



Peran *Bacillus amyloliquefaciens* dalam Bioremediasi Limbah Industri Pulp dan Kertas

The Role of *Bacillus amyloliquefaciens* in the Bioremediation of Pulp and Paper Mill Effluent

Jery Prastiyo^{1*}, Minoru Maeda², Nuning Vita Hidayati³

¹Program Studi Magister Sumberdaya Akuatik, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman, Jl. Profesor DR. HR Boenyamin No. 708, Purwokerto Utara, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah 53122, Indonesia.

²Kyushu Medical Co. Ltd, Fukuoka, Jepang

³Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman, Karangwangkal, Purwokerto, Jawa Tengah 53122, Indonesia

*Corresponding author, e-mail: jery.prastiyo@mhs.unsoed.ac.id

Diterima: 21 Oktober 2025, Disetujui 20 Desember 2025

ABSTRAK.

Industri pulp dan kertas menghasilkan limbah cair dengan kandungan lignin, zat pewarna (*chromophores*), senyawa fenolik, serta nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) yang tinggi. Senyawa-senyawa tersebut bersifat toksik, sulit terurai secara alami, dan berpotensi mencemari lingkungan perairan. Berbagai metode pengolahan limbah berbasis fisika dan kimia seperti sedimentasi, koagulasi-flokulasi, ozonasi, adsorpsi, dan filtrasi membran telah diterapkan, namun masih memiliki keterbatasan berupa biaya operasional tinggi, konsumsi energi besar, pembentukan limbah sekunder, serta efektivitas yang rendah terhadap senyawa organik kompleks. Oleh karena itu, bioremediasi menggunakan mikroorganisme menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Artikel ini bertujuan meninjau potensi *Bacillus amyloliquefaciens* sebagai agen bioremediasi limbah industri pulp dan kertas. Bakteri ini mampu menghasilkan enzim ekstraseluler seperti *dye-decolorizing peroxidase* (DyP), laccase, dan ligninase yang berperan dalam degradasi lignin, zat pewarna, dan senyawa fenolik. Selain itu, *B. amyloliquefaciens* juga menghasilkan biosurfaktan yang meningkatkan bioavailabilitas senyawa hidrofobik sehingga mempercepat proses biodegradasi. Berbagai studi menunjukkan bahwa bakteri ini efektif dalam menurunkan warna, COD, dan kandungan lignin pada limbah pulp dan kertas serta berpotensi diterapkan dalam sistem pengolahan limbah industri yang lebih efisien dan berkelanjutan. Dengan kemampuan adaptasi terhadap kondisi lingkungan ekstrem dan sifatnya yang relatif aman, *B. amyloliquefaciens* berpotensi menjadi alternatif biologis yang menjanjikan dalam pengelolaan limbah industri pulp dan kertas.

Kata kunci: *Bacillus amyloliquefaciens*, bioremediasi, lignin, limbah pulp dan kertas, biosurfaktan

ABSTRACT

The pulp and paper industry generates wastewater containing lignin, chromophoric dyes, phenolic compounds, and high levels of Chemical Oxygen Demand (COD) and Biochemical Oxygen Demand (BOD). These pollutants are toxic, difficult to degrade naturally, and potentially harmful to aquatic environments. Various conventional treatment methods, including sedimentation, coagulation–flocculation, ozonation, adsorption, and membrane filtration, have been widely applied; however, these methods still face limitations such as high operational costs, excessive energy consumption, secondary waste generation, and limited effectiveness in degrading complex organic compounds. Therefore, bioremediation using microorganisms has emerged as a more environmentally friendly and sustainable alternative. This article reviews the potential of *Bacillus amyloliquefaciens* as a bioremediation agent for pulp and paper wastewater treatment. This bacterium produces extracellular enzymes such as dye-decolorizing peroxidase (DyP), laccase, and ligninase, which play important roles in degrading lignin, dyes, and phenolic compounds. In addition, *B. amyloliquefaciens* produces biosurfactants that enhance the bioavailability of hydrophobic compounds and accelerate biodegradation processes. Various studies have demonstrated its effectiveness in reducing color intensity, COD, and lignin content in pulp and paper effluent, indicating its potential application in more efficient and sustainable industrial wastewater treatment systems. Due to its adaptability to extreme environmental conditions and relatively safe characteristics, *B. amyloliquefaciens* has strong potential as a promising biological alternative for pulp and paper wastewater management.

Keywords: *Bacillus amyloliquefaciens*, bioremediation, lignin, pulp and paper wastewater, biosurfactant.

PENDAHULUAN

Industri pulp dan kertas merupakan salah satu sektor industri yang memberikan kontribusi besar terhadap perkembangan ekonomi dan (M. Yang et al., 2023). Namun, proses produksinya menghasilkan limbah cair (*effluent*) dalam jumlah besar yang mengandung senyawa organik kompleks seperti lignin, zat pewarna (*chromophores*), dan senyawa fenolik yang bersifat toksik dan sulit terurai secara alami (Lacorte, 2003; Singh et al., 2021; Zheng et al., 2022). Limbah ini juga mengandung COD dan BOD tinggi yang bukan hanya mencemari badan air, tetapi juga mengganggu kehidupan akuatik dan kualitas lingkungan secara keseluruhan (Mandeep, Gupta, Liu, & Shukla, 2019).

Berbagai metode pengolahan limbah berbasis fisika dan kimia telah diterapkan untuk mengurangi beban pencemar pada efluen industri pulp dan kertas, di antaranya sedimentasi, flotasi, adsorpsi, koagulasi–flokulasi, ozonasi, filtrasi membran, dan oksidasi lanjut (Ren, Huo, et al., 2022; Ren, Li, et al., 2022). Meskipun metode-metode tersebut mampu menurunkan kadar lignin, zat

pewarna, dan senyawa fenolik, masing-masing masih memiliki keterbatasan. Sedimentasi hanya efektif untuk menghilangkan padatan tersuspensi, sedangkan koagulasi–flokulasi menghasilkan lumpur beracun yang memerlukan penanganan lanjutan (Ren, Li, et al., 2022); koagulasi–flokulasi menghasilkan lumpur beracun (Ren, Li, et al., 2022); ozonasi dan elektrolisis memerlukan input energi yang sangat tinggi dan biaya operasional yang mahal (Patel et al., 2021); adsorpsi dengan karbon aktif mahal (Radziff et al., 2021); sementara filtrasi membran menghadapi masalah fouling serta biaya tinggi (Patel et al., 2021). Oleh karena itu, diperlukan alternatif yang lebih ramah lingkungan, hemat biaya, dan berkelanjutan, salah satunya melalui bioremediasi dengan mikroorganisme (Patel et al., 2021; Ren, Li, et al., 2022).

Metode biologis menggunakan bakteri (seperti genus *Bacillus* dan *Pseudomonas*) atau jamur (seperti *white-rot fungi*) dianggap lebih unggul karena mampu mendegradasi polutan organik tanpa menghasilkan polusi sekunder dan beroperasi pada kondisi yang lebih

moderat (Grgas et al., 2023; Patel et al., 2021). Salah satu agen hayati yang menjanjikan adalah *Bacillus amyloliquefaciens*, bakteri gram positif yang dikenal mampu menghasilkan berbagai enzim dan senyawa bioaktif (Balhara, Ruhil, Dhankhar, & K. Chhillar, 2011). Di antaranya adalah *dye-decolorizing peroxidase* (DyP), enzim yang berperan dalam mendekolorisasi dan mendetoksifikasi senyawa pewarna dan lignin dalam limbah pulp dan kertas (Ren, Li, et al., 2022). Selain itu, kemampuan bakteri ini untuk bertahan di lingkungan yang ekstrem, serta memproduksi biosurfaktan dan senyawa antimikroba, menjadikannya kandidat unggulan dalam aplikasi pengolahan limbah industri (Beladjal, Gheysens, Clegg, Amar, & Mertens, 2018; Diez et al., 2022; Palacios-Rodriguez, Espinoza-Culupú, Durán, & Sánchez-Rojas, 2024).

Tulisan ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi *Bacillus amyloliquefaciens* sebagai alternatif biologis yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan untuk bioremediasi limbah industri pulp dan kertas. Pembahasan akan mencakup mekanisme aksi enzimatik, efisiensi dekontaminasi, serta potensi aplikasinya dalam skala industri untuk mendukung pengelolaan limbah yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

1. Industri Pulp dan Kertas serta Permasalahannya

Industri pulp dan kertas merupakan salah satu sektor strategis yang berperan besar dalam pembangunan ekonomi global. Produk kertas tidak hanya digunakan untuk keperluan percetakan, pendidikan, dan perkantoran, tetapi juga menjadi bahan baku penting dalam industri pengemasan dan berbagai produk turunan lainnya. Namun, di balik kontribusi ekonominya, industri ini juga menghasilkan limbah cair (*effluent*) dalam jumlah besar yang dapat menimbulkan

dampak lingkungan serius apabila tidak dikelola dengan baik.

Limbah cair dari industri pulp dan kertas mengandung senyawa organik kompleks seperti lignin, zat pewarna (*chromophores*), dan senyawa fenolik yang sulit terurai secara alami. Selain itu, nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) pada limbah ini relatif tinggi, menandakan kandungan bahan organik yang besar serta potensi menurunkan kadar oksigen terlarut dalam badan air. Keberadaan polutan tersebut dapat menyebabkan pencemaran air, mengganggu kehidupan organisme akuatik, dan menurunkan kualitas lingkungan perairan secara keseluruhan.

Berbagai metode pengolahan konvensional berbasis fisika dan kimia telah diterapkan, seperti sedimentasi, flotasi, *screening*, koagulasi-flokulasi, ozonasi, adsorpsi karbon aktif, dan filtrasi membran. Meskipun metode-metode ini dapat mengurangi sebagian polutan, masing-masing memiliki keterbatasan. Misalnya, koagulasi-flokulasi menghasilkan lumpur beracun, ozonasi dan elektrolisis membutuhkan energi yang tinggi, adsorpsi dengan karbon aktif mahal, sementara filtrasi membran rentan terhadap *fouling* serta berbiaya tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa pendekatan konvensional masih belum mampu memberikan solusi optimal yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Oleh karena itu, diperlukan strategi alternatif yang lebih efektif, aman, dan ekonomis dalam pengelolaan limbah pulp dan kertas. Salah satu pendekatan yang semakin mendapat perhatian adalah bioremediasi menggunakan mikroorganisme, khususnya bakteri penghasil enzim dan biosurfaktan yang mampu mendegradasi senyawa organik kompleks. Dalam konteks ini, *Bacillus amyloliquefaciens* muncul sebagai kandidat potensial berkat kemampuannya menghasilkan berbagai enzim degradasi lignin, zat pewarna, dan fenol, serta sifatnya yang tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem.

2. Komposisi Kimia Limbah Pulp dan Kertas

Industri pulp dan kertas menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar selama proses pemasakan, pemutihan, dan pencucian serat selulosa (Patel et al., 2021b). Limbah ini terdiri dari berbagai senyawa kimia organik dan anorganik yang berasal dari bahan baku kayu serta bahan kimia proses industri. Beberapa komponen utama yang sering dijumpai dalam limbah ini antara lain:

2.1 Lignin

Lignin adalah senyawa aromatik kompleks yang secara alami terdapat dalam dinding sel tumbuhan (Wu et al., 2023) dan dilepaskan selama proses delignifikasi (Deivy Andhika Permata, Anwar Kasim, Alfi Asben, & Yusniwati, 2021). Lignin yang tidak terdegradasi akan tetap berwarna coklat gelap dan menyebabkan peningkatan warna dan kekeruhan pada limbah (Lal & Garg, 2019). Di samping itu, lignin cenderung

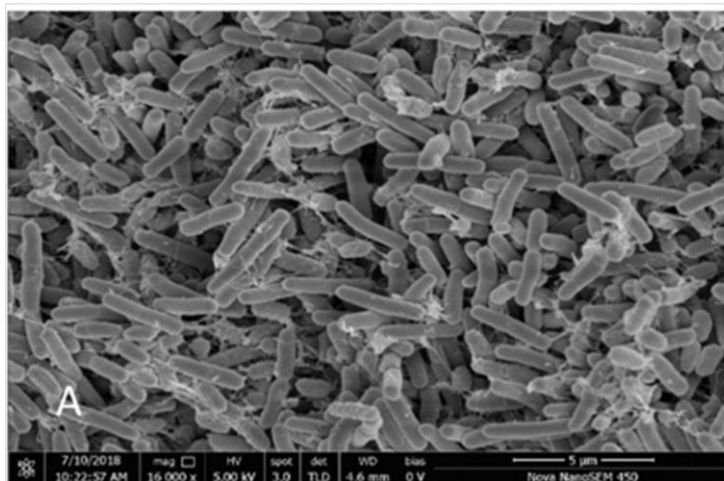
yang persisten membuat bahan ini bertahan lama di lingkungan dan dapat terakumulasi dalam rantai makanan (Grgas et al., 2023b).

Lignin memiliki efek berbahaya terhadap Kesehatan manusia karena mengandung komponen androgenik serta bersifat karsinogenik (memicu kanker), selain itu Senyawa turunan lignin yang terikat dengan klorin bertanggung jawab atas penyakit pernapasan, gangguan kronis, iritasi kulit, serta kerusakan genetik dan reproduksi pada manusia (Mandeep et al., 2019).

2.2 Zat Pewarna (*Chromophores*)

Selama proses pemutihan, terutama yang menggunakan klorin atau turunannya, terbentuk senyawa *chromophoric* yang berwarna dan stabil. Senyawa ini menyumbang pada tingginya absorbansi optik (warna) pada limbah akhir dan sering menjadi indikator keberhasilan pengolahan limbah (Budischowsky et al., 2021). Zat Pewarna

Gambar 1. *Bacillus amyloliquefaciens* dari scanning electron micrograph (Guo et al., 2019)



tahan terhadap degradasi biologis alami, Sifatnya

(*Chromophores*) dapat menyebabkan gangguan pada

pertumbuhan mikroba, plankton dan ikan kecil sehingga mengganggu seluruh rantai makanan (Mandeep et al., 2019).

2.3 Fenol

Fenol dan turunannya (seperti klorofenol) lainnya dilepaskan selama degradasi lignin (Soongprasit, Sricharoenchaikul, & Atong, 2020). Senyawa ini termasuk dalam golongan senyawa toksik dan dapat menyebabkan gangguan ekotoksikologis pada organisme perairan (Radziff et al., 2021).

Fenol dapat menyebabkan gangguan pernapasan, kerusakan reproduksi dan resiko kanker. Dampak pada lingkungan dapat berupa mengganggu system hormon makhluk hidup dan sulit terurai dan cenderung terakumulasi dalam tubuh organisme (Mandeep et al., 2019).

2.4 Chemical Oxygen Demand (COD) dan Biochemical Oxygen Demand (BOD)

Limbah dari proses pembuatan pulp dan kertas biasanya memiliki nilai COD dan BOD yang tinggi, menandakan kandungan bahan organik yang besar dan aktivitas biologis tinggi (Patel et al., 2021b). COD berkisar antara 1.000–5.000 mg/L, tergantung pada tahap proses dan jenis teknologi yang digunakan. Rasio

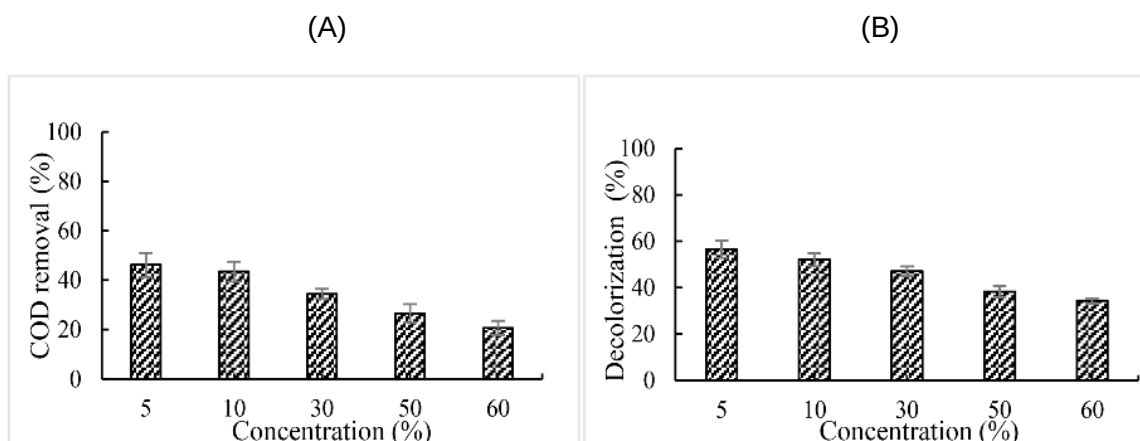
BOD/COD yang rendah menunjukkan bahwa sebagian besar bahan organik dalam limbah ini bersifat refraktori atau sulit diuraikan oleh mikroorganisme umum yang ada di perairan (W. Wang, Chang, Show, & Lee, 2022).

3. Karakteristik Umum *Bacillus amyloliquefaciens*

Bacillus amyloliquefaciens adalah bakteri Gram-positif berbentuk batang yang membentuk endospore terlihat pada Gambar 1. Bakteri ini umumnya ditemukan di tanah, rizosfer tanaman, dan lingkungan perairan, di mana ia berperan penting dalam siklus nutrisi dan dekomposisi bahan organik (Q. Wang et al., 2022).

Spesies ini dikenal karena pertumbuhannya yang cepat, kemampuan tinggi dalam menghasilkan enzim, serta adaptasi yang kuat terhadap lingkungan (Liu et al., 2025). *B. amyloliquefaciens* mampu memproduksi berbagai enzim ekstraseluler seperti amilase, protease, selulase, dan lipase, yang memungkinkannya menguraikan senyawa organik kompleks (Zalila-Kolsi, Ben-Mahmoud, & Al-Barazie, 2023). Selain itu, bakteri ini juga mensintesis senyawa antimikroba dan biosurfaktan yang efektif dalam mengendalikan patogen dan meningkatkan proses biodegradasi (Santos et al., 2023; Schalchli et al., 2023).

Gambar 2. Efek Konsentrasi Limbah terhadap Penghilangan COD dan Warna (A) COD; (B) Kromatisitas (Ren, Li, et al., 2022)



Salah satu karakteristik terpenting dari *B. amyloliquefaciens* adalah kemampuannya menghasilkan enzim dye-decolorizing peroxidase (DyP), yang dapat menguraikan senyawa aromatik dan berwarna seperti lignin dan pewarna sintetis, menjadikannya sangat relevan dalam aplikasi bioremediasi (Ren, Huo, et al., 2022; J. Yang et al., 2019).

Selain itu, *B. amyloliquefaciens* dianggap sebagai bakteri yang tidak patogen dan aman (Du et al., 2022), serta banyak digunakan di bidang pertanian sebagai agen pengendali hayati (Luo, Zhao, Wang, Raza, & Yin, 2022), maupun dalam bioteknologi lingkungan untuk pengolahan air limbah, termasuk limbah dari industri pulp dan kertas (Ren, Huo, et al., 2022). Ketahanannya terhadap kondisi lingkungan ekstrem seperti pH tinggi, salinitas, dan paparan bahan kimia toksik menjadikannya kandidat ideal untuk strategi bioremediasi yang ramah lingkungan dan hemat biaya.

3. Mekanisme Bioremediasi *Bacillus amyloliquefaciens*

3.1 Produksi Enzim

Salah satu mekanisme utama yang digunakan *Bacillus amyloliquefaciens* dalam mendukung proses bioremediasi terutama dalam pengolahan limbah dari industri pulp dan kertas adalah melalui produksi enzim ekstraseluler yang mampu menguraikan polutan organik kompleks. Enzim-enzim ini memainkan peran penting dalam memecah senyawa-senyawa resisten seperti lignin, zat pewarna, dan struktur fenolik yang umum ditemukan dalam limbah industri.

3.1.1 Dye-Decolorizing Peroxidase (DyP)

B. amyloliquefaciens diketahui mampu memproduksi dye-decolorizing peroxidase (DyP), enzim yang mengandung heme yang ditemukan pada

jamur dan bakteri. Enzim ini mengkatalisis reduksi hidrogen peroksida menjadi air, disertai dengan oksidasi berbagai substrat, termasuk pewarna antrakuinon, senyawa fenolik dan non-fenolik yang berhubungan dengan lignin (Silva, Rodrigues, Lorena, Borges, & Martins, 2023) yang merupakan polutan utama dalam limbah pabrik pulp dan kertas. Enzim ini bekerja dengan mengkatalisis oksidasi substrat fenolik dan non-fenolik dengan bantuan hidrogen peroksida (H_2O_2). DyP telah terbukti sangat efisien dalam menghilangkan warna dan menurunkan kebutuhan oksigen kimia (COD) dari air limbah yang mengandung senyawa kromoforik terlihat pada Gambar 2.

3.1.2 Laccase, Ligninase, dan Enzim Oksidatif Lainnya

Selain DyP, *B. amyloliquefaciens* juga mampu menghasilkan laccase dan enzim pengurai lignin (Mei et al., 2020). Laccase adalah enzim multi-tembaga oksidase yang mengkatalisis oksidasi fenol dan amina aromatik, sehingga membantu pemecahan struktur kompleks seperti lignin. Ligninase, termasuk lignin peroksidase (LiP) dan mangan peroksidase (MnP), juga berperan dalam memutus ikatan kompleks dalam lignin dan turunannya.

Enzim-enzim oksidatif ini tidak hanya membantu mengurangi dampak lingkungan dari air limbah, tetapi juga meningkatkan tingkat biodegradabilitasnya, sehingga mempermudah proses pengolahan lanjutan secara biologis. Produksi enzim-enzim tersebut oleh *B. amyloliquefaciens* menegaskan potensinya sebagai agen mikroba yang ramah lingkungan dan berkelanjutan dalam bioremediasi, khususnya untuk limbah industri yang kaya akan polutan organik persisten.

3.2 Peran Biosurfaktan dalam Meningkatkan Degradasi Senyawa Hidrofobik

Selain memproduksi enzim, *Bacillus amyloliquefaciens* juga berkontribusi dalam proses bioremediasi melalui sekresi biosurfaktan senyawa aktif permukaan yang berasal dari mikroba (Diez et al., 2022). Biosurfaktan ini memainkan peran penting dalam meningkatkan ketersediaan hayati (bioavailabilitas) dan degradasi senyawa organik hidrofobik yang umum ditemukan dalam limbah industri pulp dan kertas, seperti turunan lignin, fenol terklorinasi, dan asam resin.

Senyawa-senyawa hidrofobik cenderung menggumpal atau berikatan kuat dengan partikel, sehingga sulit diakses oleh enzim mikroba. Biosurfaktan mampu menurunkan tegangan permukaan dan tegangan antarmuka antara dua fase (misalnya minyak dan air), serta membentuk misel atau emulsi yang meningkatkan kelarutan semua dari senyawa tersebut (Datta et al., 2024). Proses emulsi ini mempercepat dispersi polutan ke dalam fase air, sehingga memudahkan kontak antara polutan dengan sel mikroba dan enzim.

Dengan meningkatkan aksesibilitas polutan, biosurfaktan yang diproduksi oleh *B. amyloliquefaciens*:

- Meningkatkan laju degradasi enzimatis terhadap substrat yang sulit larut,
- Mendukung biodegradasi polutan organik yang persisten, dan
- Meningkatkan efisiensi keseluruhan proses bioremediasi, terutama pada sistem air limbah yang heterogen dan kompleks.

Beberapa studi juga menunjukkan bahwa biosurfaktan dari spesies *Bacillus* memiliki sifat antimikroba dan membantu kolonisasi mikroba pada lingkungan yang kaya polutan, yang semakin memperkuat

perannya dalam pengolahan air limbah yang berkelanjutan.

4. Aplikasi *Bacillus amyloliquefaciens* dalam Pengolahan Limbah Pulp dan Kertas

4.1 Studi In Vitro / Laboratorium

Berbagai penelitian laboratorium telah menunjukkan bahwa *Bacillus amyloliquefaciens* memiliki efisiensi tinggi dalam menurunkan parameter pencemar utama pada limbah industri pulp dan kertas. Melalui produksi enzim seperti *dye-decolorizing peroxidase* (DyP), laccase, serta biosurfaktan, bakteri ini mampu mendegradasi senyawa kompleks yang sulit terurai secara alami. Beberapa hasil studi menunjukkan:

- Penurunan warna yang signifikan melalui dekolonisasi senyawa chromophoric pada limbah hasil pemutihan sampai 80,2 % (Ren, Li, et al., 2022).
- Reduksi nilai COD (Chemical Oxygen Demand) hingga 60-80 %, menandakan penurunan beban bahan organik yang dapat mencemari perairan (Mei et al., 2020; Ren, Li, et al., 2022).
- Degradasi lignin hingga 78,2% (Ren, Li, et al., 2022) dan senyawa aromatik lainnya yang selama ini dikenal resisten terhadap pengolahan biologis konvensional.

Kondisi optimum seperti pH, suhu, dan konsentrasi inokulum telah dikaji untuk memastikan efektivitas kerja bakteri dalam sistem batch atau reaktor skala kecil.

4.2 Aplikasi Skala Industri / Pilot

Meskipun sebagian besar penelitian masih dilakukan pada skala laboratorium, beberapa uji coba pada skala pilot plant telah dilakukan untuk menguji kelayakan aplikasi *B. amyloliquefaciens* di industri (Zalila-Kolsi et al., 2023). Dalam sistem biofilter,

bioreaktor aerobik, atau integrated treatment systems, bakteri ini digunakan sebagai agen bioremediasi tambahan guna mempercepat penguraian limbah kompleks sebelum dibuang atau didaur ulang.

Hasil awal dari studi skala pilot menunjukkan:

- Penurunan biaya operasional karena minimnya penggunaan bahan kimia tambahan.
- Efisiensi pengolahan meningkat jika dikombinasikan dengan metode fisikokimia seperti flokulasi atau filtrasi.
- Potensi untuk penggunaan berkelanjutan dalam sistem pengolahan air limbah industri dengan beban organik tinggi.

Implementasi pada skala industri masih memerlukan kajian lebih lanjut terkait stabilitas, konsistensi performa, serta aspek regulasi dan keamanan lingkungan.

KESIMPULAN.

Bacillus amyloliquefaciens terbukti memiliki potensi besar sebagai agen bioremediasi yang ramah lingkungan untuk pengolahan limbah industri pulp dan kertas. Melalui produksi enzim-enzim ekstraseluler seperti *dye-decolorizing peroxidase* (DyP), laccase, dan ligninase, bakteri ini mampu menguraikan senyawa organik kompleks seperti lignin, zat pewarna, dan fenol yang resisten terhadap pengolahan konvensional. Selain itu, sekresi biosurfaktan oleh *B. amyloliquefaciens* meningkatkan bioavailabilitas senyawa hidrofobik, mempercepat proses degradasi, serta mendukung efektivitas bioremediasi secara keseluruhan.

Berbagai studi laboratorium menunjukkan efektivitas signifikan dalam penurunan warna, COD, dan degradasi lignin, sementara uji coba skala pilot menegaskan kelayakan aplikasi industri

dengan efisiensi biaya dan peningkatan performa pengolahan. Dengan karakteristik yang tidak patogen dan kemampuan bertahan di lingkungan ekstrem, *B. amyloliquefaciens* berimplikasi penting dalam pengembangan teknologi pengolahan limbah yang berkelanjutan, serta berkontribusi terhadap perlindungan ekosistem perairan dan kesehatan Masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- Balhara, M., Ruhil, S., Dhankhar, S., & K. Chhillar, A. (2011). Bioactive Compounds Hold Up- *Bacillus amyloliquefaciens* as a Potent Bio-Control Agent. *The Natural Products Journale*, 1(1), 20–28. <https://doi.org/10.2174/2210315511101010020>
- Beladjal, L., Gheysens, T., Clegg, J. S., Amar, M., & Mertens, J. (2018). Life from the ashes: survival of dry bacterial spores after very high temperature exposure. *Extremophiles*, 22(5), 751–759. <https://doi.org/10.1007/s00792-018-1035-6>
- Budischowsky, D., Zwirchmayr, N. S., Hosoya, T., Bacher, M., Hettegger, H., Potthast, A., & Rosenau, T. (2021). Degradation of cellulosic key chromophores by ozone: a mechanistic and kinetic study. *Cellulose*, 28(10), 6051–6071. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03909-4>
- Datta, D., Ghosh, S., Kumar, S., Gangola, S., Majumdar, B., Saha, R., ... Kar, G. (2024). Microbial biosurfactants: Multifarious applications in sustainable agriculture. *Microbiological Research*, 279, 127551. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127551>

- Deivy Andhika Permata, Anwar Kasim, Alfi Asben, & Yusniwati. (2021). Delignification of Lignocellulosic Biomass. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 12(2), 462–469.
<https://doi.org/10.30574/wjarr.2021.12.2.0618>
- Diez, M. C., Llafquen, C., Fincheira, P., Lamilla, C., Briceño, G., & Schalchli, H. (2022). Biosurfactant Production by *Bacillus amyloliquefaciens* C11 and *Streptomyces lavendulae* C27 Isolated from a Biopurification System for Environmental Applications. *Microorganisms*, 10(10), 1892.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms10101892>
- Du, H., Yao, W., Kulyar, M. F.-A., Ding, Y., Zhu, H., Pan, H., ... Li, J. (2022). Effects of *Bacillus amyloliquefaciens* TL106 Isolated from Tibetan Pigs on Probiotic Potential and Intestinal Microbes in Weaned Piglets. *Microbiology Spectrum*, 10(1).
<https://doi.org/10.1128/spectrum.01205-21>
- Grgas, D., Rukavina, M., Bešlo, D., Štefanac, T., Crnek, V., Šikić, T., ... Landeka Dragičević, T. (2023a). The Bacterial Degradation of Lignin—A Review. *Water*, 15(7), 1272.
<https://doi.org/10.3390/w15071272>
- Grgas, D., Rukavina, M., Bešlo, D., Štefanac, T., Crnek, V., Šikić, T., ... Landeka Dragičević, T. (2023b). The Bacterial Degradation of Lignin—A Review. *Water*, 15(7), 1272.
<https://doi.org/10.3390/w15071272>
- Guo, D., Yuan, C., Luo, Y., Chen, Y., Lu, M., Chen, G., ... An, D. (2019, July 14). Biocontrol of PGPR strain *Bacillus amyloliquefaciens* Ba168 against *Phytophthora nicotianae* on tobacco.
<https://doi.org/10.1101/700757>
- Lacorte, S. (2003). Organic compounds in paper-mill process waters and effluents. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 22(10), 725–737.
[https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(03\)01009-4](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(03)01009-4)
- Lal, K., & Garg, A. (2019). Effectiveness of synthesized aluminum and iron based inorganic polymer coagulants for pulping wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103204.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103204>
- Liu, X., John Martin, J. J., Li, X., Zhou, L., Li, R., Li, Q., ... Cao, H. (2025). Optimization of the fermentation culture conditions of *Bacillus amyloliquefaciens* ck-05 using response surface methodology. *Frontiers in Microbiology*, 16.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1552645>
- Luo, L., Zhao, C., Wang, E., Raza, A., & Yin, C. (2022). *Bacillus amyloliquefaciens* as an excellent agent for biofertilizer and biocontrol in agriculture: An overview for its mechanisms. *Microbiological Research*, 259, 127016.
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127016>
- Mandeep, Gupta, G. K., Liu, H., & Shukla, P. (2019, December 1). Pulp and paper industry–based pollutants, their health hazards and environmental risks. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, Vol. 12, pp. 48–56. Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.09.010>
- Mei, J., Shen, X., Gang, L., Xu, H., Wu, F., & Sheng, L. (2020). A novel lignin degradation bacteria-*Bacillus amyloliquefaciens* SL-7 used to degrade straw lignin efficiently. *Bioresource Technology*, 310,

123445.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123445>
- Ngalimat, M. S., Yahaya, R. S. R., Baharudin, M. M. A., Yaminudin, S. Mohd., Karim, M., Ahmad, S. A., & Sabri, S. (2021). A Review on the Biotechnological Applications of the Operational Group *Bacillus amyloliquefaciens*. *Microorganisms*, 9(3), 614.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms9030614>
- Palacios-Rodriguez, A. P., Espinoza-Culupú, A., Durán, Y., & Sánchez-Rojas, T. (2024). Antimicrobial Activity of *Bacillus amyloliquefaciens* BS4 against Gram-Negative Pathogenic Bacteria. *Antibiotics*, 13(4), 304.
<https://doi.org/10.3390/antibiotics13040304>
- Patel, K., Patel, N., Vaghamshi, N., Shah, K., Duggirala, S. M., & Dudhagara, P. (2021a). Trends and strategies in the effluent treatment of pulp and paper industries: A review highlighting reactor options. *Current Research in Microbial Sciences*, 2, 100077.
<https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100077>
- Patel, K., Patel, N., Vaghamshi, N., Shah, K., Duggirala, S. M., & Dudhagara, P. (2021b). Trends and strategies in the effluent treatment of pulp and paper industries: A review highlighting reactor options. *Current Research in Microbial Sciences*, 2, 100077.
<https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100077>
- Radziff, S. B. M., Ahmad, S. A., Shaharuddin, N. A., Merican, F., Kok, Y.-Y., Zulkharnain, A., ... Wong, C.-Y. (2021a). Potential Application of Algae in Biodegradation of Phenol: A Review and Bibliometric Study. *Plants*, 10(12), 2677.
<https://doi.org/10.3390/plants10122677>
- Radziff, S. B. M., Ahmad, S. A., Shaharuddin, N. A., Merican, F., Kok, Y.-Y., Zulkharnain, A., ... Wong, C.-Y. (2021b). Potential Application of Algae in Biodegradation of Phenol: A Review and Bibliometric Study. *Plants*, 10(12), 2677.
<https://doi.org/10.3390/plants10122677>
- Ren, J., Huo, J., Wang, Q., Liu, Z., Li, S., Wang, S., ... Li, H. (2022a). Characteristics of immobilized dye-decolorizing peroxidase from *Bacillus amyloliquefaciens* and application to the bioremediation of dyeing effluent. *Biochemical Engineering Journal*, 182, 108430.
<https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108430>
- Ren, J., Huo, J., Wang, Q., Liu, Z., Li, S., Wang, S., ... Li, H. (2022b). Characteristics of immobilized dye-decolorizing peroxidase from *Bacillus amyloliquefaciens* and application to the bioremediation of dyeing effluent. *Biochemical Engineering Journal*, 182, 108430.
<https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108430>
- Ren, J., Li, X., Zhang, W., Li, Z., Wang, Q., Li, S., ... Li, H. (2022a). Evaluation of application potential of dye-decolorizing peroxidase from *Bacillus amyloliquefaciens* in bioremediation of paper and pulp mill effluent. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1031853.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1031853>
- Ren, J., Li, X., Zhang, W., Li, Z., Wang, Q., Li, S., ... Li, H. (2022b). Evaluation of application potential of dye-decolorizing peroxidase from

- Bacillus amyloliquefaciens* in bioremediation of paper and pulp mill effluent. *Frontiers in Microbiology*, 13.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1031853>
- Santos, J. B. dos, Cruz, J. de O., Geraldo, L. C., Dias, E. G., Queiroz, P. R. M., Monnerat, R. G., ... Blum, L. E. B. (2023). Detection and evaluation of volatile and non-volatile antifungal compounds produced by *Bacillus* spp. strains. *Microbiological Research*, 275, 127465. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127465>
- Schalchli, H., Lamilla, C., Rubilar, O., Briceño, G., Gallardo, F., Durán, N., ... Diez, M. C. (2023). Production and characterization of a biosurfactant produced by *Bacillus amyloliquefaciens* C11 for enhancing the solubility of pesticides. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), 111572. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111572>
- Silva, D., Rodrigues, C. F., Lorena, C., Borges, P. T., & Martins, L. O. (2023). Biocatalysis for biorefineries: The case of dye-decolorizing peroxidases. *Biotechnology Advances*, 65, 108153. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108153>
- Singh, A. K., Bilal, M., Iqbal, H. M. N., Meyer, A. S., & Raj, A. (2021). Bioremediation of lignin derivatives and phenolics in wastewater with lignin modifying enzymes: Status, opportunities and challenges. *Science of The Total Environment*, 777, 145988. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145988>
- Soongprasit, K., Sricharoenchaikul, V., & Atong, D. (2020). Phenol-derived products from fast pyrolysis of organosolv lignin. *Energy Reports*, 6, 151–167. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.08.040>
- Wang, Q., Ou, E.-L., Wang, P.-C., Chen, Y., Wang, Z.-Y., Wang, Z.-W., ... Zhang, J.-L. (2022). *Bacillus amyloliquefaciens* GB03 augmented tall fescue growth by regulating phytohormone and nutrient homeostasis under nitrogen deficiency. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.979883>
- Wang, W., Chang, J.-S., Show, K.-Y., & Lee, D.-J. (2022). Anaerobic recalcitrance in wastewater treatment: A review. *Bioresource Technology*, 363, 127920. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127920>
- Wu, W., Li, P., Huang, L., Wei, Y., Li, J., Zhang, L., & Jin, Y. (2023). The Role of Lignin Structure on Cellulase Adsorption and Enzymatic Hydrolysis. *Biomass*, 3(1), 96–107. <https://doi.org/10.3390/biomass3010007>
- Yang, J., Gao, T., Zhang, Y., Wang, S., Li, H., Li, S., & Wang, S. (2019). Degradation of the phenolic β -ether lignin model dimer and dyes by dye-decolorizing peroxidase from *Bacillus amyloliquefaciens*. *Biotechnology Letters*, 41(8–9), 1015–1021. <https://doi.org/10.1007/s10529-019-02696-0>
- Yang, M., Li, J., Wang, S., Zhao, F., Zhang, C., Zhang, C., & Han, S. (2023). Status and trends of enzyme cocktails for efficient and ecological production in the pulp and paper industry. *Journal of Cleaner Production*, 418, 138196. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138196>

Zalila-Kolsi, I., Ben-Mahmoud, A., & Al-Barazie, R. (2023). *Bacillus amyloliquefaciens*: Harnessing Its Potential for Industrial, Medical, and Agricultural Applications—A Comprehensive Review. *Microorganisms*, 11(9), 2215. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11092215>

Zheng, X., Zhao, Y., Xu, H., Fan, Q., Li, Y., Chen, L., ... Hua, D. (2022).

Enhancing the anaerobic digestion of papermaking black liquor with three-dimensional iron-carbon electrolysis and assessment of microbial community changes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(4), 108115. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108115>