untuk membandingkan keunggulan antarvariasi untuk memberikan rekomendasi variasi optimum antara aspek fisik, mekanik, dan ekonomis. Sehingga dari aspek tersebut dicari penutupan yang paling tinggi dibandingkan variasi kontrol, daya serap terendah dibandingkan variasi kontrol, kuat tekan tertinggi dibandingkan variasi kontrol, dan harga yang ekonomis dibandingkan variasi kontrol. Berikut ini akan disajikan **Tabel 4.17** mengenai hubungan antarvariasi dalam hasil penelitian batako dibandingkan dengan variasi kontrol yaitu 0%.

Tabel 4.17 Persentase hubungan hasil pengujian variasi batako inovasi dengan variasi batako kontrol

Jenis Pengujian	Variasi Batako			
	0%	5%	10%	15%
Penutupan Retak (%)	0	+2.800,45	+3.381,08	+3.153,60
Daya Serap (%)	0	+23,44	+42,34	+70,33
Kuat Tekan (%)	0	+34,22	+39,98	+76,27
Harga (%)	0	-12,22	-24,44	-36,57
Total	0	+2.845,89	+3.438,96	+3.263,63

Berdasarkan **Tabel 4.17**, hasil perbandingan persentase terhadap batako kontrol (0%) menunjukkan bahwa perubahan kultur *Bacillus subtilis* dengan media jagung memberikan perubahan pada aspek fisik, mekanik, dan ekonomis harga batako. Variasi 5% menunjukkan peningkatan penutupan retak sebesar 5.800,45%, penurunan daya serap air sebesar 23,44%, dan peningkatan kuat tekan sebesar

34,22%. Namun, harga produksinya meningkat sebesar 12,22% dibandingkan variasi kontrol.

Variasi 10% menghasilkan peningkatan penutupan retak tertinggi, yaitu sebesar 3.381,08%, disertai penurunan daya serap air sebesar 42,34% dan peningkatan kuat tekan sebesar 39,98%. Sementara itu, harga produksi meningkat sebesar 24,44%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi 10% memiliki kinerja terbaik dalam penutupan retak, sedangkan peningkatan biaya-biaya produksi menjadi salah satu aspek yang perlu dipertimbangkan.

Pada variasi 15%, penurunan daya serap air mencapai 70,33% dan peningkatan kuat tekan mencapai 76,27%, yang merupakan hasil terbaik untuk kedua parameter tersebut. Penutupan retaknya meningkat sebesar 3.153,60%, tapi masih lebih rendah dibandingkan dengan variasi 10%. Dengan demikian, variasi 15% lebih unggul dalam aspek mekanik dan daya serap air, sedangkan 10% memberikan hasil penutupan retak tertinggi. Pemilihan variasi optimum perlu mempertimbangkan perbedaan kinerja tersebut beserta konsekuensi biaya produksinya. Berdasarkan **Tabel 4.17** diperoleh hasil yang optimum pada variasi 10% dari nilai total keseluruhan sebesar +3.438,96 untuk penilaian pengujian pada penutupan retak, daya serap, kuat tekan, dan harga produksi.