

KAJIAN POTENSI TEKNOLOGI MICROBIAL ELECTROSYNTHESIS CELL (MES) UNTUK SINTESIS SENYAWA ORGANIK (C1-C5) DARI GAS KARBONDIOKSIDA

STUDY ON MICROBIAL ELECTROSYNTHESIS CELL (MES) TECHNOLOGY POTENCY FOR (C1-C5) ORGANIC COMPOUND SYNTHESIS FROM CARBONDIOXIDE

Rustiana Yuliasni

Balai Besar Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri

Jl. Kimangsarkoro No.6 - Semarang

Email : rustianay@yahoo.com

Naskah diterima tanggal 11 Agustus 2015, disetujui tanggal 29 Oktober 2015

ABSTRACT

Carbon dioxide can be reduced to ethanol and any other organic compound e.g acetate, by applying electrical energy with acetogenic bacteria acts as catalyst. This technology known as Microbial Electrosynthesis Cell (MES). MES technology become very prospective because it has potential to store renewable energy source from solar or wind energy, to reduce carbondioxide and to produce biofuel. However, MES technology is relatively novel technology, with current researches are emphasizing more on developing MES technology at lab scale, but facing many drawbacks at pilot scale application. Therefore this review will quantitatively investigate the development of MES technology by making review and summary of related researches for the past 10 years. This article will become guidance for the future research or application for bigger scale.

Keywords : *Bioelectrochemistry, carbondioxide, ethanol, acetate, electrosynthesis*

ABSTRAK

Karbon dioksida dapat direduksi menjadi etanol dan senyawa organik lainnya seperti asetat dengan cara mengaplikasikan energi listrik dan dengan bantuan bakteri elektroaktif sebagai katalis, suatu teknologi yang dinamakan sebagai *Microbial Electrosynthesis Cell (MES)*. Teknologi ini menjadi sangat menarik untuk diteliti lebih lanjut karena merupakan upaya untuk menyimpan energi listrik dari sumber energi terbarukan seperti energi panas matahari dan angin, sebagai upaya untuk mereduksi gas CO₂ dan sebagai salah satu alternatif teknologi dalam produksi bahan bakar ramah lingkungan (*biofuel*). Walaupun demikian, teknologi ini masih tergolong baru, dan penelitian yang ada masih dalam skala laboratorium karena adanya hambatan-hambatan untuk aplikasi teknologi ini dalam skala *pilot plant*. Oleh karena itu, di dalam kajian ini akan menitik beratkan pada investigasi secara kuantitatif dengan cara mereview penelitian-penelitian yang sudah dilakukan selama kurun waktu 10 tahun ini, sehingga dapat dijadikan referensi dalam pengembangan teknologi ini untuk skala yang lebih besar nantinya.

Kata kunci : Bioelektrokimia, karbondioksida, asetat, etanol, elektrosintesis

PENDAHULUAN

Sebanyak 81% kebutuhan energi dunia masih mengandalkan energi yang berasal dari bahan bakar fosil sehingga berdampak pada meningkatnya emisi gas rumah kaca terutama emisi gas karbondioksida (CO₂) (Teske *et al.* 2010). Pada tahun 2010, Emisi CO₂ cenderung meningkat mencapai 390 ppm atau meningkat sebanyak 39% di atas konsentrasi sebelum era industri [Edenhofer and Zwickel, 2011]. Dengan peningkatan emisi gas rumah kaca terutama CO₂, potensi energi terbarukan, yaitu energi panas matahari dan energi angin,

sebagai energi alternatif yang ramah lingkungan menjadi alternatif yang potensial sebagai pengganti ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Namun sayangnya listrik yang berasal dari energi panas matahari dan energi angin tersebut masih terkendala oleh pasokannya yang fluktuatif sehingga untuk pemanfaatannya dengan skala yang lebih besar, energi tersebut perlu disimpan dalam bentuk lain yang stabil, mudah penyimpanannya, mudah pengangkutannya dan mudah pemanfaatannya. Salah satu alternatif untuk menyimpan listrik yang berasal dari energi panas matahari dan angin adalah dengan merubahnya menjadi bahan bakar ramah

lingkungan (*biofuel*) seperti etanol (Denholm *et al.*, 2010).

Karbon dioksida dapat direduksi menjadi etanol dan senyawa organik lainnya seperti asetat (Lovley dan Nevin 2013) dengan cara mengaplikasikan energi listrik dan dengan bantuan bakteri elektroaktif sebagai katalis, suatu teknologi yang dinamakan sebagai *Microbial Electrosynthesis Cell (MES)*. Dalam kondisi reduktif dan anaerobik, bakteri asetogen dapat menggunakan CO₂ sebagai substrat dan sebagai elektron akseptor, kemudian menggunakannya dalam metabolisme sel melalui mekanisme yang dinamakan *wood ljungdahl pathway* (Schuchmann dan Müller 2014), merubah CO₂ menjadi senyawa organik seperti asetat (Kelly P Nevin *et al.* 2010; Jiang *et al.* 2013), dan etanol (Steinbusch *et al.* 2010; Sakai *et al.* 2004). Selain asam-asam organik, metan juga menjadi salah satu produk dari reduksi CO₂ secara bioelektrokimia (Van Eerten-Jansen *et al.* 2013).

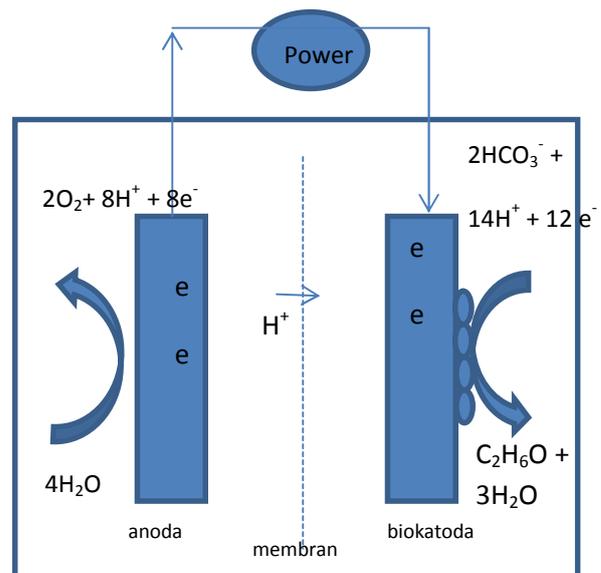
Teknologi ini menjadi sangat menarik untuk diteliti lebih lanjut karena 1) sebagai upaya menyimpan menyimpan energi listrik yang didapat dari energi panas matahari dan angin; 2) sebagai upaya untuk mereduksi gas CO₂; 3) sebagai salah satu alternatif teknologi dalam produksi bahan bakar ramah lingkungan (*biofuel*). Walaupun demikian, teknologi ini masih tergolong baru dan kelayakan teknologi ini dari segi teknis maupun ekonomi perlu dikaji lagi, karena disamping segala keunggulan yang ada, hambatan-hambatan dalam pengembangan teknologi ini juga banyak dan layak untuk dikaji lebih jauh. Salah satu hambatan yang paling mendasar dalam aplikasi teknologi ini adalah bagaimana cara membuat biokatoda yang stabil sehingga bakteri asetogen dapat menempel dan membentuk biofilm di permukaan katoda dan juga pembuatan biokatoda yang dapat memperkecil overpotensial dari katoda yang mayoritas terbuat dari karbon.

Karena teknologi ini tergolong baru, maka kajian literatur akan lebih banyak meringkas penelitian yang sudah ada tentang sejauh mana teknologi reduksi karbon dioksida menjadi berbagai macam senyawa organik secara bioelektrokimia ini telah berkembang. Investigasi akan dilakukan secara kuantitatif yaitu dengan mereview penelitian-penelitian yang sudah dilakukan selama ini serta hambatan-hambatan apa saja yang dihadapi oleh teknologi ini terutama dalam hal pengembangan biokatoda sehingga nantinya

potensi dari teknologi ini bisa dimaksimalkan di masa yang akan datang.

Microbial Electrosynthesis (MES): memberi makan elektron kepada bakteri

Sebenarnya konsep dari *Microbial Electrosynthesis (MES)* adalah pengembangan dari konsep sistem bioelektrokimia atau yang kerap disebut sebagai *Bioelectrochemical System (BESs)*. BESs biasanya terdiri atas ruang anoda dan ruang katoda yang di pisahkan oleh membran. Elektroda dicelupkan kedalam larutan elektrolit. Larutan elektrolit yang digunakan bisa berupa air limbah (Logan dan Rabaey 2012) atau air biasa. BESs bisa dioperasikan dalam bentuk *Microbial Fuel Cell (MFC)*, dimana dihasilkan energi listrik, atau bisa juga dioperasikan dalam bentuk *Microbial Electrosynthesis Cell (MES)* dimana energi listrik diperlukan untuk mendorong laju reaksi yang secara termodinamika tidak spontan (Hamelers *et al.*, 2010, Rabaey and Rozendal, 2010). Berbagai macam mikroorganisme (Logan, 2009) dan enzim (Jia *et al.* 2005) dapat dipakai sebagai katalis untuk reaksi elektrokimia yang terjadi.



Gambar 1. Konsep dari reduksi CO₂ menjadi etanol dalam sistem MES

Gambar 1. Konsep dari reduksi CO₂ menjadi etanol dalam sistem MES, dimana air di oksidasi di ruang anoda, elektron mengalir menuju katoda yang kemudian ditangkap oleh mikroorganisme yang kemudian dipakai untuk mereduksi CO₂ menjadi etanol.

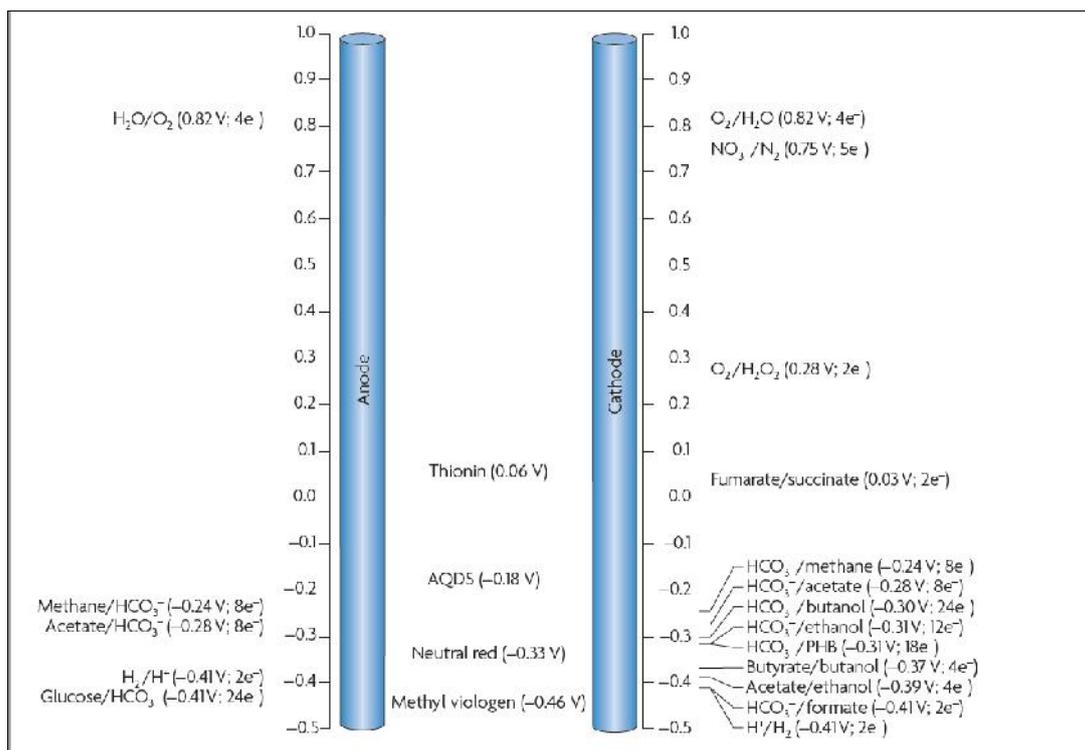
Kebutuhan energi listrik di dalam MES sistem

Dalam sistem MES, besarnya energi listrik yang dibutuhkan agar reaksi reduksi CO₂

di ruang katoda berjalan spontan di definisikan sebagai potensial katoda. Pendekatan perhitungan teoritis potensial katoda dihitung berdasarkan termodinamika reaksi di katoda, dengan menghitung energi Gibb's bebas (Gibb's *free energy*) dari reaksi di katoda. Dalam kondisi standar Gr° (kJ/mol) dapat dikonversikan menjadi standar potensial E_0 (V vs *standard hydrogen electrode* (SHE)), sebagaimana perhitungan oleh (Cheng dan Hamelers 2008).

$$E = - Gr^\circ/nF.....(1)$$

Untuk membuat reaksi elektrolisis berjalan spontan, aplikasi voltase harus lebih besar dari nilai Gr°/nF , dimana n adalah jumlah elektron di dalam reaksi, dan F (96.485 C/mol e^-) adalah konstanta Faraday. Secara teoritis, besarnya voltase yang harus diaplikasikan dalam sistem BES dapat dilihat dalam gambar 2.



Gambar 2. Standar potensial elektroda dalam BES (vs SHE) (Rabaey and Rozendal, 2010).

Namun dalam aplikasisebenarnya, energi listrik yang dibutuhkan jauh lebih besar dari perhitungan teoritis (Gambar 2). Sebagai contoh, untuk reduksi CO₂ menjadi asetat membutuhkan minimal potensial katoda sebesar -0,28 V (gambar 2), tetapi dalam penelitian (Min *et al.* 2013; Jiang *et al.* 2013) produksi acetate terjadi pada potensial katoda sebesar lebih negatif dari - 0,75 V vs SHE. Hal ini menyebabkan rendahnya efisiensi dari proses elektrosintesis, yang kemudian menjadikan salah satu hambatan dalam aplikasinya. Tingginya kebutuhan energi sebenarnya ini bisa disebabkan oleh over potensial dari sistem, dimana over potensial tersebut bisa dikarenakan oleh rendahnya nilai konduktivitas dari larutan elektrolit (Rabaey and Rozendal, 2010) atau bisa juga karena pergerakan ion-ion di dalam sistem MES yang tidak sempurna karena keterbatasan

kemampuan elektroda yang menyebabkan proses katalisis tidak sempurna (Harnisch dan Schröder 2009).

Salah satu pendekatan untuk mengukur keefektifan dari sistem MES adalah dengan mengukur sampai sejauh mana elektron yang diumpangkan ke dalam sistem dapat tersintesis ke dalam produk senyawa organik. Efisiensi Coulomb (*coulombic efficiency*) dipakai sebagai patokan oleh (Steinbusch *et al.* 2010; Van Eerten-Jansen *et al.* 2013; Su *et al.* 2013), walaupun konsep tentang efisiensi coulomb ini masih menjadi perdebatan. Efisiensi coulomb didefinisikan sebagai perbandingan antara ekuivalen elektron yang terkandung didalam produk senyawa organik dengan energi listrik (elektron) yang diumpangkan ke dalam sistem MES.

Tabel 1. Ringkasan dari penelitian-penelitian yang sudah ada tentang sistem MES dengan produksi berbagai macam senyawa organik.

Jenis elektron akseptor	Senyawa organik utama yang dihasilkan	Jumlah produksi maksimum (mM/hari)	Efisiensi coulomb maksimum (%)	Potensial katoda (V vs SHE)	Jenis mikroorganisme di biokatoda	Referensi
CO ₂	Asetat	1.57	28	-0,95	Kultur campuran	(Jiang <i>et al.</i> 2013)
**CO ₂	Asetat	2.35	89,5	-0.90	Kultur campuran	(Su <i>et al.</i> 2013)
asetat	Caproate dan caprylate	739 ppm untuk caproate; 36 mg/l caprylate	45	-0,9	Kultur campuran	(Van Eerten-Jansen <i>et al.</i> 2013)
*asetat	etanol	1.82	49	-0,55	Kultur campuran	(Steinbusch <i>et al.</i> 2010)
CO ₂	asetat	1	85	>-0,6	Kultur murni <i>S. ovata</i>	(Kelly P. Nevin <i>et al.</i> 2010)

*memakai redoks mediator

**memakai 2- bromoethanesulfonic acid (BESA) untuk metan inhibitor

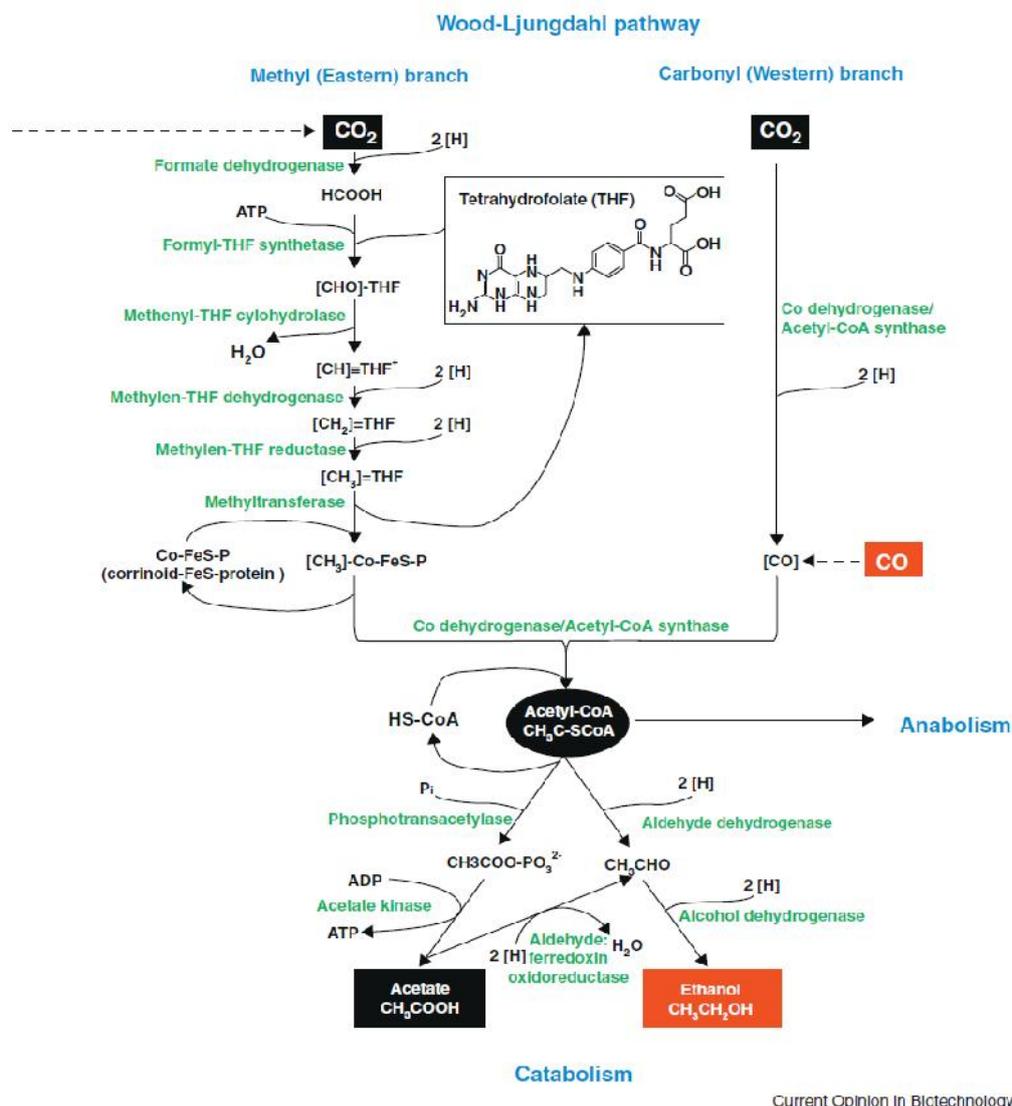
Peran bakteri asetogen di biokatoda untuk pembentukan senyawa-senyawa organik.

Pembentukan senyawa organik tidak lepas dari peran bakteri asetogen yang mempunyai kemampuan menggunakan sumber karbon autotrof (CO₂) guna pembentukan asam-asam organik dalam metabolismenya, melalui mekanisme *Wood-Ljungdahl pathway* (gambar 3). Karena kemampuannya tersebut, beberapa penelitian berfokus pada penggunaan kultur murni dari beberapa spesies bakteri asetogen sebagai katalis di katoda untuk mengkonversi CO₂ menjadi berbagai macam senyawa organik. Umumnya produk yang dihasilkan dari sintesa ini adalah asetat, namun dibawah kondisi yang memungkinkan bisa juga dihasilkan etanol, laktat, butirat dan butanol (Köpke *et al.* 2011). Sayangnya tidak semua asetogen mempunyai kemampuan elektrosintesis tersebut. Beberapa bakteri yang sudah terbukti mampu melakukan elektrosintesis adalah *morella thermoacetica*, beberapa spesies *Sporomusa* dan beberapa spesies dari *Clostridium* (Lovley dan Nevin 2013). Walaupun beberapa spesies kultur murni dari asetogen mempunyai kemampuan elektrosintesis, tetapi beberapa penelitian (tabel 1) lebih memilih menggunakan kultur campuran yang lebih kuat walaupun nantinya hambatan dari dipakainya kultur campuran ke dalam sistem MES ini adalah terbentuknya berbagai macam produk sampingan, misalnya metan atau hidrogen sulfida, yang dapat mengurangi efisiensi dari sistem MES.

Di dalam *wood ljungdahl pathway* (gambar 3), pembentukan senyawa organik memerlukan 2 molekul CO₂, dimana nantinya satu molekul

CO₂ akan dihidrogenasi via cabang metil dan satu molekul CO₂ via cabang karbonil membentuk senyawa asetil CoA yang merupakan *building block* (senyawa antara) untuk pembentukan acetat maupun etanol. Dari pembentukan senyawa Acetyl Coa, laju reaksi bisa di dorong menuju pembentukan etanol dengan penambahan 2 molekul hidrogen lagi, atau asetat bisa digunakan juga sebagai building block untuk pembentukan etanol. Pembentukan etanol dari 2 molekul CO₂ memerlukan 6 molekul H₂ atau 12 e⁻, dan sudah terbukti bisa dilakukan dengan fermentasi *syngas* oleh (Kundiyana *et al.* 2010; Klasson *et al.* 1992) dan (Lee 2010), tapi sayangnya penelitian yang berkaitan dengan pembentukan etanol dari CO₂ secara bioelektrosintesis belum bisa menampilkan hasil yang maksimal, hanya penelitian oleh (Steinbusch *et al.* 2010) yang dapat dijadikan referensi yang berarti itupun pembentukan etanol dari asetat, bukan dari karbon dioksida, dan dengan bantuan redox mediator. **Mekanisme transfer elektron dari sistem MES.**

Hambatan yang dialami dalam penerapan sistem MES untuk pembentukan senyawa organik yang valuable seperti etanol salah satunya dikarenakan belum jelasnya mekanisme transfer elektron dari elektroda ke mikroorganisme. Mekanisme transfer elektron dari elektroda ke bakteri merupakan hal yang sangat penting untuk dipahami, karena berkaitan dengan seberapa besar efisiensi dari sistem MES guna mendesain sistem MES yang sanggup menyuplai cukup elektron untuk pembentukan senyawa organik.



Gambar 3. Konversi CO₂ ke asetat dan ethanol oleh bakteri asetogen melalui *Wood-Ljungdahl pathway* (Kopke et al., 2011).

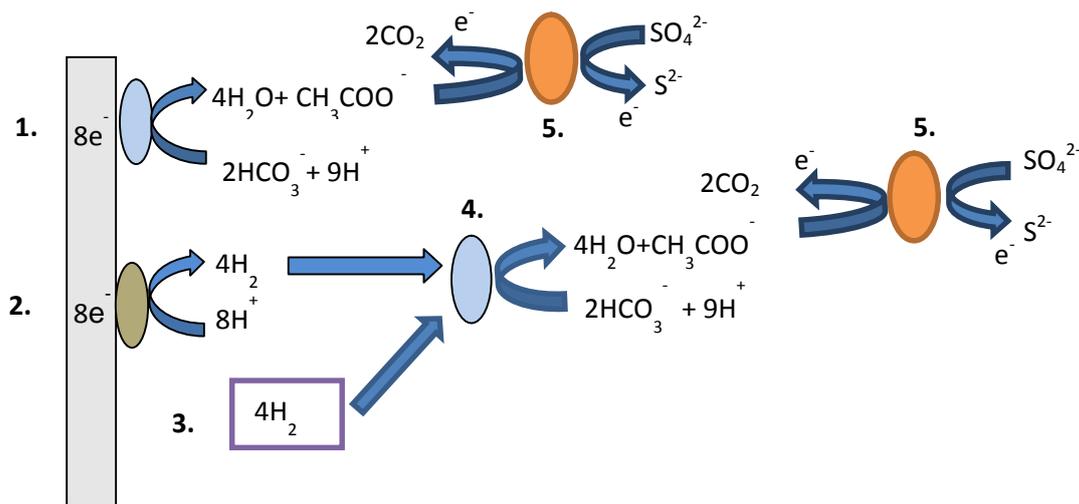
Ada tiga bentuk mekanisme transfer elektron dari elektroda ke mikroorganisme, yaitu *Direct Electron Transfer (DET)* dimana mikroorganisme dapat membentuk biokatoda menempel di permukaan katoda dan dapat menerima transfer elektron secara langsung seperti dalam kasus *S ovata* (Nevin et al. 2010), *Mediated Elektron Transfer (MET)* adalah ketika mikroorganisme tidak elektroaktif sehingga tidak bisa langsung menerima elektron dari elektroda tetapi mengandalkan mediator seperti metil viologen atau AQDS untuk menerima elektron dan mengumpulkannya ke mikroorganisme seperti dalam kasus (Steinbusch et al. 2010), dan *Indirect Electron Transfer (IET)* dimana ada pembentukan hidrogen dari elektrolisis air pada potensial katoda lebih dari -0,8 vs SHE di sistem MES sehingga mikroorganisme dapat memanfaatkan hidrogen tersebut untuk reduksi

CO₂ (Jeremiase et al., 2010, Liang et al., 2013).

Untuk kasus reduksi CO₂ menjadi senyawa etanol apabila menggunakan kultur campuran kemungkinan mekanisme transfer elektron dapat dilihat pada gambar 4. Selain 3 mekanisme yang sudah disebutkan tadi diatas yaitu direct, mediated dan indirect, penggunaan mikroorganisme dengan kultur campuran juga mengakibatkan ada kompetisi dari mikroorganisme selain asetogen, bisa *sulfur reducing bacteria (SRB)*, ataupun metan. Ada atau tidaknya kompetisi di dalam sistem MES tergantung pada 1) adanya elektron akseptor selain karbondioksida (misalnya sulfat atau nitrat) 2) kondisi sistem di MES misalnya pH, dalam kasus metan, dimana kondisi pH yang basa sangat cocok untuk pertumbuhan metanogen dan tidak cocok untuk pertumbuhan asetogen.

Dari ketiga mekanisme transfer elektron tersebut, untuk pengembangan aplikasi MES yang lebih efisien kedepannya, direct elektron transfer menjadi mekanisme yang paling prospektif. *Mekanisme Direct electron transfer (DET)* paling efisien karena membutuhkan paling sedikit energi listrik per satuan produk yang dihasilkan. *Mediated electron transfer (MET)* dengan menggunakan mediator seperti Metil viologen (MV) atau AQDS sangat tidak disarankan untuk aplikasi skala besar karena akan memakan biaya yang

sangat besar untuk pembelian bahan kimia MV dan AQDS. Sedangkan untuk *indirect electron transfer (IET)* mungkin menjadi alternatif yang lebih fisibel. Walaupun dengan IET energi listrik yang dibutuhkan akan lebih besar dari DET akan tetapi untuk saat ini dengan masih terbatasnya pengetahuan akan elektroaktif mikroorganisme, IET menjadi salah satu solusi yang aplikabel apalagi jika menggunakan kultur bakteri campuran di biokatoda.



Gambar 4. Contoh mekanisme *electron transfer* pada bioelektrosintesis etanol dari CO₂ (diadaptasi dari (van Eerten-Jansen et al. 2014)

Di ekosistem yang kompleks misalnya ketika biokatoda menggunakan konsorsium bakteri yang beraneka ragam, walaupun dalam sistem MES sudah dilakukan mekanisme seleksi yaitu misalnya *adjustment pH*, tetapi kompetisi antara asetogen dan bakteri lainnya masih mungkin terjadi. Gambar 4 menggambarkan reaksi reduksi CO₂ menjadi asetat dalam ekosistem kompleks kultur campuran.

Keterangan Gambar 4 :

Route 1 – 5

Direct electron transfer (DET), elektrosintesis CO₂ menjadi acetate oleh asetogen (*blue oval*) and kemungkinan asetat dioksidasi oleh SRB (*orange oval*) membentuk CO₂.

Route 2-4-5: produksi hidrogen dari elektrolisis air, *indirect electron transfer (IET)*, kemudian hidrogen digunakan oleh asetogen untuk reduksi CO₂ ke asetat (*blue oval*) dan kemudian acetate oksidasi menjadi CO₂ oleh SRB.

Route 3-4-5: *External hydrogen supply (syngas fermentasi)* digunakan oleh asetogen untuk produksi acetate, kemudian acetate dioksidasi menjadi CO₂ oleh SRB.

KESIMPULAN

Reduksi gas karbon dioksida menjadi berbagai senyawa organik secara bioelektrokimia sudah terbukti menjadi suatu teknologi yang potensial untuk diaplikasikan dimasa yang akan datang. Sampai saat ini, Asetat adalah produk utama yang dapat dihasilkan oleh teknologi ini, tetapi tidak tertutup kemungkinan produk yang lebih berharga seperti etanol juga bisa dihasilkan. Walaupun teknologi MES ini masih belum bisa diaplikasikan dalam skala pilot plant dikarenakan banyaknya hambatan yang dihadapi, tetapi seiring dengan bertambahnya pengetahuan tentang teknologi MES dan semakin populernya penelitian terkait teknologi ini, diharapkan pengembangan teknologi MES ini nantinya akan dapat menuju ke arah aplikasi. Sampai saat ini dalam skala laboratorium, produksi tertinggi senyawa organik yaitu asetat di capai oleh Su et al. 2013 dengan produksi sebanyak 2,35 mM asetat perhari dengan menggunakan kultur campuran dengan BESA sebagai metan inhibitor.

Prospek kedepan

Untuk prospek pengembangan teknologi yang lebih ke arah aplikasi kedepannya, yang perlu diperhatikan dalam mendesain MES adalah:

1. Pengembangan biokatoda yang kuat (*robust*) tahan lama, yang bisa dilakukan dengan pendekatan:
 - a. Pengembangan material yang cocok yang memungkinkan mikroorganisme menempel di katoda dan memungkinkan terjadinya *direct electron transfer (DET)*. Walaupun dalam artikel ini jenis, material dan luas area elektroda tidak dibahas, akan tetapi peran dari elektroda baik anoda dan katoda sangat penting untuk mereduksi overpotensial dari sistem MES.
 - b. Pengembangan elektrosintesis mikroorganisme baik kultur murni ataupun kultur campuran yang dapat menangkap elektron langsung dari elektroda dan tahan pada potensial yang tinggi.
2. Untuk aplikasi skala yang lebih besar, metode pemisahan *valuable product* seperti asetat dan etanol dari sistem MES perlu diperhatikan, apalagi jika menggunakan biokatoda yang terdiri dari kultur campuran dimana produk hasil dari reduksi karbondioksida bisa berbagai macam senyawa organik rantai C1-C5, gas metan dan hidrogen.
3. Teknologi MES selama ini kebanyakan masih dalam pengembangan skala laboratorium, skala *pilot plant* masih belum menampakkan hasil yang stabil dan optimum dikarenakan banyak sekali hambatan contohnya kebocoran sistem, rendahnya *output* produk, masih mahal bahan seperti elektroda dan membran (Wang dan Ren 2013).

DAFTAR PUSTAKA

- Cheng, S. dan Hamelers, H.V.M., 2008. Critical Review Microbial Electrolysis Cells for High Yield Hydrogen Gas Production from Organic Matter. , 42(23).
- van Eerten-Jansen, M.C. a. a. et al., 2014. Analysis of the mechanisms of bioelectrochemical methane production by mixed cultures. *Journal of Chemical Technology dan Biotechnology*, 31(April), p.n/a–n/a. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/jctb.4413>.
- Van Eerten-Jansen, M.C.A.A. et al., 2013. Bioelectrochemical production of caproate and caprylate from acetate by mixed cultures. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*.
- Harnisch, F. dan Schröder, U., 2009. Selectivity versus mobility: Separation of anode and cathode in microbial bioelectrochemical systems. *ChemSusChem*, 2, pp.921–926.
- Jia, N. et al., 2005. Bioelectrochemistry and enzymatic activity of glucose oxidase immobilized onto the bamboo-shaped CNx nanotubes. *Electrochimica Acta*, 51(4), pp.611–618.
- Jiang, Y. et al., 2013. Bioelectrochemical systems for simultaneously production of methane and acetate from carbon dioxide at relatively high rate. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Klasson, K.T. et al., 1992. Bioconversion of synthesis gas into liquid or gaseous fuels. *Enzyme and Microbial Technology*, 14(8), pp.602–608.
- Köpke, M. et al., 2011. 2,3-butanediol production by acetogenic bacteria, an alternative route to chemical synthesis, using industrial waste gas. *Applied and environmental microbiology*.
- Kundiyanana, D.K., Huhnke, R.L. dan Wilkins, M.R., 2010. Syngas fermentation in a 100-L pilot scale fermentor: Design and process considerations. *Journal of Bioscience and Bioengineering*.
- Lee, P., 2010. Syngas fermentation to ethanol using innovative hollow fiber membrane.
- Logan, B.E. dan Rabaey, K., 2012. Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies. *Science (New York, N.Y.)*, 337(6095), pp.686–90. Available at : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22879507> [Accessed July 9, 2014].
- Lovley, D.R. dan Nevin, K.P., 2013. Electrobiocommodities: Powering microbial production of fuels and commodity chemicals from carbon dioxide with electricity. *Current Opinion in Biotechnology*.
- Min, S., Jiang, Y. dan Li, D., 2013. Production of acetate from carbon dioxide in bioelectrochemical systems based on autotrophic mixed culture. *Journal of Microbiology and Biotechnology*.
- Nevin, K.P. et al., 2010. Microbial Electrosynthesis: Feeding Microbes Electricity To Convert Carbon Dioxide and Water to Multicarbon Extracellular Organic Compounds. , 1(2), pp.1–4.
- Nevin, K.P. et al., 2010. Microbial electrosynthesis: Feeding microbes electricity to convert carbon dioxide and water to multicarbon extracellular organic compounds. *mBio*.
- Sakai, S. et al., 2004. Ethanol production from H₂ and CO₂ by a newly isolated

- thermophilic bacterium, *Moorella* sp. HUC22-1. *Biotechnology Letters*.
- Schuchmann, K. dan Müller, V., 2014. Autotrophy at the thermodynamic limit of life: a model for energy conservation in acetogenic bacteria. *Nature reviews. Microbiology*, 12(12), pp.809–821. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25383604> [Accessed November 11, 2014].
- Steinbusch, K.J.J. et al., 2010. Bioelectrochemical ethanol production through mediated acetate reduction by mixed cultures. *Environmental Science and Technology*.
- Su, M., Jiang, Y. dan Li, D., 2013. Production of acetate from carbon dioxide in bioelectrochemical systems based on autotrophic mixed culture. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23(8), pp.1140–1146.
- Teske, S. et al., 2010. Energy [R]evolution 2010—a sustainable world energy outlook. *Energy Efficiency*, 4(3), pp.409–433. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s12053-010-9098-y> [Accessed January 6, 2015].
- Wang, H. dan Ren, Z.J., 2013. A comprehensive review of microbial electrochemical systems as a platform technology. *Biotechnology Advances*.