

Pemanfaatan dan Aplikasi Mikroalga dalam Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit

Atika Afriani dan M. Ansori Nasution

ABSTRAK

Pemanfaatan agen-agen biologis dalam upaya bioremediasi lingkungan diharapkan dapat menjadi solusi teknik pengolahan limbah cair yang ramah lingkungan. Agen biologis berperan dalam menguraikan senyawa organik kompleks yang berdampak negatif bagi lingkungan dalam hal ini limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS). Mikroba perombak limbah terbukti sebagai agen biologis yang mampu merombak senyawa organik kompleks menjadi senyawa organik sederhana dalam pengolahan limbah cair. Pemanfaatan mikroalga dalam pengolahan limbah cair sangat potensial untuk menguraikan bahan-bahan organik dan produksi biomassa sel yang ramah lingkungan. Aplikasi mikroalga dalam pengolahan limbah cair yang juga potensial untuk menguraikan bahan-bahan organik yang terkandung dalam LCPKS. Hasil riset yang telah dilakukan menunjukkan bahwa secara alami mikroalga memiliki kemampuan meremediasi dan mereplikasi selnya dengan cepat selama berfotosintesis sehingga mampu merombak limbah cair dan menghasilkan produk berupa minyak, protein, alkohol dan biomassa.

Kata kunci: Mikroalga, pengolahan, limbah cair, pabrik kelapa sawit.

PENDAHULUAN

Perkembangan industri yang sangat pesat, selain menghasilkan produk yang mempengaruhi perekonomian global juga menghasilkan produk samping yang mempengaruhi keseimbangan lingkungan. Pemanfaatan agen-agen biologis dalam upaya bioremediasi lingkungan diharapkan dapat menjadi solusi teknik pengolahan limbah cair yang ramah lingkungan. Agen biologis berperan dalam

Penulis yang tidak disertai dengan catatan kaki instansi adalah peneliti pada Pusat Penelitian Kelapa Sawit

Atika Afriani (✉)
Pusat Penelitian Kelapa Sawit
Jl. Brigjen Katamso No. 51 Medan, Indonesia
Email: 27.atika@gmail.com

menguraikan senyawa organik kompleks yang berdampak negatif bagi lingkungan dalam hal ini limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS). Mikroba perombak limbah terbukti sebagai agen biologis yang mampu merombak senyawa organik kompleks menjadi senyawa organik sederhana dalam pengolahan limbah cair. Namun, selama kurun waktu tertentu, kemampuan mikroba di kolam limbah mengalami penurunan populasi sehingga diperlukan aktivasi mikroba untuk menjaga kinerja proses pengolahan limbah.

Limbah pengolahan kelapa sawit secara esensial tidak dalam kategori limbah beracun tetapi jika limbah tersebut jika dibuang langsung akan mempengaruhi badan air yang menampung limbah tersebut. Sekarang ini pengolahan limbah pabrik kelapa sawit di Indonesia didominasi oleh pengolahan limbah dengan kolam stabilisasi. Pengolahan ini memerlukan area yang relatif lebih luas. Selain itu teknologi yang sedang berkembang saat ini adalah dengan menggunakan land application, yaitu dengan mengalirkan limbah cair ke areal perkebunan, dengan kadar COD lebih tinggi dari standard COD (maksimum 100 ppm) yang boleh di buang ke badan air .

Sejalan dengan program pemerintah tentang penancangan produksi bersih industri pengolahan kelapa sawit dan program “zero waste”, maka pengendalian dan penanggulangan limbah hasil pengolahan kelapa sawit seyogyanya dilakukan secara komprehensif dan sinergis dengan harapan optimalitas dalam rangka meminimalisasi dampak limbah dapat dicapai.

Pemanfaatan dan aplikasi agen biologis seperti campuran mikroba seperti bakteri, jamur maupun mikroalga dapat diintegrasikan dengan kolam yang sudah ada dan dioptimasi aktivitasnya untuk meningkatkan efisiensi pengolahan limbah. Dalam proses pengolahan secara biologis, faktor utama yang berperan adalah mikroba perombak limbah. Selama

kurun waktu tertentu, kemampuan mikroba di kolam limbah akan mengalami penurunan sehingga perlu dilakukan aktivasi mikroba untuk menjaga kinerja pengolahan limbah agar tidak menurun.

Konsep Pengolahan Limbah Cair

Pengolahan limbah secara biologis dengan memanfaatkan mikroalga sangat menarik karena kemampuan fotosintesis alga, yakni mampu mengkonversi cahaya matahari menjadi biomassa yang bermanfaat dan menggabungkan nutrisi seperti nitrogen dan fosfor penyebab eutrofikasi. Mikroalga merupakan mikroorganisme fotosintetik yang dapat ditemukan di perairan tawar dan laut. Mekanisme fotosintesis mikroalga mirip dengan tumbuhan darat, dikarenakan kesamaan pada struktur selulosa yang dimilikinya. Bila dibandingkan dengan organisme fotosintetik lainnya, mikroalga paling efisien dalam menangkap dan memanfaatkan energi matahari dan CO₂ untuk keperluan fotosintesis karena organisme ini mengandung klorofil serta pigmen-pigmen lain untuk mengkonversi fotosintesis menjadi biomassa dan akumulasi pati. Mikroalga hidup secara planktonik di perairan, namun juga dapat hidup secara epifit dan bentik di dasar perairan yang memiliki intensitas cahaya yang cukup. Mikroalga mampu mengkonversi hingga 5% energi cahaya menjadi biomassa. Sejarah pemanfaatan kultur mikroalga secara komersial dimulai sejak 75 tahun yang lalu untuk aplikasi pengolahan air limbah dan produksi kultur masal strain berbeda seperti *Chlorella* dan *Dunaliella*. Saat ini, jenis mikroalga tersebut cukup menjadi pusat perhatian untuk dikembangkan di beberapa negara dunia maju seperti Australia, Amerika Serikat, Thailand, Taiwan dan Meksiko.

Kultivasi mikroalga menawarkan langkah menarik dalam pengolahan limbah cair secara biologis pada tahap pengolahan tersier disertai produksi biomassa yang sangat bernilai dan dapat digunakan untuk beberapa tujuan. Kultivasi mikroalga menjadi solusi tepat untuk pengolahan limbah tersier karena kemampuan mikroalga menggunakan nitrogen anorganik dan fosfor untuk pertumbuhannya. Keunggulan lainnya, mikroalga mampu mereduksi kandungan logam berat dan beberapa senyawa organik beracun yang terkandung dalam limbah. Dengan demikian, penerapan kultivasi mikroalga dapat diintegrasikan dengan pengolahan limbah konvensional sistem kolam terbuka dan efektif untuk meningkatkan kandungan makro dan mikro nutrisi

limbah dalam mendukung konsep zero waste khususnya pada teknologi pengolahan LCPKS dengan menggunakan land application di perkebunan kelapa sawit. Biomassa dapat dipanen untuk dijadikan pakan ternak ataupun pupuk organik.

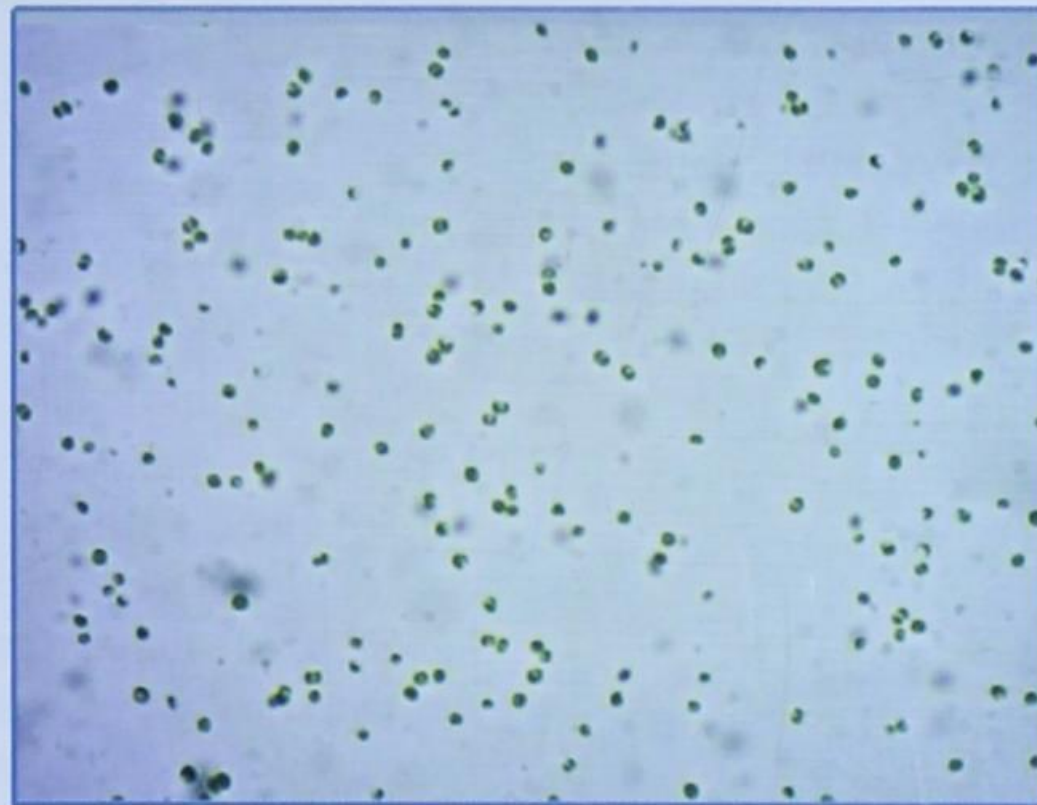
Mikroalga

Mikroalga merupakan mikroorganisme uniseluler yang memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap lingkungan. Mikroalga mampu mengabsorpsi energi cahaya dengan intensitas cahaya yang rendah karena kondisi LCPKS yang berwarna pekat. Proses ini dikenal dengan fotosintesis yaitu proses menghasilkan karbohidrat dan oksigen dari reaksi air dan karbondioksida dengan bantuan matahari. Proses fotosintesis mikroalga juga terdiri dari dua tahap yakni fotosistem I dan fotosistem II. Kegunaan alga cukup banyak, alga juga digunakan sebagai sumber makanan dan juga sebagai sumber energi. Sebagai sumber energi alga dapat menghasilkan *bio-oil* dan ada juga yang dapat menghasilkan gas hidrogen. Alga yang menghasilkan *bio-oil* berasal dari bagian tubuh alga yakni vakuola. Sedangkan gas hidrogen dihasilkan selama proses fotosintesis pada fotosistem II.

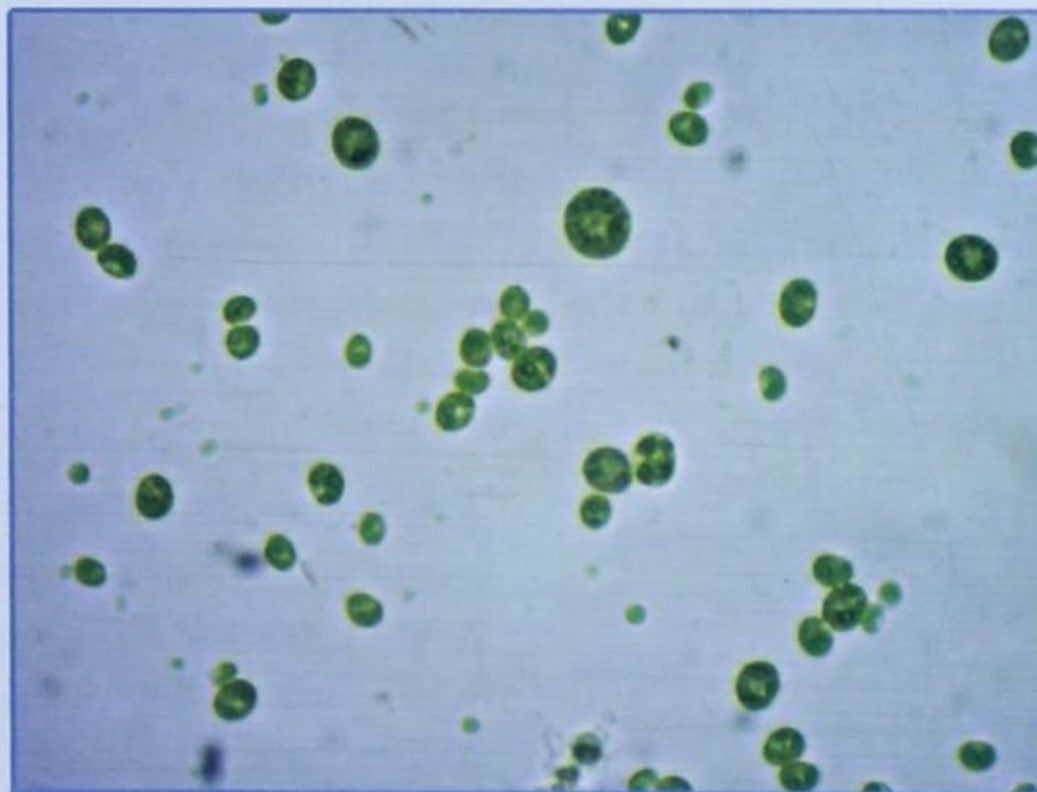
Fotosintesis terdiri dari reaksi gelap dan reaksi terang. Reaksi terang melibatkan dua fotosistem yang saling bekerja sama, yaitu fotosistem I dan II. Fotosistem I (PS I) berisi pusat reaksi P700, yang berarti bahwa fotosistem ini optimal menyerap cahaya pada panjang gelombang 700 nm, sedangkan fotosistem II (PS II) berisi pusat reaksi P680 dan optimal menyerap cahaya pada panjang gelombang 680 nm. Mekanisme reaksi terang diawali dengan tahap dimana fotosistem II menyerap cahaya matahari sehingga elektron klorofil pada PS II tereksitasi dan menyebabkan muatan menjadi tidak stabil. Untuk menstabilkan kembali, PS II akan mengambil elektron dari molekul H₂O yang ada di sekitarnya. Molekul air akan dipecahkan oleh ion mangan (Mn) yang bertindak sebagai enzim. Hal ini akan mengakibatkan pelepasan H⁺ di lumen tilakoid. Reaksi ini dikatalisis dalam stroma oleh enzim feredoksin-NADP⁺ reduktase. Ion H⁺ yang telah dipompa ke dalam membran tilakoid akan masuk ke dalam ATP sintase. ATP sintase akan menggandengkan pembentukan ATP dengan pengangkutan elektron dan H⁺ melintasi membran tilakoid. Salah satu hambatan produksi hidrogen adalah produksi oksigen sebagai hasil fotosintesis. Dengan memodifikasi medium

tumbuhnya dan faktor lingkungannya, diharapkan mikroalga mampu meningkatkan reaksi metabolismenya dalam membentuk molekul-molekul hydrogen.

Isolat mikroalga di Laboratorium Bioproses PPKS diperoleh sebanyak 4 jenis antara lain *Chlorella* sp. dan isolat WA. Mikroalga tersebut termasuk dalam kelompok alga hijau kelas *Chlorophyta*. Kedua jenis mikroalga ini telah diseleksi berdasarkan kemampuan hidupnya di LCPKS.



Gambar 1. Isolat WA



Gambar 2. *Chlorella* sp.

Kultivasi Mikroalga di LCPKS

Mikroalga merupakan mikroorganisme uniseluler yang memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap lingkungan. Mikroalga mampu mengabsorpsi energi cahaya dengan intensitas cahaya yang rendah karena kondisi LCPKS yang berwarna pekat. Proses ini dikenal dengan fotosintesis yaitu proses menghasilkan karbohidrat dan oksigen dari reaksi air dan karbondioksida dengan bantuan matahari. Proses fotosintesis mikroalga juga terdiri dari dua tahap yakni fotosistem I dan fotosistem II.

Mikroalga akan menghasilkan enzim-enzim spesifik untuk merombak LCPKS sebagai sumber nutrisinya. Kultivasi mikroalga akan dilakukan dalam LCPKS sebagai media tumbuhnya dalam upaya menurunkan COD limbah dan meningkatkan kualitas air buangan limbah ke badan air sesuai standar yang diperbolehkan.

Kultivasi mikroalga dalam sel elektrokoagulasi di laboratorium dilakukan dengan medium BG-11 dan medium berbasis LCPKS dengan komposisi 80% LCPKS dan 20% medium BG-11. Sebanyak 20% starter

mikroalga ke dalam sel elektrokoagulasi. Sel mikroalga-elektrokoagulasi dioperasikan dengan menggunakan penyearah arus, *power supply* dengan rentang arus listrik 0-60 ampere dan tegangan listrik 0,5-1,5 volt, ampere meter digital dengan rentang arus listrik 0-20 ampere dan voltmeter digital dengan rentang tegangan listrik 0-300 volt DC. Pengaruh tegangan listrik terhadap penurunan COD dan beberapa parameter lain diobservasi dalam waktu reaksi selama 1-7 hari didalam reaktor. Sebelum pengoperasian proses elektrokoagulasi, semua bahan dan alat yang digunakan harus dalam keadaan baik, untuk menjamin tidak ada masalah pada proses yang akan dilakukan.

Mikroalga dibiakkan dan diperbanyak dalam media cair yang dimodifikasi berbasis LCPKS dengan pH 8-9. Sebanyak 15% (0.4 g/l) isolat mikroalga diinokulasikan ke media cair modifikasi (LCPKS + medium BG-11). Mikroalga diinkubasi dengan aerasi dan penyinaran lampu UV 18 Watt (10000 lux) selama 6-7 hari. Sumber LCPKS yang digunakan sebagai medium alga dan yang akan seolah berasal dari keluaran tangki RANUT (reaktor milik PPKS untuk pengolahan LCPKS dan produksi biogas metan) dengan kisaran COD 3000-5000 ppm.

Pada penelitian skala laboratorium telah diperoleh isolat WA (*wild algae*) dan *Chlorella sp* yang telah diisolasi dari berbagai sumber perairan dan diseleksi berdasarkan kemampuan hidupnya di LCPKS. Kedua isolat merupakan jenis mikroalga yang termasuk ke dalam kelas alga hijau (*Chlorophyta*). Kegiatan isolasi dan eksplorasi mikroalga dari berbagai sumber perairan yang mampu beradaptasi dengan daya hidup yang tinggi di LCPKS masih terus dilakukan hingga saat ini.

Kedua mikroalga dapat tumbuh baik dalam sel elektrokogulasi yang dilengkapi dengan air sparger selama 7 hari masa inkubasi (Gambar 3). Pertumbuhan mikroalga tidak optimal dalam sel elektrokoagulasi tanpa sparger bahkan menyebabkan kematian alga. Air sparger berperan dalam menjaga kondisi medium cair tetap homogen sebagai sumber nutrisi bagi alga agar mudah diabsorpsi melalui membrane sel.

Selain itu, tegangan listrik yang dialirkan juga berpengaruh terhadap pertumbuhan mikroalga dan sebaliknya. Aklimatisasi mikroalga dalam sel elektrokoagulasi mampu menurunkan konsumsi tegangan listrik menjadi 0,5-1 volt. Sel

elektrokoagulasi beroperasi dengan mengalirkan tegangan listrik sebesar 2-4 volt yang dialirkan melalui elektroda (anoda dan katoda) saja untuk mengolah LCPKS (Nasution *et al.*, 2011). Jika tegangan listrik yang dialirkan > 1,5 volt, maka dapat menyebabkan sel alga mengalami lisis.

Alga dapat berfungsi sebagai biokatoda dimana melalui proses fotosintesis, dibantu radiasi cahaya matahari, memanfaatkan CO₂ sebagai sumber karbon dan menghasilkan oksigen, alga juga menjadi akseptor elektron biologis yang secara simultan juga mereduksi karbon dioksida menjadi biomassa.

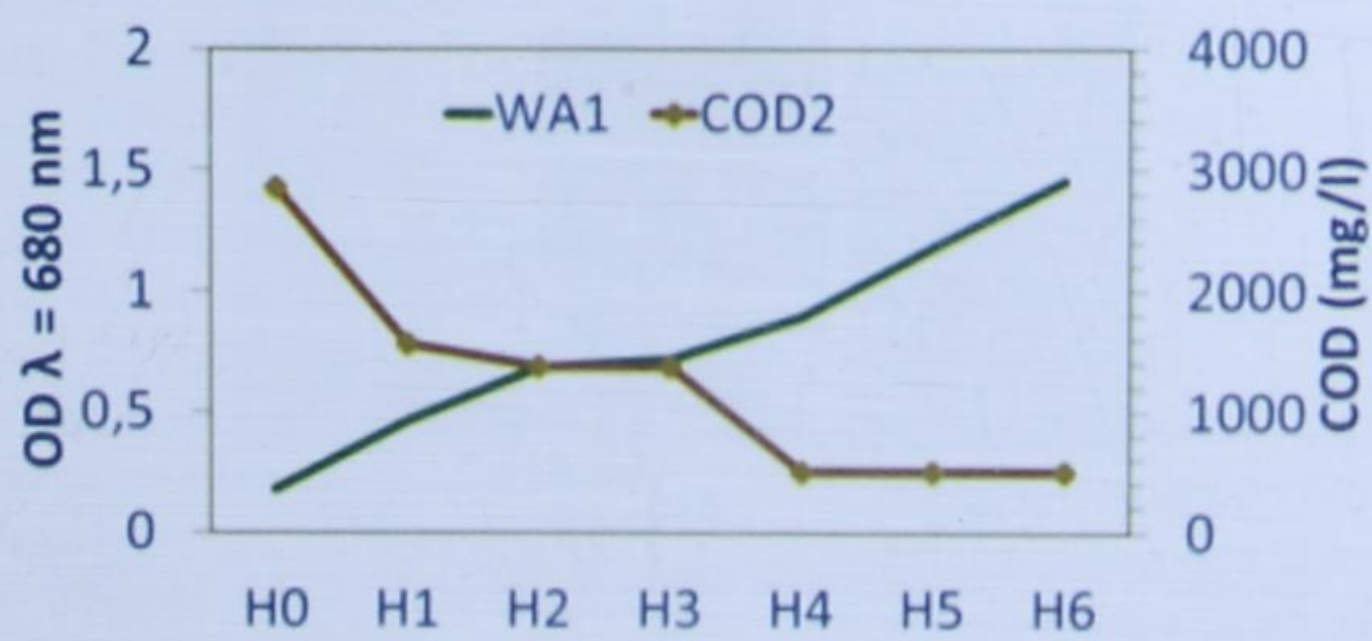
Pertumbuhan alga diamati dari nilai kepadatan sel alga pada panjang gelombang 680 nm dalam media LCPKS keluaran Ranut yang telah disaring dengan kondisi septik menunjukkan bahwa ketiga isolat dapat hidup dan mampu beradaptasi dengan baik dalam media limbah tersebut (Gambar 4). Isolat WA1 menunjukkan pola pertumbuhan fase eksponensial dimulai pada hari pertama sedangkan fase eksponensial *Chlorella sp* (Gambar 5) dimulai dari hari kedua. Sampai hari keenam, pola pertumbuhan belum memasuki fase stasioner. Pada penelitian yang pernah dilakukan, *Chlorella sp.* yang ditumbuhkan pada limbah yang berasal dari pengolahan limbah rumah tangga kondisi aseptik memasuki fase eksponensial pada hari ketiga dan fase stasioner pada hari keenam.

Peningkatan jumlah sel alga berbanding terbalik dengan nilai COD akhir yang diperoleh setelah masa inkubasi 6 hari. Alga mampu menurunkan COD limbah sampai 77% dalam waktu 6 hari. Nilai COD mulai mengalami penurunan signifikan pada hari kedua baik pada *Chlorella*, alga WA1 dan Wa2 pH akhir medium menjadi 7,8 dari pH awal 7,1.

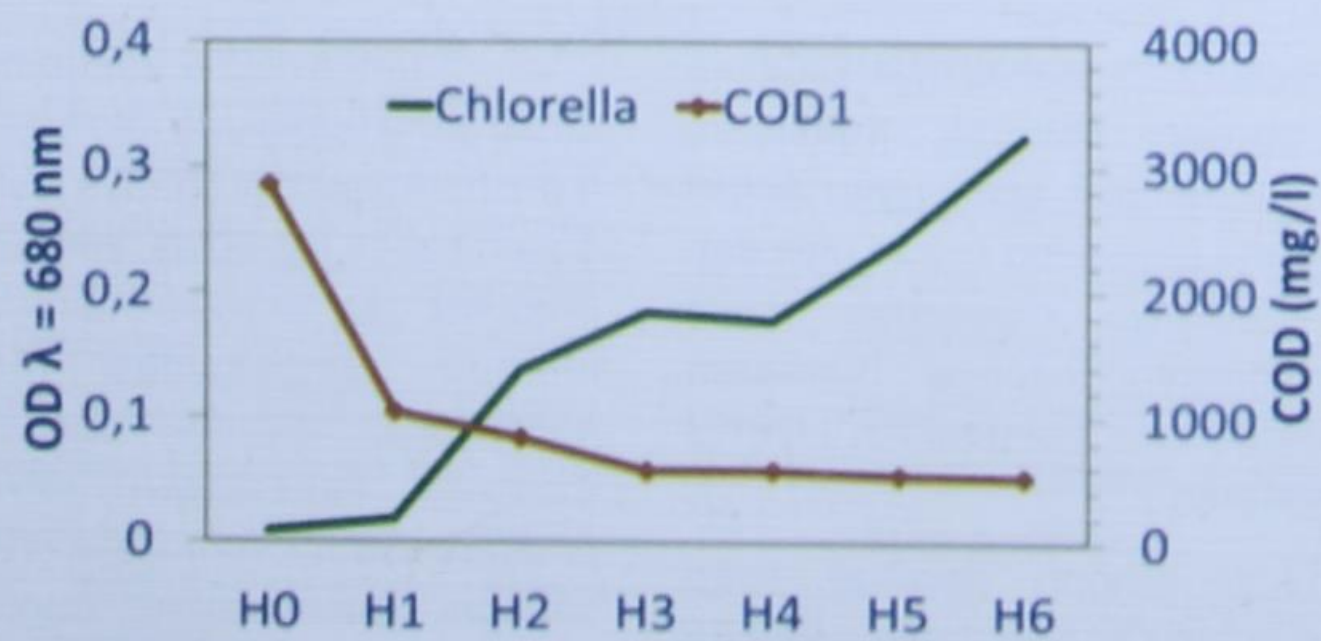
Saat ini, alga sering dimanfaatkan untuk proses biofiksasi karena kemampuannya yang sangat potensial dalam menyerap CO₂. Kemampuan alga dalam memanfaatkan nutrisi yang terkandung dalam limbah cair dapat menjadi alternatif pengolahan LCPKS yang terintegrasi dengan kultivasi alga. Beberapa pabrik kelapa sawit (PKS) mengaplikasikannya dalam kolam-kolam alga yang diintegrasikan dengan kolam pengolahan LCPKS yang sudah ada. Aplikasi alga untuk pengolahan limbah cair (limbah rumah tangga maupun limbah industri pertanian) sangat cocok pada proses pengolahan limbah tersier yang bertujuan untuk mengurangi ammonia, nitrat dan fosfor. Biaya untuk tahap



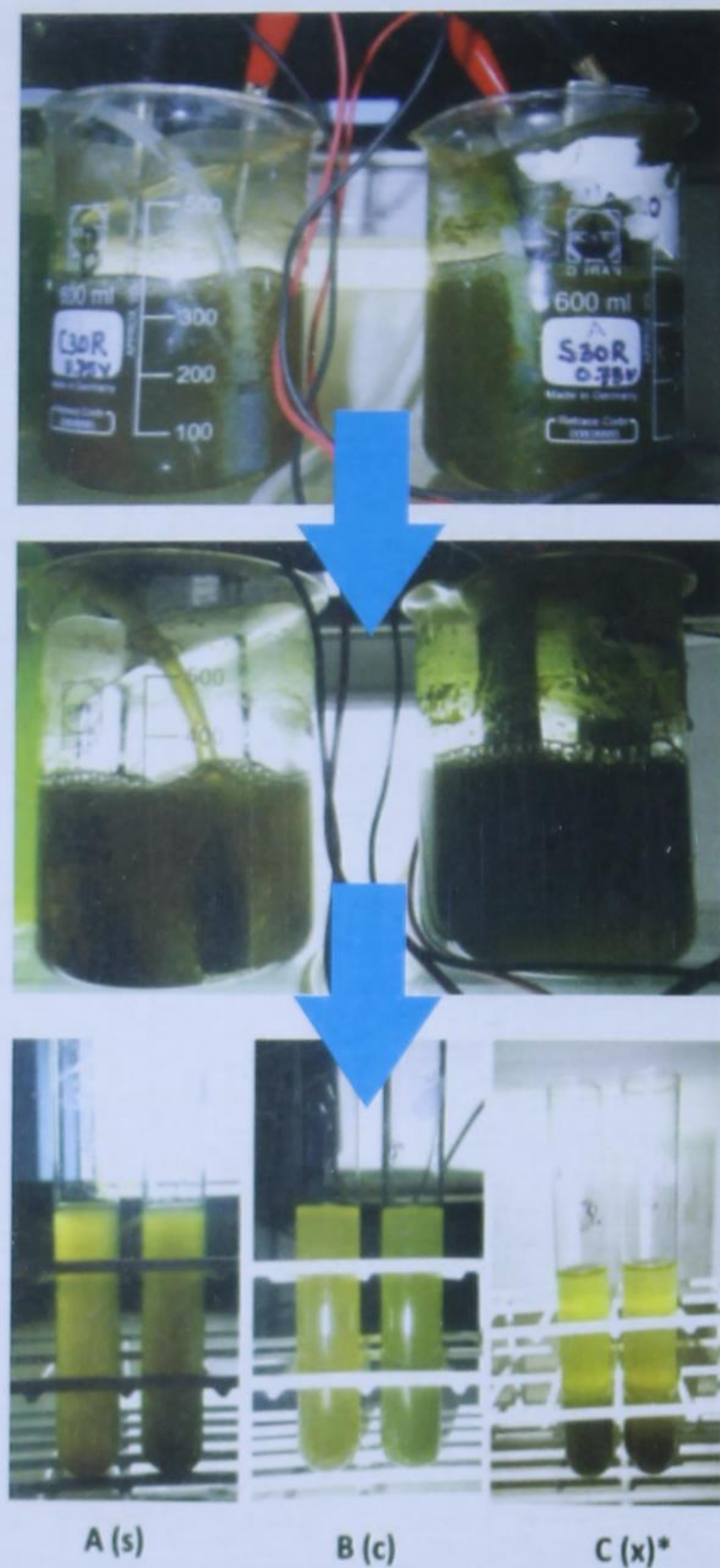
Gambar 3. (a) tanpa air *sparger* dan dialiri listrik, (b) dengan air *sparger* tanpa aliran listrik merupakan standar kultivasi alga dan (c) dengan air *sparger* dan dialiri listrik. Kedua isolat dapat hidup dalam sel elektrokoagulasi dgn konsumsi listrik 0,5-1,05 vol



Gambar 4. Kurva pertumbuhan mikroalga dan penurunan COD LCPKS.



Gambar 5. Kurva pertumbuhan mikroalga dan penurunan COD LCPKS.



Gambar 6. Kultivasi mikroalga dalam sel elektrokoagulasi + LCPKS

pengolahan ini empat kali lebih mahal dibandingkan tahap pengolahan primer. Dengan demikian, pemanfaatan alga dapat menjadi salah satu solusi karena sistem metabolisme alga yang cukup unik dan mudah dalam penanganannya khususnya dalam memodifikasi medium pertumbuhannya. Biomassa alga yang dihasilkan dari sistem pengolahan LCPKS dapat digunakan sebagai pupuk.

Penurunan COD limbah *deoiling pond* sebesar 75,8%; masa inkubasi 24 hari; tegangan 0,75 volt, biomassa 350 mg/ml; dan sludge sangat sedikit.

Fotosintesis umumnya terjadi melalui dua tahap yang terdiri dari fotosistem I (PSI) dan fotosistem II (PSII). Absorpsi cahaya oleh perangkat fotosintesis, dalam hal ini kloroplas, sangat esensial dalam proses produksi gas hidrogen karena cahaya yang diserap mampu mengoksidasi molekul air kemudian melepaskan elektron dan proton, serta bereaksi dengan feredoxin membentuk senyawa *photosynthetic feredoxin* (PetF). PetF berfungsi sebagai donor elektron bagi enzim Fe-hidrogenase yang menghubungkannya dengan rantai transpor elektron dalam kloroplas pada alga hijau. Melalui

proses pada PSII gas hidrogen terbentuk sebagai produk samping fotosintesis (Melis & Happe, 2001).

Berdasarkan hasil analisis gas dengan menggunakan GC SRI melalui kultur *batch* tertutup diketahui bahwa alga menghasilkan gas hidrogen sebesar 6,9% sebagai hasil samping proses fotosintesis (Gambar 6).

Fotosintesis terdiri dari reaksi gelap dan reaksi terang. Reaksi terang melibatkan dua fotosistem yang saling bekerja sama, yaitu fotosistem I dan II. Fotosistem I (PS I) berisi pusat reaksi P700, yang berarti bahwa fotosistem ini optimal menyerap cahaya pada panjang gelombang 700 nm, sedangkan fotosistem II (PS II) berisi pusat reaksi P680 dan optimal menyerap cahaya pada panjang gelombang 680 nm. Mekanisme reaksi terang diawali dengan tahap dimana fotosistem II menyerap cahaya matahari sehingga elektron klorofil pada PS II tereksitasi dan menyebabkan muatan menjadi tidak stabil. Untuk menstabilkan kembali, PS II akan mengambil elektron dari molekul H_2O yang ada di sekitarnya. Molekul air akan dipecahkan oleh ion mangan (Mn) yang bertindak sebagai enzim. Hal ini akan mengakibatkan pelepasan H^+ di lumen tilakoid. Fotosistem I (PS-I) menyerap energi cahaya terpisah dari PS II, tapi mengandung kompleks inti terpisahkan, yang menerima elektron yang berasal dari H_2O melalui kompleks inti PS II lebih dahulu. Sebagai sistem yang bergantung pada cahaya, PS I berfungsi mengoksidasi plastosianin tereduksi dan memindahkan elektron ke protein Fe-S larut yang disebut feredoksin. Feredoksi akan memicu dihasilkannya hidrogen dan menghambat produksi oksigen. Selanjutnya elektron dari feredoksin digunakan dalam tahap akhir pengangkutan elektron untuk mereduksi $NADP^+$ dan membentuk NADPH. Reaksi ini dikatalisis dalam stroma oleh enzim feredoksin- $NADP^+$ reduktase. Ion H^+ yang telah dipompa ke dalam membran tilakoid akan masuk ke dalam ATP sintase. ATP sintase akan menggandengkan pembentukan ATP dengan pengangkutan elektron dan H^+ melintasi membran tilakoid. Salah satu hambatan produksi hidrogen adalah produksi oksigen sebagai hasil fotosintesis. Dengan memodifikasi medium tumbuhnya dan faktor lingkungannya, diharapkan mikroalga mampu meningkatkan reaksi metabolismenya dalam membentuk molekul-molekul hidrogen.

Keunggulan Aplikasi Mikroalga

- Mikroalga adalah organisme fotosintetik yang akan mengikat CO_2 untuk dikonversi menjadi gula sebagai sumber energinya sendiri dan melepaskan O_2 ke lingkungan
- Mikroalga juga melepaskan hidrogen yang ramah lingkungan, terutama atmosfer, sebagai upaya mitigasi gas rumah kaca.
- Reaksi berlangsung secara aerob sehingga tidak ada gas metan atau gas lainnya yang berdampak buruk bagi lingkungan.
- Biomassa mikroalga dapat dipanen dan dijadikan pupuk organik.

KESIMPULAN

1. Mikroalga dapat dikultivasi dalam LCPKS sebagai medium hidupnya dan berperan sebagai produsen bagi mikroba perombak limbah lainnya di limbah cair.
2. Mikroalga dapat beraklimatisasi dan tumbuh baik dalam LCPKS serta mampu menurunkan nilai COD.

DAFTAR PUSTAKA

- Nasution, M.A., T. Herawan, and V.D. Lelyana, *Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit Menggunakan Anaerobic Fixed Bed Reactor*. J. Pen. Kelapa Sawit, 2009. **17**(3): p. 114-119.
- Liu, H., X. Zhao, and J. Qu, *Electrocoagulation in Water Treatment*, in *Electrochemistry for the Environment*, C. Comninellis and G. Chen, Editors. 2010, Springer Science+Business Media: New York. p. 245-262.
- Nasution, M.A., Z. Yaakob, and T. Herawan, *Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit dan Penghasilan Hidrogen Menggunakan Elektrokoagulasi*. J. Pen. Kelapa Sawit, 2010. **18**(2): p. 86-96.
- Nasution, M.A., et al., *Electrocoagulation of Palm Oil Mill Effluent as Wastewater Treatment and Hydrogen Production Using Electrode Aluminum*. Journal of Environmental Quality,

2011. **40**(4): p. 1332-1339.
- Abdel-Raouf, N., A.A. Al-Homaidan, and I.B.M. Ibraheem, *Microalgae and wastewater treatment*. Saudi Journal of Biological Sciences, 2012. **19**(3): p. 257-275.
- Takara, D., et al., *Sustainable bioenergy from biofuel residues and wastes*. Water Environment Research, 2010. **82**(10): p. 1694-1719.
- Sydney, E.B., et al., *Screening of microalgae with potential for biodiesel production and nutrient removal from treated domestic sewage*. Applied Energy, 2011. **88**(10): p. 3291-3294.
- Olguín, E.J., *Dual purpose microalgae–bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery*. Biotechnology Advances, 2012. **30**(5): p. 1031-1046.
- Selmani, N., M.E.S. Mirghani, and M.Z. Alam. *Study the growth of microalgae in palm oil mill effluent waste water*. 2013. Putrajaya.
- Kao, C.-Y., et al., *Ability of a mutant strain of the microalga Chlorella sp. to capture carbon dioxide for biogas upgrading*. Applied Energy, 2012. **93**(0): p. 176-183.
- Hurtado, R.G., *Microalgae-based wastewater treatment for biogas production: Green energy production implications and strategic considerations*, 2013, Southern University and Agricultural and Mechanical College: Ann Arbor. p. 75.
- Hadiyanto, M. Christwardana, and D. Soetrisnanto, *Phytoremediations of Palm Oil Mill Effluent (POME) by using aquatic plants and microalge for biomass production*. Journal of Environmental Science and Technology, 2013. **6**(2): p. 79-90.