

Kuat Tekan *Self-Healing* Concrete Berbasis Enkapsulasi Xanthan Gum

Muhammad Hafizh¹, Luthfi Muhammad Mauludin^{*2}, Keryanti³, Ambar Susanto⁴,
Gandhi Widiarnoko⁵

^{1,2,4}Program Studi Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Kota Bandung

³Program Studi Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung, Kota Bandung

⁵PT. Bintang Solusi Bersama, Kota Jakarta Selatan

e-mail: muhammad.hafizh.mtri22@polban.ac.id, [*2luthfi-mm@polban.ac.id](mailto:luthfi-mm@polban.ac.id)

Abstract

This study aims to evaluate the reaction and performance of self-healing concrete using Bacillus megaterium encapsulation with xanthan gum coating through a simple extrusion method. This study focuses on the effect of adding xanthan gum microcapsules on the compressive strength of concrete and efforts to determine the optimal microcapsule content to produce the best performance. Five variations of xanthan gum microcapsule percentages used were 1%, 2%, 3%, 4%, and 5%. The test results showed that the addition of 2% microcapsules produced the highest compressive strength, which was 25.6 MPa on the 7th day and 34.1 MPa on the 28th day. Meanwhile, further testing indicated that although the addition of 5% microcapsules was able to provide the greatest strength recovery, the amount of microcapsules that was too high actually caused a decrease in the overall concrete strength due to reduced homogeneity of the mixture. Therefore, the microcapsule content of 2% is considered the optimal content, because it is able to provide the best balance between increasing compressive strength, self-healing ability, and stability of concrete materials. This finding could be the first step in developing more sustainable concrete technology that is capable of repairing damage independently.

Keywords: *Bacillus megaterium, encapsulation, xanthan gum, compressive strength*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi reaksi dan performa beton self-healing yang menggunakan enkapsulasi bakteri Bacillus megaterium dengan penyalut xanthan gum melalui metode ekstrusi sederhana. Penelitian ini berfokus pada pengaruh penambahan mikrokapsul xanthan gum terhadap nilai kuat tekan beton serta upaya menentukan kadar mikrokapsul yang optimal untuk menghasilkan performa terbaik. Lima variasi persentase mikrokapsul xanthan gum yang digunakan adalah 1%, 2%, 3%, 4%, dan 5%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan mikrokapsul sebesar 2% menghasilkan kuat tekan tertinggi, yaitu 25,6 MPa pada hari ke-7 dan 34,1 MPa pada hari ke-28. Sementara itu, pengujian lanjutan mengindikasikan bahwa meskipun penambahan mikrokapsul sebesar 5% mampu memberikan pengembalian kekuatan terbesar, jumlah mikrokapsul yang terlalu tinggi justru menyebabkan penurunan kekuatan beton secara keseluruhan akibat berkurangnya homogenitas campuran. Oleh karena itu, kadar mikrokapsul sebesar 2% dianggap sebagai kadar optimal, karena mampu memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan kekuatan tekan, kemampuan self-healing, dan stabilitas material beton. Temuan ini dapat menjadi langkah awal dalam pengembangan teknologi beton yang lebih berkelanjutan dan mampu memperbaiki kerusakan secara mandiri.

Kata kunci: *Bacillus megaterium, enkapsulasi, xanthan gum, kuat tekan*

1. Pendahuluan

Beton merupakan material yang umumnya digunakan dalam dunia konstruksi. Baik dalam konstruksi gedung, jalan, bendungan, jembatan, dan sebagainya (Hamdy et al., 2022). Beton dijadikan material yang paling umum digunakan karena mempunyai beberapa kelebihan diantaranya yakni, mempunyai kekuatan yang tinggi, tahan terhadap tekanan, awet, dan mempunyai *workability* yang mudah (Rinaldi Basri & Zaki, 2018). Disamping kelebihanannya, beton juga mempunyai kekurangan yaitu beton lemah terhadap gaya tarik (Tandilino, 2018). Oleh karenanya diperlukan tulangan untuk menutupi kekurangannya tersebut.

Kerusakan yang umumnya terjadi pada beton adalah retak (Fajar Puspita et al., 2018). Kerusakan ini dapat diakibatkan oleh beberapa hal contohnya, usia beton yang sudah tua, beban yang melebihi kapasitasnya, bencana alam, kesalahan dalam perencanaan, dan sebagainya (Manuahe et al., 2014). Penyebab runtuhnya konstruksi berawal dari adanya retakan kecil yang kemudian lama kelamaan menjadi besar sehingga beton kehilangan kekuatannya (Khaliq & Ehsan, 2016). Oleh karena hal tersebut, perlu penanganan terkait retakan kecil tersebut untuk mencegah kegagalan dari suatu konstruksi. Cara penanganan retak ada berbagai macam diantaranya dengan melakukan *grouting*, injeksi *epoxy*, *patching*, *retrofitting* menggunakan serat baja, dan *shotcrete* (beton tembak) (Ali, 2023). Namun cara – cara tersebut mempunyai kekurangan yaitu hanya memperbaiki retak yang sudah terlihat secara visual.

Pada era modern ini, para peneliti telah menemukan sebuah cara untuk memperbaiki retakan khususnya retak kecil yang terjadi di dalam beton yaitu dengan membuat *Self-healing concrete* (K. Mahmud et al., 2021). *Self-healing concrete* adalah sebuah teknologi beton dimana beton bisa memperbaiki dirinya sendiri saat terjadi kerusakan dengan bantuan suatu *healing-agent* berupa mikroorganisme (Nugroho et al., 2015). Mikroorganisme yang digunakan ada berbagai macam, namun yang umumnya digunakan adalah bakteri. Cara kerja dari *self-healing concrete* sendiri adalah saat beton terjadi retak, *healing-agent* yang sudah tercampur dalam beton akan bereaksi dengan air yang kemudian mengeluarkan zat kalsium karbonat (CaCO_3) (Roig-Flores et al., 2021). Kalsium karbonat (CaCO_3) inilah yang nantinya akan mengisi dan menutup retak yang terjadi (Prayuda et al., 2020).

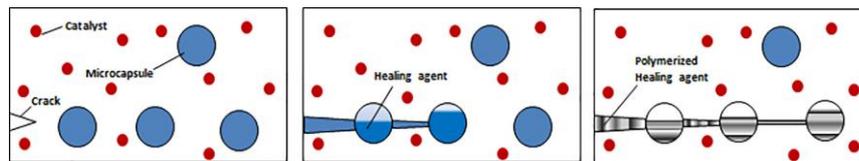


Sebelumnya telah dilakukan berbagai macam penelitian mengenai *self-healing concrete* ini salah satu contohnya seperti yang dilakukan oleh Mutia Gina pada tahun 2022 berjudul “*Compressive Strength of Bacterial-based Concrete Using Bacillus Megaterium*” (Savira et al., 2022). Penelitian yang dilakukan adalah membuat beton *self-healing* menggunakan bakteri *Bacillus Megaterium* sebagai *healing agent* dan penambahan flyash. Pencampuran bakteri dilakukan secara langsung ke dalam beton segar dengan variasi 1% dan 2% dari faktor air semen. Dalam penelitian tersebut, *healing agent* dicampur secara langsung ke dalam beton segar sehingga tidak diketahui apakah *healing agent*nya masih dalam keadaan yang baik atau tidak. Sebagai tindakan antisipasi agar *healing agent* tetap dalam keadaan baik, maka diperlukan suatu metode untuk menjaga *self-healing* yang terjadi yaitu dengan memberi lapisan atau membungkus *healing agent* tersebut dengan suatu zat (Asri et al., 2021). Metode ini disebut sebagai metode enkapsulasi.

Metode enkapsulasi adalah sebuah metode untuk membungkus mikroorganisme, enzim, atau zat lain dalam suatu material agar terisolasi dari lingkungan luar yang mengganggu keadaan suatu mikroorganisme, enzim, atau zat lain tersebut (Nur Hidayah & Lubis, 2021). Teknik untuk enkapsulasi juga ada berbagai macam jenis, diantaranya adalah teknik koaservasi, *spray drying*, *spray cooling*, *fluidized bed coating*, *freeze drying*, hingga yang paling sederhana adalah teknik ekstrusi (Jyothi et al., 2010). Mekanisme penggunaan metode enkapsulasi pada beton adalah saat beton mengalami retak, mikrokapsul yang sudah mengandung *healing agent* diharapkan pecah dan mengeluarkan *healing agent* tersebut sehingga dapat bereaksi dengan air dan oksigen yang kemudian

membentuk zat kalsium karbonat (CaCO_3) yang akan menutup retakan tersebut (Mauludin & Oucif, 2019).

Material pembungkus untuk enkapsulasi ada berbagai macam. Pada umumnya material yang sering digunakan adalah Maltodekstrin, *Gum arabic*, Alginat, Kitosan, Karagenan, *Cyclodextrin*, *Mesquite gum*, *Pullulan*, dan *Xanthan gum* (Aminah & Hersoelistyorini, 2021). Pada penelitian ini digunakan *Xanthan gum* sebagai material penyalut enkapsulasi bakteri *Bacillus megaterium*. *Xanthan gum* sendiri merupakan suatu biopolimer polisakarida alami yang terbuat dari bakteri *Xanthomonas campestris* dan ditemukan pada tahun 1950 di *Northern Regional Research Laboratories* (NRRL) (Garcó Âa-Ochoa et al., 2000). *Xanthan gum* dapat digunakan sebagai material enkapsulasi karena memiliki beberapa sifat, diantaranya adalah mempunyai kelarutan tinggi dalam air dingin dan panas, mempunyai viskositas yang tinggi, pengemulsi alami, rendah kalor, pseudoplastisitas, mempunyai ketahanan pH yang tinggi, dan mempunyai ketahanan yang suhu yang cukup tinggi (Petri, 2015).



Gambar 1 Ilustrasi pecahnya mikrokapsul saat beton mengalami retak

Dari latar belakang tersebut, peneliti tertarik untuk meneliti tentang penggunaan metode enkapsulasi bakteri *Bacillus Megaterium* dengan penyalut *Xanthan gum*. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui bagaimana reaksi dari penggunaan mikrokapsul tersebut terhadap nilai kuat tekan beton dan mengetahui penambahan kadar mikrokapsul yang optimum untuk ditambahkan ke dalam beton.

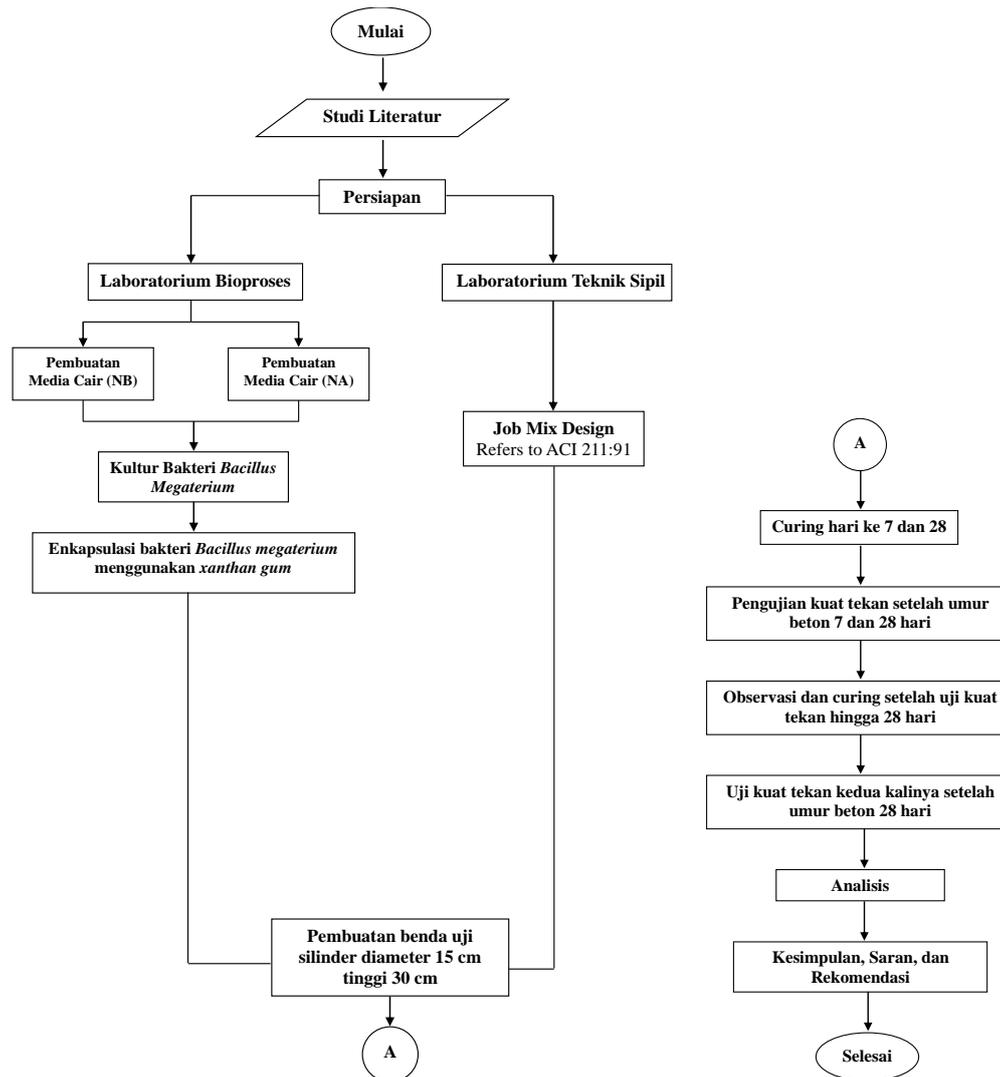
2. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental yang dilakukan di laboratorium bioproses teknik kima Politeknik Negeri Bandung untuk proses kultur bakteri dan laboratorium bahan teknik sipil Politeknik Negeri Bandung untuk proses pembuatan dan pengujian sampel beton. Bakteri yang digunakan berasal dari spesies *Bacillus sp.* yaitu *Bacillus megaterium* dengan bahan penyalut mikrokapsul adalah *xanthan gum*. Sampel beton yang dibuat berbentuk silinder berdiameter 15 cm dengan tinggi 30 cm.

Beberapa batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mutu beton rencana F_c' 30 MPa. Beton yang digunakan adalah beton instan dengan deskripsi pada produk dapat mencapai K-350 dan beton dibuat di laboratorium bahan menggunakan mixer.
2. Beton yang digunakan adalah beton instan bermerk BEPMIX.
3. Variasi penambahan mikrokapsul sebesar 1, 2, 3, 4, dan 5% dari berat air.
4. Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada saat beton berumur 7 dan 28 hari

Tahapan penelitian ini diawali dengan proses kultur bakteri *Bacillus megaterium* kemudian dilanjutkan dengan membuat mikrokapsul *xanthan gum*, pembuatan sampel silinder beton yang dicampur dengan mikrokapsul, pengujian sampel, dan terakhir proses analisis dan kesimpulan. Untuk membantu mempermudah jalannya penelitian ini tersaji bagan alir pada **Gambar 2**. berikut.



Gambar 2. Bagan alir penelitian

Tahapan pertama dari penelitian ini adalah pengembangbiakkan bakteri atau dapat disebut juga sebagai kultur bakteri atau inokulasi bakteri. Tahapan ini diawali dengan pembuatan media cair dan media padat sebagai tempat berkembang sekaligus sebagai makanan dari bakteri yang dikembangbiakkan. Media padat yang digunakan adalah Nutrient Agar (Himedia) dan Agar Bacto (Oxoid) sedangkan media cair yang digunakan adalah Nutrient Broth (MERCK). Pembuatan media cair diawali dengan menimbang Nutrient Agar bubuk sebanyak 2,8 % (b/v) dan Agar Bacto bubuk sebanyak 1,5 % (b/v). Setelah ditimbang, kedua bubuk tersebut dilarutkan ke dalam 100 mL air dan dibagi ke dalam beberapa tabung reaksi. 1 tabung reaksi berisi ± 5 mL. Setelah dibagi secara merata, larutan tersebut disterilkan menggunakan autoklaf bersuhu 121°C dengan tekanan 15 lbs selama 15 menit. Media yang sudah disterilkan kemudian diokulasi bibit bakteri *Bacillus megaterium* dan dimasukkan ke dalam inkubator bersuhu $31 - 34^{\circ}\text{C}$ selama 2 – 3 hari.



Gambar 3. Media padat yang sudah diokulasi bakteri *Bacillus megaterium*

Untuk pembuatan media cair diawali dengan melarutkan 13 gram Nutrient Broth bubuk ke dalam 1000 mL aquades kemudian diaduk dan dipanaskan hingga mendidih. Setelah mendidih, media cair tersebut kemudian disterilkan menggunakan autoklaf dengan suhu 121 °C dan tekanan 15 lbs selama 15 menit. Media cair yang sudah disterilkan kemudian diokulasi bakteri dari media padat yang sudah dibuat sebelumnya dengan cara mengambil 2 – 3 ose bakteri. Media cair yang sudah diokulasi bakteri, dimasukkan ke dalam inkubator shaker bersuhu 31 – 34 °C selama 2 – 3 hari. Ciri – ciri bakteri sudah berkembang pada media cair adalah warna media cair tersebut menjadi keruh.



Gambar 4. Media cair yang sudah diokulasi bakteri *Bacillus megaterium*

Tahapan proses pembuatan mikrokapsul atau sering disebut juga dengan proses enkapsulasi diawali dengan menimbang *xanthan gum* bubuk sebanyak 4,2 % (b/v) yang dilarutkan ke dalam 120 mL aquades. Larutan *xanthan gum* dipasterisasi pada suhu 80°C selama 15 menit agar larutan tersebut steril. Setelah dingin, larutan *xanthan gum* dicampur dengan larutan bakteri dengan perbandingan 1 : 4 (1 mL bakteri : 4 mL larutan *xanthan gum*). Campuran larutan tersebut dimasukkan ke dalam syringe lalu ditetaskan ke dalam larutan CaCl₂ 0,2 M hingga membentuk bulatan – bulatan mikrokapsul.



Gambar 5. Mikrokapsul *xanthan gum* yang berisi bakteri *Bacillus megaterium*

Tahapan selanjutnya dari penelitian ini adalah pembuatan benda uji silinder diameter 15 cm dengan tinggi 30 cm. Pembuatan dan pengujian benda uji mengacu pada SNI 1974 : 2011. Jumlah sampel yang dibuat tersaji pada **Tabel 1**.

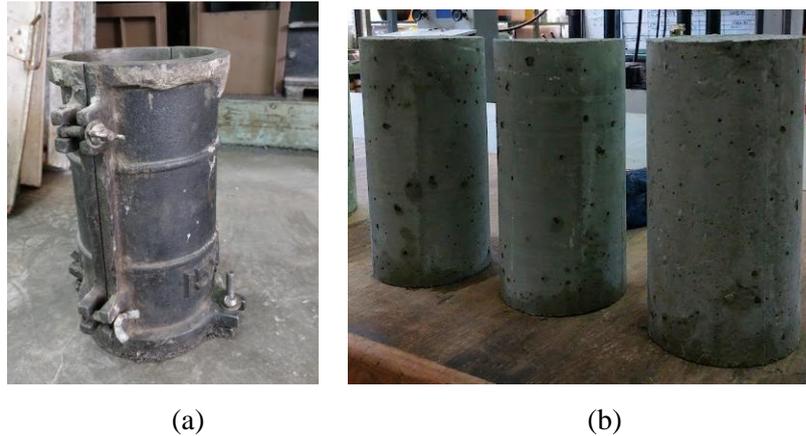
Tabel 1. Variasi sampel yang dibuat

Variasi	Umur	
	7 hari	28 hari
Beton Normal	3	3
Variasi <i>Xanthan Gum</i> 1% (BVX 1%)	3	3
Variasi <i>Xanthan Gum</i> 2% (BVX 2%)	3	3
Variasi <i>Xanthan Gum</i> 3% (BVX 3%)	3	3
Variasi <i>Xanthan Gum</i> 4% (BVX 4%)	3	3
Variasi <i>Xanthan Gum</i> 5% (BVX 5%)	3	3
Total Sampel	36	

Sumber: Pengolahan data

Pemilihan variasi yang digunakan didasarkan dari penelitian yang dilakukan oleh Mauludin et al., (2018) tentang pembuatan model sampel yang diisi mikrokapsul secara numerikal menggunakan aplikasi abacus dan python. Penelitian tersebut menggunakan persentase penambahan kapsul sebanyak 2, 4, dan 10%. Hasil penambahan kapsul yang optimum untuk dicampur ke dalam beton adalah 2%. Karena jarak penambahan mikrokapsul yang terlalu jauh dan penelitian tersebut masih numerikal, maka pada penelitian ini digunakan variasi 1, 2, 3, 4, dan 5% dari berat air yang digunakan dan melakukan penelitian eksperimental.

Pembuatan benda uji beton diawali dengan mempersiapkan alat dan bahan yang akan digunakan. Setelah itu, mixer diisi dengan agregat kasar, agregat halus, dan semen terlebih dahulu kemudian diaduk merata. Setelah dirasa tercampur rata, air dimasukkan sedikit demi sedikit. Sebelum dimasukkan ke dalam cetakan, beton diuji slump. Nilai slump mengacu pada PBI 1971 NI 2 yaitu sebesar 7 – 12 cm. Setelah nilai slump mencukupi, mikrokapsul dituang ke dalam mixer sesuai takaran. Mixer diaduk kembali selama 1 – 2 menit agar mikrokapsul tersebar merata di dalam beton. Beton segar kemudian dituang ke dalam cetakan. Cetakan dibuka setelah 24 jam pasca pengecoran.



Gambar 6. (a) Cetakan benda uji (b) Benda uji yang sudah dikeluarkan dari cetakan

Tahap terakhir dari penelitian ini adalah pengujian dan observasi secara visual. Uji tekan dilakukan sebanyak 2 kali. Uji tekan pertama dilakukan saat beton mencapai umur 7 dan 28 hari. Setelah diuji tekan, beton diobservasi untuk melihat perkembangan dari proses *healing* yang dilakukan oleh bakteri *Bacillus megaterium* di dalam benda uji selama 7, 14, dan 28 hari. Setelah 28 hari, benda uji akan diuji tekan lagi untuk melihat pengembalian kekuatannya.

3. Hasil dan Pembahasan

Dari hasil pengujian dan observasi visual yang dilakukan, didapatkan bahwa kuat tekan paling tinggi saat beton segar ditambahkan mikrokapsul *xanthan gum* sebanyak 2% pada hari ke 7 maupun hari ke 28. Benda uji yang dibuat merupakan beton *self-healing* yang mempunyai kemampuan untuk menyembuhkan dirinya saat terjadi keretakan. Penyembuhan ini dicapai dengan cara menambahkan *healing agent* berupa bakteri *Bacillus megaterium* dan membungkusnya dengan suatu biopolimer yang dibuat menggunakan *xanthan gum*. Saat terjadi keretakan pada beton, *healing agent* yang terbungkus oleh biopolimer *xanthan gum* diharapkan pecah dan mengisi retakan kemudian bereaksi dengan air dan udara membentuk kalsium karbonat (CaCO_3). Kalsium karbonat (CaCO_3) inilah yang nantinya akan menutup retakan tersebut dan mengembalikan kekuatan beton.



(a) Beton Variasi *Xanthan gum* (BVX) 1%



(b) Beton Variasi *Xanthan gum* (BVX) 2%



(c) Beton Variasi *Xanthan gum* (BVX) 3%

(d) Beton Variasi *Xanthan gum* (BVX) 4%(e) Beton Variasi *Xanthan gum* (BVX) 5%**Gambar 7. Sampel yang telah diuji tekan berumur 7 dan 28 hari**

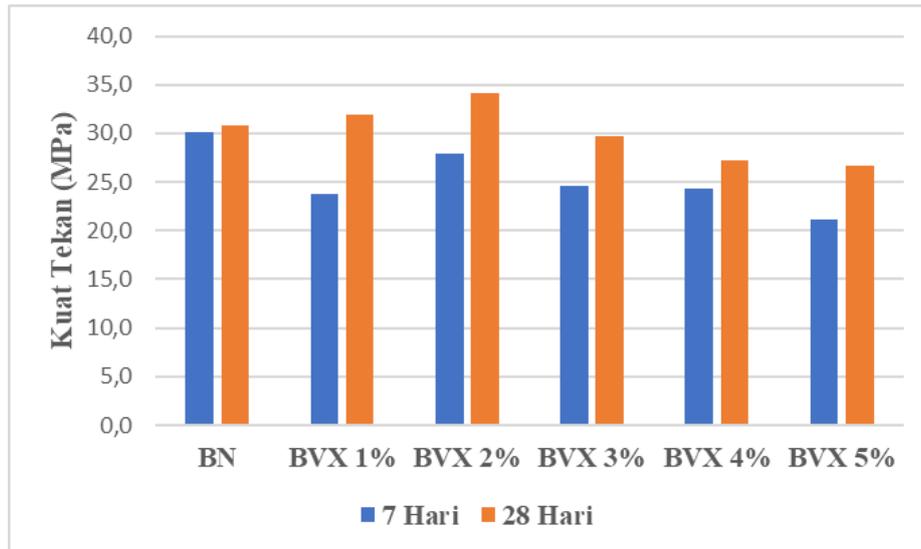
Hasil kuat tekan beton hari ke 7 dan 28 tersaji pada gambar dan tabel di bawah ini.

Tabel 2. Kuat tekan rata - rata umur 7 hari

No.	Nama Sampel	Dimensi Sampel		Kuat Tekan Rata – rata (Mpa)
		D (mm)	T (mm)	
1	Beton Normal (BN)	150	300,5	30,8
2	Beton Variasi <i>Xanthan gum</i> 1% (BVX 1%)	150	300	23,9
3	Beton Variasi <i>Xanthan gum</i> 2% (BVX 2%)	150	303	25,6
4	Beton Variasi <i>Xanthan gum</i> 3% (BVX 3%)	149,5	302	24,3
5	Beton Variasi <i>Xanthan gum</i> 4% (BVX 4%)	150	300	23,6
6	Beton Variasi <i>Xanthan gum</i> 5% (BVX 5%)	149,5	300	12,8

Tabel 3. Kuat tekan rata - rata umur 28 hari

No.	Nama Sampel	Dimensi Sampel		Kuat Tekan Rata – rata (Mpa)
		D (mm)	T (mm)	
1	Beton Normal (BN)	150	300	30,8
2	Beton Variasi <i>Xanthan gum</i> 1% (BVX 1%)	151,5	302	31,9
3	Beton Variasi <i>Xanthan gum</i> 2% (BVX 2%)	150	299	34,1
4	Beton Variasi <i>Xanthan gum</i> 3% (BVX 3%)	149	302	29,7
5	Beton Variasi <i>Xanthan gum</i> 4% (BVX 4%)	151	300	27,2
6	Beton Variasi <i>Xanthan gum</i> 5% (BVX 5%)	150	300	26,6



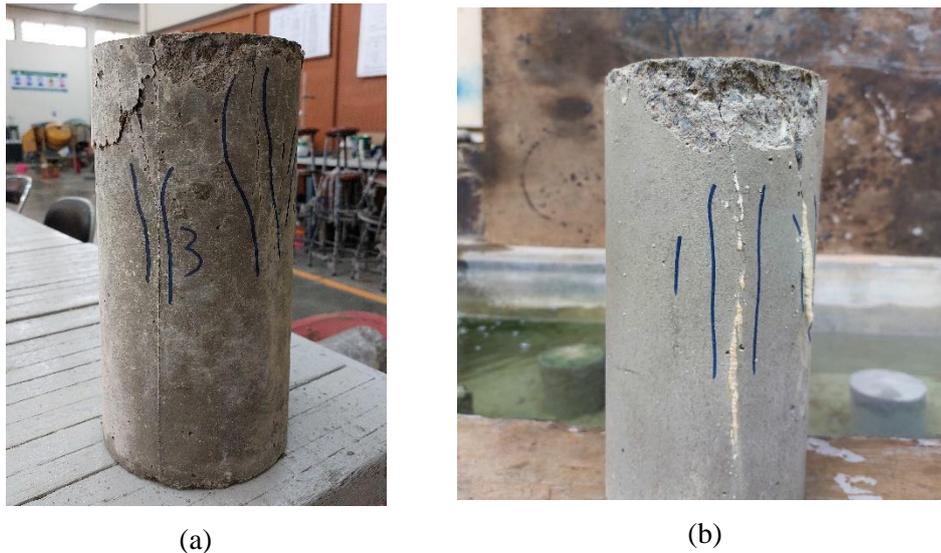
Gambar 8. Grafik perbandingan kuat tekan 7 hari dan 28 hari

Dari hasil pengujian yang dilakukan dan dari data yang tersaji pada **Tabel 2.**, **Tabel 3.**, dan **Gambar 8.** menunjukkan bahwa kuat tekan beton normal sebesar 30,1 MPa pada hari ke 7, dan 30,8 MPa pada hari ke 28. Peningkatan mutu terjadi pada saat beton ditambahkan mikrokapsul 1% hingga 2%. Peningkatan terbesar terjadi pada saat penambahan mikrokapsul 2% yang mempunyai kuat tekan sebesar 27,9 MPa pada hari ke 7 dan 34,1 MPa pada hari ke 28. Peningkatan ini terjadi karena adanya mikrokapsul yang pecah pada saat pengadukan berlangsung sehingga bakteri bereaksi dengan kalsium laktat yang sebelumnya sudah dicampurkan membentuk kalsium karbonat. Zat inilah yang menutup rongga – rongga yang kosong sehingga kekuatannya bertambah. Pada saat beton segar ditambahkan kembali mikrokapsul menjadi 3 – 5%, kuat tekan mengalami penurunan yang cukup signifikan. Hal ini dikarenakan semakin banyak mikrokapsul yang ditambahkan, maka beton tersebut akan kehilangan volumenya karena digantikan oleh mikrokapsul tersebut. Hal ini diperjelas juga oleh penelitian yang dilakukan oleh Soysal et al., (2020) bahwa semakin banyak mikrokapsul yang ditambahkan, maka kekuatan beton juga akan berkurang. Hal ini berbanding terbalik dengan semakin banyak mikrokapsul yang ditambahkan, maka beton mempunyai kekuatan penyembuhan diri yang tinggi juga.

Setelah beton diuji kuat tekannya, beton *dicuring* kembali selama 28 hari kemudian diuji tekan kembali untuk kedua kalinya untuk melihat pengembalian kekuatan akibat proses penyembuhan diri. Hasil dari pengujian kuat tekan yang kedua tersaji pada **Tabel 4.**

Tabel 4. Persentase pengembalian kekuatan beton

Nama Sampel	Kuat tekan 1	Kuat tekan 2	Persentase pengembalian kekuatan (%)
	(MPa) 28 hari	(MPa) 28 days	
Beton Variasi <i>Xanthan gum</i> 1% (BVX 1%)	30,76	30,84	96,69
Beton Variasi <i>Xanthan gum</i> 2% (BVX 2%)	31,90	32,26	94,53
Beton Variasi <i>Xanthan gum</i> 3% (BVX 3%)	34,12	26,60	89,52
Beton Variasi <i>Xanthan gum</i> 4% (BVX 4%)	29,71	28,01	103,13
Beton Variasi <i>Xanthan gum</i> 5% (BVX 5%)	27,16	29,14	109,42



Gambar 9. (a) benda uji yang pasca uji tekan sebelum curing, (b) benda uji setelah diuji tekan dan curing selama 28 hari

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan yang kedua yang tersaji pada **Tabel 4.**, diperoleh persentase pengembalian kekuatan yang paling besar terdapat pada Beton Variasi *Xanthan gum* (BVX) 5% sebesar 109,42 %. Hal ini terjadi karena semakin banyak mikrokapsul yang digunakan, semakin besar kemampuan proses penyembuhan beton oleh bakteri *Bacillus megaterium*. Hasil pengujian tersebut diperjelas oleh penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Putri, (2022) dengan menggunakan bakteri limbah sayuran. Persentase penambahan bakteri limbah sayur yang digunakan adalah sebesar 2, 4, 6, dan 8%. Dari hasil pengujian tersebut didapatkan bahwa saat beton ditambahkan bakteri sedikit demi sedikit, pengembalian kekuatan atau kemampuan penyembuhan diri pada beton akan semakin meningkat. Berdasarkan **Gambar 9.**, terlihat bahwa pada retakan beton terdapat zat berwarna putih. Zat berwarna putih tersebut adalah kalsit atau sering disebut juga dengan kalsium karbonat (CaCO_3). Kalsium karbonat (CaCO_3) atau kalsit ini terbentuk akibat adanya reaksi bakteri *Bacillus megaterium* dengan air dan udara saat mikrokapsul pecah karena retakan yang terbentuk dari beban pengujian. Zat tersebut juga berperan sebagai penutup retakan sehingga beton mempunyai 90% pengembalian kekuatan dari pengujian kuat tekan yang pertama. Mekanisme ini adalah mekanisme dari *self-healing concrete*.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh kuat tekan paling besar terjadi saat penambahan mikrokapsul *xanthan gum* 2% yaitu sebesar 25,6 MPa pada hari ke 7 dan 34,1 MPa pada hari ke 28. Dari hasil pengujian kuat tekan yang kedua, diperoleh pengembalian kekuatan terbesar adalah penambahan mikrokapsul *xanthan gum* sebanyak 5%. Namun, perlu diingat dalam hal ini, semakin banyak persentase mikrokapsul *xanthan gum* yang digunakan, maka kekuatan beton juga akan menurun. Berdasarkan hasil dari pengujian – pengujian yang telah dilakukan, maka persentase mikrokapsul yang optimum untuk ditambahkan ke dalam campuran beton dengan mutu f_c 30 MPa adalah sebesar 2%.

5. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didukung dan dibiayai oleh Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) berdasarkan perjanjian pendanaan Kontrak: 81/IV/KS/11/2022 dan B/4510/PL1/PG.00.00/2022. Dukungan tersebut kami sampaikan dengan rasa terima kasih. Peneliti juga berterima kasih kepada editor dan reviewer jurnal Borneo Engineering yang telah memberikan banyak saran dan masukan sehingga jurnal ini layak diterbitkan pada rumah jurnal ini.

Daftar Pustaka

- Ali, L. H. (2023). Analisa Retrofit Beton Pasca Kegagalan dan Kelenturan Menggunakan Metode Injeksi Epoxy. *Bulletin of Civil Engineering*, 3(1), 31–36. <https://doi.org/10.18196/bce.v3i1.17671>
- Aminah, S., & Hersoelistyorini, W. (2021). Review Artikel : Enkapsulasi Meningkatkan Kualitas Komponen Bioaktif Minuman Instan. *Seminar Nasional Publikasi Hasil - Hasil Penelitian Dan Pengabdian Masyarakat*. <file:///D:/Kuliah%20S2/Tesis/Jurnal/Jurnal%20Borneo/sumber%20jurnal/964-1844-1-SM.pdf>
- Asri, D., Dan, A., & Wibowo, A. A. (2021). TEKNOLOGI ENKAPSULASI: TEKNIK DAN APLIKASINYA. *Jurnal Teknologi Separasi*, 2, 202–209. <http://distilat.polinema.ac.id>
- Fajar Puspita, F., Budi Aulia, T., & Afifuddin, M. (2018). Analisis Retak Lentur pada Balok Beton Bertulang Mutu Tinggi yang Diperbaiki Dengan Injeksi Epoxy. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala*, 1(4), 831–844.
- Garcõ Âa-Ochoa, F., Santos, V. E., Casas, J. A., & Go Âmez, E. (2000). Xanthan gum: production, recovery, and properties. *Elsevier*, 18.
- Hamdy, F., Lapian, F. E., Tumpu, M., Mansyur, Irianto, Mabui, D. S. S., Raidyarto, A., Sila, A. A., Masdiana, Rangan, P. R., & Hamkah. (2022). *Teknologi Beton* (Irianto, M. Tumpu, Mansyur, & Mahyuddin, Eds.; 1st ed., Vol. 1). CV. Tohar Media.
- Jyothi, N. V. N., Prasanna, P. M., Sakarkar, S. N., Prabha, K. S., Ramaiah, P. S., & Srawan, G. Y. (2010). Microencapsulation techniques, factors influencing encapsulation efficiency. In *Journal of Microencapsulation* (Vol. 27, Issue 3, pp. 187–197). <https://doi.org/10.3109/02652040903131301>
- K. Mahmud, A., A. Al-Jabbar, L., & M. Salman, M. (2021). BACTERIA BASED SELF-HEALING CONCRETE :A REVIEW. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 25(Special), 3-43-3–56. <https://doi.org/10.31272/jeasd.conf.2.3.4>
- Khaliq, W., & Ehsan, M. B. (2016). Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. *Construction and Building Materials*, 102, 349–357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006>
- Manuahe, R., Sumajouw, M. D. J., & Windah, R. S. (2014). KUAT TEKAN BETON GEOPOLYMER BERBAHAN DASAR ABU TERBANG (FLY ASH). *Jurnal Sipil Statik*, 2(6), 277–282.
- Mauludin, L. M., & Oucif, C. (2019). Modeling of self-healing concrete: A review. In *Journal of Applied and Computational Mechanics* (Vol. 5, Issue Special Issue 3, pp. 526–539). Shahid Chamran University of Ahvaz. <https://doi.org/10.22055/jacm.2017.23665.1167>
- Mauludin, L. M., Zhuang, X., & Rabczuk, T. (2018). Computational modeling of fracture in encapsulation-based self-healing concrete using cohesive elements. *Composite Structures*, 196, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.066>
- Nugroho, A., Satyarno, I., & Subyakto. (2015). Bacteria as self-healing agent in mortar cracks. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 47(3), 279–295. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2015.47.3.4>
- Nur Hidayah, T., & Lubis, N. (2021). Enkapsulasi Probiotik Lactobacillus sp. Menggunakan Biopolimer Alginat dan Kitosan dengan Metode Satu Tahap. *Serambi Engineering*, VI(2).

- Petri, D. F. S. (2015). Xanthan gum: A versatile biopolymer for biomedical and technological applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(23). <https://doi.org/10.1002/app.42035>
- Prayuda, H., Soebandono, B., Cahyati, M. D., & Monika, F. (2020). Repairing of Flexural Cracks on Reinforced Self-Healing Concrete Beam using Bacillus Subtillis Bacteria. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INTEGRATED ENGINEERING*, 12(4), 300–309. <https://doi.org/10.30880/ijie.2020.12.04029>
- Putri, C. R. (2022). *Studi Eksperimental Pengaruh Ekstrak Limbah Sayuran Terhadap Nilai Kuat Tekan Beton dalam Proses Self-Healing Concrete (SHC)* [Universitas Islam Riau]. <https://repository.uir.ac.id/10533/1/173110009.pdf>
- Rinaldi Basri, D., & Zaki, A. (2018). PENGARUH LIMBAH PLASTIK BOTOL (LELEH) SEBAGAI MATERIAL TAMBAH TERHADAP KUAT LENTUR BETON. *Jurnal Rab Construction Research*, 3(1).
- Roig-Flores, M., Formagini, S., & Serna, P. (2021). Self-healing concrete-what is it good for? *Materiales de Construcción*, 71(341). <https://doi.org/10.3989/MC.2021.07320>
- Savira, M. G., Mauludin, L. M., Keryanti, & Ujang, R. (2022). Compressive Strength of Bacteria-Based Concrete Materials Using Bacillus Megaterium Bacteria. *Proceeding: Batavia Transdisciplinary Symposium (BTS) (Accepted)*.
- Soysal, A., Milla, J., King, G. M., Hassan, M., & Rupnow, T. (2020). Evaluating the Self-Healing Efficiency of Hydrogel-Encapsulated Bacteria in Concrete. *Transportation Research Record*, 2674(6), 113–123. <https://doi.org/10.1177/0361198120917973>
- Tandilino, A. (2018). Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Sistem Rangka dengan Variasi Jarak Spasi. *Jurnal Tugas Akhir*, 1–24.