

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton adalah salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia. Pemahaman mendalam tentang definisi, komposisi, sifat mekanis, dan faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan beton sangat penting bagi para insinyur dan profesional konstruksi untuk merancang dan membangun struktur yang aman dan efisien.

2.1.1 Definisi dan Komposisi Beton

Beton adalah bahan bangunan komposit yang terdiri dari campuran semen, agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil atau batu pecah), dan air. Menurut (Badan Standardisasi Nasional, 2019), beton didefinisikan sebagai campuran antara semen, air, dan agregat dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk massa padat, hal ini diuraikan pada Gambar 2.1 Komponen Campuran Beton. Komposisi utama beton meliputi:

1. Semen: Berfungsi sebagai bahan pengikat yang mengikat agregat menjadi massa padat.
2. Agregat Halus (Pasir): Mengisi rongga-rongga antara agregat kasar dan meningkatkan kepadatan beton.
3. Agregat Kasar (Kerikil atau Batu Pecah): Memberikan kekuatan dan stabilitas pada beton.
4. Air: Memicu reaksi kimia dengan semen (hidrasi) dan mempengaruhi *workability* beton.



Gambar 2. 1 Komponen Campuran Beton

Sumber : Megacon *Concrete* (2019).

Proporsi yang tepat antara komponen-komponen ini sangat menentukan kualitas dan karakteristik beton yang dihasilkan

2.1.2 Sifat Mekanis Beton

Sifat mekanis beton mencakup berbagai aspek yang menentukan kinerja beton dalam struktur, antara lain:

1. **Kuat Tekan:** Kemampuan beton menahan beban tekan tanpa mengalami keruntuhan. Kuat tekan merupakan parameter utama dalam penilaian kualitas beton.
2. **Kuat Tarik:** Kemampuan beton menahan beban tarik. Beton memiliki kuat tarik yang rendah, sehingga sering diperkuat dengan tulangan baja untuk menahan beban tarik.
3. **Modulus Elastisitas:** Menggambarkan kekakuan beton, yaitu kemampuan beton untuk mengalami deformasi elastis saat diberi beban.
4. **Ketahanan terhadap Faktor Lingkungan:** Kemampuan beton untuk bertahan terhadap kondisi lingkungan seperti perubahan suhu, kelembaban, dan serangan kimia.

Sifat-sifat ini sangat dipengaruhi oleh komposisi beton, proses pembuatan, dan kondisi lingkungan selama dan setelah proses pengerasan.

2.1.3 Faktor yang Mempengaruhi Kekuatan Beton

Beberapa faktor utama yang mempengaruhi kekuatan beton meliputi:

1. Rasio air semen (faktor w/c): Semakin kecil rasio air terhadap semen (w/c), maka mutu beton yang dihasilkan umumnya akan semakin tinggi. Sebaliknya, rasio w/c yang terlalu tinggi dapat menyebabkan beton memiliki kekuatan yang rendah dan permeabilitas yang tinggi, sehingga kurang tahan terhadap pengaruh lingkungan.
2. Ukuran dan Kualitas Agregat: Agregat yang keras dan padat akan meningkatkan kekuatan beton. Ukuran agregat juga mempengaruhi *workability* dan kekuatan beton.
3. Proses *Curing*: Perawatan beton setelah pengecoran (*curing*) sangat penting untuk mencapai kekuatan yang diinginkan. *Curing* yang baik mencegah penguapan air yang terlalu cepat, sehingga proses hidrasi semen dapat berlangsung optimal.
4. Umur Beton: Kekuatan beton meningkat seiring dengan bertambahnya umur beton, terutama pada 28 hari pertama setelah pengecoran.
5. Jenis dan Jumlah Semen: Jenis semen dan jumlah yang digunakan mempengaruhi reaksi hidrasi dan akhirnya kekuatan beton.
6. Kualitas Air: Air yang digunakan harus bersih dan bebas dari bahan kimia berbahaya yang dapat mempengaruhi proses hidrasi dan kekuatan beton.

2.2 Retak Pada Beton

Retak pada beton merupakan salah satu permasalahan utama yang dapat mempengaruhi kinerja dan umur layan suatu struktur. Retak dapat terjadi akibat berbagai faktor, baik dari dalam beton itu sendiri maupun dari pengaruh lingkungan eksternal. Retak pada beton harus diperhatikan dengan serius karena dapat mengurangi kekuatan struktural, meningkatkan permeabilitas, serta mempercepat korosi pada tulangan baja yang tertanam di dalamnya. Oleh karena itu, pemahaman tentang jenis-jenis retak, penyebab, serta dampaknya sangat penting dalam upaya mitigasi dan perbaikan struktur beton.

2.2.1 Jenis Retak pada Beton

Retak pada beton dapat diklasifikasikan berdasarkan berbagai faktor, seperti penyebab, lokasi, dan pola retak yang terbentuk, hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.2 dan dijelaskan pada Tabel 2.1 Jenis – Jenis Retak Beton. Berikut adalah beberapa jenis retak yang umum terjadi pada beton:

Tabel 2. 1 Klasifikasi Jenis Retak Pada Beton

Jenis Retak	Ciri - Ciri	Penyebab	Dampak
<i>Hairline Cracks</i>	1. Retakan mikro dengan lebar < 0.1 mm.	1. Fluktuasi suhu.	1. Tidak signifikan terhadap kekuatan struktur.

Lanjutan Tabel 2.1 Klasifikasi Jenis Retak Pada Beton

Jenis Retak	Ciri - Ciri	Penyebab	Dampak
	2. Umumnya terjadi pada permukaan beton. 3. Tidak selalu terlihat tanpa pencahayaan atau alat bantu.	2. Evaporasi cepat akibat kondisi lingkungan. 3. Penyusutan permukaan akibat pengeringan tidak merata.	2. Berpotensi menjadi jalur infiltrasi air dan zat agresif. 3. Dapat memicu korosi tulangan internal.
<i>Shrinkage Cracks</i>	1. Retak acak di permukaan. 2. Berbentuk pola seperti “crazing” atau jaring laba-laba.	1. Penyusutan plastik (evaporasi saat plastis) 2. Penyusutan kering setelah beton mengalami pengerasan awal.	1. Melemahkan permukaan beton. 2. Memungkinkan penetrasi air 3. Potensi kerusakan lebih besar jika tidak dikendalikan.

Lanjutan Tabel 2.1 Klasifikasi Jenis Retak Pada Beton

Jenis Retak	Ciri - Ciri	Penyebab	Dampak
Settlement Cracks	1. Retak vertikal/diagonal. 2. Umumnya muncul di atas tulangan atau sambungan. 3. Berkaitan dengan segmentasi volume beton.	1. Penurunan massa beton sebelum mencapai waktu awal pengikatan. 2. Terhalang oleh tulangan atau sambungan struktur.	1. Dapat mengganggu kontinuitas struktural lokal. 2. Menjadi titik lemah terhadap masuknya air dan karbonasi. 3. Membutuhkan perhatian khusus jika terjadi di area struktural penting.

Lanjutan Tabel 2.1 Klasifikasi Jenis Retak Pada Beton

Jenis Retak	Ciri - Ciri	Penyebab	Dampak
Structural Cracks	1. Retakan signifikan dengan lebar > 0.3 mm. 2. Mengikuti arah tegangan utama atau pola beban. 3. Umumnya terjadi pada elemen utama (balok, kolom).	1. Beban berlebih (overloading). 2. Cacat dalam desain struktural atau detail sambungan. 3. Kegagalan fondasi, deformasi tanah atau erosi bawah.	1. Menunjukkan kegagalan struktural yang nyata. 2. Memerlukan analisis forensik dan tindakan remediasi. 3. Harus ditangani segera untuk menghindari keruntuhan.



Gambar 2. 2 Jenis-Jenis Retak Beton

Sumber : Arcon Indonesia (n.d.). Jenis Retakan pada Struktur

2.2.2 Penyebab dan Dampak Retak pada Beton

Retak pada beton dapat disebabkan oleh berbagai faktor, baik dari segi material, proses konstruksi, maupun kondisi lingkungan. Berikut adalah beberapa penyebab utama retak pada beton:

1. Faktor Material
 - a. Penggunaan rasio air-semen yang terlalu tinggi, menyebabkan porositas yang tinggi dan beton lebih rentan terhadap retak.
 - b. Agregat yang tidak memiliki gradasi yang baik dapat meningkatkan kemungkinan segregasi dan retak.
 - c. Kualitas semen dan bahan tambahan yang tidak sesuai dapat mempengaruhi kinerja beton secara keseluruhan.

2. Faktor Proses Kontruksi

- a. Proses pencampuran yang tidak homogen dapat menyebabkan distribusi material yang tidak merata dan mengurangi kekuatan beton.
- b. Pemadatan yang kurang optimal menyebabkan adanya rongga udara dalam beton, yang dapat mempercepat retak.
- c. Proses curing yang tidak tepat, seperti kurangnya kelembaban atau paparan panas berlebih, dapat menyebabkan susut dini dan retak plastis.

3. Faktor Beban dan Lingkungan

- a. Beban berlebih yang tidak sesuai dengan desain dapat menyebabkan retak struktural.
- b. Perubahan suhu yang ekstrem menyebabkan ekspansi dan kontraksi yang berulang, meningkatkan risiko retak akibat siklus termal.
- c. Pengaruh zat kimia seperti sulfat dan klorida dapat mempercepat kerusakan beton dan tulangan baja.

Dampak Pada Beton, Retak yang terjadi pada beton dapat menimbulkan berbagai dampak negatif, antara lain:

1. Penurunan Kekuatan Struktural: Retak yang besar dapat mengurangi daya dukung struktur beton dan mempercepat kegagalan struktural.
2. Peningkatan Permeabilitas: Retak membuka jalur bagi air, klorida, dan zat kimia lainnya untuk masuk ke dalam beton, meningkatkan risiko korosi tulangan.

3. Biaya Perawatan yang Lebih Tinggi: Struktur beton yang mengalami retak memerlukan perawatan dan perbaikan yang lebih sering untuk mempertahankan fungsinya.
4. Pengurangan Umur Layan: Retak yang tidak ditangani dengan baik dapat mempercepat degradasi material dan mengurangi umur layan struktur beton.

2.3 Teknologi *Self healing* pada Beton

Seiring dengan perkembangan teknologi material, inovasi dalam bidang beton telah melahirkan konsep *self healing concrete*, yaitu beton yang mampu memperbaiki retak atau kerusakannya sendiri tanpa intervensi manusia. Teknologi ini dikembangkan untuk meningkatkan ketahanan dan umur usia beton dalam berbagai kondisi lingkungan ekstrem.

2.3.1 Pengertian *Self healing Concrete*

Self healing concrete adalah jenis beton yang memiliki kemampuan untuk memperbaiki sendiri kerusakan mikro seperti retakan kecil akibat tegangan atau pengaruh lingkungan dan juga retak rambut. Konsep ini terinspirasi dari mekanisme penyembuhan alami yang terjadi pada organisme hidup. Beton dengan teknologi ini mengandung material tambahan yang dapat bereaksi dengan air atau karbon dioksida untuk membentuk kembali komponen penyusun beton, sehingga memperbaiki celah yang terbentuk.

Menurut penelitian yang diterbitkan dalam *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, *self healing concrete* dapat meningkatkan daya tahan

struktur beton hingga 20–50% lebih lama dibandingkan beton konvensional (Snoeck et al., 2019).

2.3.2 Mekanisme *Self healing* pada Beton

Proses penyembuhan sendiri pada beton dapat terjadi melalui beberapa mekanisme utama, hal ini diuraikan pada Gambar 2.3 Mekanisme *Self healing* pada Beton, berikut penjelasannya:

1. Reaksi Kalsium Hidroksida dengan Karbon Dioksida

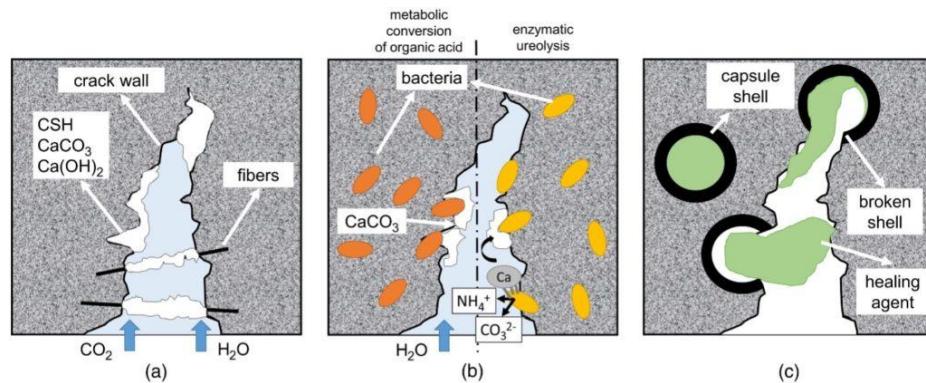
Kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) yang ada dalam beton bereaksi dengan karbon dioksida (CO_2) di udara, membentuk kalsium karbonat (CaCO_3), yang dapat mengisi celah-celah kecil pada beton.

2. Kristalisasi Partikel Mikro

Penambahan agen penyembuhan seperti mikroba penghasil kalsium karbonat (misalnya *Bacillus Subtilis*) yang dapat mengkatalisis reaksi kimia untuk memperbaiki retakan beton.

3. Penggunaan Polimer atau Kapsul Mikroskopis

Penggunaan kapsul yang berisi material perekat seperti epoksi atau silika yang akan pecah ketika terjadi retak, sehingga material perekat tersebut keluar dan mengisi celah yang terbentuk.



Gambar 2.3 Mekanisme Self healing pada Beton

Sumber : Plexxis (2023). *Self healing Concrete Visualization*

Menurut penelitian yang dipublikasikan dalam *Cement and Concrete Research* (De Belie et al., 2018), mekanisme-mekanisme ini dapat menutup retak hingga ukuran 0,8 mm dalam waktu beberapa hari hingga beberapa minggu, tergantung pada kondisi lingkungan dan bahan yang digunakan.

2.3.3 Keunggulan dan Kelemahan *Self healing Concrete*

Self healing concrete memiliki berbagai keunggulan yang menjadikannya inovasi penting dalam teknologi konstruksi. Salah satu manfaat utamanya adalah kemampuannya dalam memperpanjang umur usia beton dengan memperbaiki retak secara otomatis, sehingga mengurangi kebutuhan perawatan dan biaya pemeliharaan. Selain itu, beton ini lebih tahan terhadap lingkungan ekstrem, seperti paparan bahan kimia, air, dan perubahan suhu, yang dapat meningkatkan ketahanan struktur dalam jangka panjang. Dari segi keberlanjutan, *self healing concrete* juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon karena mengurangi frekuensi perbaikan dan penggunaan bahan baku baru. Namun, teknologi ini masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti biaya produksi yang lebih tinggi dibandingkan beton

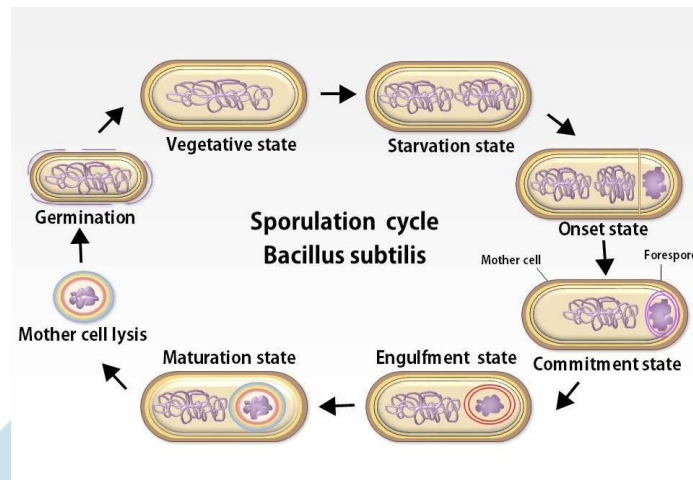
konvensional, karena penggunaan material khusus seperti mikroba, kapsul polimer, atau mineral tambahan. Selain itu, efektivitas mekanisme penyembuhan sangat bergantung pada kondisi lingkungan, seperti tingkat kelembaban dan suhu, yang dapat mempengaruhi kecepatan serta tingkat keberhasilan perbaikan retak. Teknologi ini juga lebih optimal untuk memperbaiki retak kecil, sementara untuk retakan besar masih diperlukan metode perbaikan tambahan agar struktur tetap aman dan kokoh.

2.4 Penggunaan *Bacillus Subtilis* dalam *Self healing Concrete*

Penggunaan *Bacillus Subtilis* dalam *self healing concrete* merupakan salah satu inovasi yang memungkinkan beton untuk memperbaiki retakan secara alami. Bakteri ini mampu menghasilkan kalsium karbonat (CaCO_3) melalui proses biomineralisasi, yang dapat mengisi celah pada beton dan meningkatkan daya tahannya.

2.4.1 Karakteristik *Bacillus Subtilis*

Bacillus Subtilis adalah bakteri gram-positif berbentuk batang yang bersifat *endospora*, sehingga mampu bertahan dalam kondisi lingkungan ekstrem, termasuk dalam beton yang memiliki pH tinggi. Bakteri ini bersifat non-patogenik dan banyak ditemukan di tanah serta lingkungan perairan. Dalam kondisi tertentu, *Bacillus Subtilis* dapat aktif dan menghasilkan enzim *urease*, yang memicu reaksi pembentukan kalsium karbonat saat berinteraksi dengan ion kalsium yang tersedia dalam beton.



Gambar 2. 4 Siklus sporulasi *Bacillus Subtilis*.

Sumber : *SlideTeam (n.d.). Formation of a Bacterial Spore by Bacillus Subtilis – Medical Images for PowerPoint.*

Bacillus Subtilis digunakan sebagai bakteri pemicu *self healing* dalam beton karena kemampuannya membentuk spora yang tahan terhadap lingkungan ekstrem. Saat beton mengalami retak, air dan nutrisi masuk ke dalam celah, memicu spora untuk aktif kembali. Bakteri ini kemudian menghasilkan enzim urease yang membantu mengubah urea menjadi ion karbonat. Ion karbonat ini bereaksi dengan kalsium dalam beton, membentuk kalsium karbonat (CaCO_3) yang mengisi dan menutup retakan.

Siklus sporulasi *Bacillus Subtilis* sangat penting dalam proses ini. Dalam kondisi normal, bakteri tetap dalam bentuk dorman (spora) dan tidak mengganggu struktur beton pada Gambar 2.4 Siklus sporulasi *Bacillus Subtilis* sudah diuraikan bagaimana siklus spora itu terjadi. Namun, ketika lingkungan berubah akibat retakan, bakteri mulai berkembang dan memulai proses biomineralisasi. Mekanisme ini memungkinkan beton untuk memperbaiki

dirinya sendiri secara alami, mengurangi kebutuhan perawatan dan meningkatkan daya tahan struktur dalam jangka panjang.

Keunggulan utama *Bacillus Subtilis* dalam *self healing concrete* adalah kemampuannya untuk bertahan dalam jangka waktu lama dalam kondisi dorman sebelum diaktifkan oleh kelembaban dari retakan beton. Penelitian menunjukkan bahwa bakteri ini tetap aktif selama lebih dari enam bulan dalam kondisi tertanam di dalam beton (Jonkers et al., 2010).

2.4.2 Proses Kerja *Bacillus Subtilis* dalam Self healing

Proses penyembuhan sendiri dalam beton yang menggunakan *Bacillus Subtilis* terjadi ketika retakan terbentuk dan memungkinkan air atau kelembaban masuk ke dalam beton. Air ini mengaktifkan bakteri yang sebelumnya dalam kondisi dorman (tidak aktif). Setelah aktif, *Bacillus Subtilis* mulai menghasilkan zat yang dapat bereaksi dengan senyawa dalam beton, terutama kalsium, untuk membentuk kalsium karbonat (CaCO_3).

Kalsium karbonat ini memiliki sifat mirip dengan bahan utama beton, sehingga dapat menutup retakan kecil dan mencegah air serta zat berbahaya lainnya masuk ke dalam struktur beton. Proses ini menyerupai cara karang laut terbentuk secara alami. Dengan demikian, *self healing concrete* yang menggunakan *Bacillus Subtilis* dapat memperbaiki kerusakan tanpa perlu perawatan tambahan.

2.4.3 Penelitian Terkait *Self healing Concrete* dengan *Bacillus Subtilis*

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menguji efektivitas *Bacillus Subtilis* dalam *self healing concrete*.

1. Jonkers et al. (2020) dalam publikasi di *Cement and Concrete Research* menemukan bahwa beton yang mengandung bakteri dapat menutup retakan hingga 0,8 mm dalam waktu kurang dari sebulan.
2. Tittelboom et al. (2019) menguji pengaruh penambahan kapsul kalsium laktat sebagai sumber nutrisi bagi bakteri, yang terbukti meningkatkan daya tahan beton hingga 30% lebih tinggi dibandingkan beton konvensional.
3. Wang et al. (2018) dalam penelitian di *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)* menunjukkan bahwa keberadaan *Bacillus Subtilis* tidak hanya meningkatkan ketahanan beton terhadap retak, tetapi juga mengurangi permeabilitas air hingga 65% lebih rendah dibandingkan beton biasa.

Penelitian-penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *Bacillus Subtilis* memiliki potensi besar dalam meningkatkan umur usia beton dan mengurangi biaya pemeliharaan struktur.

2.5 Faktor yang Mempengaruhi Efektivitas *Self healing Concrete*

Efektivitas *self healing concrete* bergantung pada beberapa faktor utama, termasuk dosis bakteri serta lingkungan dan kondisi curing yang mempengaruhi aktivitas biomineralisasi dalam beton.

2.5.1 Variasi Dosis Bakteri dan Efeknya terhadap Kekuatan Beton

Dosis *Bacillus Subtilis* yang digunakan dalam campuran beton dapat berpengaruh terhadap kekuatan dan efektivitas proses penyembuhan. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa:

1. Dosis terlalu rendah (kurang dari 10^5 sel/mL) tidak memberikan efek signifikan terhadap penyembuhan retak.
2. Dosis optimal berada pada kisaran $10^6 - 10^8$ sel/mL, yang menunjukkan hasil terbaik dalam menutup retakan tanpa mengurangi kekuatan awal beton.
3. Dosis terlalu tinggi (lebih dari 10^9 sel/mL) dapat menyebabkan gangguan pada proses hidrasi semen dan berpotensi menurunkan kekuatan tekan beton hingga 10% karena meningkatnya porositas.

Menurut studi dari De Muynck et al. (2008), pemberian bakteri dalam bentuk mikrokapsul atau hidrogel dapat membantu mengontrol pelepasan bakteri dalam jumlah yang tepat, sehingga meningkatkan efektivitas tanpa merusak struktur beton.

2.5.2 Lingkungan dan Kondisi *Curing*

Lingkungan tempat beton digunakan serta kondisi curing juga memiliki peran penting dalam efektivitas *self healing concrete*. Faktor-faktor yang mempengaruhi adalah:

- a. Kelembaban, proses penyembuhan akan lebih efektif dalam kondisi kelembaban tinggi (lebih dari 60% RH) karena air diperlukan untuk mengaktifkan bakteri.
 - b. Dalam kondisi kering, aktivitas bakteri menurun, sehingga memperlambat proses pembentukan CaCO_3 .
1. Suhu Lingkungan
 - a. Aktivitas *Bacillus Subtilis* optimal pada suhu antara 25-40°C.

- b. Suhu di bawah 10°C memperlambat metabolisme bakteri, sedangkan suhu di atas 50°C dapat membunuh bakteri sebelum diaktifkan.

2. pH Beton

- a. Beton segar memiliki pH tinggi (12-13), yang dapat mempengaruhi kelangsungan hidup bakteri.
- b. Penggunaan kapsul atau agen pelindung seperti silika gel dapat membantu bakteri bertahan lebih lama dalam kondisi ekstrem.

Menurut Wiktor dan Jonkers (2020), *self healing concrete* bekerja lebih efektif pada beton yang digunakan dalam lingkungan dengan paparan air atau kelembaban tinggi, seperti jembatan, bendungan, dan infrastruktur bawah air.