

Analisis Potensi Elektrik Berbagai Elektrolit Alam Sebagai Sumber Energi Terbarukan

Giri Amirul Mukminin^{(1)a}, Gurum Ahmad Pauzi⁽¹⁾, Warsito⁽¹⁾

⁽¹⁾Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung
Bandar Lampung 35145

^aE-mail korespondensi:giriamirul13@gmail.com

Diterima (22 September 2017), Direvisi (9 Oktober 2017)

Abstract. The electrical characteristics of river water, brackish water, swamp water, spring water, and rain water can be determined by using electrodes. The electrode pairs of this research are Cu-Zn and C-Zn electrode. The electrical characteristics measurement of river water, brackish water, swamp water, spring water, and rain water are connected with a 1,2watt LED load and without load. The electrolyte cell consisted of 20 cell, which were arranged in series with a volume of ± 200 ml per cell. The maximum current (I) which were produced by Cu-Zn electrode using brackish water is 1,58 mA; river water is 0,8 mA; swamp water is 0,57 mA; spring water is 0,21 mA; and rain water is 0,01 mA. Meanwhile The maximum current (I) which were produced by C-Zn electrode using brackish water is 1,54 mA; river water is 0,01 mA; swamp water is 0,8 mA; spring water is 0,26 mA; and rain water is 0,09 mA. The type of water that has the best electrical characteristic are brackish water with light intensity of 1192 lux and river water with light intensity of 121 lux.

Keywords :Cu-Zn electrode, Cu-Zn electrode, electric characteristics, light intensity.

Abstrak.Karakteristik elektrik air sungai, air payau, air rawa, mata air, dan air hujan dapat diketahui dengan menggunakan elektroda, pasangan elektroda yang digunakan pada penelitian ini adalah elektroda Cu-Zn, dan C-Zn. Pengukuran karakteristik elektrik air sungai, air payau, air rawa, mata air, dan air hujan dilakukan dengan menggunakan beban LED 1,2 watt dan saat beban dilepas. Sel elektrolit yang digunakan terdiri dari 20 sel, yang dirangkai secara seri dengan volume ± 200 ml per sel. Arus maksimum (I) menggunakan elektroda Cu-Zn yang dihasilkan air payau 1,58 mA; air sungai 0,8 mA; air rawa 0,57 mA; mata air 0,21 mA; dan air hujan 0,11 mA. Sedangkan menggunakan elektroda C-Zn arus maksimum (I) yaitu air payau 1,54 mA; air sungai 0,01 mA; air rawa 0,8 mA; mata air 0,26 mA; dan air hujan 0,09 mA. Jenis air yang mempunyai karakteristik elektrik terbaik adalah air payau, dimana didapatkan intensitas cahaya 1192 lux dan kedua yaitu air sungai dengan intensitas 121 lux.

Kata Kunci :Elektroda Cu-Zn, elektroda C-Zn, karakteristik elektrik, intensitas cahaya.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan perkembangan zaman, hal ini disebabkan oleh pertambahan jumlah penduduk dan pertumbuhan ekonomi yang terus meningkat. Berdasarkan data ketenaga listrik nasional tahun 2015, total kapasitas pembangkit yang terpasang adalah sebesar 53.585 MW dengan rincian 70% PLN, 5% *private power utility* (PPU)

yang merupakan pembangkit terintegrasi, 20% *independent power producer* (IPP) yang merupakan listrik swasta, dan 5% pembangkit ijin operasi non BBM. Permintaan listrik diperkirakan meningkat dengan laju pertumbuhan 8,8% per tahun.

Pemanfaatan energi alternatif dari air sebagai sumber energi listrik menjadi salah satu pilihan. Ditinjau dari geografis Indonesia, pemanfaatan air sebagai penghasil energi listrik sangat potensial karena sumber air yang melimpah dan

belum termanfaatkan dengan baik [1]. Oleh karena itu perlu dilakukan sebuah upaya untuk menghasilkan sumber energi alternatif dari air.

Energi listrik pada reaksi elektrokimia dapat terjadi melalui dua elektroda yang memiliki beda potensial dan terhubung pada bahan elektrolit [2]. Proses elektrokimia membutuhkan media pengantar sebagai tempat terjadinya serah terima elektron dalam suatu sistem reaksi yang dinamakan larutan. Larutan dapat dikategorikan menjadi tiga bagian yaitu larutan elektrolit kuat, larutan elektrolit lemah dan larutan bukan elektrolit.

Larutan elektrolit kuat merupakan larutan yang mengandung ion-ion terlarut yang dapat mengantarkan arus listrik sangat baik sehingga proses serah terima elektron berlangsung cepat dan energi yang dihasilkan relatif besar. Sedangkan larutan elektrolit lemah merupakan larutan yang mengandung ion-ion terlarut cenderung terionisasi sebagian sehingga dalam proses serah terima elektron relatif lambat dan energi yang dihasilkan kecil. Namun demikian proses elektrokimia tetap terjadi. Untuk larutan bukan elektrolit, proses serah terima elektron tidak terjadi [3].

Analisis karakteristik elektrik air laut sebagai sumber energi listrik terbarukan telah diteliti oleh Encep Hudaya tahun 2016, dengan menggunakan 3 variabel elektroda yaitu C-Zn, Cu-Al, dan Cu-Zn. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa elektrolit air laut yang dihubungkan dengan ketiga pasangan elektroda tersebut sudah dapat menghasilkan energi listrik, dengan variasi bahan elektroda dan volume air laut. Hasil penelitian ini juga menunjukkan

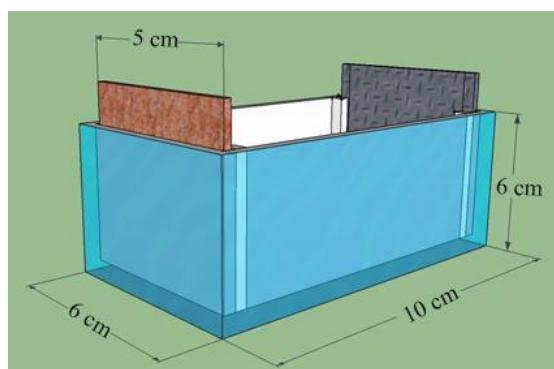
bahwa semakin lama penggunaan elektrolit air laut dengan beban yang diberikan maka energi listrik yang dihasilkan akan semakin berkurang.

Pada penelitian ini memanfaatkan cairan yang berada di sekitar lingkungan masyarakat sebagai sumber energi listrik baru dan terbarukan yaitu air rawa, mata air, air sungai, air hujan, dan air payau dengan menggunakan 3 variabel elektroda yaitu C-Zn, Cu-Al, dan Cu-Zn. Hasil dari penelitian analisis elektrik berbagai elektrolit alam ini yaitu mengetahui besarnya energi listrik yang dihasilkan oleh setiap elektrolit yang digunakan yang nantinya diharapkan dapat digunakan sebagai referensi sumber energi listrik terbarukan.

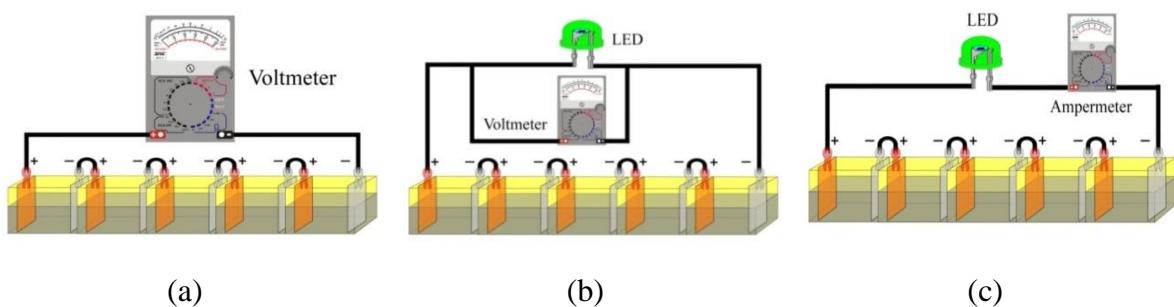
METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah air sungai, air payau, air rawa, mata air, dan air hujan sebagai elektrolit, akrilik untuk membuat media tempat penampungan elektrolit, tembaga (Cu), seng (Zn), carbon (C), Almunium (Al), perekat, kabel, jepit buaya, lampu LED 1,2 watt untuk menguji keberadaan karakteristik elektrik. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu multimeter digital, DTS meter, pH meter, gergaji besi, tang, gunting, gelas ukur, refraktometer, dan spidol atau pensil.

Pembuatan media tempat uji dibuat dari bahan akrilik yang dibentuk menjadi kotak persegi (Sel) agar dapat digunakan untuk menampung berbagai elektrolit yang akan dibandingkan karakteristik elektriknya.



Gambar 1. Media tempat uji karakteristik elektrik



Gambar 2. Media tempat uji karakteristik elektrik pada pengukuran tegangan saat beban dilepas (a), pengukuran tegangan menggunakan beban (b) dan pengukuran arus elektrolit (c)

Data pengamatan akan diambil setelah elektrolit dan elektroda di tempatkan pada sel yang sudah dibuat dan dibiarkan selama 24 jam, data yang diambil terdiri dari data pengamatan karakteristik elektrik berbagai elektrolit saat beban dilepas (V_{bl}), data pengamatan karakteristik elektrik berbagai elektrolit saat menggunakan beban (V_b), data pengamatan zat terlarut pada berbagai elektrolit, pH berbagai elektrolit. Beban yang digunakan adalah rangkaian LED dengan beban 1,2 watt, pengukuran dilakukan disetiap 2 jam selama 3 hari. Sedangkan media tempat uji karakteristik elektrik yang digunakan berbentuk kotak balok dengan ukuran panjang sebesar 10 cm, lebar sebesar 6 cm dan tinggi sebesar 6 cm, setiap sel akan dimasukkan larutan elektrolit 200 ml.

Gambar 2. menunjukkan cara pengambilan data karakteristik elektrik berbagai elektrolit. Pengambilan data karakteristik berbagai elektrolit dilakukan selama 72 jam dengan selang waktu

pengambilan data 2 jam, juga dilakukan pengambilan data setiap 2 jam selama 72 jam berupa keasaman dengan menggunakan pH meter, zat pada terlarut dengan TDS meter, intensitas cahaya yang dihasilkan oleh led 1,2 watt menggunakan lux meter.

HASIL DAN PEMBAHASAN

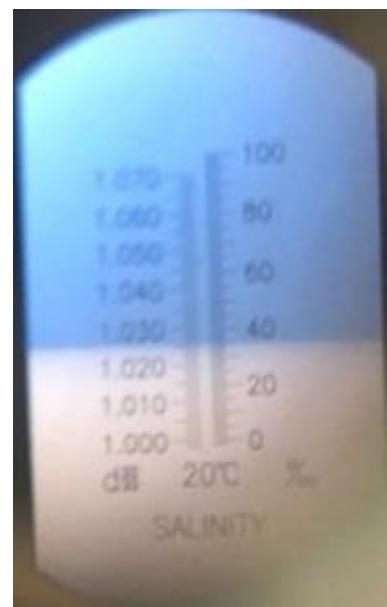
Pengambilan sampel mata air diambil di wilayah Gisting, Provinsi Lampung dimana pengambilan langsung dari sumber mata air. Air rawa di ambil di lempasing dimana terdapat banyak tanaman bakau. Air hujan diambil di wilayah Kemiling, Bandar lampung. Sempel air payau di ambil di lempasing dan dilakukan sebuah metode pengamatan salinitas air payau menggunakan alat yang bernama refraktometer didapatkan nilai untuk air payau yaitu sebesar 3,3 % atau dapat dikatakan bahwa dalam 1 liter (1000ml) air payau terdapat 33 garam (terutama, namun tidak seluruhnya garam

dapur/NaCL) dari sempel yang digunakan. Air dikategorikan sebagai air payau bila konsentrasinya 0,05 sampai 3,5% atau menjadi saline bila konsentrasinya 3,5 sampai 5%. Lebih dari 5% disebut brine [4]. Pada pengambilan sempel air sungai diambil di jalan Saleh Raja Kusuma Yudha, Bandar Lampung. Dan dilakukan metode pengambilan data salinitas didapatkan data mendekati angka 0 karena dari pengamatan putih dan biru bertemu di angka 0 atau dapat dikatakan bahwa dalam 1 liter (1000 ml) air sungai sedikit sekali terdapat kandungan garam dari sempel yang digunakan.

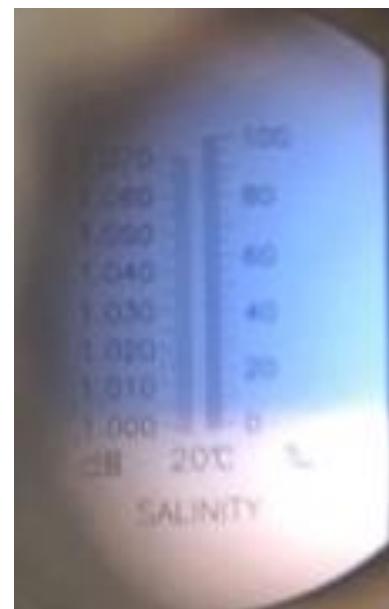
Analisis Daya yang Dihasilkan oleh Air Rawa

Setiap 1 jam sekali selama 5 jamberturut-turut dilakukan data pengujian darisistem dengan beban berupa LED 1,5 watt. Grafik perbandingan antara penggunaan berbagai elektroda dengan elektrolit berupa air rawa ditunjukkan pada **Gambar 5**. Pada gambar tersebut merupakan perbandingan antara daya yang dihasilkan terhadap waktu, didapatkan bahwa pasangan elektroda Cu-Zn menghasilkan rata-rata daya sebesar 2.02418 mW, pasangan elektroda C-Zn menghasilkan rata-rata daya sebesar 0.83736 mW, dan pasangan elektroda Cu-Al menghasilkan rata-rata daya yang sebesar 0.41484 mW. Maka dapat dikatakan bahwa menggunakan pasangan elektroda berupa Cu-Zn lebih baik dibandingkan dengan C-Zn dan Cu-Al. Pada pengambilan data TDS didapatkan nilai tebesar yaitu 349 ppm dengan perubahan yang sangat kecil. Sedangkan

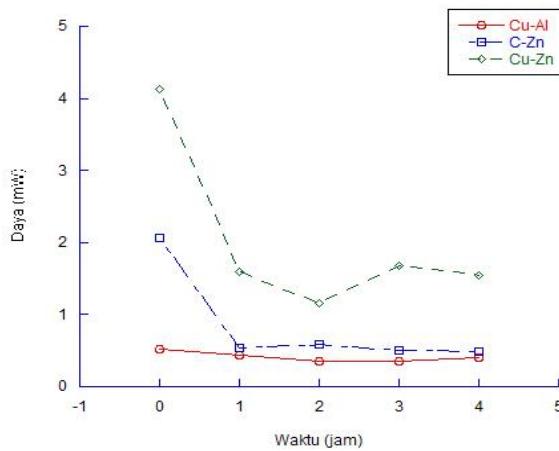
pada pengambilan nilai keasaman diapatkan pH sebesar 7.



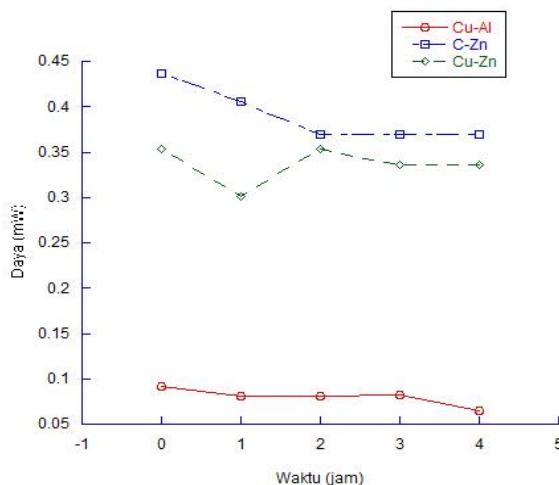
Gambar 3. Hasil pengamatan refraktometer air payau (3,3%)



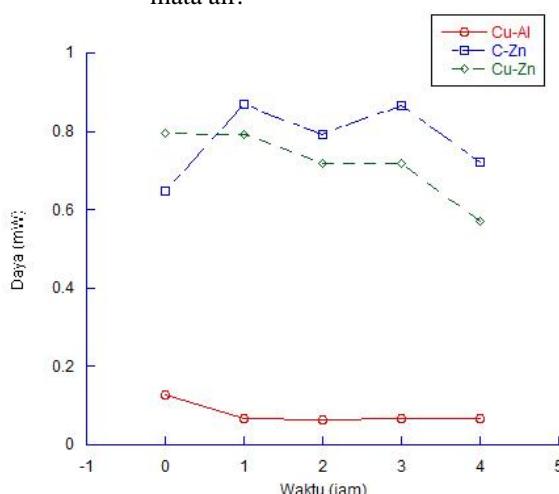
Gambar 4. Hasil pengamatan refraktometer air sungai (mendekati 0%)



Gambar 5. Grafik daya dan waktu pada elektrolit air rawa.



Gambar 6. Grafik hubungan antara daya terhadap waktu pada saat pengujian elektrolit mata air.



Gambar 7. Grafik hubungan antara daya terhadap waktu pada saat pengujian elektrolit air hujan.

Analisis Daya yang Dihasilkan oleh Mata Air

Gambar 6. Merupakan perbandingan antara daya yang dihasilkan terhadap waktudidapatkan bahwa pasangan elektroda Cu-Zn menghasilkan rata-rata daya sebesar 0.71848 mW, pasangan elektroda C-Zn menghasilkan rata-rata daya sebesar 0.77984 mW, dan pasangan elektroda Cu-Al menghasilkan rata-rata daya yang sebesar 0.07826 mW. Didapatkan bahwa penggunaan elektroda berupa C-Zn lebih baik dibandingkan menggunakan pasangan Cu-Zn dan Cu-Al. Pada pengambilan data TDS didapatkan nilai terbesar yaitu 62 ppm dengan perubahan yang sangat kecil. Sedangkan pada pengambilan nilai keasaman didapatkan pH sebesar 7.

Gambar 7. Merupakan perbandingan antara daya yang dihasilkan terhadap waktu, didapatkan bahwa pasangan elektroda Cu-Zn menghasilkan rata-rata daya sebesar 0.33564 mW, pasangan elektroda C-Zn menghasilkan rata-rata daya sebesar 0.39024 mW, dan pasangan elektroda Cu-Al menghasilkan rata-rata daya yang sebesar 0.08024 mW. Didapatkan bahwa penggunaan elektroda berupa C-Zn lebih baik dibandingkan menggunakan pasangan Cu-Zn dan Cu-Al karena menghasilkan daya yang lebih besar. Pada pengambilan data TDS didapatkan nilai terbesar yaitu 105 ppm dengan perubahan yang sangat kecil. Sedangkan pada pengambilan nilai keasaman didapatkan pH sebesar 7.

Dikarenakan data yang didapatkan pada karakteristik elektrik air rawa, mata air dan air hujan tidak terlalu besar yaitu daya terbesar yang didapatkan oleh air rawa sebesar 2.02418 mW dengan menggunakan Cu-Zn, mata air menghasilkan daya terbesar 0.07826 mW menggunakan Cu-Al, dan air hujan menghasilkan daya terbesar 0.39024 mW dengan elektroda C-Zn dibandingkan oleh eletrokit air payau dan air sungai

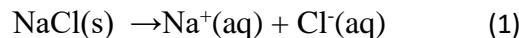
dengan menggunakan Cu-Zn dan C-Zn maka dilakukan penelitian yang mendalam menggunakan elektrolit berupa air payau dan air sungai dan pasangan elektroda Cu-Zn dan C-Zn.

Analisis Daya dengan Elektrolit Air Payau dan Air Sungai

Pada air sungai dan air payau dilakukan selama 72 jam dengan selang waktu pengambilan data 2 jam. Daya yang dihasilkan oleh masing elektrolit dapat di lihat pada **Gambar 8**.

Grafik pada **Gambar 8** merupakan perbandingan daya yang dihasilkan oleh masing-masing elektrolit dengan uji coba menggunakan Cu-Zn dan C-Zn, dapat di lihat daya terbesar dihasilkan oleh elektrolit air payau dengan pasangan elektroda berupa Cu-Zn pada jam pertama yaitu 12,008 mW namun mengalami penurunan drastis sampai pengambilan data ke 4 atau setelah 8 jam pengambilan data. Sedangkan besar daya kedua dihasilkan juga oleh elektrolit air payau namun menggunakan elektroda berupa C-Zn yaitu dengan daya yang dihasilkan saat pertama kali pengambilan data sebesar 11,5192 mW namun mengalami penurunan yang lebih jauh dibandingkan dengan air payau menggunakan Cu-Zn yaitu hingga mencapai dibawah 1 mW. Pada posisi ketiga yaitu elektrolit air sungai menggunakan elektroda berupa Cu-Zn dengan besar daya yang dihasilkan $P = 5,84$ mW penurunan drastis terjadi hanya pada 4 jam pertama, selebihnya mengalami penurunan yang tidak cukup besar, dan posisi trakhir yaitu air sungai dengan menggunakan C-Zn daya yang dihasilkan tidak lebih dari 1 mW karena daya yang dihasilkan tidak besar maka lampu led tidak menyala, hal ini disebabkan karenaterlalu sedikitnya kandungan NaCl yang menyebabkan sedikit sekali terjadi reaksi redoksy yang terjadi.

Berbeda dengan air payau yang menghasilkan daya lebih besar dan dapat membuat lampu led menyala hal tersebut karena banyaknya kandungan NaCl pada Elektrolit akan menghasilkan energi listrik lebih besar, NaCl yang terdapat di air payau merupakan salah satu elektrolit yang dapat menghantarkan arus listrik dengan baik. NaCl yang larut dalam H_2O dapat diuraikan menjadi ion Na^+ dan Cl^- , dengan adanya partikel muatan bebas itu, maka akan muncul arus listrik. Reaksi kimia NaCl dapat dilihat pada persamaan berikut.

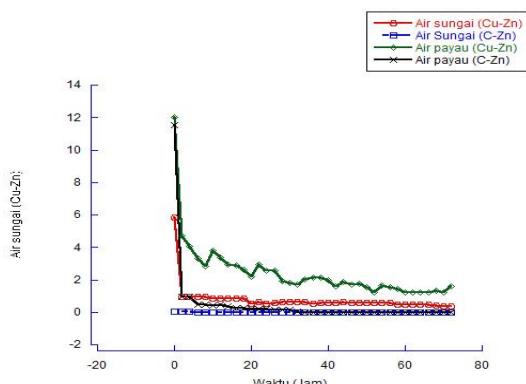


Unsur NaCl memiliki derajat ionisasi 1, atau mendekati 1 dan NaCl termasuk larutan elektrolit kuat serta dapat terionisasi sempurna dalam air [5].

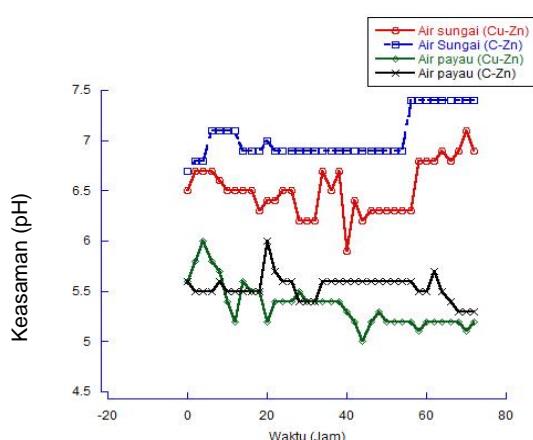
Penurunan tengangan disebabkan oleh pengkaratan yang terjadi pada lempengan Cu, Zn, dan C sesuai dengan apa yang dijelaskan oleh [6]. Korosi tidak dapat dihindari, tetapi lajunya dapat dikendalikan [7]. Laju korosi elektroda seng yang menggunakan elektrolit air payau jauh lebih besar dibandingkan laju korosi pada elektroda seng yang menggunakan elektrolit air sungai. Air payau merupakan media yang korosif karena kandungan Cl^- didalamnya yang cukup tinggi [8].

Analisis perubahan pH dengan Elektrolit Air Payau dan Air Sungai

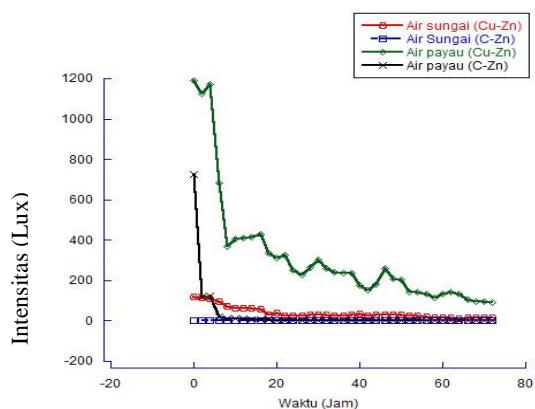
Pada setiap pengambilan data diambil juga data pengamatan parameter kimia berupa perubahan pH setiap 2 jam dari setiap penelitian menggunakan elektrolit air sungai dan air payau dengan dua jenis pasang elektroda Cu-Zn dan C-Zn. Penggunaan Cu-Zn dan C-Zn pada percobaan berdampak berbeda terhadap masing-masing elektrolit. pH yang dihasilkan oleh masing elektrolit dapat di lihat pada **Gambar 9**.



Gambar 8. Perbandingan daya yang dihasilkan oleh air sungai dan air payau.



Gambar 9. Perbandingan perubahan tingkat keasaman yang dihasilkan oleh air sungai dan air payau.



Gambar 10. Perbandingan perubahan intensitas cahaya yang dihasilkan oleh air sungai dan air payau.

Pada grafik yang ditunjukkan pada **Gambar 9** terlihat perubahan keasaman elektrolit dari masing-masing percobaan tidak terlalu jauh. Pengamatan yang terjadi

pada air sungai menggunakan elektroda Cu-Zn didapatkan pH awal sebesar 6,5, dan pH akhir sebesar 6,9, namun pada dua jam sebelum akhir pH air sungai menggunakan elektroda Cu-Zn mencapai nilai 7,1 yang merupakan basa lemah. Pada elektrolit air sungai menggunakan elektroda C-Zn didapatkan pH awal sebesar 6,7, dan pH akhir 7,4. Pada elektrolit air payau dengan elektroda berupa Cu-Zn didapatkan pH awal sebesar 5,6, dan pH akhir sebesar 5,2. Sedangkan pada air payau menggunakan elektroda C-Zn didapatkan pH awal sebesar 5,6, dan pH akhir sebesar 5,3. Berdasar data tersebut dapat dikatakan bahwa elektrolit air sungai berubah dari air dengan derajat keasaman sebagai asam lemah berubah berlahan menjadi basa lemah, sedangkan pada air payau dari asam lemah perlahan berubah menjadi semakin asam.

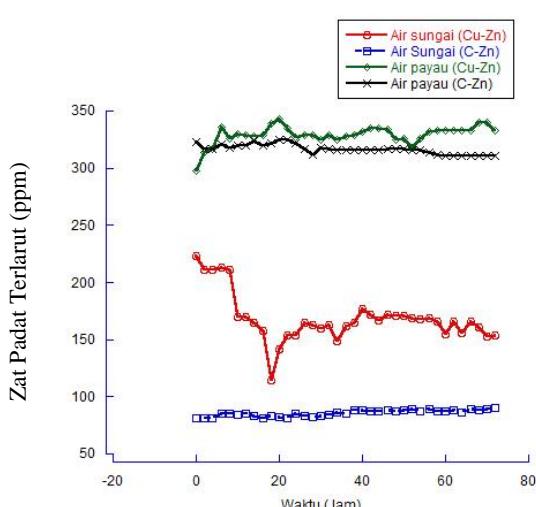
Analisis Intensitas Cahaya dengan Elektrolit Air Payau dan Air Sungai

Pada setiap pengambilan data diambil juga data perubahan intensitas cahaya setiap 2 jam dari setiap penelitian dengan menggunakan elektrolit air sungai dan air payau dengan dua jenis pasang elektroda Cu-Zn dan C-Zn. Penggunaan Cu-Zn dan C-Zn pada percobaan berdampak berbeda terhadap masing-masing elektrolit. Intensitas Cahaya yang dihasilkan oleh masing elektrolit dapat di lihat pada **Gambar 10**. Dapat diketahui pada gambar tersebut bahwa intensitas terbesar yaitu yang dihasilkan oleh air payau dengan elektroda berupa Cu-Zn namun mengalami penurunan seiring berjalannya waktu yang kedua yaitu air payau dengan elektroda berupa C-Zn, ketiga yaitu air sungai dengan elektroda Cu-Zn, dan yang terakhir yaitu air sungai dengan elektroda C-Zn. Dimana intensitas yang didapat berbanding lurus dengan daya yang diamati karena intensitas bergantung dengan daya yang dihasilkan

semakin daya besar makan intensitasnya juga semakin besar begitupun sebaliknya.

Analisis Total Dissolved Solid(TDS) dengan Elektrolit Air Payau dan Air Sungai

Pada setiap pengambilan data diambil juga data perubahan TDS setiap 2 jam dari setiap penelitian dengan menggunakan elektrolit air sungai dan air payau dengan dua jenis pasang elektroda Cu-Zn dan C-Zn. Penggunaan Cu-Zn dan C-Zn pada percobaan berdampak berbeda terhadap masing-masing elektrolit. Perubahan TDS yang dihasilkan oleh masing elektrolit dapat di lihat pada **Gambar 11**. Berdasarkan gambar tersebut TDS terbesar yaitu yang dihasilkan oleh air payau menggunakan elektrolit Cu-Zn dan C-Zn yaitu antara 300-350 ppm sedangkan pada air sungai dengan menggunakan Cu-Zn 100-250 ppm sedangkan air sungai menggunakan C-Zn didapatkan nilai TDS stabil di angka 100 ppm. Hal ini sesuai dengan referensi [9]. Dapat ditarik kesimpulan bahwa tidak banyak perubahan yang terjadi pada nilai TDS dan dapat dikatakan bahwa percobaan yang dilakukan tidak merubah atau membuat nilai zat padat terlarut pada elektrolit.



Gambar 11. Perbandingan perubahan TDS yang dihasilkan oleh air sungai dan air payau.

KESIMPULAN

Berdasarkan realisasi hasil penelitian dan analisis yang yang telah dilakukan diperoleh kesimpulan bahwa penggunaan elektrolit air payau dan pasangan elektroda Cu-Zn terbaik mampu menghasilkan daya yang dapat menghidupkan Led 1,2 watt namun nilai intensitas cahaya semakin lama semakin menurun, dibandingkan penggunaan elektrolit berupa air sungai, air rawa, mata air, dan air hujan. Hal ini disebabkan oleh NaCl yang terinonisasi secara sempurna dimana semakin banyak kandungan NaCl di sebuah larutan akan menghasilkan energi listrik lebih besar karena NaCl dapat membantu mempercepat reaksi redoks. Dan penurunan intensitas cahaya disebabkan oleh pengkaratan pada lempengan Cu, Zn, dan C yang berbanding lurus dengan kandungan NaCl pada sebuah elektrolit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. V Nwokocha, J. Nwokocha, and A. Nnanna, “The Microbial Fuel Cell: The Solution to the Global Energy and Environmental Crises ?,” *Int. J. Acad. Res. Progress. Educ. Dev.*, vol. 1, no. 1, pp. 363–374, 2012.
- [2] Umair Shahzad, “The Need For Renewable Energy Sources,” *ITEE J.*, vol. 15, pp. 16–18, 2012.
- [3] M. R. Harahap, “Sel Elektrokimia: Karakteristik dan Aplikasi,” *Circuit*, vol. 2, no. 1, pp. 177–180, 2016.
- [4] J. P. Riley and G. Skirrow, *Chemical oceanography*, v. 4. 2nd ed. London: Academic Press, 1975.
- [5] C. W. Keenan, *Ilmu Kimia untuk Universitas. Penerjemah Aloysius Hadyana Pudjaatmaka*. Jakarta: Erlangga, 1975.
- [6] P. K. Barua and D. Deka, “Electricity Generation from

- Biowaste Based Microbial Fuel Cells,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 77–92, 2010.
- [7] E. Budiyanto, D. A. Setiawan, H. Supriadi, and Ridhuan, “Pengaruh Jarak Anoda-Katoda Pada Proses Elektroplating Tembaga Terhadap Ketebalan Lapisan dan Efisiensi Katoda Baja AISI 1020,” *J. TURBO*, vol. 5, no. 1, 2016.
- [8] A. A. Karim and Z. A. Yusuf, “Analisa Pengaruh Penambahan Inhibitor Kalsium Karbonat dan
- Tapioka terhadap Tingkat Laju Korosi pada Pelat Baja Tangki Ballast Air Laut,” *J. Ris. dan Teknol. Kelaut.*, vol. 10, no. 2, pp. 205–212, 2012.
- [9] B. E. Logan, B. Hamelers, R. Rozendal, U. Shroder, J. Keller, S. Freguia, P. Aelterman, W. Verstraete, and K. Rabaey, “Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 40, no. 17, pp. 5181–5192, 2006.

