

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

A. Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3)

Menurut UU No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup yang diubah menjadi bagian dari UU No. 11 Tahun 2020 (UU Cipta Kerja), bahan berbahaya dan beracun yang selanjutnya disingkat B3 adalah zat, energi, dan/atau komponen lain yang karena sifat, konsentrasi, dan/atau jumlahnya, baik secara langsung maupun tidak langsung, dapat mencemarkan dan/atau merusak lingkungan hidup, dan/atau membahayakan lingkungan hidup, kesehatan, serta kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lain. Limbah bahan berbahaya dan beracun, yang selanjutnya disebut Limbah B3, adalah sisa suatu usaha dan/atau kegiatan yang mengandung B3

Untuk mengelola limbah B3, pemerintah telah mengeluarkan PP. No. 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Berbahaya dan Beracun yang diubah menjadi bagian dari PP. No. 22 tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Menurut PP tersebut, kegiatan pengelolaan limbah B3 merupakan suatu rangkaian kegiatan yang mencakup reduksi, penyimpanan, pengumpulan, pemanfaatan, pengangkutan dan pengolahan serta penimbunan hasil pengolahan tersebut. Dalam rangkaian kegiatan tersebut terkait beberapa pihak yang masing-masing merupakan mata rantai dalam pengelolaan limbah B3, yaitu :

- **Reduksi Limbah B3** : Suatu kegiatan pada penghasil untuk mengurangi jumlah dan mengurangi sifat bahaya dan racun limbah B3, sebelum dihasilkan dari suatu kegiatan
- **Penyimpanan Limbah B3** : kegiatan menyimpan limbah B3 yang dilakukan oleh penghasil dan/atau pengumpul dan/atau pemanfaat dan/atau pengolah dan/atau penimbun limbah B3 dengan maksud menyimpan sementara
- **Pengumpulan Limbah B3** : kegiatan mengumpulkan limbah B3 dari penghasil limbah B3 dengan maksud menyimpan sementara sebelum diserahkan kepada pemanfaat dan/atau pengolah dan/atau penimbun limbah B3
- **Pengangkutan Limbah B3** : kegiatan pemindahan limbah B3 dari penghasil dan/atau dari pengumpul dan/atau dari pemanfaat dan/ atau dari pengolah ke pengumpul dan/atau ke pemanfaat dan/atau ke pengolah dan/atau ke penimbun limbah B3
- **Pemanfaatan Limbah B3** : kegiatan perolehan kembali (*recovery*) dan/atau penggunaan kembali (*reuse*) dan/atau daur ulang (*recycle*) yang bertujuan untuk mengubah limbah B3 menjadi suatu produk yang dapat digunakan dan harus juga aman bagi lingkungan dan kesehatan manusia
- **Pengolahan Limbah B3** : proses untuk mengubah karakteristik dan komposisi limbah B3 untuk menghilangkan dan/atau mengurangi sifat bahaya dan/atau sifat racun
- **Penimbunan Limbah B3** : kegiatan menempatkan limbah B3 pada suatu fasilitas penimbunan dengan maksud tidak membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan hidup

Dengan pengolahan limbah sebagaimana tersebut di atas, maka mata rantai siklus perjalanan limbah B3 sejak dihasilkan oleh penghasil limbah B3 sampai penimbunan akhir oleh pengolah limbah B3 dapat diawasi. Setiap mata rantai perlu diatur, sedangkan perjalanan limbah B3 dikendalikan dengan sistem manifest berupa dokumen limbah B3. Dengan sistem manifest dapat diketahui berapa jumlah B3 yang dihasilkan dan berapa yang telah dimasukkan ke dalam proses pengolahan dan penimbunan tahap akhir yang telah memiliki persyaratan lingkungan (Kusyuniarti, et al., 2011)

Limbah B3 rumah tangga pada masyarakat masih dikelola dan diperlakukan seperti sampah pada umumnya (Iswanto, et al., 2016). Dalam mengelola limbah B3 yang dihasilkan oleh rumah tangga, pemerintah daerah perlu menerbitkan perda untuk mengatur pengelolaan limbah B3 RT sehingga jadi pedoman dalam pengelolaan limbah B3 yang dapat dijadikan pedoman pelaksanaannya sampai tingkat RT (Wardana, et al., 2015)

A.1. Limbah Baterai

Baterai (*Battery*) adalah sebuah alat yang dapat merubah energi kimia yang disimpannya menjadi energi listrik (Kiehne, 2003). Baterai banyak digunakan pada perangkat elektronik rumah tangga saat ini. Baterai yang digunakan masyarakat saat ini terdiri dari dua jenis, yaitu baterai sekali pakai dan baterai yang dapat diisi ulang.

Baterai sekali pakai juga disebut dengan baterai primer, karena pada baterai ini reaksi kimianya berlangsung hanya satu arah atau *irreversible* sehingga jika kondisinya sudah jenuh maka baterai sudah tidak berfungsi lagi dan harus dibuang (Linden & Reddy, 2002). Pada umumnya terbentuk dari elektroda yang terdiri dari dari

batang karbon pada pusat sel dan bejana seng dengan elektrolit jeli ammonium klorida dengan potensial sel kira-kira 1,5 volt. Batang karbon berfungsi sebagai elektroda positif atau anoda dan bejana seng sebagai kutub negatif atau katoda sedangkan elektrolit ammonium klorida berfungsi sebagai penghantar ion. Selama pemakaian, seng secara perlahan-lahan larut ketika arus listrik dihasilkan dan saat ammonium klorida jenuh, aliran arus listrik berhenti dan sel harus dibuang. Baterai dengan bahan seng dan karbon tersebut biasa disebut juga dengan baterai *zinc-carbon*. Macam macam baterai primer lainnya adalah baterai *silver oxide*, baterai *alkaline (manganese)* dan baterai *lithium* (Kiehne, 2003). Pada baterai *alkaline* serbuk *zinc* dipakai sebagai elektroda negatif (anoda) dan mangan dioksida (MnO_2) dan grafit sebagai elektroda positif (katoda) serta pasta potasium hidroksida (KOH) sebagai elektrolit (Almeida, et al., 2006), (Ebin, et al., 2015)

Baterai yang bisa diisi ulang disebut juga dengan baterai sekunder. Baterai tipe ini dapat diisi ulang karena adanya sifat *reversible* dari reaksi kimianya. Ketika baterai dipakai maka ada proses elektrokimia yang merubah energi kimia menjadi energi listrik. Jika kondisi elektrolitnya sudah jenuh, maka baterai dapat diisi ulang dengan memberi energi listrik ke baterai sehingga terjadi proses perubahan dari energi listrik menjadi energi kimia yang menyebabkan elektrolit pada baterai kembali pada kondisi awal. Macam macam baterai yang bisa diisi ulang adalah baterai *lead acid*, baterai *NiCd (Nickel Cadmium)*, baterai *Li-Ion (Litium Ion)*, baterai *NiMH (Nickel Metal Hydrid)* (Kiehne, 2003)

Dalam pembuatan baterai, banyak senyawa kimia yang digunakan sebagai bahan baku ataupun bahan pelengkap, antara lain : belerang, asam sulfat, amonium klorida, kadmium, kobalt, karbon, nikel, mangan, litium, air raksa, seng, perak,

rubidium, hidrida logam nikel (Isidor, 2016). Bahan-bahan tersebut merupakan bahan-bahan yang bersifat racun dan berbahaya. Oleh karena itu penanganan limbahnya perlu dilaksanakan secara hati-hati.

Baterai bekas merupakan jenis limbah B3 (bahan berbahaya beracun). Pembuangan baterai bekas tidak bisa disatukan dengan limbah biasa. Baterai mengandung berbagai macam logam berat seperti merkuri, mangan, timbal, nikel, lithium dan kadmium. Bila dibuang sembarangan atau tidak didaur ulang, maka kandungan logam berat dan zat-zat berbahaya lain yang ada di baterai dapat mencemari air dan tanah, yang pada akhirnya membahayakan tubuh manusia. Jika air yang tercemar logam berat ini digunakan oleh manusia dapat menyebabkan penyakit kronis yang nantinya menimbulkan gangguan di sistem saraf pusat, ginjal, sistem reproduksi dan bahkan kanker. (Detikhealth, 2011)

Limbah baterai tergolong limbah B3, maka pengelolaannya mengikuti kaidah yang berlaku dalam pengelolaan limbah B3. Selama ini, Kementerian Lingkungan Hidup telah diberi tanggungjawab untuk membuat regulasi dan program penanganan limbah B3. Kementerian Lingkungan Hidup telah membuat program dengan langkah-langkah untuk mendorong hal-hal sebagai berikut :

- Mendorong registrasi bahan berbahaya dan beracun yang masuk ke wilayah Indonesia
- Menerapkan perizinan pengelolaan limbah B3
- Mendorong pengelolaan limbah B3 melalui program *reuse, recycle* dan *recovery (3R)* guna meningkatkan nilai ekonomi limbah B3

- Melakukan pengawasan pengelolaan limbah B3 dengan program PROPER (Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan) maupun Non PROPER serta melakukan remediasi terhadap lahan yang terkontaminasi limbah B3

Kalau dilihat dari program program tersebut, program tersebut hanya efektif pada penghasil limbah B3 yang ada di industri, sedangkan limbah B3 yang ada di masyarakat sepertinya belum tersentuh, seperti limbah batu baterai misalnya, selama ini masyarakat membuangnya dijadikan satu dengan sampah biasa. Ketika sampai di TPA limbah tersebut belum tentu dipisahkan dan kemudian dilakukan penanganan sebagaimana limbah B3. Untuk itu peran serta masyarakat dalam memilah serta kemudian melakukan langkah-langkah 3R terhadap limbah baterai perlu mendapatkan perhatian dari pemerintah dan juga adanya inovasi pemanfaatan limbah baterai yang memiliki nilai ekonomis tinggi perlu disosialisasikan kepada masyarakat sehingga ada pemahaman akan bahaya dan manfaat ekonomi untuk pengelolaan limbah baterai (Setiyono, 2005); (Wardana, et al., 2015)

B. *Reverse Electrodialysis (RED)*

Energi, air dan makanan merupakan suatu tantangan yang dihadapi oleh manusia pada abad 21, dimana kebutuhannya akan semakin meningkat seiring dengan pertambahan jumlah penduduk (Cipollina & Micale, 2016). Isu utama dari penyediaan energi, air dan makanan adalah keberlanjutan dan ramah lingkungan dimana manusia saat ini harus mampu menyediakan untuk kebutuhan saat ini tanpa harus menghilangkan kesempatan untuk penyediaan bagi generasi yang akan datang. Hal yang menjadi perhatian dalam penyediaan ini adalah adanya hubungan yang erat antara energi, air dan makanan dimana energi dan air merupakan kebutuhan yang

mendasar untuk memproduksi makanan, air juga dibutuhkan untuk menyediakan energi dan energi juga diperlukan untuk penyediaan air dan produksi air (*desalination*). Sebagai konsekuensinya kebutuhan energi akan meningkat cepat dan hal ini tidak cukup hanya disediakan oleh energi dari fosil (minyak, batubara, gas alam) akan tetapi perlu penyediaan energi dari sumber lain yaitu dari *renewable energy* mengingat *renewable energy* merupakan sumber energi yang *sustainable* dan ramah lingkungan.

Renewable energy dapat disediakan dari berbagaimacam sumber seperti matahari, angin, biomasa, panas bumi, air, gelombang, energi arus laut dan lain-lain. Selain itu, terdapat sumber *renewable energy* yang kurang dikenal oleh kita tetapi memiliki potensi yang sangat besar yaitu *Salinity Gradient Energy (SGE)* atau juga disebut *Salinity Gradient Power (SGP)* (Logan & Elimelech, 2012). SGE atau SGP merupakan energi yang dihasilkan dari pencampuran dua cairan yang berbeda level salinitasnya seperti pada proses bercampurnya air sungai ke air laut. SGE atau SGP merupakan sumber energi yang sangat bersih, tidak menghasilkan emisi CO₂ dan dapat menghasilkan energi terus menerus (Veerman, 2010).

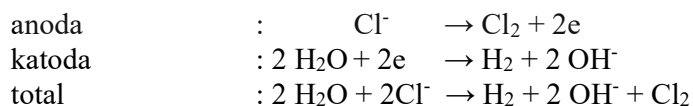
Salah satu jenis SGE atau SGP adalah *Reverse Electrodialysis (RED* atau *SGP-RE)* merupakan salah satu teknologi untuk mendapatkan energi dari perbedaan salinitas khususnya dari salinitas air laut dan air sungai. Teknologi ini menggunakan *Ion Exchange Membrane (IEM)* untuk menghasilkan beda potensial dari perbedaan konsentrasi salinitas (Susanto, et al., 2017).

Peralatan RED terdiri dari lembaran IEM, kompartemen untuk *feed water* diantara membran, kompartemen untuk elektroda di setiap sisi (Gambar 2.1). Ada dua jenis membran yang digunakan yaitu *Cation Exchange Membrane (CEM)* dan *Anion Exchange Membrane (AEM)*, dimana CEM hanya dapat meloloskan ion positif

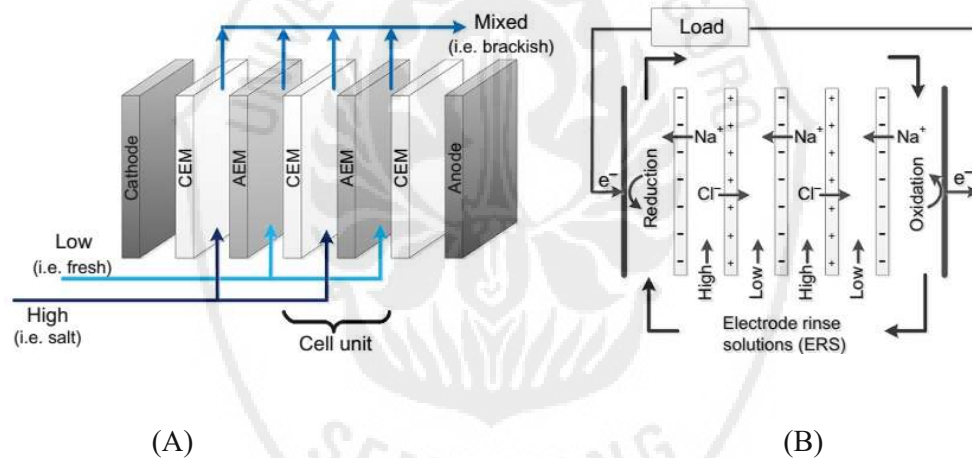
sedangkan AEM meloloskan ion negatif. Dalam setiap IEM hanya satu jenis ion (positif atau negatif) yang diloloskan, perbedaan konsentrasi ion antar membran akan menyebabkan perbedaan beda potensial pada setiap membran (Veerman & Vermaas, 2012).

Pada gambar 2.1 terlihat jika larutan NaCl berada pada kompartemen *stack* RED, maka larutan NaCl akan terionisasi menjadi ion Na⁺ dan Cl⁻. Jika larutan konsentrasi *high* dan *low* berada pada membran CEM maka ion Na⁺ yang berada pada kompartemen larutan *high* akan berhasil menembus membrane CEM menuju kompartemen larutan *low*. Pada membran AEM yang berada pada kompartemen berisi larutan konsentrasi *high* dan konsentrasi *low* maka ion Cl⁻ yang berada pada kompartemen larutan konsentrasi *high* akan berhasil menembus membran AEM. Dengan adanya ionisasi larutan dan adanya aliran ion pada membran maka pada setiap membran akan terdapat beda potensial yang menurut Nernst dinyatakan pada persamaan 2.8 dan 2.9, yang mengkonversikan energi Gibbs dari dua larutan berbeda salinitas menjadi beda potensial listrik.

Ion ion yang berada di kompartemen akan menuju ke elektroda melalui larutan pembilas ion. Pada elektroda akan terjadi proses redoks yang akan mengkonversikan ion ion menjadi aliran elektron. Sebagai contoh, jika elektroda yang digunakan merupakan elektroda karbon yang bersifat *inert*, maka akan terjadi reaksi redoks sebagai berikut (Veerman, et al., 2010):



Jika *multiple CEM* dan *AEM* disusun berselang seling dan diataranya dialiri dengan larutan dengan konsentrasi garam yang tinggi (*High*) dan disisi lain dialiri dengan larutan dengan konsentrasi garam yang rendah (*Low*) pada suatu kompartemen yang ada membrannya, maka akan terjadi akumulasi tegangan. Secara keseluruhan besarnya beda potensial adalah sebanding dengan jumlah cell, dimana setiap cell terdiri dari CEM, kompartemen *High*, AEM, kompartemen *Low*. Jika beban luar disambungkan dengan elektroda, ion akan mengalir dari larutan garam *High* ke larutan garam *Low* dan arus ion akan dikonversikan menjadi arus listrik pada elektroda. (Veerman & Vermaas, 2012).



Gambar 2. 1 : Prinsip dasar RED, dimana percampuran larutan garam berkonsentrasi tinggi (*High*) dan rendah (*Low*) menghasilkan aliran ion pada suatu membran dan menghasilkan arus listrik yang mengalir ke beban melalui elektroda (Veerman & Vermaas, 2012)

RED merupakan kebalikan dari proses *electrodialysis* (ED), dimana pada ED energi listrik digunakan untuk menggerakkan ion melawan potensial kimia sedangkan pada RED digunakan untuk menghasilkan potensial listrik pada arah yang berlawanan. ED merupakan teknologi separasi menggunakan sumber tenaga listrik sementara RED

menghasilkan energi listrik dari percampuran larutan yang berbeda salinitasnya. (Veerman, et al., 2010) (Tedesco, et al., 2018)

B.1. Salinitas

Salinitas didefinisikan sebagai berat dalam gram dari semua zat padat yang terlarut dalam 1 kilo gram air jika semua brom dan yodium digantikan dengan khlor dalam jumlah yang setara, semua karbonat diubah menjadi oksidanya dan semua zat organik dioksidasikan. Nilai salinitas dinyatakan dalam g/kg yang umumnya dituliskan dalam ‰ atau ppt yaitu singkatan dari part-per-thousand (Arief, 1984)

Kandungan garam pada sebagian besar sungai, danau, kolam, aquarium dan saluran air alami sangat kecil sehingga air di tempat ini dapat dikategorikan sebagai air tawar. Kandungan garam sebenarnya pada air tawar ini secara definisi, kurang dari 0,05 ppt (*part-per-thousand*). Jika lebih dari itu, air akan dikategorikan sebagai air payau atau menjadi saline bila konsentrasinya 3 sampai 5 ppt, lebih dari 5 ppt disebut brine (Fatoni, et al., 2018).

Salinitas air laut dihitung dengan jumlah gram garam terlarut dalam seribu gram air laut. Salinitas air laut rata-rata sekitar 34 - 37 *parts per thousand* (ppt), yang artinya setiap 1 kg air mengandung 34 - 37 gram garam terlarut. Garam terlarut ini terdiri dari 6 ion utama, yaitu Klorida (Cl^-), Natrium (Na^+), Sulfat (SO_4^{2-}), Magnesium (Mg^{2+}), Kalsium (Ca^{2+}), dan Kalium (K^+) (Mackenzie, et al., 2020)

Refraktometer merupakan salah satu alat untuk mengukur salinitas yang sangat umum dan dapat digunakan oleh semua orang. Kadang juga disebut sebagai alat pengukur indeks pembiasan pada cairan yang digunakan untuk mengukur kadar garam. Indeks bias larutan berbeda salinitas memiliki sudut pembiasan yang berbeda.

Prinsip alat ini adalah dengan memanfaatkan indeks pembiasan cahaya untuk mengetahui tingkat salinitas air. Hasil penunjukan pembiasan pada refraktometer dikalibrasi skalanya menjadi penunjukan atau skala kadar salinitas larutan. (Arief, 1984)

B.2. Energi Perbedaan Salinitas

Jika dua buah larutan yang berbeda salinitas dicampurkan, akan terdapat energi yang dilepaskan, energi ini biasanya disebut sebagai energi bebas Gibbs. Besar energi Gibbs dari percampuran dua larutan merupakan selisih antar energi Gibbs hasil percampuran dan energi Gibbs masing masing larutan yang dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\Delta_{mix}G = \Delta G_M - (\Delta G_H + \Delta G_L) \quad (2.1)$$

dengan $\Delta_{mix}G$ merupakan energi Gibbs hasil percampuran, ΔG_M energi Gibbs akhir percampuran, ΔG_H energi Gibbs akhir larutan pekat, ΔG_L energi Gibbs akhir larutan encer. Sedangkan besar energi Gibbs dinyatakan sebagai selisih antara enthalpi dan entropi suatu larutan yang dinyatakan sebagai berikut :

$$\Delta G = H - T \cdot \Delta S \quad (2.2)$$

dengan ΔG adalah energi Gibbs, H adalah enthalpi, T temperature dan ΔS entropi. Untuk kondisi larutan tanpa perubahan temperature dan tekanan besar energi Gibbs dinyatakan dalam perubahan entropi saja, sehingga persamaan 2.1 dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\Delta_{mix}G = -T\Delta_{mix}S_M - (-T\Delta_{mix}S_H - T\Delta_{mix}S_L) \quad (2.3)$$

$$\Delta_{mix}S = R \sum n_i \ln \chi_i \quad (2.4)$$

dengan indek M untuk larutan campuran, H untuk larutan pekat, L untuk larutan encer, i untuk banyaknya larutan dan R adalah konstanta gas, ni jumlah mol larutan dan Xi jumlah fraksi mol larutan. Dari persamaan 2.3 dan 2.4 dapat dituliskan sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 \Delta_{mix} G &= -T.R.n_M \ln \chi_M + T.R.n_L \ln \chi_L + T.R.n_H \ln \chi_H \\
 \Delta_{mix} G &= RT(-n_M \ln \chi_M + n_L \ln \chi_L + n_H \ln \chi_H) \\
 \Delta_{mix} G &= RT(-(n_L + n_H) \ln \chi_M + n_L \ln \chi_L + n_H \ln \chi_H) \quad (2.5) \\
 \Delta_{mix} G &= RT \left(n_L \ln \frac{\chi_L}{\chi_M} + n_H \ln \frac{\chi_H}{\chi_M} \right) \\
 \Delta_{mix} G &= RT \left(n_L \ln \left(\frac{n_L}{n_L + n_H} \right) + n_H \ln \left(\frac{n_H}{n_L + n_H} \right) \right)
 \end{aligned}$$

Untuk larutan garam murni *monovalen* dan larutan yang relatif rendah konsentrasi garamnya, energi bebas Gibbs (ΔG) dari percampuran cairan (volume V_L dalam m^3 , dan konsentrasi C_L dalam mol/m^3) dan larutan garam berkonsentrasi tinggi (volume V_H dalam m^3 , dan konsentrasi C_H dalam mol/m^3) dan besar volume larutan pekat dan larutan encer berupa NaCl dengan volume yang sama maka didapatkan $n_L = 2.V_L C_L$, $n_H = 2.V_H C_H$ dan energi gibbs dari hasil campuran dua larutan dinyatakan dengan (Veerman & Vermaas, 2012)

$$\Delta G = 2RT \left[V_L C_L \ln \frac{C_L}{C_M} + V_H C_H \ln \frac{C_H}{C_M} \right] \quad (2.6)$$

dengan

$$C_M = \frac{V_L C_L + V_H C_H}{V_L + V_H} \quad (2.7)$$

C_M merupakan konsentrasi akhir larutan setelah percampuran

Ricard Pattel adalah ilmuwan yang menyatakan bahwa percampuran air laut dan air sungai dapat dijadikan sumber energi listrik melalui "*hydroelectric pile*". Pada tahun 1954 menyatakan : "Tekanan *osmotic* air laut adalah 20 atmosfer sehingga jika

air sungai dan air laut bercampur maka akan ada energi yang hilang setara dengan energi yang dihasilkan dari jatuhnya air setinggi 680 ft”. Potensi energi secara global dari pencampuran air laut dan air sungai sebagai sumber energi adalah sangat besar. Setiap meter kubik air sungai dapat menghasilkan energi 1,4 MJ jika dicampurkan dengan air laut dengan jumlah yang sama (dengan asumsi konsentrasi salinitas 30 ‰) dan lebih dari 2 MJ jika dicampur dengan lebih banyak air lautnya (Post, et al., 2008). Potensi energi yang dihasilkan secara global dengan teknologi SGP (2,7 TW) akan melebihi dari kebutuhan energi global (2 TW).

Salah satu cara untuk menangkap energi gibbs dari pencampuran larutan berbeda salinitas adalah dengan menggunakan reverse electro dialysis (RED). RED merubah energi Gibbs melalui *ion membrane selective*, dimana pada setiap membran Energi Gibbs pada larutan dapat dirubah menjadi energi listrik dengan didasari atas persamaan Nernst sebagai berikut :

$$\Delta G = nFE$$

atau

$$E = \frac{\Delta G}{nF} \quad (2.8)$$

dengan F adalah konstanta Faraday dan E adalah potensial pada membran dan n adalah jumlah ion yang melalui membrane.

B.3. *Electromotive Force dan Permselectivity*

Jika sebuah CEM ditempatkan pada dua larutan NaCl yang berbeda konsentrasinya, maka akan dibangkitkan beda potensial listrik dengan diffusi ion Na^+ melalui membran. Karena pada kenyataannya, IEMs pada kondisi tertentu juga dapat

dimasuki oleh ion lain seperti Cl^- , maka potensial aktualnya sedikit menurun. Kondisi yang tidak ideal ini dinyatakan dengan koefisien *permselectivity* semu (α_{CEM}). Beda potensial aktual yang melalui membran dinyatakan sebagai berikut : (Veerman & Vermaas, 2012)

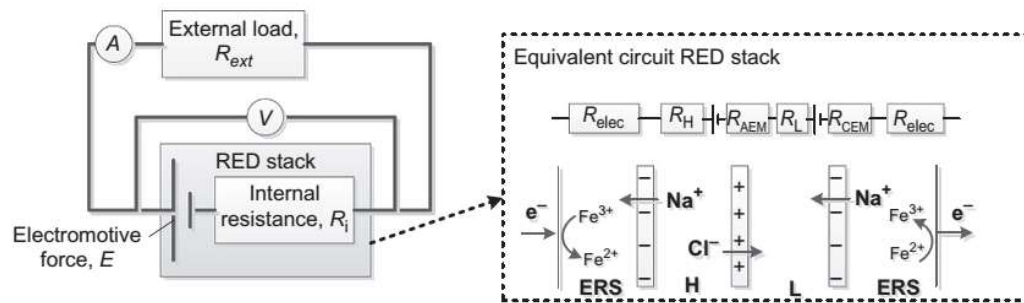
$$E_{CEM} = \alpha_{CEM} \frac{R.T}{z.F} \ln \left(\frac{a_H^+}{a_L^+} \right) = \alpha_{CEM} \frac{R.T}{z.F} \ln \left(\frac{\gamma_H^+ \cdot c_H^+}{\gamma_L^+ \cdot c_L^+} \right) \quad (V) \quad (2.9)$$

dimana E_{CEM} adalah *electromotive force* yang dibangkitkan (EMF), α_{CEM} adalah koefisien *permselectivity* semu, z adalah valensi ($z = 1$ untuk Na^+), R adalah konstanta gas ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), F adalah konstanta Faraday ($96.485/\text{mol}$), γ^+ adalah koefisien activity, c adalah konsentrasi larutan, indeks L untuk larutan konsentrasi rendah dan H untuk larutan konsentrasi tinggi.

B.4. Proses *Reverse Electrodialysis* (RED)

Bentuk umum RED terlihat seperti gambar 2.1. Sebuah cell atau cell pair RED diisi dengan larutan dengan salinitas rendah (Low) dan larutan dengan salinitas tinggi (High). Untuk memperbesar beda potensial cell atau cell pair dibuat berulang berselang seling yang berisi CEM, kompartemen Low, AEM, kompartemen High menjadi sebuah *stack*. Dalam satu *stack* dapat berisi ratusan *cell* atau *cell pair*. Arus ion yang dihasilkan akan dikonversikan menjadi arus listrik pada elektroda melalui proses reduksi dan oksidasi atau redoks.

Proses RED dalam menghasilkan arus listrik dapat digambarkan dalam skematik rangkaian listrik seperti gambar 2.2.



Gambar 2. 2 : Skematik rangkaian listrik *stack RED* dengan *external load* dan rangkaian *equivalen stack RED* (Veerman & Vermaas, 2012)

Pada gambar 2.2 terlihat sebuah *stack RED* yang hanya berisi satu *cell* atau *cell pair* dimana tegangan yang terukur (V) tidak sama dengan tegangan yang dihasilkan ($E = \text{EMF} = \text{Electromotive Force}$) karena adanya *voltage drop* akibat adanya *internal resistance* yang terdiri dari resistansi larutan dengan salinitas tinggi (*High*) yaitu R_H , resistansi dari AEM yaitu R_{AEM} , resistansi dari larutan dengan salinitas rendah (*Low*) yaitu R_L , resistansi dari CEM yaitu R_{CEM} dan juga resistansi dari elektroda dengan *Electroda Rinse Solution* (ERS) yang memiliki konsentrasi salinitas diantara salinitas rendah dan salinitas tinggi yaitu R_{elec} . Pada gambar tersebut diilustrasikan reaksi redoks *reversible* yaitu $\text{Fe}^{3+} + e^- \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$.

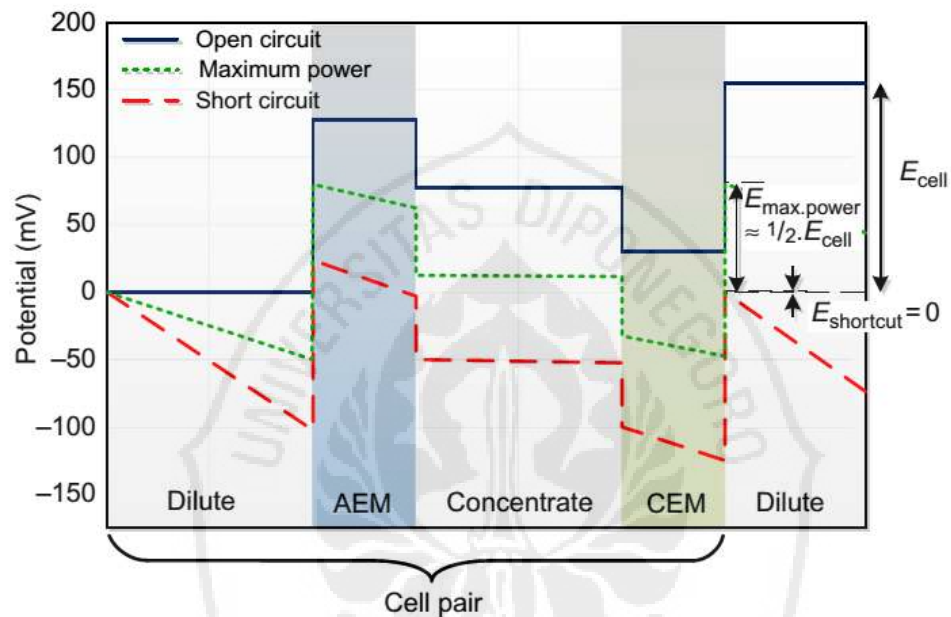
Keberadaan EMF dan *voltage drop* akibat resistansi internal *stack RED* adalah penting untuk diketahui, untuk itu pada sub bab berikut akan dibahas terkait hal tersebut.

B.5. Profil Potensial Listrik

Jika (N) *cell pair* tersusun pada *stack RED*, maka EMF keseluruhan (E) merupakan jumlah dari nilai EMF masing masing *cell*, dinyatakan sebagai berikut :

$$E = N(E_{CEM} + E_{AEM}) = N \cdot E_{cell} \quad (2.10)$$

Tegangan terukur saat *open stack* atau *open circuit voltage (OCV)* hampir sama dengan E karena dalam kondisi *open circuit* atau tanpa beban tidak ada voltage drop karena resistansi cairan dan nilai E di sekitar titik hubung akan sedikit lebih rendah akibat adanya *parasitic* arus hubung singkat. Profil potensial listrik pada *stack RED* terlihat saat *open circuit*, *maximum power* dan *short circuit* seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 : Profil potensial *stack RED* satu *cell* pada kondisi *Open Circuit*, *Maximum Power* dan *Short Circuit* (Veerman & Vermaas, 2012)

Saat *open circuit* tidak ada arus listrik yang mengalir sehingga tidak ada *voltage drop* pada membran maupun larutan di kompartemen. Ketika kondisi *short circuit* mengakibatkan arus listrik yang mengalir pada rangkaian besar sehingga terjadi *voltage drop* yang besar pada membran maupun larutan yang ada di kompartemen. Sedangkan kondisi maximum power adalah ketika potensial dari *stack RED* mendekati 50% dari OCV akibatnya arus yang mengalir juga mendekati setengah dari kondisi

short circuit dan potensial listrik di membran maupun larutan di kompartemen adalah rata rata dari kondisi *open circuit* dan *short circuit*.

B.6. Keluaran Daya Listrik

Daya yang dihasilkan dari *stack* RED tergantung dari *EMF* yang dihasilkan dan *internal resistance* dari *stack* RED. *Internal resistance* (R_i) dari *stack* merupakan fungsi dari resistansi *cell* (r), jumlah *cell* (N), resistansi sistem elektroda (R_{elec})

$$R_i = N \cdot r + R_{elec} \quad (2.11)$$

Resistansi sistem elektroda (R_{elec}) termasuk dari resistansi salah satu membran terluar dan jika membran terluar yang lain merupakan bagian dari resistansi *cell* maka, resistansi *cell* (r) merupakan jumlahan dari resistansi dua membran (R_{CEM}, R_{AEM}) dan resistansi dua kompartemen (R_L, R_H) dan dapat dituliskan dalam persamaan :

$$r = R_{CEM} + R_{AEM} + R_L + R_H \quad (2.12)$$

Jika kompartemen tanpa menggunakan *spacer*, resistansi dari kompartemen larutan R_L, R_H dapat dihitung dari *specific conductivity* σ (S/m) larutan, luasan A_{cell} (m²) dan ketebalan δ (m) kompartemen. Sebagai contoh, resistansi R_L dinyatakan sebagai

$$R_L = f_{obs} \frac{1}{\sigma} \frac{\delta}{A_{cell}} \quad (2.13)$$

dengan f_{obs} adalah faktor *obstruction* yang merupakan kontribusi pengurangan volume larutan akibat *spacer*.

Besarnya arus listrik dapat dihitung berdasarkan hukum Ohm, jika beban memiliki resistansi sebesar R_{ext} (Ω), maka arus dihitung sebagai berikut

$$I = \frac{E}{R_i + R_{ext}} \quad (2.14)$$

dengan E adalah EMF yang dibangkitkan oleh *stack* RED sehingga besarnya daya listrik pada beban P_{gross} (W) dapat dinyatakan sebagai berikut

$$P_{gross} = I^2 \cdot R_{ext} = \left(\frac{E}{R_i + R_{ext}} \right)^2 \cdot R_{ext} \quad (2.15)$$

dengan asumsi bahwa besarnya E dan R_i tidak bergantung dari R_{ext} maka besarnya daya maksimum dari *stack* RED

$$P_{gross} = \frac{U^2}{R_{ext}} = \frac{E^2}{4 \cdot R_{ext}} \quad (2.16)$$

dengan U adalah besar tegangan listrik saat daya maksimum yaitu sebesar $U = \frac{1}{2} E$. Persamaan yang sama juga didapat jika nilai $R_i = R_{ext}$, artinya bahwa daya maksimum dapat terjadi jika $R_i = R_{ext}$

Untuk mengetahui daya netto pada *stack* RED perlu dihitung kebutuhan daya pada sistem RED, daya yang dibutuhkan direpresentasikan dengan penurunan tekanan saat *feed water* melewati kompartemen. Daya yang hilang ketika melewati kompartemen kita sebut dengan daya *hydraulic* yang besarnya diformulasikan dengan :

$$P_{hdrl} = \Delta p_L \Phi_L + \Delta p_H \Phi_H \quad (2.17)$$

dengan notasi Δp adalah untuk *pressure drop* dan notasi Φ untuk besar aliran (m^3/s), sehingga daya netto dapat dihitung dengan

$$P_{net} = P_{gross} - P_{hdrl} \quad (2.18)$$

Jika kita normalisasikan dengan luasan membran, maka *power density stack* RED dinyatakan sebagai

$$Pd_{gross} = \frac{P_{gross}}{A_{mem}} \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (2.19)$$

$$Pd_{net} = \frac{P_{net}}{A_{mem}} \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (2.20)$$

dengan A_{mem} adalah jumlah luasan membran yang merupakan jumlah total luasan membran (AEM dan CEM).

B.7. Efisiensi

Efisiensi daya listrik pada *stack* RED dapat dituliskan sebagai perbandingan antara daya yang diberikan pada beban external dibagi dengan jumlah daya pada beban external dan daya disipasi *stack* RED karena resistansi internal.

$$Eff_{pw} = \frac{I^2 \cdot R_{ext}}{I^2 \cdot R_{ext} + I^2 \cdot R_i} = \frac{R_{ext}}{R_{ext} + R_i} \quad (2.21)$$

Dengan pendekatan pada daya maksimum yaitu ketika nilai $R_i = R_{ext}$ maka akan didapatkan nilai efisiensi daya pada nilai 50%. Akan tetapi pada kenyataannya resistansi internal dan EMF bergantung pada nilai resistansi eksternal sehingga tidak sesuai dengan asumsi awal kita. Oleh karena itu efisiensi daya bisa saja dibawah atau diatas 50 (Weiner, et al., 2015), bisa juga efisiensi diatas 90% tergantung kondisi operasi dan arah aliran (Vermaas, et al., 2013).

Dengan mensubstitusi volume dengan flow (Φ) pada persamaan 2.6 didapatkan perbedaan *free energy* Gibbs per detik (X) yang merupakan daya masukan pada *stack* RED yang dinyatakan dengan

$$X = 2RT \left[\Phi_L C_L \ln \frac{C_L}{C_M} + \Phi_H C_H \ln \frac{C_H}{C_M} \right] \quad (2.22)$$

C_M dapat didapatkan dengan menggunakan persamaan (2.2) dan menggantikan volume dengan *flow*. Oleh karena itu dapat dituliskan besarnya efisiensi energi dari *stack* RED sebagai

$$EnEff_{gross} = \frac{P_{gross}}{X} \quad (2.23)$$

$$EnEff_{net} = \frac{P_{net}}{X} \quad (2.24)$$

B.8. Sistem Elektroda

Pada suatu *stack* RED, perpindahan muatan disebabkan adanya difusi ion melalui membran. Aliran ion dikonversikan menjadi aliran elektron pada elektroda dalam kompartemen elektroda. (Veerman, et al., 2010).

Elektroda adalah konduktor yang digunakan untuk bersentuhan dengan bagian atau media non-logam dari sebuah rangkaian (misal semikonduktor, elektrolit atau vakum). Elektroda adalah suatu sistem dua fase yang terdiri dari sebuah penghantar elektrolit (misalnya logam) dan sebuah penghantar ionik (larutan). Elektroda positif (+) disebut anoda sedangkan elektroda negatif (-) adalah katoda. Reaksi kimia yang terjadi pada elektroda selama terjadinya konduksi listrik disebut elektrolisis. Pada anoda terjadi reaksi oksidasi, yaitu anion (ion negatif) ditarik oleh anoda sehingga jumlah elektronnya berkurang atau bilangan oksidasinya bertambah. Pada katoda terjadi reaksi reduksi, yaitu kation (ion positif) ditarik oleh katoda dan menerima tambahan elektron, sehingga bilangan oksidasinya berkurang.

Pada teknologi RED, sistem elektroda terdiri dari elektroda, *anolyt* dan *catholyt*, membran terluar dan peralatan teknis larutan pembilas elektroda (*electrode rinse solution (ERS)*). Pada prinsipnya sistem sirkulasi larutan pembilas elektroda akan menyebabkan short circuit, akan tetapi jika resistansi ERS jauh lebih besar dari internal resistans, pengaruh ini dapat diabaikan (Veerman, et al., 2010).

Sebagai contoh, seperti *stack* RED di gambar 2.1, sistem elektroda menggunakan elektroda *inert* dengan pasangan reaksi redoks reversible berisi ion

Fe^{2+}/Fe^{3+} yang didukung dengan larutan elektrolit NaCl – HCl. Perbedaan potensial untuk reduksi Fe^{3+} ke Fe^{2+} pada katoda, diimbangi dengan oksidasi dari Fe^{2+} ke Fe^{3+} pada anoda. Pada kondisi tidak ada arus yang mengalir, EMF didapatkan dari kerja elektroda. Perbandingan Fe^{2+}/Fe^{3+} dijaga konstan dengan mensirkulasi kombinasi *anolyt* dan *catholyt* pada muatan kompartemen elektroda. Sistem elektroda seperti ini disebut sistem dengan reaksi pertukaran homogen karena semua reaktan berada pada satu fasa. Untuk mengurangi kehilangan daya yang besar dibutuhkan jumlah cell pada *stack* RED yang banyak. (Veerman, et al., 2010).

Dari beberapa peneliti terdahulu, terdapat empat golongan sistem elektroda pada *stack* RED, yaitu

1. Sistem Elektroda Inert dengan reaksi redoks *reversible*

Elektroda inert dengan reaksi redoks yang bisa berkebalikan reaksinya sebagai contoh adalah Elektroda Inert dengan larutan sirkulasi $FeCl_2/FeCl_3$ (Scialdone, et al., 2012), (Scialdone, et al., 2013). Elektroda *Inert* dengan larutan sirkulasi $K_4Fe(CN)_6/K_3Fe(CN)_6$ (Burheim, et al., 2012)

Diantara sistem tersebut, yang paling banyak digunakan di laboratorium adalah yang menggunakan sirkulasi larutan $K_4Fe(CN)_6/K_3Fe(CN)_6$ dengan elektroda *inert*, untuk mendapatkan konduktifitas yang lebih baik biasanya ditambahkan *NaCl*

2. Sistem Elektroda *Inert* dengan reaksi elektroda yang berbeda

Menggunakan elektroda inert dengan reaksi redoks yang searah sehingga digunakan elektroda yang berbeda, sebagai contoh Elektroda *inert* dengan larutan sirkulasi Na_2SO_4 . Elektroda *inert* dengan larutan sirkulasi *NaCl* (Post, et al., 2008). Dapat dipergunakan dua arah aliran sehingga memungkinkan ada

tambahan flow switch untuk merubah aliran. Dapat menggunakan air laut sebagai ERS sehingga sistem lebih sederhana akan tetapi ada kehilangan tegangan akibat reaksi elektroda sekitar 2 – 3 Volt dan menghasilkan gas yang berbahaya (H_2 , Cl_2). Dengan larutan sirkulasi $NaCl$ juga akan terbentuk $NaCl$ akan tetapi dapat dicegah dengan menggunakan pembilasan dengan air laut

3. Sistem Elektroda *Participating*

Pada sistem ini digunakan elektroda yang tidak *inert*, artinya elektrodanya ikut bereaksi redoks sehingga massa salah satu elektrodanya akan bertambah, sebagai contoh Elektroda $Ag/AgCl$ dengan larutan sirkulasi $NaCl$ (Audinos, 1983), Elektroda Cu dengan larutan sirkulasi Na_2SO_4 (Pattle, 1954)

Keuntungan sistem ini adalah tidak ada sisa reaksi kimia dan kehilangan tegangan dan kekurangannya adalah diperlukan secara periodik untuk merubah aliran guna meregenerasi elektroda

4. Sistem Elektroda *Capasitive*

Elektroda Karbon Aktif dengan larutan sirkulasi (*Capasitive Electrodialysis, CRED*) (Vermaas, et al., 2012)

Dengan sistem Elektroda *Capasitive* membuat reaksi kimia menjadi melemah tetapi tidak dihasilkan bahan kimia berbahaya dalam kompartemen, akan tetapi diperlukan secara periodik perubahan aliran untuk regenerasi elektroda

C. Elektroda *Carbon Nanoparticle*

C.1. Unsur *Carbon*

Karbon adalah unsur kimia nonmetal yang disimbolkan dengan huruf C. Karbon berada di alam dalam bentuk karbon murni dan karbon terikat secara kimia dalam senyawa alam yg dapat berbentuk kristal murni (seperti berlian dan grafit). Karbon umumnya berada dalam senyawa ikatan kimia dengan unsur lain yg juga dapat berbentuk senyawa organik (seperti batu bara dan petroleum) atau senyawa anorganik (seperti gamping dan bubuk pengembang kue) (Pierson, 1994). Karbon memiliki persebaran yang luas di kerak bumi dengan konsentrasi 1.800 ppm (WebElements, 2007).

Berlian dan grafit dikenal sebagai alotrop karbon karena zat-zat ini hanya terbuat dari atom karbon, dan susunan atom karbon ini berbeda satu sama lain. Berlian dan grafit memiliki sifat kimia dan fisik yang berbeda yang muncul sesuai dengan perbedaan strukturnya. Bentuk dasar karbon mempunyai sifat-sifat yg sangat berbeda, berlian terbentuk dari atom yg terikat dengan sangat kuat sehingga dikenal sebagai benda yg paling keras sedangkan karbon grafit, memiliki kekerasan lebih rendah daripada berlian. Grafit merupakan mineral *native element* dengan komposisi C (karbon). Mineral ini memiliki banyak karakteristik unik. Grafit memiliki sistem kristal heksagonal, tampak sebagai massa berfoliasi atau lembaran-lembaran tipis yang terlepas, struktur opak dan pada umumnya berwarna hitam. Grafit merupakan dimorfisme dari intan, tetapi mempunyai tingkat kekerasan sangat rendah. Benda hitam yg terdapat di dalam pensil adalah grafit (Sukandarrumudi, 1999).

Perbedaan penting lain antara berlian dan grafit adalah daya hantar arus listrik yang dikandung. Berlian adalah benda nonkonduktor (tidak dapat menghantarkan arus

listrik), sedangkan grafit adalah benda konduktor (dapat menghantarkan arus listrik) (Wigayati, 2009). Sifat optik berlian sangat signifikan, berlian mempunyai indeks refraksi paling tinggi jika dibandingkan dengan batu permata apa pun sehingga benda ini memantulkan cahaya ke mata dengan lebih menyilaukan daripada pantulan dari jenis batu permata yang lain. Berlian juga mempunyai daya dispersif yang luar biasa. Berlian dapat mengurai cahaya menjadi spektrum yang berwarna-warni (Sukandarrumudi, 1999).

Pada suhu rendah semua bentuk karbon lembek, tetapi pada suhu tinggi karbon akan bersenyawa dengan oksigen dalam proses oksidasi. Bentuk karbon apa pun ketika bersenyawa dengan oksigen yang banyak pada suhu tinggi akan membentuk karbon monoksida. Karbon monoksida terbentuk sebagai hasil pembakaran mesin yang menggunakan minyak petroleum dan ditemukan dalam jumlah yang besar pada buangan knalpot mesin otomotif (Mullinger & Jenkins, 2013). Apabila terkena panas di atmosfer bersama oksigen bebas, karbon dasar akan terkonversi menjadi dioksida, karbon dioksida relatif tidak reaktif.

C.2. Carbon Nanoparticle

Carbon nanoparticle adalah sebuah karbon dengan ukuran partikel dalam puluhan nanometer. *Carbon nanoparticle* merupakan salah satu material yang memiliki beragam morfologi, diantaranya: karbon koloidal, nanotube, fullerenese, grafit, grafen, colloidal sphere, nanofiber, porous carbon, nanowire, dan karbon aktif (Ratchahat, et al., 2010).

Perbedaan morfologi ini akan berakibat pada luasnya aplikasi dari *carbon nanoparticle* tersebut, seperti: pendukung katalis, adsorben, penyimpan gas, teknologi

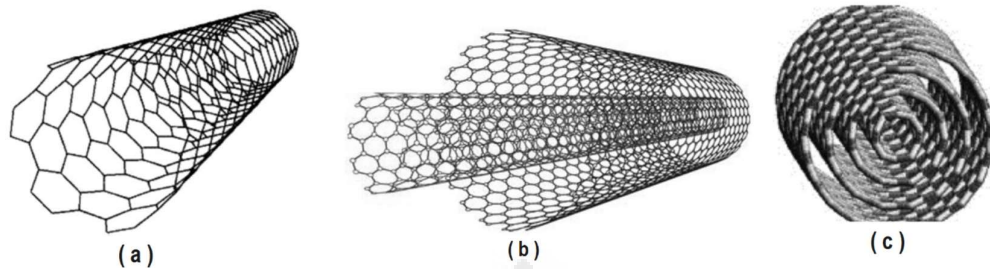
pemisahan, elektroda baterai, template material berpori, sel bahan bakar, dan sel biologis (Rahman, et al., 2015). Beberapa partikel *carbon nanoparticle* dengan morfologi tertentu akan memiliki aplikasi yang berbeda, diantaranya:

- *Carbon nanoparticle* sferik diaplikasikan dalam *nanodevice*, penyimpanan energi, teknologi pemisahan, adsorben, katalis, anoda baterai, dan template pembentuk material berpori (Rakesh, et al., 2017)
- *Carbon nanoparticle* berpori digunakan sebagai penukar ion, katalis, elektroda baterai, pengisi polimer, ultrafiltrasi, sensor, bahan bakar, adsorben, dan membran (Rakesh, et al., 2017)
- *Carbon nanoparticle* koloidal memiliki keunggulan, diantaranya: banyak gugus fungsi, mudah terdispersi, mempunyai sisi aktif, dan mudah dikompositkan (Rakesh, et al., 2017)

Partikel *nanocarbon* juga banyak diteliti karena memiliki beberapa keunggulan, seperti: tidak berbahaya, kapasitas volumetrik tinggi, kapasitas refersibel tinggi, mudah dikompositkan, berlimpah, murah, dan stabil.

Carbon Nanotubes (CNTs) merupakan salah satu bentuk morfologi *carbon nanoparticle* yang saat ini menjadi fenomenal untuk diteliti. CNTs memiliki struktur graphit (hibridisasi – sp^2) terbuat dari karbon yang mempunyai dimensi dalam satuan *nanometer*. *Carbon nanotube* merupakan suatu rantai atom karbon yang terikat di antara satu sama lain secara heksagonal (segienam) berbentuk silinder tak pejal yang mempunyai diameter 1-2 nanometer dengan satu atau lebih dinding silinder pada ukuran bervariasi dari 1nm hingga 100 nm *Carbon nanotube* yang terdiri dari satu dinding disebut *single walled carbon nanotube* (SWCNT) sedangkan yang terdiri dari

banyak dinding disebut *multi walled carbon nanotube* (MWCNT) dengan jarak antar dinding sekitar 0,34 nm (Ibrahim, 2013)



Gambar 2. 4 : Struktur *Single Walled CNT* (a), *Double Walled CNT* (b), *Multi Walled CNT* (c) (Ibrahim, 2013)

C.3. Sintesa *Carbon Nanoparticle*

Pembuatan *nanomaterial* dapat dilakukan dengan menggunakan dua pendekatan, yaitu pendekatan *top-down* dan *bottom-up*.

➤ *Top Down*

Dalam pendekatan *top-down*, pertama *bulk* material dihancurkan dan dihaluskan sedemikian rupa sampai berukuran nano meter. Pendekatan *top-down* dapat dilakukan dengan teknik MA-PM (*mechanical alloying-powder metallurgy*) dan atau MM-PM (*mechanical milling-powder metallurgy*).

Dalam mekanisme *mechanical alloying*, material dihancurkan hingga menjadi bubuk dan dilanjutkan dengan penghalusan butiran partikelnya sampai berukuran puluhan *nanometer*. Kemudian, bubuk yang telah halus disinter hingga didapatkan material final. Contohnya nano baja diperoleh dari

penghalusan bubuk besi dan karbon hingga berukuran 30 nm, dan disinter pada suhu 723°C pada tekanan 41 MPa dalam suasana gas nitrogen.

Teknik MM-PM (*mechanical alloying-powder metallurgy*) ini dilakukan dengan :

- ***Ball Milling***

Teknologi *ball milling* yaitu menggunakan energi tumbukan antara bola-bola penghancur dan dinding wadahnya. Untuk mendapatkan partikel nano dalam jumlah banyak dan dalam waktu relatif pendek, dilakukan inovasi pada mesin ball mill, dengan merubah putaran mill menjadi berlintasan planet (*planetary*) di dalam wadahnya yang memiliki tuas pada kedua sisi, untuk mengatur sudut putaran yang optimal. Dan distabilisasi dengan menggunakan larutan kimia seperti polyvinyl alcohol (PVA) atau *polyethylene glycol (PEG)* sehingga membentuk *nanokoloid* yang stabil (Raut, 2014)

- ***Ultrasonic Milling***

Prosesnya dengan cara menggunakan gelombang ultrasonik dengan rentang frekuensi 20 kHz – 10 MHz. Gelombang ultrasonik ditembakkan ke dalam medium cair untuk menghasilkan kavitasi *bubble* yang dapat membuat partikel memiliki diameter dalam skala nano. Gelombang ultrasonik bila berada di dalam medium cair akan dapat menimbulkan *acoustic cavitation*. Selama proses *cavitation* akan terjadi *bubble collapse* (ketidakstabilan gelembung), yaitu pecahnya gelombang akibat suara. Akibatnya akan terjadi peristiwa *hotspot* yang melibatkan energi yang sangat tinggi. Dimana *hotspot* adalah pemanasan lokal yang sangat *intens*

sekitar 5000 K pada tekanan sekitar 1000 atm, laju pemanasan dan pendinginannya sekitar 1010 K/s (Raut, 2014)

➤ ***Bottom Up***

Dalam pendekatan *bottom-up*, material dibuat dengan menyusun dan mengontrol atom demi atom atau molekul demi molekul sehingga menjadi suatu bahan yang memenuhi suatu fungsi tertentu yang diinginkan. Sintesa *nanomaterial* dilakukan dengan mereaksikan berbagai larutan kimia dengan langkah-langkah tertentu yang spesifik sehingga terjadi suatu proses nukleasi yang menghasilkan nukleus-nukleus sebagai kandidat nanopartikel setelah melalui proses pertumbuhan. Laju pertumbuhan nukleus dikendalikan sehingga menghasilkan nanopartikel dengan distribusi ukuran yang relatif homogen. (Raut, 2014) (Romano, et al., 2015)

D. Pembangunan Berkelanjutan dan Energi Ramah Lingkungan

Menurut laporan WCED (*World Commission On Environment and Development*) dari organisasi PBB, pembangunan berkelanjutan didefinisikan sebagai pemenuhan kebutuhan sekarang tanpa mengorbankan kebutuhan generasi yang akan datang. Tiga pilar dalam pembangunan berkelanjutan adalah pemenuhan dari sisi ekonomi, sosial dan perlindungan lingkungan. Untuk melaksanakan pembangunan berkelanjutan hal utama yang perlu disediakan adalah ketersediaan dan ketahanan energi. Ketersediaan dan ketahanan energi akan menaikkan tingkat ekonomi dan sosial masyarakat, akan tetapi penyediaan energi harus memperhatikan penyelamatan lingkungan. Energi yang disediakan dengan memperhatikan penyelamatan lingkungan adalah yang disebut energi ramah lingkungan (IEC, 2015).

Energi ramah lingkungan didefinisikan sebagai sumber energi yang dalam pembangkitannya tidak merusak lingkungan atau alam. Sedangkan tidak merusak lingkungan atau alam mengandung pengertian pelestarian alam yaitu biasa kita kenal dengan keberlanjutan atau *sustainable* yaitu pemanfaatan sumber daya alam tanpa mengurangi manfaat yang diterima oleh generasi yang akan datang. Salah satu indikasi suatu pembangkitan energi yang ramah lingkungan adalah tidak dihasilkannya polutan atau hanya menghasilkan polutan pada nilai ambang batas. Diantara polutan yang perlu diperhatikan dalam pembangkitan energi adalah emisi carbon atau yang biasa dikenal dengan emisi CO₂.

Emisi gas CO₂ merupakan emisi gas yang berkontribusi dengan adanya bahaya Gas Rumah Kaca (GRK) yang saat ini diyakini sebagai penyebab pemanasan global (*global warming*) serta perubahan iklim (*climate change*) dan emisi gas CO₂ akan senantiasa muncul pada proses siklus *carbon* yang merupakan siklus dasar yang ada di alam (IPCC, 2014)

Emisi gas rumah kaca (GRK) sangat tergantung dari besarnya penggunaan energi, khususnya energi fosil, seperti bahan bakar minyak (BBM), gas, dan batubara. Dalam perhitungan emisi GRK dikenal *baseline* emisi dan mitigasi emisi. *Baseline* emisi GRK adalah emisi GRK yang dihasilkan pada kondisi teknologi mitigasi belum dimanfaatkan dan juga tidak ada intervensi kebijakan pemerintah. Sedangkan mitigasi emisi GRK adalah intervensi yang dilakukan untuk menurunkan emisi dengan menggunakan teknologi atau menggunakan bahan bakar yang lebih ramah lingkungan. Mitigasi dapat dilakukan melalui beberapa pendekatan seperti dari sisi sosial, ekonomi, politik, dan teknologi yang semuanya dapat mendukung penurunan emisi.

Berdasarkan studi UNEP (*United Nation Environment Programme*) ada empat strategi utama dalam penerapan mitigasi , yaitu:

- Eliminasi, yaitu menghindari penggunaan peralatan yang menghasilkan emisi gas rumah kaca. Aktivitas ini memberikan penghematan biaya yang terbesar dan dapat langsung dirasakan. Sebagai contoh yaitu: mematikan lampu saat tidak digunakan dan mematikan A/C saat tidak ada orang di dalam ruangan.
- Pengurangan, yaitu usaha yang dilakukan dengan mengganti peralatan lama dan/atau mengoptimalkan struktur yang sudah ada. Aktivitas mitigasi ini sangat efektif dan dapat integrasikan ke dalam bisnis sehari-hari dengan usaha yang minimum. Sebagai contoh yaitu memasukkan penggunaan peralatan yang efisiensi energi dalam pengambilan keputusan investasi.
- Substitusi, yaitu mengganti penggunaan energi yang menghasilkan emisi tinggi dengan energi yang menghasilkan sedikit emisi. Mitigas ini biasanya mempunyai implikasi biaya investasi yang tinggi. Namun demikian, potensi penurunan emisi melalui substitusi sangat tinggi. Sebagai contoh yaitu penggunaan energi terbarukan untuk memenuhi kebutuhan listrik dan/atau pemanas.
- *Offset*, yaitu metode dengan biaya rendah namun mempunyai manfaat yang cukup besar. Walaupun demikian, metode ini sulit dilaksanakan dalam skala kecil. Sebagai contoh yaitu melakukan reforestasi yang akan menyerap emisi GRK. (Supriadi, et al., 2015)

Dalam praktek pengurangan emisi gas rumah kaca dapat dilakukan melalui penghematan energi atau konservasi energi dan melakukan diversifikasi energi.

Berikut secara ringkas akan diulas secara ringkas konservasi dan diversifikasi energi yang merupakan aktivitas dalam mitigasi emisi GRK

➤ **Konservasi Energi**

Konservasi atau penghematan energi dapat dilaksanakan melalui peningkatan efisiensi peralatan, penggunaan peralatan yang lebih efisien serta melaksanakan manajemen energi. Peningkatan efisiensi peralatan dilaksanakan dengan mengganti sebagian atau seluruh peralatan pengguna energi dengan peralatan yang lebih efisien. Penggunaan peralatan yang lebih efisien akan dapat menurunkan konsumsi energi seperti mengganti peralatan yang sudah tua dan boros energi dengan yang lebih efisien. Pengelolaan di sisi pengguna, selain dari penggantian peralatan, juga dapat dilakukan dengan mengubah kebiasaan yang boros menjadi hemat energi.

➤ **Diversifikasi Energi**

Diversifikasi energi atau penggantian bahan bakar dengan jenis energi lain, bertujuan untuk mengurangi penggunaan bahan bakar yang mempunyai kandungan karbon tinggi dengan jenis energi yang mempunyai kandungan karbon rendah atau tanpa kandungan karbon. Substitusi energi adalah upaya untuk mengganti energi yang ada dengan jenis energi lain yang lebih murah, mudah secara teknis dan tanpa mengurangi kinerja alat. Pemanfaatan teknologi rendah karbon sebagai pengganti PLT bahan bakar fosil secara drastis akan dapat mengurangi pelepasan gas rumah kaca (CO₂) ke atmosfer. (Supriadi, et al., 2015)

Berdasarkan IPCC 2006 GL, ketelitian penghitungan emisi GRK dikelompokkan dalam 3 tingkat ketelitian (Boer, et al., 2012). Dalam kegiatan inventarisasi GRK, tingkat ketelitian perhitungan dikenal dengan istilah “Tier”. Tingkat ketelitian

perhitungan terkait dengan data dan metoda perhitungan yang digunakan sebagaimana dijelaskan berikut ini:

- Tier 1 : estimasi berdasarkan data aktifitas dan faktor emisi default IPCC.
- Tier 2 : estimasi berdasarkan data aktifitas yang lebih akurat dan faktor emisi default IPCC atau faktor emisi spesifik suatu negara atau suatu pabrik (country specific/plant specific).
- Tier 3 : estimasi berdasarkan metoda spesifik suatu negara dengan data aktifitas yang lebih akurat (pengukuran langsung) dan faktor emisi spesifik suatu negara atau suatu pabrik (country specific/plant specific).

Penentuan Tier dalam inventarisasi GRK sangat ditentukan oleh ketersediaan data dan tingkat kemajuan suatu negara atau pabrik dalam hal penelitian untuk menyusun metodologi atau menentukan faktor emisi yang spesifik dan berlaku bagi negara/pabrik tersebut.

E. *Sea Water Desalination (SWD)*

Sea Water Desalination (SWD) merupakan unit pengolahan air tawar dengan umpan air laut. Unit SWD biasanya disediakan jika untuk mendapatkan air tawar mengalami kesulitan sedang ketersediaan air laut melimpah atau plant unit berada di sekitar pantai. Ada beberapa teknologi yang digunakan dalam SWD antara lain proses elektrolisa, reverse osmosis, difusi, ion exchange, adsorpsi, ekstraksi, proses pembekuan dan distilasi. (Furqon, 2016)

Proses elektrolisa adalah proses elektro kimia, dimana adanya arus listrik akan menyebabkan terjadinya reaksi kimiawi garam-garam di dalam air membentuk ion

positif dari logam dan ion negatif dari sisa asam. Ion akan menuju kutub positif dari elektroda, sehingga garam-garam akan dipisahkan dari air.

Reverse osmosis adalah pemisahan garam-garam yang ada dalam air laut dengan melewati air laut melalui membran yang dapat ditembus (*permeable membrane*) atau penyaring yang merupakan media yang berpori. Peristiwa osmosis berdasarkan adanya perbedaan tekanan osmosis antara air dan bahan-bahan lain yang terlarut. Air laut yang mengandung garam-garam yang terlarut dilewatkan melalui membran. Karena adanya tekanan osmosis air, maka air akan menembus membran dan terpisah dari garam-garam

Difusi pada dasarnya sama dengan osmosis, hanya pada difusi prosesnya berdasarkan meresapnya suatu larutan yang berkonsentrasi lebih rendah ke larutan yang berkonsentrasi tinggi. Proses ini jarang dilakukan karena sulit untuk memproduksi dalam jumlah banyak dan biayanya relatif mahal

Adsorpsi adalah penyerapan suatu bahan oleh bahan lain yang terjadi pada permukaan saja. Bahan yang dipakai sebagai penyerap padatan disebut adsorben atau desicant. Keberhasilan proses jenis ini banyak ditentukan oleh daya adhesi dari kedua bahan tersebut. Garam-garam yang terlarut dalam air dapat diadsorpsi oleh adsorben tertentu sehingga dapat terpisah dari air. Setelah itu, adsorben dapat diregenerasi kembali.

Ekstraksi adalah proses melarutkan bahan ke dalam bahan lain yang dapat berfungsi sebagai pelarut. Dalam pemisahan suatu campuran zat A dan zat B, dipilih suatu pelarut yang dapat melarutkan salah satu zat tersebut tetapi tidak dapat melarutkan zat yang lain (dapat melarutkan zat A tetapi tidak dapat melarutkan zat B). Garam diekstrak pelarut lain sehingga terpisah dari air.

Pembekuan merupakan proses pemisahan yang bekerja berdasarkan perbedaan titik beku. Proses ini dilakukan dengan jalan menurunkan temperatur air sampai pada titik beku masing-masing komponennya. Airlaut yang terdiri dari air dan garam-garam serta bahan-bahan lain yang terlarut mempunyai titik beku yang berbeda-beda. Dalam proses pembekuan, pada umumnya garam-garam dan bahan-bahan terlarut lainnya mempunyai titik beku yang lebih rendah dari air sehingga air akan membeku lebih dahulu dan dapat dipisahkan dari garam.

Distilasi merupakan pemisahan dari larutan berdasarkan perbedaan titik didih. Dua proses utama dalam distilasi, yaitu pemanasan (dengan tujuan untuk menguapkan) dan pendinginan (dengan tujuan untuk mengembunkan). Dalam operasi distilasi, jika air dipanaskan pada tekanan 1 atm maka air akan mendidih pada suhu 100°C . Berdasarkan titik didih ini apabila air laut diuapkan, air akan menguap terlebih dahulu. Apabila uap air yang terbentuk diembunkan maka akan didapatkan air tawar yang terbebas dari garam-garam.

SEMARANG
SEKOLAH PASCASARJANA