

## SEL ELEKTROLISIS 3–KOMPARTEMEN UNTUK EKSTRAKSI MAGNESIUM DAN SULFAT DARI SISTEM LARUTAN $MgSO_4$ – $KCl$ – $H_2O$

W. H. Rahmanto<sup>(1)</sup>, M. Asy'ari<sup>(2)</sup>, Rame<sup>(3)</sup>, Marihati<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Laboratorium Kimia Fisik, Jurusan Kimia – FMIPA, Universitas Diponegoro, Semarang  
e-mail: cselab\_undip@yahoo.com

<sup>(2)</sup>Laboratorium Biokimia, Jurusan Kimia – FMIPA, Universitas Diponegoro, Semarang

<sup>(3)</sup>Laboratorium Riset, Balai Riset & Standarisasi Industri dan Perdagangan, Semarang

### ABSTRACT

*Extraction of magnesium and sulfate from  $MgSO_4$ – $KCl$ – $H_2O$  solution system of 0.1 M salt concentration has been conducted. The 3–compartment electrolytic cell model was designed to fulfill the purpose. The cell is constructed from aquarium plastic box of 417 mL capacity divided into three compartments. Each compartment is separated by fixed plastic wall. One of the compartment with no electrode (mid compartment) was connected either to anodic (left) and cathodic (right) compartment using double filter paper strip of 2 x 6 (in cm) dimension. Electrolysis was performed in atmospheric environment under the 6 volt external electric potential using 7A Montana power supply. Experimental results show that electrolysis systems provide good separation of magnesium and sulfate from solution. Magnesium in the form of  $Mg(OH)_2$  and sulfate as  $H_2SO_4$  has been obtained in about 92% yield. Clear solution in the mid compartment show the absence of salt residues; both of cationic and anionic species migrate totally toward cathodic and anodic compartment respectively.*

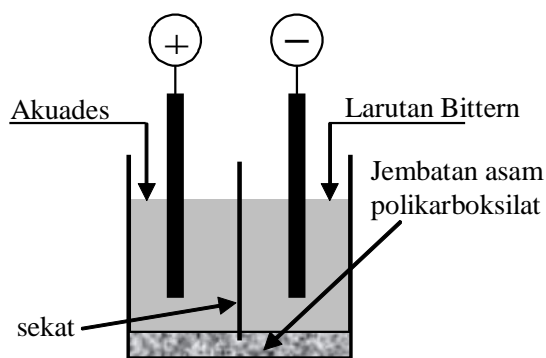
### PENDAHULUAN

Ekstraksi magnesium dan sulfat, berturut-turut dalam bentuk perolehan  $Mg(OH)_2$  dan  $H_2SO_4$  telah dilakukan berdasarkan elektrolisis sistem larutan  $MgSO_4$ – $KCl$ – $H_2O$ . Ekstraksi magnesium menjadi sangat penting mengingat logam tersebut merupakan komoditas dunia yang sangat potensial (Wilhelm and Williams, 1994; Lyday, 1995; Anoname, 2005; Kramer, 2005; Jadhav and Pawar, 2003; Kipouros and Sadoway, 2001). Salah satu kegunaan yang menarik adalah pemakaiannya untuk membuat film oksida logam bernilai guna tinggi (Jia et.al., 2005), baik untuk katalisis maupun penyimpanan gas hidrogen. Untuk seluruh kepentingan tersebut, negara-negara China, Canada, Russia, dan Afrika telah menjadi pemasok utama kebutuhan magnesium dunia (Anoname, 2004; Benham and Taylor, 2005; Kramer, 2005). Indonesia memiliki potensi

magnesium yang sebenarnya cukup tinggi. Menurut Marihati & Rame (2006), pekatan limbah cair ladang garam (larutan Bittern) memiliki kandungan magnesium berkadar tinggi, sangat ekonomis untuk dieksplorasi. PT Garam Surabaya, menurut Marihati & Rame, sebenarnya mampu menggali larutan Bittern dengan kapasitas 1.000.000 liter per tahun dari seluruh ladang garam Jawa Timur. Taksiran Balai Riset & Standarisasi Industri dan Perdagangan, Semarang, masih menurut Marihati & Rame, menunjukkan bahwa ladang garam Jawa Tengah saja setiap tahun dapat menghasilkan volume Bittern yang setara dengan 328 ton magnesium. Sayangnya sekali, Jawa Tengah maupun Jawa Timur belum sanggup mengolahnya sendiri. Akibatnya, ekspor sumber potensial magnesium dari ladang garam tersebut ke Jepang, oleh PT Garam, menjadi lebih cocok, meskipun PT Garam baru sanggup memenuhi permintaan sebanyak 600.000 L (th.

2004) dan 400.000 L (th. 2005) dari kapasitas eksplorasi nominal 1.000.000 L/th.

Hingga saat ini, elektrolisis untuk mendapatkan magnesium dari larutannya masih menerapkan system sel 2–kompartemen (Maddan, 2001; Rieger, 1994; Walsh, 2001; UHDE, 2002; Pilson, 1998; Bonney, 1982). Meskipun sudah mengalami berbagai penyempurnaan, namun sel masih tersusun atas kompartemen katodik berdampingan dengan kompartemen anodik. Antar kompartemen hanya dipisahkan oleh membran semi–permeabel saja, tidak dipisahkan oleh kompartemen tanpa elektrode. Sistem sel 2–kompartemen memiliki efisiensi arus sangat tinggi. Akan tetapi, sistem sel demikian menuntut tingkat kemurnian reaktan yang tinggi untuk mendapatkan produk dengan kemurnian tinggi pula. Pengotor-pengotor non-ionik yang larut bersama reaktan tidak dapat dipisahkan hanya dengan elektrolisis semata-mata. Sel 3–kompartemen didesain khusus untuk mengatasi kelemahan sel elektrolisis 2–kompartemen yang digunakan dalam penelitian ekstraksi sebelumnya (Rahmanto dkk, 2006).



Gambar 1. Sel 2–kompartemen

Ekstraksi magnesium dan sulfat dari dalam pekatan limbah ladang garam (larutan Bittern) dengan sel 2–kompartemen terdahulu dilakukan menurut 2 mode. Pertama, kompartemen katodik

difungsikan sebagai kompartemen larutan bittern sekaligus pembangkit  $\text{Cl}_2$  dan  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Kedua, kompartemen anodik difungsikan sebagai kompartemen larutan bittern sekaligus pembangkit  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  dan  $\text{KOH}$ . Ketika beroperasi dengan fungsi ganda, kompartemen anodik ataupun katodik terisi pengotor bawaan larutan Bittern. Bakteri halofilik juga terdapat di dalam kompartemen fungsi ganda, karena ternyata bahwa bakteri halofilik tropis *Halobacterium halobium* maupun *Halobacterium salinarum* dapat tumbuh subur di dalam air garam bersalinitas tinggi seperti halnya larutan Bittern (Paytan et.al., 2004). Sebenarnya, bakteri halofilik tropis memiliki enzim-enzim bernilai guna sangat tinggi (Burg, 2003). Jika dapat diisolasi serentak bersama-sama ekstraksi magnesium, sulfat, brom, dan iod, hasilnya dapat meningkatkan nilai tambah produk elektrolisis. Sel 2–kompartemen tidak dapat memenuhi kepentingan tersebut.

Sel elektrolisis 3–kompartemen diusulkan untuk mengatasi kelemahan. Kompartemen tengah yang memisahkan kompartemen katolitik dan anolitik berfungsi sebagai ruang larutan asal yang berisi campuran berbagai macam ion, bakteri, dan pengotor non-ionik lainnya. Kompartemen katolitik berfungsi sebagai pengumpul kation, sementara kompartemen anolitik berfungsi sebagai pengumpul anion. Bakteri dan pengotor non-ionik lainnya tetap tinggal di dalam kompartemen tengah. Namun demikian, sel tersebut harus diuji terlebih dahulu menggunakan sistem larutan  $\text{MgSO}_4\text{--KCl--H}_2\text{O}$  model, sebelum diterapkan ke sistem larutan  $\text{MgSO}_4\text{--KCl--H}_2\text{O}$  nyata di lapangan (pekatan limbah ladang garam). Pengujian dilakukan

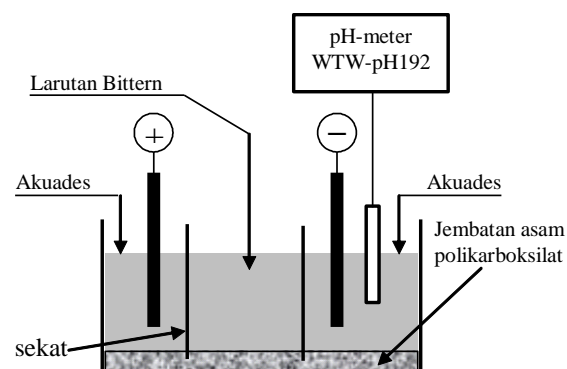
untuk menetapkan kemampuan sel memisahkan, membawa, dan mengumpulkan kation-kation maupun anion-anion ke masing-masing kompartemen tepi. Tulisan ini melaporkan kemampuan sel elektrolisis 3–kompartemen membawa magnesium dan kalium ke kompartemen katodit serta klor dan sulfat ke kompartemen anolit. Uji kemampuan sel untuk mempertahankan bakteri dan pengotor non-ionik berada di luar jangkauan penelitian yang dilaporkan ini.

### BAHAN DAN METODE

Bahan-bahan yang telah tersedia sebelumnya meliputi larutan campuran  $MgSO_4$  dan  $KCl$ , masing-masing dengan kadar 0,1 M, larutan  $Ba(OH)_2$  0,1 M, larutan  $HCl$  0,1 M, akuades, dan indikator fenolftalein. Peralatan elektrolisis dikonstruksikan seperti pada Gambar 2. Pencatu daya 7A Montana dipergunakan sebagai sumber arus listrik eksternal. Instrumen pH-meter WTW-pH192 digunakan untuk memastikan saat menghentikan elektrolisis. Multimeter analog Sanwa YX-360Tre diperlukan untuk mengontrol kuat arus selama elektrolisis. Neraca analitik konvensional digunakan untuk menimbang endapan hasil elektrolisis.

### Konstruksi Alat

Alat elektrolisis 3–kompartemen dikonstruksikan seperti pada Gambar 2. Bagian tengah sel tanpa elektrode difungsikan sebagai kompartemen larutan bittern, sementara bagian-bagian di sebelahnya difungsikan sebagai kompartemen anodik maupun katodik.



Gambar 2. Sel 3–kompartemen

### Elektrolisis Larutan

Seratus milliliter larutan campuran  $MgSO_4$  dan  $KCl$  dituangkan ke dalam kompartemen tengah, sementara akuades dituangkan ke dalam kompartemen anodik dan katodik, masing-masing sebanyak 100 mL. Sebanyak 5 tetes indikator fenolftalein dibubuhkan ke kompartemen katodik. Elektrolisis dijalankan dengan cara menghubungkan elektrode ke kutub-kutub pencatu daya. Potensial diatur konstan 6 volt. Elektrolisis dihentikan kurang lebih 20 menit setelah pH larutan dalam kompartemen katodik tidak lagi berubah.

### Analisis Hasil Elektrolisis

Endapan  $Mg(OH)_2$  ditimbang memakai neraca analitik konvensional. Massa endapan dikonversikan ke cacah mol, dan selanjutnya dibandingkan dengan cacah mol magnesium yang dimasukkan ke kompartemen sel elektrolisis. Asam sulfat di dalam larutan anodik diendapkan sebagai  $BaSO_4$  menggunakan larutan  $Ba(OH)_2$  untuk menentukan kadarnya secara gravimetrik. Perhitungan dilakukan sama seperti pada perhitungan untuk magnesium.

Sebagai data penguat, kadar  $KOH$  dalam larutan katodik ditentukan berdasarkan metode titrasi asidi–alkalimetri, mempergunakan larutan

standar HCl 0,1 M. Indikator fenolftalein digunakan sebagai penanda titik ekuivalen titrasi. Kadar KOH dalam kompartemen katodik dihitung memakai persamaan  $V_{\text{KOH}} N_{\text{KOH}} = V_{\text{HCl}} N_{\text{HCl}}$  (dengan  $V_{\text{KOH}} = 25$  mL dan  $N_{\text{HCl}} = 0,1$  M) dibandingkan dengan kadar kalium dalam kompartemen sel sebelum elektrolisis dijalankan.

Residu garam KCl maupun  $\text{MgSO}_4$  diuji melalui pengeringan larutan sisa di dalam oven bersuhu  $110^\circ\text{C}$ .

### Perhitungan

Rendemen dalam % dihitung dengan cara membandingkan cacah mol spesies hasil elektrolisis terhadap cacah mol hasil perhitungan terhadap spesies tersebut dalam kompartemen sel sebelum elektrolisis dijalankan.

$$\text{Rendemen (\%)} = \frac{\text{Cacah mol spesies hasil elektrolisis}}{\text{Cacah mol spesies dalam komp. sebelum elektrolisis}} \times 100 \% \quad (1)$$

$$\text{Cacah mol spesies, } n \text{ (mol)} = \frac{\text{Massa spesies, } m \text{ (dalam g)}}{\text{Massa molar spesies, } M \text{ (dalam g mol}^{-1}\text{)}} \quad (2)$$

Adapun cacah mol spesies hasil elektrolisis dapat dihitung berdasarkan Persamaan (2) berikut.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pasangan elektrode grafit–grafit telah dikonstruksikan pada kompartemen-kompartemen yang saling terpisahkan satu sama lain. Masing-masing kompartemen yang saling berpasangan dihubungkan dipisahkan oleh kompartemen tanpa elektrode. Ketiga kompartemen dihubungkan oleh jembatan asam polikarboksilat berpendukung, untuk menjamin berlangsungnya perpindahan ion-ion melalui mekanisme induksi ionik, sehingga tidak menambah resistansi listrik internal R. Asam

polikarboksilat berpendukung kitin cangkang kepiting merupakan aplikasi hasil penelitian Hibah Pekerti 2003–2004 (Rahmanto dkk, 2004). Asam organik polikarboksilat didapatkan sebagai isolat gambut Rawapening. Tanpa pemisahan kimiawi lebih dahulu, ion-ion magnesium dan kalium langsung menerobos jembatan asam menuju kompartemen katodik, ion-ion  $\text{Cl}^-$  dan  $\text{SO}_4^{2-}$  berpindah menuju kompartemen anodik. Ion-ion terpisah langsung secara elektrokimiawi.

Selama 18 menit pertama, pH-meter tidak menunjukkan perubahan pH sama sekali. Pembentukan endapan maupun pemunculan warna pink di sekitar katode juga tidak teramati. Demikian pula halnya dengan gelembung-gelembung gas di permukaan anode, belum muncul selama 18 menit. Akan tetapi, multimeter menunjukkan peningkatan kuat arus. Berawal dari 12 miliamper, perlahan-lahan menuju 1,14 amper. Pembentukan  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  maupun KOH belum berlangsung, namun migrasi kation menuju katode maupun anion menuju anode berlangsung makin cepat. Pada menit ke–19, arus mulai konstan 1,14 amper dan warna pink mulai muncul di seputar permukaan katode. Endapan putih juga mulai nampak terjadi di seputar katode. Nilai pH beranjak dari harga 7,00 menjadi 7,4. Bersamaan dengan semakin jelas dan meratanya warna pink, peningkatan harga pH mengindikasikan pembentukan KOH. Gelembung-gelembung gas berwarna kehijau-hijauan dengan bau menyengat khas  $\text{Cl}_2$  pun bermunculan dipermukaan anode. Pada menit ke 40, kuat arus masih konstan 1,14 amper. Endapan  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  sudah cukup banyak, warna pink semakin intens, dan gelembung-gelembung gas klor bermunculan cukup deras. Instrumen

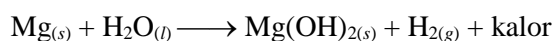
pH-meter menunjukkan harga 10,8 dan terus bergerak naik. Pada menit ke 68, pH-meter menunjukkan harga 12,1 lalu konstan hingga menit ke-90. Kuat arus pun menurun menjadi 1,08 ampere pada menit ke 68 lalu konstan hingga menit ke-90 pula. Pada menit ke-90 elektrolisis dihentikan. Dapat diasumsikan, bahwa reaksi transfer ionik maupun reaksi-reaksi elektrokimiawi terhenti pada menit ke-68. Walaupun demikian, elektrolisis masih tetap ditahan selama 22 menit.

Mekanisme transfer induktif magnesium dan kalium ke kompartemen katodik (kanan) dan ion-ion klorida maupun sulfat ke kompartemen anodik (kiri) berlangsung dengan baik selama elektrolisis dijalankan. Transfer induktif anion dan kation diikuti pemisahan menurut alur reaksi elektrokimiawi sebagai berikut. Pada kompartemen anodik, ion klor  $\text{Cl}^-$  melepaskan elektron ke permukaan anode dan teroksidasi menjadi gas  $\text{Cl}_2$ . Gas  $\text{Cl}_2$  keluar dari larutan, membentuk gelembung-gelembung dan melepaskan diri ke udara bebas. Ion sulfat,  $\text{SO}_4^{2-}$ , bereaksi dengan molekul air membentuk asam sulfat,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , sambil melepaskan gas  $\text{O}_2$ . seperti halnya gas klor, oksigen pun membentuk gelembung-gelembung dan melepaskan diri ke udara bebas pula. Asam sulfat tetap tinggal di dalam kompartemen anodik, terpisah dengan baik dari gas klor maupun oksigen.

Pada permukaan katode, ion-ion  $\text{Mg}^{2+}$  dan  $\text{K}^+$  tereduksi menjadi logamnya, sebagai Mg dan K, yang sangat tidak stabil dan sangat reaktif.



Aplikasi perbedaan potensial listrik eksternal saja tidak cukup untuk memisahkan logam K dan Mg. Sifat menarik dari logam K dan Mg yang dapat memisahkannya satu sama lain adalah reaktivitasnya terhadap molekul air membentuk hidroksida masing-masing, sambil membebaskan gas hidrogen dan kalor



Hidroksida kalium, KOH, mudah terlarut sempurna ke dalam air seraya membentuk pasangan kation–anion  $\text{K}^+$  dan  $\text{OH}^-$ , sedangkan  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  dengan  $K_{sp} = 1,8 \times 10^{-11}$  (Bodner & Pardue, 1989; Skoog & West, 1982) justru mengendap.

Hasil analisis menunjukkan perolehan  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{BaSO}_4$ , KOH seperti yang dipaparkan pada Tabel 1. Harga pada Tabel 1 merupakan nilai rata-rata dari 5 kali pengulangan.

**Tabel 1.** Kuantitas perolehan  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{BaSO}_4$ , KOH

Kuantitas	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	$\text{BaSO}_4$	KOH
M (g mol <sup>-1</sup> )	58,3197	233,3919	56,1056
m (g) <sup>a</sup>	0,53	2,14	---
V <sub>HCl</sub> (mL) <sup>a</sup>	---	---	23,4

Keterangan: <sup>a</sup>Kuantitas yang didapatkan dari eksperimen (pengukuran)

Setelah dikonversikan ke cacah mol dan rendemen berdasarkan Pers. (1) dan Pers. (2), perolehan  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{BaSO}_4$ , dan KOH dipaparkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Kuantitas  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{BaSO}_4$ , KOH hasil konversi

Kuantitas	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	$\text{BaSO}_4$	KOH
n (mol) <sup>b</sup>	0,00909	0,00917	0,00936
n (mol) <sup>c</sup>	0,01	0,01	0,01
Rendemen (%)	90,9	91,7	93,6

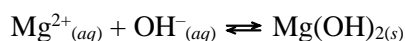
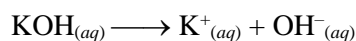
$$\text{Rendemen rata-rata (\%)} = \frac{90,9 + 91,7 + 93,6}{3} = 92,07$$

Keterangan: <sup>b</sup>Kuantitas hasil konversi data pengamatan, <sup>c</sup>Hasil hitungan atas dasar kuantitas spesies yang terdapat di dalam kompartemen sebelum elektrolisis

Nampak pada Tabel 1, bahwa efisiensi produksi  $\text{Mg(OH)}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , dan  $\text{KOH}$  tidak sama. Angka tersebut diperkirakan muncul sebagai hasil pembulatan-pembulatan dan kesalahan penimbangan maupun titrasi. Seharusnya, nilai rendemen sama besar, karena cacah mol  $\text{Mg(OH)}_2$ ,  $\text{BaSO}_4$ , dan  $\text{KOH}$  berdasarkan perbandingan stoikiometrik sama besar. Berdasarkan asumsi demikian, rendemen dapat dirata-ratakan. Rendemen kurang dari 100 % menyiratkan adanya kemungkinan, bahwa sebagian kecil ion-ion masih terjebak di dalam struktur jembatan asam polikarboksilat berpendukung kitin, meskipun elektrolisis masih tetap ditahan kurang lebih 22 menit dari saat dugaan berakhirnya reaksi-reaksi elektrokimiawi. Dugaan ini didukung oleh data, bahwa pengeringan sisa larutan dalam kompartemen tanpa elektrode tidak meninggalkan residu kristal garam sedikitpun. Penimbangan gelas arloji sesudah maupun sebelum pengeringan tidak memberikan perbedaan berat sama sekali. Dengan demikian, angka di atas kurang lebih 92 % menunjukkan bahwa sel 3-kompartemen mampu memisahkan ion-ion magnesium, sulfat, dan kalium dengan baik.

Pembentukan  $\text{KOH}$  selama elektrolisis justru menjadi fasilitator pengendapan  $\text{Mg(OH)}_2$ . Semakin banyak  $\text{KOH}$  terbentuk, semakin banyak pula keberadaan  $\text{OH}^-$  di dalam kompartemen katode. Peningkatan konsentrasi  $\text{OH}^-$  menggeser kesetimbangan jauh ke kanan,

sesuai dengan persamaan reaksi berikut, sehingga  $\text{Mg(OH)}_2$  menjadi semakin sukar larut.



Basa  $\text{Mg(OH)}_2$  yang terbentuk pun mengendap seluruhnya. Magnesium, kalium, klorida, dan sulfat dapat dipisahkan secara sempurna.

Hasil-hasil eksperimen di atas memperlihatkan kemampuan sel elektrolitik 3-kompartemen memisahkan ion-ion magnesium, kalium, klor, dan sulfat. Oleh karena molekul-molekul netral tidak terpengaruh oleh medan (potensial) listrik, maka dapat dihipotesiskan bahwa substansi-substansi netral yang datang ke kompartemen tanpa elektrode (tengah) bersama-sama dengan sistem larutan  $\text{KCl-MgSO}_4\text{-H}_2\text{O}$  tidak akan berpindah ke kompartemen anodik maupun katodik dan tetap tinggal di dalam kompartemen tengah. Dapat dihipotesiskan lebih lanjut, bahwa jika substansi netralnya adalah spesies-spesies bakteri halofil, maka spesies-spesies bakteri halofil juga tidak akan bermigrasi dan tetap akan tinggal di dalam kompartemen tengah. Penelitian eksperimental lanjut masih harus didesain untuk membuktikan ke-2 hipotesis tersebut. Untuk keperluan ini, sistem model diganti dengan sistem nyata berupa pekatan limbah ladang garam (larutan Bittern) sesungguhnya.

Pengalaman ekstraksi elektrolitik magnesium (Rahmanto dkk, 2006) telah mengindikasikan adanya spesies-spesies bakteri halofil dalam larutan Bittern masuk ke kompartemen sel elektrolitik. Air laut dengan salinitas tinggi ternyata menjadi media pertumbuhan subur bakteri halofil (Burg, 2003; Paytan et.al., 2004). Sifat menarik dari bakteri halofilik tropis adalah

bahwa salinitas tinggi membuat enzim-enzim bakteri halofil mempunyai residu asam amino bermuatan negatif lebih banyak pada bagian permukaan enzim. Atas dasar hal tersebut, ada harapan untuk mengekstraksi dan memanfaatkannya untuk mengkatalis berbagai reaksi kimiawi. Enzim protease ekstraseluler *Halobacterium halobium* misalnya, dapat dimanfaatkan untuk mensintesis peptida (senyawa aktif obat). Enzim *p*-nitrofenilfosfat fosfatase (*p*-NPPase) maupun malat dehidrogenase *Halobacterium salinarum* bermanfaat sebagai biokatalis (Burg, 2003).

Penelitian lanjut dapat dilaksanakan sel 3–kompartemen untuk mengumpulkan spesies-spesies bakteri halofil tersebut di dalam kompartemen tengah, mengambil, dan memanfaatkannya untuk berbagai kepentingan. Desain sel 3–kompartemen berikut jembatan penghubungnya masih harus diperbaiki untuk meningkatkan efisiensi arus.

#### **KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil eksperimen, bahwa elektrolisis menghasilkan rendemen sekurang-kurangnya 92 % tanpa meninggalkan residu  $MgCl_2$  maupun  $KCl$  sama sekali di dalam kompartemen tanpa elektrode, dapat disimpulkan bahwa sel elektrolisis 3–kompartemen memiliki performansi yang tinggi untuk memisahkan magnesium, kalium, dan sulfat dari sistem larutan  $MgSO_4$ – $KCl$ – $H_2O$ .

#### **PERSANTUNAN**

Ucapan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya disampaikan kepada Dr. Sri Juari Santosa, M.Eng. dan Dr. Dwi Siswanta, M.Eng. yang telah mengizinkan penerapan hasil

penelitian Hibah Pekerti UNDP-UGM 2003–2004 dan gagasan elektrolisis 2–kompartemen berjembatan asam polikarboksilat ke dalam penelitian ini. Demikian juga atas sumbangan dananya untuk skenario riset jangka panjang di Lab CSE, Jurusan Kimia–MIPA Universitas Diponegoro. Skenario riset jangka panjang “Eksplorasi Potensi Mineral dan Energi Laut/Pantai” berada di bawah payung program “Coastal Eco–Development” yang ditetapkan menjadi Pola Ilmiah Pokok (PIP) Universitas Diponegoro semenjak lama lalu. Terimakasih juga disampaikan kepada Kepala Laboratorium Riset – Balai Riset dan Standarisasi Industri dan Perdagangan Jawa Tengah, Semarang, atas kontribusi dananya bagi kepentingan penelitian yang telah kami lakukan. Kepada kolega Dra. Dwi Hudyanti, M.Sc., ucapan terimakasih ditujukan atas kesediaannya mengoreksi manuskrip dan memberikan masukan-masukan berharga. Adi Darmawan, M.Si. juga telah memberikan kontribusi teknis penting untuk menyelesaikan perbaikan manuskrip. Terimakasih tak lupa kami sampaikan pula.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Anoname, 2004, *Magnesium Production*, EPS Report 9/AP/6, Environment Canada, Ottawa.
- Anoname, 2005, *The Economics of Magnesium Compounds*, Roskill Information Services Ltd
- Benham AJ and Taylor LE, 2005, *Frican Mineral Production 1999 – 2003*, Geological Survey Report No. IR/05/074, British Geological Survey, Keyworth.
- Bonney OV, 1982, *Recovery of Magnesium as Magnesium Hydroxide from Sea Water*, United State Patent 4314985.
- Bodner GM and Pardue HL, 1989, *Chemistry: An Experimental Science*, New York: John Wiley & Sons, pp.A10–11.

- Burg BV., 2003, *Extremophiles as a source for novel enzymes*, *Current Opinion*. In: *Microbiology*, 6, Elsevier, p.213–218.
- DOW, 2005, *The European Chlor-Alkali Industry*, EuroChlor Progress Report, Brussel.
- Gupta A and Rajurkar P, 2001, *Waste Minimization in a Chlor-Alkali Plant*, Progress Report, Indian Institute of Technology, Mumbai-India.
- Jadhav AB and Pawar SH, 2003, Electrochemical Synthesis of Superconducting magnesium Diboride Film, *Supercond. Sci. Technol.*, 16, pp.752–759.
- Jia QX, Wang H, Lin Y, Li Y, Foltyn SR, dePaula R, Stan L, and Arendt PN, 2005, *Materials and processes of Metal-Oxide Films for Coated Conductors*, DOE Wire Workshop, Florida, Januari 19 – 20<sup>th</sup>.
- Kipouros GJ and Sadoway DR, 2001, Production of Anhydrous MgCl<sub>2</sub>, *J. Light Metals*, 10, 487-494
- Kramer DA, 2005, *Magnesium Metal, Mineral Commodity Summaries*, U.S. Geological Survey.
- Libes SM, 1992, *Evaporites*. In: *An Introduction to Marine Biogeochemistry*, John Wiley and Sons, New York, pp.274–288.
- Lyday P, 1995, *Mineral Commodity Summaries*, U.S. Bureau of Mines, p.34
- Maddan OL, 2001, *Apparatus and Method for Producing Magnesium from Seawater*, United State Patent 6267854.
- Paytan A, Boehm AB, and Shellenbarger GG, 2004, Bacterial Contamination and Submarine Groundwater Discharge. In: *Environ. Chem.*, 1, 107(10), 29–30.
- Pilson MEQ, 1998, *Chemical Extraction of Useful Substance from Sea Water*. In: *Introduction to the Chemistry of the Sea*, Prentice Hall, pp.341–350.
- Rahmanto WH, Haris A, Santosa SJ, Siswanta D, 2004, *Imobilisasi Asam Humat Tanah Gambut pada Kitin Cangkang Kepiting untuk Pengambilan Perak, Nikel, dan Krom dalam Limbah Cair*, Laporan Penelitian Hibah Pekerti II – DP2M Dikti, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Rahmanto WH, Haris A, Marihati, Siswanta D, Santosa SJ, 2006, *Prototipe Elektrolisator Bittern Fleksibel dan Mudah Diatur*, Seminar Nasional Kimia & Kongres Nasional Himpunan Kimia Indonesia, LIPI, Jakarta.
- Rame dan Marihati, Balai Riset & Standarisasi Industri dan Perdagangan, Semarang, 2006, Komunikasi Pribadi.
- Rieger PH, 1994, *Electrochemistry*, 2<sup>nd</sup> ed., Chapman & Hall, New York, pp. 371–411, 274–308.
- Sedivy VM, 1996, Purification of Salt for Chemical and Human Consumption, *Industrial Minerals*, April Ed.
- Selby and Twidwell, 2004, *The Recovery and Recycle of Mercury from Chlor-Alkali Plant Wastewater Sludge*, Research Study Report, University of Montana, Butte, pp.83–99.
- Shekhovtsov et.al., 2000, Magnesium Electrolytic Production Process, *Magnesium Technology*, The Minerals, Metals & Materials Society, Saint-Petersburg.
- Skoog DA and West DM, 1982, *Fundamentals of Analytical Chemistry*, 4<sup>th</sup> Ed., Holt Saunders, Philadelphia, pp. 832.
- Thayer RL and Neelamegham R, 2001, *Improving the Electrolytic Process for Magnesium Production at MagCorp*, JOM Industrial Report, August 2001.
- Walsh FC, 2001, Electrochemical Technology for Environmental Treatment and Clean Energy Conversion, *Pure Appl. Chem.*, 73(12), 1819–1837.
- UHDE, 2002, *Chlor-Alkali Electrolysis Plant: Superior Membrane Process*, ThyssenKrupp Technologies Company, Dortmund-Germany.
- Wilhelm MJ and Williams KC, 1994, *Industrial Minerals and Rocks*, U.S. Bureau of Mines, p.187.