

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang

Penerapan Teknologi *Self-healing* pada Beton Ringan: Tinjauan Literatur

Theo Alfaro Dida Darmajaya

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada,
E-mail: theoalfarodidadarmajaya@mail.ugm.ac.id

Bambang Supriyadi*

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada,
E-mail: bambang.supri@ugm.ac.id

Abstrak

Konstruksi bangunan di era modern menuntut material yang berkualitas tinggi dan berkelanjutan. Salah satu permasalahan yang telah lama ada pada struktur beton bertulang adalah munculnya retak akibat beban berulang, yang tidak hanya menurunkan kekuatan struktural, tetapi juga mempercepat proses degradasi melalui infiltrasi zat-zat agresif dari lingkungan eksternal. Salah satu upaya yang sedang dikembangkan dalam mengatasi masalah retak pada beton adalah penggunaan *self-healing concrete*. Perbaikan retak mikro pada beton *self-healing* bisa terjadi melalui aktivasi agen penyembuh (*healing agent*) yang dibawa ke dalam beton melalui *carrier* bakteri. Tinjauan literatur ini membahas penggunaan mikroorganisme (*bakteri*) sebagai agen penyembuh dengan agregat ringan sebagai *carrier* bakteri dalam beton *self-healing*. Penelitian terkini menunjukkan bahwa kelangsungan hidup bakteri sebagai *healing agent* adalah hal yang sangat vital dalam menentukan efektivitas beton *self-healing*. Pelapisan *carrier* bakteri menggunakan zat pelapis seperti silika gel dan sodium silikat terbukti bisa menjaga bakteri dan nutrisi tetap dalam kondisi dorman hingga terjadi retak dan teraktivasi. Namun, meskipun penerapan beton *self-healing* di beberapa proyek telah menunjukkan peningkatan durabilitas beton, kapasitas penyembuhannya masih terbatas pada retak-retak mikro. Oleh karena itu, pengembangan lanjutan diperlukan, terutama dalam memperluas kemampuan penyembuhan retakan yang lebih besar, menurunkan biaya produksi, serta mengoptimalkan penerapan teknologi ini dalam praktik konstruksi secara luas.

Kata-kata Kunci: Agregat ringan, beton, *healing agent*, retak, *self-healing*

Abstract

Modern construction demands high-quality and sustainable materials. One of the longstanding issues in reinforced concrete structures is the formation of cracks due to repeated loading, which not only compromises structural integrity but also accelerates degradation by allowing the infiltration of aggressive external substances. In response, researchers are developing *self-healing concrete* to address this issue. The repair of microcracks in *self-healing concrete* can occur through the activation of healing agents delivered into the concrete via bacterial carriers. This paper discusses the use of microorganisms (*bacteria*) as healing agents with lightweight aggregates as carriers for the bacteria in *self-healing concrete*. Recent studies indicate that the viability of bacteria as healing agents is crucial to the effectiveness of *self-healing concrete*. The encapsulation of bacterial carriers using coating materials such as silica gel and sodium silicate has proven effective in preserving bacterial cells and nutrients in a dormant state until crack formation triggers their activation. Despite successful field applications demonstrating improved concrete durability, the healing capacity remains largely limited to microcracks. Thus, further advancements are necessary to enhance the healing range, reduce production costs, and optimize the integration of *self-healing concrete* technology into broader construction practices.

Keywords: Lightweight aggregate, concrete, *healing agent*, crack, *self-healing*.

1. Pendahuluan

Beton merupakan material konstruksi yang paling sering digunakan baik untuk pembangunan struktur baru maupun perbaikan infrastruktur yang sudah ada, karena biaya yang relatif rendah (Panza Uguzzoni et al., 2023). Akan tetapi, penggunaan

beton dalam skala besar menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti peningkatan emisi karbon dioksida dan pencemaran air.

Seiring dengan meningkatnya kesadaran akan isu keberlanjutan, diperlukan upaya untuk mengembangkan beton yang tidak hanya memiliki kekuatan dan daya tahan tinggi, tetapi juga ramah

* Penulis Korespondensi: bambang.supri@ugm.ac.id

lingkungan. Salah satu permasalahan utama pada beton adalah terjadinya retak, yang menjadi jalur masuk bagi zat-zat kimia berbahaya dan dapat mempercepat proses degradasi struktural (Nodehi et al., 2022).

Beberapa metode konvensional untuk memperbaiki retak pada beton adalah pelapisan permukaan (*coating*) dan penyuntikan material pengisi (*grouting*). Akan tetapi, metode-metode tersebut cenderung menaikkan biaya pemeliharaan dan kurang efektif dalam menangani retak pada area yang susah dijangkau (Hermawan et al., 2021).

Perkembangan teknologi *self-healing concrete* dalam satu dekade terakhir telah menarik perhatian dari kalangan peneliti di berbagai negara. Mekanisme penyembuhan *self-healing concrete* terbagi menjadi dua, yaitu *autogenous healing* dan *autonomous healing*. Kendati demikian, kemampuan penyembuhan ini umumnya masih terbatas pada retak dengan lebar kurang dari 60 μm (Tan et al., 2023). Mekanisme penyembuhan pada beton dapat diaktifkan melalui penambahan *healing agent* ke dalam campuran beton, di mana penggunaan bakteri sebagai agen penyembuh menunjukkan potensi tinggi karena bersifat ramah lingkungan dan aplikatif (Tan et al., 2023).

Agar proses penyembuhan dapat berlangsung efektif, dibutuhkan pori-pori dalam beton sebagai media hidup bagi bakteri atau agen penyembuh lainnya (F. Huang & Zhou, 2022). Agregat ringan menjadi alternatif yang menjanjikan sebagai *carrier* bakteri pada beton *self-healing*. Dalam hal ini, agregat ringan menjadi salah satu alternatif yang menjanjikan sebagai *carrier* bagi bakteri dalam sistem beton *self-healing*. Oleh karena itu, pemilihan jenis *healing agent* dan *carrier* yang tepat sangat krusial untuk menjaga performa mekanis beton yang dihasilkan. Tinjauan literatur ini bertujuan untuk mengeksplorasi berbagai alternatif agen penyembuh dan pembawa bakteri yang berpotensi diterapkan dalam pengembangan beton ringan *self-healing* yang berkelanjutan dan ekonomis.

2. Metodologi Penelitian

Tinjauan literatur ini disusun secara sistematis dengan membangun kerangka teoritis yang mengintegrasikan temuan-temuan empiris terdahulu dan mutakhir mengenai teknologi beton *self-healing*. Melalui pendekatan deskriptif dan analitik, kajian ini bertujuan untuk mengidentifikasi perkembangan teknologi, metode penelitian, serta implementasi *self-healing concrete* dalam dunia rekayasa sipil. Tiga jurnal ilmiah yang ditulis oleh (Risnandari et al., 2022, 2023, 2024) mengenai pemanfaatan

agregat ringan dalam pembuatan mortar *self-healing* menjadi landasan utama dalam pengembangan kajian ini. Penulis membaca dan menganalisis ketiga jurnal tersebut untuk mengidentifikasi topik dan permasalahan yang akan ditelaah lebih mendalam.

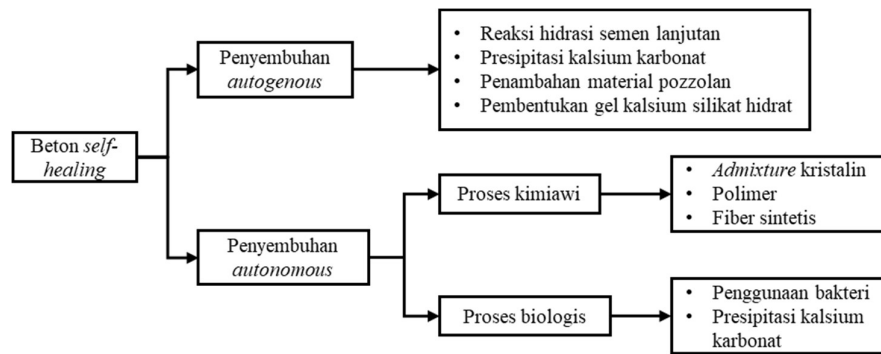
Literatur tambahan dikumpulkan dari berbagai basis data ilmiah dengan metode pencarian yang sistematis. Seleksi awal dilakukan melalui penelaahan judul dan abstrak untuk memastikan relevansi dan kualitas sumber, yang kemudian dilanjutkan dengan pembacaan mendalam terhadap jurnal-jurnal yang memenuhi kriteria. Setiap sumber yang terpilih dianalisis keterkaitannya untuk memperkuat argumen-argumen utama dalam tinjauan ini. Berdasarkan informasi yang telah diperoleh, penulis mengevaluasi setiap temuan tersebut dan menyusun tinjauan literatur yang terstruktur dan komprehensif, dengan fokus utama pada alternatif agen penyembuh berbasis mikroorganisme dan pembawa bakteri dalam pengembangan beton ringan *self-healing*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Klasifikasi penyembuhan beton *self-healing*

Teknologi penyembuhan material beton dapat dibedakan ke dalam dua pendekatan utama, yaitu penyembuhan *autogenous* dan penyembuhan *autonomous* seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**. Penyembuhan *autogenous* pada dasarnya merupakan proses penyembuhan alami yang terjadi akibat reaksi lanjutan antara partikel semen yang belum terhidrasi dengan air yang masuk ke dalam beton, sehingga membentuk gel kalsium silikat hidrat yang berperan dalam menutup retakan. Efektivitas mekanisme ini dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti, umur beton, komposisi campuran, dan lebar retak (Javeed et al., 2024).

Sementara itu, penyembuhan *autonomous* merupakan mekanisme penyembuhan yang dipicu oleh aktivasi bahan tertentu yang sengaja ditambahkan ke dalam campuran beton dan dapat dilakukan melalui proses kimiawi maupun biologis. Secara kimiawi, penyembuhan *autonomous* dilakukan dengan penambahan bahan aditif seperti admixture kristalin, polimer dan serat sintetis yang mampu bereaksi dan membentuk senyawa khusus penutup retak pada beton (Javeed et al., 2024). Sedangkan secara biologis, penyembuhan *autonomous* melibatkan mikroorganisme, seperti bakteri, yang bertindak sebagai *healing agent* dan akan diaktivasi saat retak muncul pada beton, memicu terbentuknya produk metabolik yang dapat menutup retakan (Hermawan et al., 2021).

Gambar 1. Klasifikasi metode penyembuhan beton *self-healing* (Javeed et al., 2024)

3.2. Agregat ringan dan bakteri

Self-healing concrete merupakan inovasi beton yang memungkinkan beton untuk memperbaiki retak secara mandiri dalam batas lebar tertentu. Material utama penyusun beton adalah air, semen, agregat halus, dan agregat kasar. Salah satu inovasi terkini dalam pengembangan beton *self-healing* adalah pemanfaatan agregat ringan, yang tidak hanya berfungsi untuk mengurangi berat jenis beton, tetapi juga dapat meningkatkan kinerja fungsionalnya, khususnya dalam aspek penyembuhan retak. Agregat ringan yang memiliki porositas tinggi, dapat dimanfaatkan sebagai tempat menyimpan agen penyembuh di dalam pori-porinya (Wu et al., 2014). Air yang tersimpan di dalam agregat ringan bisa bereaksi dengan partikel semen yang belum terhidrasi, begitu juga dengan bakteri yang terenkapsulasi di dalam agregat ketika teraktivasi dapat bereaksi menghasilkan senyawa seperti kalsium karbonat untuk menutup retakan. Agregat ringan dalam beton *self-healing* dapat meningkatkan permeabilitas beton, sehingga mempermudah penetrasi air yang menjadi faktor penting dalam mengaktifkan *healing agent* secara efektif.

Agregat ringan dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis menurut proses pembuatannya, yaitu agregat ringan alami, buatan, dan daur ulang. Agregat ringan alami seperti batu apung, *scoria*, dan *diatomaceous earth* terbentuk melalui proses alami dari batuan vulkanik dan memiliki densitas yang rendah (H. Huang et al., 2013). Di sisi lain, agregat ringan buatan seperti *expanded clay*, *expanded shale* dan *sintered fly ash* diproduksi di pabrik sehingga bisa dikontrol ukuran pori dan spesifikasi agregat (De Belie et al., 2018). Sementara itu, agregat ringan daur ulang dibuat dari material sisa seperti limbah beton, plastik, dan potongan kaca memberikan potensi keberlanjutan dari sisi lingkungan (X. Wang et al., 2022). Akan tetapi, tantangan utama dari agregat daur ulang adalah inkonsistensi sifat fisik

dan mekanik yang membatasi performa jangka panjangnya. Penelitian tentang pembuatan beton ringan *self-healing* disajikan pada Tabel 1.

Agregat ringan *expanded clay* dan *fly ash* telah diteliti secara intensif sebagai pembawa bakteri yang memungkinkan menyimpan *healing agent* di dalamnya. *Expanded clay* diproduksi melalui proses pemanasan tanah liat pada suhu tinggi untuk menghasilkan struktur berpori, terbukti efektif dalam membawa sel vegetatif *Bacillus sphaericus*, yang mampu menutup retakan selebar 0,3 – 0,4 mm (Risdanareni et al., 2023). Sementara itu agregat ringan berbasis *fly ash* yang diproduksi dari residu pembakaran batu bara menunjukkan efektivitas penyembuhan yang lebih baik di umur beton lanjut seiring dengan reaksi lanjutan antara *fly ash* dan air yang menghasilkan endapan kalsium karbonat (Risdanareni et al., 2023). Temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan jenis agregat ringan sebagai pembawa bakteri tidak hanya ditentukan oleh porositas, tetapi juga oleh material penyusun agregat dan stabilitas mikroorganisme di dalam matriks beton

3.3. Mekanisme penyembuhan

Mekanisme penyembuhan pada beton *self-healing* menyerupai proses penyembuhan pada manusia, di mana sistem internal (agen penyembuh) bekerja secara otomatis untuk memperbaiki kerusakan guna mencegah degradasi lebih lanjut. Pada dasarnya proses penyembuhan retak dikategorikan menjadi dua mekanisme utama yaitu *autogenous healing* dan *autonomous healing* (F. Huang & Zhou, 2022). Penyembuhan *autogenous* terjadi secara alami tanpa intervensi zat penyembuh lainnya, mengandalkan hidrasi lanjutan dan presipitasi kalsium karbonat (Javeed et al., 2024). Sementara itu, penyembuhan *autonomous* memerlukan keberadaan *healing agent* dalam campuran beton yang secara aktif berperan dalam menutup retak, baik melalui reaksi kimiawi

maupun proses biologis.

Penyembuhan secara kimiawi *autonomous healing* melibatkan penggunaan kapsul berisi epoksi atau senyawa silika, yang ketika kapsul tersebut pecah akibat tegangan mekanis, senyawa di dalamnya dilepaskan dan bereaksi membentuk produk yang menutup retakan (Van Tittelboom et al., 2010). Secara biologis, proses penyembuhan *autonomous* memanfaatkan mikroorganisme seperti *Bacillus subtilis* dan *Bacillus sphaericus*, yang mampu

bertahan dalam kondisi ekstrem di lingkungan beton termasuk alkalinitas tinggi dan kelembaban rendah (Jonkers et al., 2010).

Bakteri sebagai agen penyembuh dicampurkan ke dalam beton bersama dengan sumber nutrisi yang menunjang kelangsungan hidup bakteri di dalam beton, dan akan teraktivasi saat air masuk ke dalam retakan, menghasilkan kalsium karbonat sebagai hasil metabolisme yang menutup retakan tersebut seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**.

Tabel 1. Penelitian tentang agen penyembuh dan agregat ringan yang digunakan (F. Huang & Zhou, 2022)

Agen Penyembuh	Agregat Ringan	Referensi
<i>Bacillus pseudofirmus</i>	Expanded clay	(Stuckrath et al., 2014)
Larutan Na ₂ CO ₃	Porous ceramsite	(X. Wang et al., 2021)
<i>Bacillus subtilis natto</i>	Expanded clay granules	(Huynh et al., 2019)
<i>Paenibacillus mucilaginosus</i>	Expanded vermiculite	(Zhan et al., 2021)
Water	Partikel clinoptilolite zeolite	(Y.-F. Su et al., 2020)
Larutan Na ₂ CO ₃	Agregat ringan clay	(X. F. Wang et al., 2020)
Larutan sodium silikat	Expanded clay	(Alghamri et al., 2016)
Larutan sodium silikat	Foam geopolimer berbasis fly ash	(Rashid et al., 2021)
<i>Bacillus sphaericus</i>	Diatomaceous earth, expanded clay, granular activated carbon, metakaolin, zeolite, dan air entrainment	(Erşan et al., 2015)
<i>Sporosarcina halophila</i>	Expanded perlite	(Ehsan Khan et al., 202(P
<i>Bacterium S. pasteurii</i>	Porous dan superlight expanded glass	(Zhang et al., 2022)
Bakteri <i>alkaphilic</i> dari genus <i>Bacillus</i>	Expanded clay granules	(Dembovska et al., 2019; Tziviloglou et al., 2017; Xu et al., 2018)
<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Expanded shale	(Han et al., 2019)
<i>Bacillus psuedofirms</i>	Expanded perlite	(Saridhe & Selvaraj, 2021)
<i>Bacillus psuedofirmus</i>	Expanded perlite	(Gilford et al., 2014)
Bakteri <i>alkaphilic</i> dari genus <i>Bacillus</i>	Partikel expanded clay	(Kanellopoulos et al., 2015)
<i>Lysinibacillus boronitolerans</i>	Expanded clay	(Han et al., 2020)
<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Agregat ringan dari leca	(Hosseini Balam et al., 2017)
<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Diatomite	(Fu et al., 2022)
<i>Sporosarcina pasteurii</i> , <i>Bacillus megateterium</i> , <i>Sporosarcina ureae</i> , dan <i>Bacillus licheniformis</i>	Leca coarse dan Leca fine	(Salehi et al., 2022)
<i>Bacillus mucilaginous</i>	Expanded perlite	(Meng et al., 2021)
<i>Bacillus alkalinitrilicus</i>	Partikel expanded clay	(Wiktor & Jonkers, 2011a, 2011b)
<i>Bacillus subtilis</i>	Pelet diatomite	(Huynh et al., 2017)
<i>Bacillus subtilis</i>	Pumice	(Yazici et al., 2023)
<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Partikel ceramsite	(H.-J. Chen et al., 2019a; Xu et al., 2020)
<i>Bacillus alcalophilus</i>	Partikel ceramsite modifikasi	(Y. Su et al., 2021)
<i>Bacillus mucilaginous</i>	Ceramsite	(H.-J. Chen et al., 2019b)

(Nodehi et al., 2022; Zhang et al., 2024). Efektivitas proses penyembuhan sangat bergantung pada sejumlah variabel, seperti lebar retak, kondisi lingkungan (suhu, kelembapan), rancang campur beton, serta stabilitas dan viabilitas agen penyembuh selama masa dorman.

Salah satu tantangan teknis dalam pembuatan beton *self-healing* adalah menjaga agar carrier bakteri tidak pecah sebelum terjadinya retakan struktural. Kegagalan dalam menjaga integritas carrier dapat menyebabkan kematian bakteri akibat paparan kondisi lingkungan beton yang ekstrem, sehingga mekanisme penyembuhan tidak dapat berlangsung saat dibutuhkan.

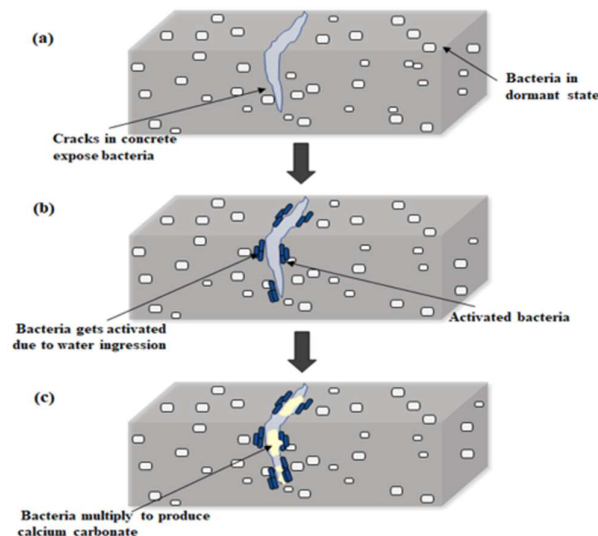
Keberhasilan teknologi beton *self-healing* beton tidak hanya ditentukan oleh pemilihan jenis agen penyembuh, tetapi juga oleh desain sistem penyimpanan, strategi perlindungan selama masa dorman, dan respons terhadap kerusakan mikro dalam beton. Penelitian lanjutan perlu difokuskan pada optimalisasi integrasi *healing agent* dan pembawa bakteri untuk meningkatkan keandalan sistem penyembuhan dalam skala struktural.

3.4. Healing agent biologis

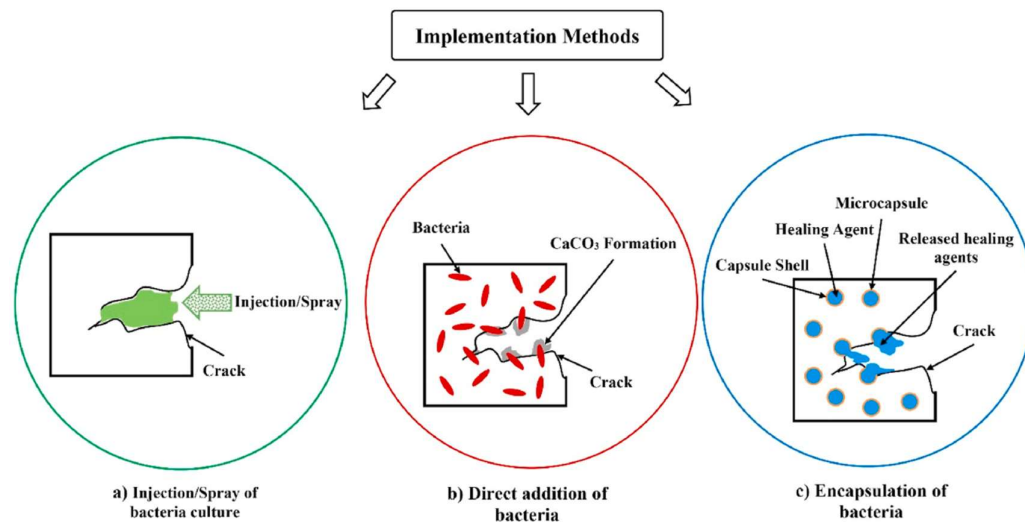
Penggunaan *healing agent* berbasis mikroorganisme dalam pembuatan beton *self-healing* memberikan pendekatan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan dalam meningkatkan umur layan beton. Bakteri sebagai agen penyembuh perlu

dibudidayakan terlebih dahulu sebelum diaplikasikan ke dalam beton melalui berbagai metode seperti pencampuran langsung, proses enkapsulasi, penyemprotan, dan penyuntikan seperti ditunjukkan pada **Gambar 3** (Nodehi et al., 2022).

Suplai nutrisi yang memadai seperti ekstrak ragi, kalsium laktat, dan urea diperlukan untuk menjaga viabilitas bakteri selama fase dorman di dalam beton yang bersifat sangat basa dan minim kelembapan (Risdanareni et al., 2023). Tiga jenis bakteri yang paling umum digunakan sebagai *healing agent* dalam pengembangan *self-healing concrete*, adalah *Bacillus sphaericus*, *Sporosarcina pasteurii* (*Bacillus pasteurii*), dan *Bacillus subtilis* (Nodehi et al., 2022). *Bacillus sphaericus* dikenal karena kemampuannya untuk mengendapkan kalsium karbonat melalui proses biomineralisasi serta memiliki ketahanan tinggi terhadap kondisi alkali ekstrem pada beton (Nodehi et al., 2022). *Sporosarcina pasteurii* adalah mikroorganisme yang paling sering digunakan dalam aplikasi berbasis semen karena efisiensinya dalam menghidrolisis urea dan membentuk presipitasi kalsium karbonat, yang berkontribusi pada penurunan daya serap air, penurunan permeabilitas ion klorida, serta peningkatan daya tahan terhadap siklus *freeze-thaw* (Nodehi et al., 2022). Sementara itu, *Bacillus subtilis* memiliki keunggulan berupa ketahanan tinggi dalam kondisi alkali beton dan aktivitas ureolitik yang tinggi, serta kemampuan menghasilkan endapan kalsium karbonat dalam jumlah stabil (Nodehi et al., 2022).



Gambar 1. Mekanisme penyembuhan *self-healing concrete* (Javeed et al., 2024)



Gambar 2. Metode penggunaan bakteri sebagai agen penyembuhan pada beton (Nodehi et al., 2022)

Bakteri sebagai agen penyembuh dapat ditempatkan ke dalam agregat ringan dalam dua bentuk, yakni spora dan sel vegetatif. Bakteri dalam bentuk spora, cenderung lebih efektif dalam menutup retak pada umur beton lanjut, karena dapat tetap dorman selama ada nutrisi untuk berkecambah menjadi sel vegetatif, hingga teraktivasi akibat pecahnya pembawa bakteri. Sebaliknya, dalam bentuk sel vegetatif, bakteri dapat langsung aktif menutup retak ketika dilepaskan dan bereaksi dengan air, tetapi memiliki umur simpan yang lebih pendek dan lebih rentan terhadap degradasi lingkungan (Risdanareni et al., 2022).

Faktor krusial yang menentukan keberhasilan mekanisme penyembuhan biologis adalah kemampuan agregat ringan sebagai pembawa bakteri untuk mempertahankan kelangsungan hidup bakteri. Pelapisan agregat ringan menggunakan bahan pelapis seperti silika gel, kalsium laktat, dan sodium alginat telah terbukti efektif dalam menjaga bakteri tetap dorman dan mencegah aktivasi prematur yang dapat menurunkan efisiensi penyembuhan. Namun demikian, penggunaan lapisan pelindung harus dipertimbangkan secara cermat agar tidak mengganggu sifat mekanik dan reologi beton secara keseluruhan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu mengkaji hubungan antara jenis pelapis, porositas agregat, dan keberlangsungan hidup bakteri sebagai *healing agent* dalam kondisi alkali beton, untuk mengoptimalkan *mix design* beton ringan *self-healing* berbasis mikroorganisme.

3.5. Performa beton ringan *self-healing*

Performa penyembuhan pada beton *self-healing*

merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor internal, seperti komposisi campuran beton, properti beton, jenis dan konsentrasi agen penyembuh, serta metode enkapsulasi, sedangkan faktor eksternal, meliputi kondisi lingkungan, pembebanan struktural, dan lebar retakan (Zhang et al., 2024). Jenis material *cementitious* dan *admixture* yang ditambahkan ke dalam beton sangat berpengaruh terhadap *workability* dan durabilitas material beton. Menurut (Jiang et al., 2021) dalam (Zhang et al., 2024) batasan ideal mikrokapsul dalam campuran beton adalah 1 - 3%, jika digunakan mikrokapsul hingga 7%, kuat tekan beton dapat menurun hingga 30%. Temuan tersebut menunjukkan bahwa penggunaan mikrokapsul yang terlalu banyak berdampak negatif terhadap performa beton dan perlu adanya optimalisasi antara metode penyembuhan dan properti mekanik beton. Selain itu, suhu lingkungan turut memengaruhi efektivitas penyembuhan, temperatur yang lebih tinggi dapat mempercepat aktivasi agen penyembuh dan meningkatkan efisiensi penutupan retak (Du et al., 2020).

Pada praktiknya, performa optimum dari beton *self-healing* tercapai dalam penanganan retak mikro berukuran < 1 mm, sehingga aplikasi pada kerusakan struktural besar masih memerlukan penelitian lanjutan. Beton *self-healing* dikembangkan sebagai solusi inovatif untuk mempermudah penanganan retak mikro pada struktur beton secara otomatis tanpa intervensi manusia. Penerapan teknologi *self-healing* pada beton harus memperhatikan keseimbangan antara efektivitas agen penyembuh dan kualitas beton secara keseluruhan, terutama dalam hal *workability* dan performa mekanik. Salah

satu tantangan utama adalah pengaruh penambahan nutrisi dan agen penyembuh terhadap proses hidrasi semen. Nutrien yang dilepaskan dari agregat ringan berpotensi memperlambat hidrasi semen, yang secara tidak langsung dapat meningkatkan *workability* beton (F. Huang & Zhou, 2022). Meskipun demikian, peningkatan *workability* tidak selalu berdampak positif, sebab perubahan karakteristik reologi beton dapat meningkatkan potensi segregasi dan memengaruhi durabilitas jangka panjang. Oleh karena itu, pelapisan *carrier* bakteri menjadi solusi penting dalam menahan pelepasan awal nutrisi, menjaga kestabilan komposisi beton, dan memastikan agen penyembuh hanya aktif saat beton mengalami retak setelah pengerasan.

Dalam jangka panjang, beton ringan *self-healing* memiliki potensi peningkatan kekuatan tekan akibat reaksi hidrasi lanjutan dan penyembuhan retakan oleh agen penyembuh. Misalnya, pada beton dengan agregat ringan berbasis *fly ash*, yang tidak hanya berfungsi sebagai *carrier*, tetapi juga turut bereaksi dengan air dan berkontribusi terhadap pembentukan produk hidrasi sekunder. Hal ini menunjukkan bahwa tidak semua agregat ringan memiliki

kontribusi yang setara terhadap kekuatan mekanik pasca penyembuhan. Pada beton dengan agregat yang tidak reaktif terhadap hidrasi sekunder, kekuatan tekan lebih bergantung pada efektivitas agen penyembuh, yang dalam banyak kasus justru menurunkan kekuatan beton awal. Meskipun demikian, kemampuan beton untuk menutup retak dan mencegah penetrasi zat agresif dari lingkungan eksternal tetap memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan durabilitas dan umur layanan beton.

Lebar retak maksimum yang dapat disembuhkan oleh beton ringan *self-healing* sangat ditentukan oleh jenis agen penyembuh dan karakteristik agregat ringan yang digunakan. Porositas tinggi pada agregat ringan mempermudah difusi air dan aktivasi agen penyembuh, namun juga meningkatkan risiko pelepasan dini agen penyembuh sebelum terjadi retak, yang dapat menyebabkan kematian bakteri atau berkurangnya efektivitas penyembuhan. Hasil-hasil penelitian terdahulu, seperti disajikan dalam **Tabel 2**, memberikan pemahaman lebih dalam mengenai korelasi antara jenis agen penyembuh, agregat ringan, dan efektivitas penutupan retak.

Tabel 2. Performa penyembuhan beton ringan *self-healing* (F. Huang & Zhou, 2022)

Agen Penyembuh	Agregat Ringan	Rasio Penutupan Retak (%)	Lebar Retak Tertutup (mm)	Referensi
Kalsium laktat dan <i>Bacillus pseudofirmus</i>	<i>Expanded clay</i>	-	0.22	(Stuckrath et al., 2014)
Larutan Na ₂ CO ₃	<i>Porous ceramsite</i>	69.32	0.24	(Wang et al., 2021)
<i>Paenibacillus mucilaginosus</i>	<i>Expanded vermiculite</i>	98.87	0.4	(Zhan et al., 2021)
Larutan sodium silikat	<i>Expanded clay</i>	80	0.3	(Alghamri et al., 2016)
Bakteri <i>alkaphilic</i> dari genus <i>Bacillus</i>	<i>Granula expanded clay</i>	86	0.3	(Xu et al., 2018)
<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Agregat ringan dari <i>leca diatomite</i>	80	0.2	(Fu et al., 2022)
<i>Bacillus mucilaginosus</i>	<i>Expanded perlite</i>	98	0.85	(Meng et al., 2021)
<i>Bacillus alkalinitrilicus</i>	Partikel <i>expanded clay</i>	61	0.46	(Wiktor & Jonkers, 2011)
<i>Bacillus mucilaginosus</i>	<i>Ceramsite</i>	87.5	0.05	(Chen et al., 2016)
Bakteri <i>alkaphilic</i> dari genus <i>Bacillus</i>	Partikel <i>expanded clay</i>	98	0.35	(Tziviloglou et al., 2017)

3.6. Penerapan di lapangan

Keberhasilan suatu inovasi dalam bidang material konstruksi, termasuk beton *self-healing*, tidak hanya ditentukan oleh performanya di laboratorium, tetapi juga oleh kemampuannya untuk diimplementasikan secara efektif dalam proyek konstruksi sipil. Beberapa teknologi beton *self-healing* telah diuji coba pada proyek nyata seperti tercantum dalam Tabel 3, dan menunjukkan hasil beragam tergantung

pada konteks aplikasinya. Setiap pendekatan teknologi memiliki keunggulan dan keterbatasan masing-masing, serta membuka ruang untuk inovasi lanjutan, terutama dalam hal efisiensi biaya dan kemudahan aplikasi. Mayoritas penelitian mengenai beton *self-healing* hingga saat ini masih berada pada skala laboratorium, di mana variabel lingkungan dan proses pengerjaan seperti suhu, pencampuran, serta pengecoran dapat dikendalikan secara optimal.

Tabel 3. Contoh penerapan beton *self-healing* (Zhang et al., 2024)

Tipe teknologi <i>self-healing</i>	Penerapan di lapangan	Hasil	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
Beton <i>self-healing autogenous</i>	Retak pada sutruktur beton	Mengurangi biaya perawatan dengan menggunakan material <i>cementitious</i>	Bergantung pada proses hidrasi lanjut pada sisa semen dalam beton	Ada ketentuan untuk lebar retak yang bisa disembuhkan	(Gardner et al., 2018; Rajczakowska et al., 2019)
<i>Microencapsulated autonomous self-healing</i>	Dinding penahan tanah di UK	Rata-rata kedalaman retak pada dinding dengan mikrokapsul berkurang 39%	Respon cepat dan hasil perbaikan yang baik	Keterbatasan pada material dinding dan dosis agen penyembuh, tidak berkelanjutan	(Al-Tabbaa et al., 2019; Wang et al., 2019)
	Area proyek terowongan Shenzhen Qianhai	Kekuatan mekanik setelah 7 hari penyembuhan meningkat 14%			
<i>Microbial autonomous self-healing</i>	Proyek jalan rel Nanjing	Uji ultrasonik mendeteksi sejumlah perbaikan retak	Durabilitas pengaruh perbaikan baik	Waktu perbaikan di luar perkiraan, beberapa jalur metabolisme tidak ramah lingkungan	(Basit Ehsan Khan et al., 2023; Qian et al., 2021)
	Dek pada parkir mobil bawah tanah	Mengurangi rembesan hingga 80%			

Namun, kondisi lapangan sangat berbeda, karena dipengaruhi oleh fluktuasi lingkungan, keterbatasan teknis, dan faktor sumber daya manusia, yang seringkali menyebabkan ketidaksesuaian antara desain material dengan realitas implementasi. Oleh karena itu, transisi dari skala laboratorium ke aplikasi lapangan memerlukan pendekatan adaptif dan evaluasi sistematis terhadap teknologi yang digunakan. Isu keberlanjutan sering diserukan dalam dunia konstruksi modern saat ini. Dampak positif penerapan beton *self-healing* dalam konstruksi adalah mengurangi biaya pemeliharaan dan pengeluaran untuk perbaikan, sehingga bisa menaikkan keuntungan pemilik proyek dan menarik *investor* untuk menyuntikkan dana guna menerapkan teknologi *self-healing concrete* (Panza Uguzzoni et al., 2023). Hal tersebut juga menunjukkan bahwa teknologi beton *self-healing* adalah inovasi ramah lingkungan karena meningkatkan durabilitas material dan dapat menggunakan material daur ulang seperti *fly ash* untuk agregat ringan. Penelitian dan pengembangan teknologi *self-healing* di bidang teknik sipil diharapkan bisa mengurangi biaya pembuatan beton *self-healing* sehingga lebih terjangkau dan bisa diproduksi secara masal.

4. Kesimpulan

Beton *self-healing* adalah inovasi yang menjanjikan untuk konstruksi sipil di masa depan. Penggunaan beton *self-healing* sebagai material bangunan menawarkan pendekatan inovatif yang menjanjikan untuk meningkatkan keberlanjutan dan daya tahan struktur beton. Berdasarkan tinjauan literatur

tersebut, bisa diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Sifat agregat ringan yang memiliki permeabilitas tinggi dapat dimanfaatkan sebagai pembawa bakteri. Agregat ringan tidak hanya berkontribusi pada pengurangan berat jenis beton, tetapi juga menyediakan ruang pori yang ideal untuk penyimpanan healing agent, terutama mikroorganisme seperti bakteri. Di antara berbagai jenis agregat ringan, *expanded clay* dan agregat berbasis *fly ash* menunjukkan performa yang signifikan dalam memfasilitasi proses penyembuhan retak, baik melalui aktivasi biologis maupun reaksi kimia lanjutan.
2. Efektivitas penyembuhan beton *self-healing* sangat bergantung pada kecocokan antara jenis agregat, karakteristik pori, dan stabilitas agen penyembuh yang digunakan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan yang lebih komprehensif untuk mengevaluasi kinerja jangka panjang, pengaruh terhadap kekuatan mekanik, serta efisiensi biaya dari masing-masing jenis agregat ringan.
3. Tiga jenis bakteri yang paling umum digunakan sebagai *healing agent* dalam pembuatan *self-healing concrete*, adalah *Bacillus sphaericus*, *Sporosarcina/Bacillus pasteurii*, dan *Bacillus subtilis* yang memiliki kemampuan biomineralisasi kalsium karbonat yang efektif dalam menutup retak. Keberhasilan mekanisme penyembuhan biologis sangat bergantung pada bentuk bakteri yang digunakan yaitu spora atau sel vegetatif.
4. Pelapisan agregat ringan dengan bahan pelindung seperti sodium alginat, kalsium

- laktat, dan gel silika menjadi strategi penting untuk menjaga viabilitas bakteri hingga saat aktivasi. Namun, optimalisasi sistem ini masih memerlukan kajian mendalam terhadap efek sampling material pelapis terhadap properti mekanik dan struktural beton.
5. Optimalisasi sistem penyembuhan tidak hanya bergantung pada efektivitas agen biologis, tetapi juga harus mempertimbangkan dampaknya terhadap *workability*, kekuatan tekan, dan durabilitas beton. Penambahan mikrokapsul atau nutrisi dalam jumlah berlebih terbukti menurunkan kekuatan tekan beton secara signifikan, sehingga diperlukan keseimbangan antara fungsi penyembuhan dan performa mekanik.
 6. Berdasarkan referensi penelitian-penelitian terdahulu, teknologi beton *self-healing* menunjukkan performa terbaik dalam penyembuhan retak mikro < 1 mm, sedangkan aplikasinya pada retakan yang lebih lebar masih menjadi tantangan dan memerlukan kajian lanjutan. Peran agregat ringan sebagai *carrier* menjadi aspek penting, karena sifat porositasnya dapat mempercepat aktivasi agen penyembuh, tetapi juga meningkatkan risiko pelepasan dini yang merugikan.
 7. Keberhasilan implementasi teknologi beton ringan *self-healing* secara luas masih menghadapi tantangan serius, terutama dalam aspek penerapan di lapangan dan efisiensi biaya. Integrasi pendekatan material, mikrobiologi, dan teknologi manufaktur akan menjadi kunci dalam mengoptimalkan pemanfaatan agregat ringan untuk mendukung implementasi beton *self-healing* secara lebih luas dan efektif di industri konstruksi.
- ## 5. Daftar Pustaka
- 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>
- Al-Tabbaa, A., Litina, C., Giannaros, P., Kanellopoulos, A., & Souza, L. (2019). First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 208, 669–685. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.178>
- Basit Ehsan Khan, M., Dias-da-Costa, D., & Shen, L. (2023). Factors affecting the self-healing performance of bacteria-based cementitious composites: A review. *Construction and Building Materials*, 384, 131271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131271>
- Chen, H., Qian, C., & Huang, H. (2016). Self-healing cementitious materials based on bacteria and nutrients immobilized respectively. *Construction and Building Materials*, 126, 297–303. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.023>
- Chen, H.-J., Peng, C.-F., Tang, C.-W., & Chen, Y.-T. (2019a). Self-Healing Concrete by Biological Substrate. *Materials*, 12(24), 4099. <https://doi.org/10.3390/ma12244099>
- Chen, H.-J., Peng, C.-F., Tang, C.-W., & Chen, Y.-T. (2019b). Self-Healing Concrete by Biological Substrate. *Materials*, 12(24), 4099. <https://doi.org/10.3390/ma12244099>
- De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., Darquennes, A., Davies, R., Ferrara, L., Jefferson, T., Litina, C., Miljevic, B., Otlewska, A., Ranogajec, J., Roig-Flores, M., Paine, K., Lukowski, P., Serna, P., Tulliani, J., ... Jonkers, H. M. (2018). A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. *Advanced Materials Interfaces*, 5(17). <https://doi.org/10.1002/admi.201800074>
- Dembovska, L., Bajare, D., Korjamins, A., Toma, D., & Jakubovica, E. (2019). Preliminary research for long lasting self-healing effect of bacteria-based concrete with lightweight aggregates. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 660(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012034>
- Du, W., Yu, J., Gu, S., Wang, R., Li, J., Han, X., & Liu, Q. (2020). Effect of temperatures on self-healing capabilities of concrete with different shell composition microcapsules containing toluene-di-isocyanate. *Construction and Building Materials*, 247, 118575. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118575>

- Ehsan Khan, M. B., Shen, L., & Dias-da-Costa, D. (2021). Crack healing performance of bacteria-based mortar under sustained tensile loading in marine environment. *Cement and Concrete Composites*, 120, 104055. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104055>
- Erşan, Y. Ç., Da Silva, F. B., Boon, N., Verstraete, W., & De Belie, N. (2015). Screening of bacteria and concrete compatible protection materials. *Construction and Building Materials*, 88, 196–203. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.027>
- Fu, Q., Wu, Y., Liu, S., Lu, L., & Wang, J. (2022). The adaptability of *Sporosarcina pasteurii* in marine environments and the feasibility of its application in mortar crack repair. *Construction and Building Materials*, 332, 127371. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127371>
- Gardner, D., Lark, R., Jefferson, T., & Davies, R. (2018). A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.02.002>
- Gilford, J., Hassan, M. M., Rupnow, T., Barbato, M., Okeil, A., & Asadi, S. (2014). Dicyclopentadiene and Sodium Silicate Microencapsulation for Self-Healing of Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(5), 886–896. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000892](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000892)
- Han, S., Choi, E. K., Park, W., Yi, C., & Chung, N. (2019). Effectiveness of expanded clay as a bacteria carrier for self-healing concrete. *Applied Biological Chemistry*, 62(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s13765-019-0426-4>
- Han, S., Jang, I., Choi, E. K., Park, W., Yi, C., & Chung, N. (2020). Bacterial Self-Healing Performance of Coated Expanded Clay in Concrete. *Journal of Environmental Engineering*, 146(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001713](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001713)
- Hermawan, H., Minne, P., Serna, P., & Gruyaert, E. (2021). Understanding the impacts of healing agents on the properties of fresh and hardened self-healing concrete: A review. In *Processes* (Vol. 9, Issue 12). MDPI. <https://doi.org/10.3390/pr9122206>
- Hosseini Balam, N., Mostofinejad, D., & Eftekhari, M. (2017). Effects of bacterial remediation on compressive strength, water absorption, and chloride permeability of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 145, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.003>
- Huang, F., & Zhou, S. (2022). A Review of Lightweight Self-Healing Concrete. In *Materials* (Vol. 15, Issue 21). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ma15217572>
- Huang, H., Ye, G., & Damidot, D. (2013). Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste. *Cement and Concrete Research*, 52, 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.05.003>
- Huynh, N. N. T., Imamoto, K., & Kiyohara, C. (2019). A Study on Biomaterialization using *Bacillus Subtilis* Natto for Repeatability of Self-Healing Concrete and Strength Improvement. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 17(12), 700–714. <https://doi.org/10.3151/jact.17.700>
- Huynh, N. N. T., Phuong, N. M., Toan, N. P. A., & Son, N. K. (2017). *Bacillus Subtilis* HU58 Immobilized in Micropores of Diatomite for Using in Self-healing Concrete. *Procedia Engineering*, 171, 598–605. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.385>
- Javeed, Y., Goh, Y., Mo, K. H., Yap, S. P., & Leo, B. F. (2024). Microbial self-healing in concrete: A comprehensive exploration of bacterial viability, implementation techniques, and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 29, 2376–2395. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.261>
- Jiang, S., Lin, Z., Tang, C., & Hao, W. (2021). Preparation and Mechanical Properties of Microcapsule-Based Self-Healing Cementitious

- Cementitious Composites. *Materials*, 14(17), 4866.
<https://doi.org/10.3390/ma14174866>
- Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., & Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, 36(2), 230–235.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.036>
- Kanellopoulos, A., Qureshi, T. S., & Al-Tabbaa, A. (2015). Glass encapsulated minerals for self-healing in cement based composites. *Construction and Building Materials*, 98, 780–791.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.127>
- Meng, H., Lu, X., Hussain, S., Shaheen, A., & Liu, G. (2021). Self-Healing Behaviors of Core-Shell-Structured Microcapsules Cement-Based Materials Immobilized with Microbes by Expanded Perlite. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 16(11), 1828–1833.
<https://doi.org/10.1166/jno.2021.3130>
- Nodehi, M., Ozbakkaloglu, T., & Gholampour, A. (2022). A systematic review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization, mechanical, and durability properties. In *Journal of Building Engineering* (Vol. 49). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104038>
- Panza Uguzzoni, A. M., Fregonara, E., Ferrando, D. G., Anglani, G., Antonaci, P., & Tulliani, J. M. (2023). Concrete Self-Healing for Sustainable Buildings: A Focus on the Economic Evaluation from a Life-Cycle Perspective. *Sustainability (Switzerland)*, 15(18).
<https://doi.org/10.3390/su151813637>

