

STUDI EKSPERIMENTAL ENERGI BAYU SEBAGAI ENERGI HIJAU UNTUK PRODUKSI GAS HIDROGEN MELALUI ELEKTROLISIS DENGAN ELEKTRODA SS 316

Immanuel Kevin Dio Hutagalung¹, Berkah Fajar², Tony Suryo Utomo²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH. Tembalang Semarang 50275, Indonesia

*E-mail: immanuelkevin99@gmail.com

Abstrak

Energi merupakan kebutuhan pokok kehidupan manusia yang selalu dibutuhkan untuk segala bentuk aktivitas. Energi fosil adalah sumber energi utama namun energi fosil bukanlah energi terbarukan dan tidak ramah lingkungan. Ketergantungan pada energi fosil akan menyebabkan penipisan energi tersebut serta dampak dari gas buang berupa CO dan CO₂ terhadap pemanasan global yang sangat besar sehingga kehidupan makhluk di bumi terancam. Untuk mengatasinya perlu energi alternatif yang terbarukan dan ramah lingkungan sebagai sumber energi baru seperti energi hidrogen dan energi angin. Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan energi angin dimana akan dikonversikan oleh turbin angin menjadi energi listrik dan kemudian disalurkan ke sel elektrolisis untuk mengelektrolisis air sehingga dapat memproduksi hidrogen. Penelitian ini diawali dengan proses perancangan dan pembuatan elektroliser dengan tipe *Alkaline Water Electrolysis* (AWE) menggunakan elektroda bermaterial SS 316 dilanjutkan dengan pengujian menggunakan *power supply* sebagai sumber daya dan terakhir merangkai elektroliser dengan turbin angin di dua lokasi, yaitu Pantai Marina Semarang dan *Rooftop Training Center* UNDIP. Pengujian berlangsung selama 7 hari di setiap lokasi dengan durasi pengujian kurang lebih 4 jam per hari. Hasil dari pengujian selama 14 hari adalah pengujian di *Rooftop Training Center* UNDIP didapatkan efisiensi sistem secara keseluruhan sebesar 7,37 %, lebih tinggi dibandingkan di Pantai Marina Semarang sebesar 5,217 %. Kemudian secara keseluruhan, efisiensi sistem di dua tempat yang berbeda selama 7 hari masih sedikit, sehingga pemanfaatan energi angin masih kurang memadai.

Kata kunci: angin; elektrolisis; energi; hidrogen; terbarukan

Abstract

Energy is a basic need of human life which is always needed for all forms of activity. Fossil energy is the main energy source but fossil energy is not renewable energy and is not environmentally friendly. Dependence on fossil energy will cause the depletion of energy and the impact of exhaust gases in the form of CO and CO₂ on global warming is very large so that the life of creatures on earth is threatened. To overcome this, renewable and environmentally friendly alternative energy is needed as a new energy source such as hydrogen energy and wind energy. This study aims to utilize wind energy which will be converted by a wind turbine into electrical energy and then channeled to an electrolysis cell to electrolyze water so that it can produce hydrogen. This research begins with the process of designing and manufacturing an electrolyzer with Alkaline Water Electrolysis (AWE) type using electrodes made of SS 316 followed by testing using a power supply as a power source and finally assembling an electrolyzer with a wind turbine in two locations, namely Marina Beach Semarang and the Rooftop Training Center. UNDIP. The test lasted for 7 days at each location with a test duration of approximately 4 hours per day. The results of the 14-day test were testing at the UNDIP Rooftop Training Center, the overall system efficiency was 7.37%, higher than at Marina Beach Semarang at 5.217%. Then overall, the efficiency of the system in two different places for 7 days is still low, so the utilization of wind energy is still inadequate.

Keywords: *electrolysis; energy; hydrogen; renewable; wind*

1. Pendahuluan

Energi merupakan kebutuhan pokok kehidupan manusia yang selalu dibutuhkan untuk segala bentuk aktivitas. Energi fosil khususnya minyak bumi dan batu bara adalah sumber energi utama yang pemanfaatannya salah satunya adalah sebagai sumber dari pembangkit listrik. Padahal energi fosil merupakan energi yang tidak terbarukan (*non-renewable energy*). Ketergantungan terhadap energi fosil akan mengakibatkan menipisnya cadangan energi yang tersedia [1].

Pemakaian energi fosil akan menyebabkan pemanasan global akibat sisa pembakarannya yang berupa gas CO dan CO₂. Kadar CO₂ saat ini disebut sebagai sebagai yang tertinggi selama 125 tahun terakhir, efek buruk CO₂ terhadap pemanasan global sangat besar. Hal ini menimbulkan ancaman serius bagi kehidupan makhluk hidup di muka bumi. Oleh karena itu, pengembangan dan implementasi bahan bakar terbarukan yang ramah lingkungan perlu mendapatkan perhatian serius dari berbagai negara. Hingga saat ini banyak dikembangkan energi baru dan ramah lingkungan, mulai dari pemanfaatan energi surya, energi angin, hingga pemanfaatan hidrogen untuk energi alternatif.

Secara sederhana angin didefinisikan sebagai udara yang bergerak dari tekanan tinggi ke tekanan rendah atau dari suhu udara rendah ke suhu udara tinggi, yang terjadi akibat pemanasan matahari terhadap atmosfer dan permukaan bumi. Angin merupakan salah satu bentuk energi yang tersedia di alam yang diperoleh melalui konversi energi kinetik. Energi dari angin diubah menjadi energi kinetik atau energi listrik.

Selain energi angin, saat ini yang menjadi perhatian besar pada banyak negara, terutama di negara maju yaitu hidrogen. Hidrogen merupakan unsur teringan dan yang paling melimpah di dunia (75% dari total massa unsur alam semesta). Hidrogen diproyeksikan oleh banyak negara akan menjadi bahan bakar masa depan yang lebih ramah lingkungan dan lebih efisien, dimana suplai energi yang dihasilkan sangat bersih karena hanya menghasilkan air sebagai emisi [2].

Energi angin dan hidrogen bisa menjadi pilihan sekaligus berfungsi mengurangi emisi gas karbondioksida (CO₂) yang dihasilkan oleh perangkat sumber energi sebelumnya. Energi angin dan daya hidrogen terutama dalam bentuk sel bahan bakar hidrogen (*hydrogen fuel cells*) menjadi energi yang relatif bersih dan ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi yang dapat merusak lingkungan [2].

Pemanfaatan energi angin salah satunya adalah dengan pembangkit tenaga angin atau dikenal sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang cara kerjanya cukup sederhana. Energi angin yang memutar kincir diteruskan untuk memutar baling-baling pada generator di bagian belakang kincir angin, sehingga menghasilkan energi listrik.

Sedangkan untuk memperoleh hidrogen, maka energi hidrogen harus diproduksi. Produksi hidrogen dapat dilakukan dengan cara elektrolisa, termolisa, termokimia dan fotolisa. Diantara berbagai cara metode menghasilkan energi hidrogen, metode yang paling mudah untuk mendapatkan energi hidrogen ialah dengan cara elektrolisis air, dimana mampu memproduksi energi hidrogen tanpa menghasilkan gas buang karbon jika dikopel dengan reaktor nuklir. Akan tetapi penggunaan elektrolisis air untuk menghasilkan energi hidrogen belum banyak digunakan secara komersial, akibat dari konsumsi listrik yang banyak dan biaya operasional yang tinggi [3].

Berdasarkan uraian di atas, maka perlu dilakukan penelitian tentang pemanfaatan energi baru terbarukan (*renewable energy*) sehingga dapat mengurangi emisi gas buang dari sisa pembakaran energi sebelumnya. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk memberikan informasi tentang pemanfaatan energi terbarukan (*renewable energy*) berupa angin dan juga energi hidrogen. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui daya yang dihasilkan turbin angin, produksi gas hidrogen melalui elektrolisis dengan elektroda SS 316, dan mengetahui efisiensi sistem keseluruhan.

2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimen lapangan yang meliputi beberapa tahap. Tahap pertama dilakukan proses perancangan dan pembuatan elektroliser. Tahap kedua percobaan elektroliser menggunakan *power supply*. Tahap ketiga pengujian elektrolisis dengan menggunakan turbin angin. Ketiga tahap yang dilakukan kemudian dilakukan pengambilan data dan pengolahan data dari kecepatan angin, tegangan, kuat arus, dan produksi gas hidrogen.

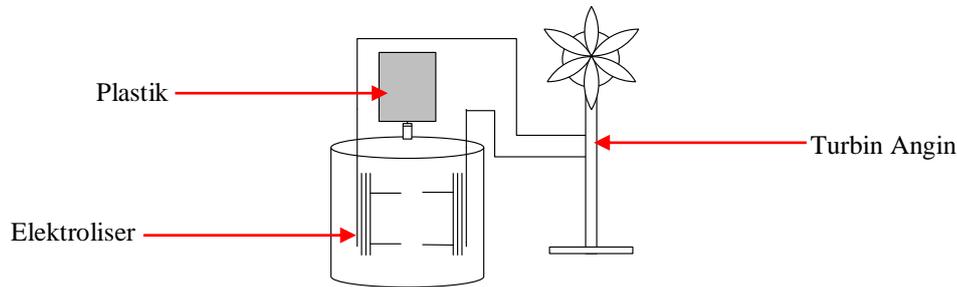
Pada tahap pertama, dilakukan pemilihan metode untuk menghasilkan gas HHO dimana penelitian ini menggunakan metode *alkaline water electrolysis* (AWE). Selanjutnya dilakukan proses perancangan dan pembuatan alat elektroliser dengan membuat desain alat elektroliser dan pemilihan material elektroda. Alat elektroliser dibuat dengan bentuk tabung dengan menggunakan komponen berupa stoples sebagai wadah dari larutan elektrolit dengan material plastik, elektroda dengan material stainless steel 316, baut mur sebagai penyambung antar elektroda dengan material stainless steel, dan valve sebagai jalur keluar dari gas HHO ke penampung gas HHO sementara dengan material kuningan.

Pada tahap kedua, dilakukan percobaan alat elektroliser menggunakan sumber daya dari *power supply*. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah alat elektroliser dapat berfungsi dengan baik atau tidak. Parameter yang diatur pada *power supply* berupa tegangan dan kuat arus sumber. Data yang diukur, diambil dan diolah pada pengujian ini adalah tegangan jepit, kuat arus jepit, dan produksi HHO yang dihasilkan. Pengujian ini dilakukan selama kurang lebih 4 jam dengan pengukuran dilakukan 1 jam sekali.

Pada tahap ketiga, dilakukan pengujian elektrolisis dengan menggunakan turbin angin sebagai sumber energi dimana yang dimanfaatkan adalah energi angin. Pengujian ini dilakukan pada dua lokasi, yaitu Pantai Marina Semarang dan *Roof Top Training Center* UNDIP. Data yang diukur, diambil dan diolah pada pengujian ini adalah tegangan, kuat arus,

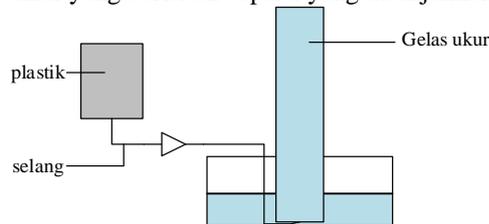
kecepatan angin dan produksi HHO yang dihasilkan. Pengujian ini dilakukan selama kurang lebih 4 jam dengan pengukuran dilakukan 15 menit sekali di masing-masing lokasi.

Alat yang digunakan pada penelitian ini, yaitu turbin angin axis horizontal, anemometer, multimeter, gelas ukur, dan elektroliser. Sedangkan untuk bahan yang digunakan adalah aquades, NaOH, dan *stainless steel* 316. Pengukuran tegangan, kuat arus dan kecepatan angin pada penelitian ini dilakukan secara manual tidak secara *real time*. Rangkaian alat yang digunakan pada pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Rangkaian Skematik Alat Elektrolisis Menggunakan Turbin Angin

Adapun tahapan proses produksi hydrogen yang digunakan adalah membuat larutan NaOH dengan memasukkan aquades sebanyak 1100 mL dan NaOH sebanyak 275 gram (konsentrasi 25%) lalu aduk hingga terlarut. Tunggu beberapa saat sampai kabut yang ada pada larutan berkurang dan suhu sedikit menurun lalu tutup tabung dengan tutup yang telah terpasang elektroda. Kemudian pasang plastik pada *valve* yang terdapat pada tutup wadah dimana plastik berfungsi sebagai tempat penampung gas HHO sementara. Selanjutnya alat elektrolisis dihubungkan dengan sumber energi yaitu *power supply* (sebagai pembanding) atau turbin angin. Selama percobaan, dilakukan pengukuran pada tegangan, kuat arus, kecepatan angin dan gas HHO yang dihasilkan. Kemudian gas HHO akan tertampung pada plastik, lalu setelah 15 menit plastik yang terisi gas HHO diukur dengan mencatat berdasarkan volume air yang berkurang dengan mendorong gas HHO pada plastik ke dalam gelas ukur yang berisi air seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Rangkaian Skematik *Set Up* Pengukuran Gas HHO

Hasil data yang digenerasi dari eksperimen berupa volume gas hasil dari elektrolisis. Metode pengukuran dengan menggunakan set up alat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Volume gas dapat terlihat langsung dari gelas ukur. Kemudian tekanan gas dalam tabung dapat dihitung dengan persamaan (1) dan kemudian massa dari gas baik HHO dan hidrogen dapat dihitung dengan persamaan gas ideal seperti yang sudah diuraikan pada penjelasan di bab sebelumnya.

$$P_{gas} = P_{atm} - \rho g h_{air} \quad (1)$$

3. Hasil Dan Pembahasan

Setelah melakukan perancangan dan pembuatan alat elektroliser, lalu percobaan dengan *power supply*, dan dilakukan pengujian dengan turbin angin maka didapatkan hasil sebagai berikut.

3.1 Perhitungan Gas Hidrogen

Perhitungan gas hidrogen menggunakan prinsip hukum Dalton, dimana tekanan total campuran gas sama dengan jumlah tekanan parsial masing-masing komponen gas. Tekanan parsial adalah tekanan yang akan diberikan oleh masing-masing gas jika gas itu sendiri menempati volume campuran pada suhu yang sama. Maka

$$P_{total\ gas} = P_{H_2} + P_{O_2} \quad (2)$$

dimana P_{H_2} merupakan tekanan gas H_2 dan P_{O_2} merupakan tekanan gas O_2 . Selain menggunakan persamaan di atas, untuk mengetahui jumlah gas hasil elektrolisis juga dapat menggunakan persamaan gas ideal sebagai berikut.

$$PV = nRT \quad (3)$$

$$y_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n_{total}} = \frac{1}{3} \quad (4)$$

$$y_{H_2} = \frac{n_{H_2}}{n_{total}} = \frac{2}{3} \quad (5)$$

Setelah mengetahui fraksi mol dari oksigen dan hidrogen, kemudian tekanan yang digunakan adalah tekanan parsial gas.

$$P_{O_2} = \frac{1}{3} P_{gas\ total} \quad (6)$$

$$P_{H_2} = \frac{2}{3} P_{gas\ total} \quad (7)$$

Setelah mengetahui tekanan parsial masing-masing gas, menggunakan persamaan (3.2) didapatkan persamaan sebagai berikut, dimana persamaan ini digunakan untuk mendapatkan massa dari gas parsial yang ingin diketahui yaitu gas hidrogen.

$$P_{O_2} V = m_{O_2} R_{O_2} T \quad (8)$$

$$P_{H_2} V = m_{H_2} R_{H_2} T \quad (9)$$

Untuk mendapatkan nilai dari R_{O_2} dan R_{H_2} menggunakan persamaan berikut, dimana \mathcal{R} merupakan konstanta gas ideal universal.

$$R_{O_2} = \frac{\mathcal{R}}{m_{O_2}} \quad (10)$$

$$R_{H_2} = \frac{\mathcal{R}}{m_{H_2}} \quad (11)$$

Setelah didapatkan massa dari gas hidrogen maka besar energi yang terkandung dalam gas dapat dihitung dengan persamaan (3.11) sebagai berikut

$$E_{H_2} (kJ) = \text{Massa } H_2 (kg) \times \text{HHV } H_2 (kJ/kg) \quad (12)$$

dimana nilai dari HHV gas hidrogen sebesar 141.8 MJ/kg. Energi input dalam penelitian ini adalah energi angin. Besar energi input dari energi angin dapat diketahui dengan persamaan berikut.

$$E_{k\ angin} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (13)$$

dimana ρ adalah densitas udara sebesar 1,2 kg/m³ dan A adalah luas area dalam m², v adalah kecepatan angin rata rata dalam m/s.

Setelah mengetahui energi output berupa hasil kali HHV dengan massa hidrogen yang didapat, dan energi angin dalam rentang waktu tertentu, maka nilai dari efisiensi sistem dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\eta_{sistem} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{E_{H_2}}{E_{k\ angin}} \times 100\% \quad (14)$$

3.2 Hasil Pengujian Power Supply

Pengujian dengan *power supply* dilakukan selama 4 jam, sesuai dengan pengujian menggunakan turbin angin sebagai sumber listrik yang akan dilakukan nantinya. Sumber listrik dari *power supply* yaitu tegangan sebesar 2 V dan arus sebesar 2 A. Sedangkan tegangan dan arus jepitnya adalah 1,9 V dan 1,3 A. Data volume hidrogen diambil setiap 1 jam. Volume hidrogen yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 1. Hasil Pengujian dengan *Power Supply*

No.	Daya (watt)	Hidrogen (mL)	Efisiensi (%)
1	2,47	681	64,2
2		581	55,45
3		605	57,78
4		653	62,27
Rata-Rata Efisiensi			59,935

Dengan total hidrogen yang dihasilkan sebanyak 2520 mL, efisiensi total dari pengujian menggunakan *power supply* selama 4 jam adalah 59,935%. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan Chi dan Yu [4] yaitu efisiensi operasi dari *alkaline water electrolysis* berkisar 60% (59-70%). Dari hasil uji menggunakan *power supply* yang hampir sama dengan referensi, maka dapat disimpulkan sudah bisa digunakan untuk proses penelitian selanjutnya.

3.3 Hasil Pengujian dengan Turbin Angin

Penelitian melakukan proses elektrolisis memvariasikan dari 2 tempat pengambilan data yang berbeda yaitu di Pantai Marina yang terletak di Tawang Sari, Kota Semarang dan *Roof Top Training Center* UNDIP yang terletak di Tembalang, Kota Semarang. Pengambilan data diambil selama 7 hari di masing-masing tempat. Konsentrasi larutan elektrolit yang digunakan sama dengan pengujian menggunakan *power supply*, 25% dari 1100 mL aquades atau sebesar 275 gram, sesuai dengan penelitian Chi dan Yu [4] dimana mereka menyatakan bahwa elektrolisis air alkali beroperasi pada suhu rendah (60-80 °C), dengan larutan berair KOH dan/atau NaOH sebagai elektrolit, konsentrasi elektrolitnya sekitar 20%-30%. Parameter yang diamati pada rangkaian proses elektrolisis adalah kecepatan angin, tegangan jepit, dan kuat arus jepit. Volume hidrogen yang didapat diamati berdasarkan volume air yang berkurang pada gelas ukur.

Pada pengujian menggunakan turbin angin, data diambil setiap 15 menit sekali selama 4 jam. Pengambilan data dilakukan dengan bantuan alat anemometer untuk mengukur kecepatan angin, voltmeter untuk mengukur tegangan, amperemeter untuk mengukur arus, dan gelas ukur untuk mengukur banyaknya produksi hidrogen.

a. Hubungan Kecepatan Angin Terhadap Volume HHO

Hasil percobaan elektrolisis menggunakan turbin angin 7 hari di Pantai Marina dan *Rooftop Training Center* UNDIP berupa kecepatan angin rata-rata dan total produksi HHO 4 jam pengujian dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Rangkuman Hasil Pengujian Menggunakan Turbin Angin (Data Rata-Rata Kecepatan Angin)

Hari ke-	Kecepatan Angin Rata-Rata (m/s)		Total Produksi HHO (mL)	
	Pantai Marina Semarang	<i>Rooftop Training Center</i> UNDIP	Pantai Marina Semarang	<i>Rooftop Training Center</i> UNDIP
1	2,906	2,191	438	315
2	3,213	2,07	573	334
3	2,064	1,78	339	246
4	2,057	2,221	281	273
5	3,309	2,231	566	336
6	2,905	2,116	483	288
7	2,109	2,259	329	354
	Total		3009	2146

Tabel 2 menunjukkan produksi HHO tertinggi pada pengujian di Pantai Marina Semarang dihasilkan pada hari ke-2 sebesar 573 mL dengan kecepatan angin rata-rata 3,213 m/s, sedangkan produksi HHO terendah dihasilkan pada hari ke-4 sebesar 281 mL dengan kecepatan angin rata-rata kecepatan 2,057 m/s. Total produksi HHO yang dihasilkan pada pengujian di Pantai Marina Semarang sebesar 3009 mL. Pada pengujian di *Rooftop Training Center* UNDIP produksi HHO tertinggi dihasilkan pada hari ke-7 sebesar 354 mL dengan kecepatan angin rata-rata 2,259 m/s, sedangkan produksi HHO terendah dihasilkan pada hari ke-3 sebesar 246 mL dengan kecepatan angin rata-rata kecepatan 1,78 m/s. Total produksi HHO yang dihasilkan pada pengujian di *Rooftop Training Center* UNDIP sebesar 2146 mL.

b. Hubungan Tegangan dan Kuat Arus Terhadap Volume HHO

Tabel 3 merupakan ringkasan data percobaan elektrolisis dengan turbin angin di Pantai Marina Semarang, yang berupa cakupan arus dan tegangan, rata-rata arus dan tegangan, serta total produksi HHO yang dihasilkan selama 7 hari 4 jam pengujian.

Tabel 3. Rangkuman Data Tegangan dan Kuat Arus di Pantai Marina Semarang

Hari ke-	Cakupan Tegangan (V)	Tegangan Rata-rata (V)	Cakupan Kuat Arus (A)	Kuat Arus Rata-rata (A)	Total Produksi HHO (mL)
1	1,63-1,7	1,659	0,21-0,39	0,292	438
2	1,61-1,82	1,686	0,18-0,69	0,373	573
3	1,61-1,67	1,633	0,17-0,34	0,23	339
4	1,6-1,66	1,628	0,13-0,31	0,217	281
5	1,66-1,76	1,683	0,3-0,58	0,375	566
6	1,62-1,72	1,666	0,18-0,47	0,325	483
7	1,6-1,67	1,635	0,12-0,33	0,228	329

Pada Tabel 3 menunjukkan produksi HHO tertinggi dihasilkan pada hari ke-2 sebesar 573 mL dengan tegangan rata-rata 1,686 V dan kuat arus rata-rata 0,373 A. Sedangkan produksi HHO terendah dihasilkan pada hari ke-4 sebesar 281 mL dengan tegangan rata-rata 1,628 V dan kuat arus rata-rata 0,217 A.

Ringkasan data percobaan elektrolisis dengan turbin angin di *Rooftop Training Center* UNDIP dapat dilihat pada Tabel 4 berikut ini.

Tabel 4. Rangkuman Data Tegangan dan Kuat Arus di *Rooftop Training Center* UNDIP

Hari ke-	Cakupan Tegangan (V)	Tegangan Rata-rata (V)	Cakupan Kuat Arus (A)	Kuat Arus Rata-rata (A)	Total Produksi HHO (mL)
1	1,61-1,67	1,635	0,17-0,34	0,238	315
2	1,6-1,67	1,634	0,12-0,32	0,228	331
3	1,61-1,64	1,625	0,17-0,24	0,203	246

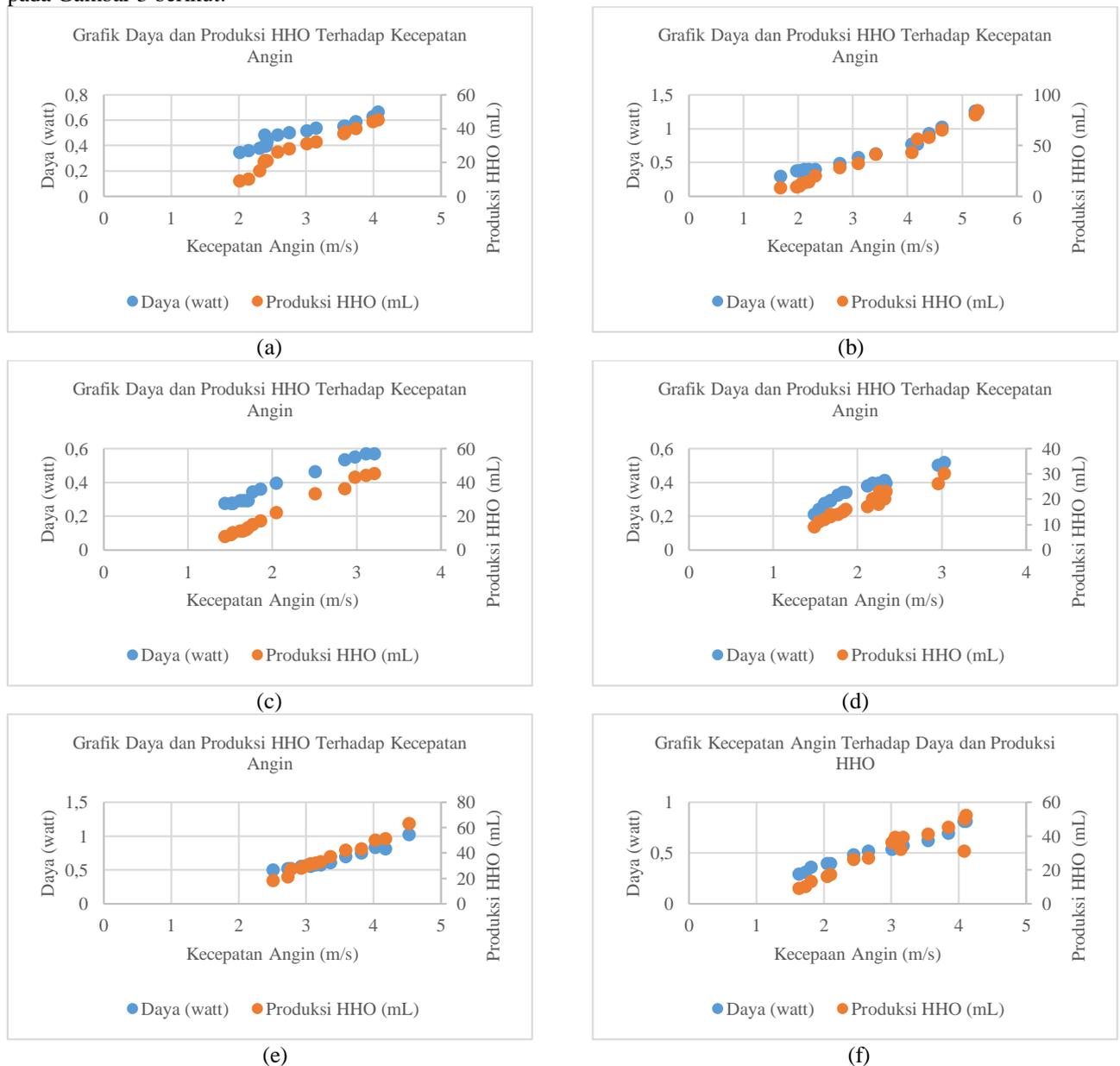
4	1,61-1,66	1,639	0,17-0,31	0,25	273
5	1,61-1,66	1,64	0,17-0,31	0,251	336
6	1,61-1,65	1,632	0,17-0,29	0,227	288
7	1,62-1,67	1,6406	0,18-0,33	0,249	354

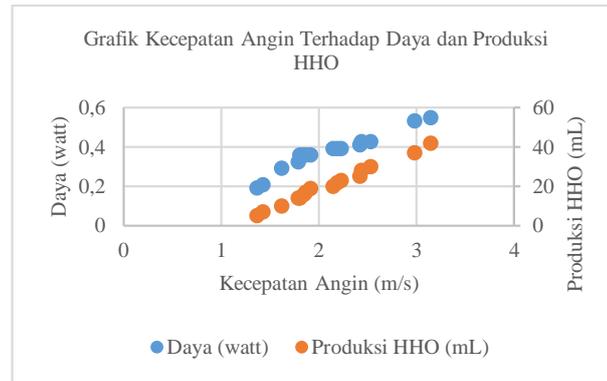
Pada Tabel 4 produksi HHO dihasilkan pada hari ke-7 sebesar 354 mL dengan tegangan rata-rata 1,6406 V dan kuat arus rata-rata 0,249 A. Sedangkan produksi HHO terendah dihasilkan pada hari ke-3 sebesar 246 mL dengan tegangan rata-rata 1,625 V dan kuat arus rata-rata 0,203 A.

Tegangan berpengaruh terhadap jumlah distribusi arus kedalam sel elektrolisis dan arus memiliki peran utama terhadap pembentukan hidrogen [5]. Secara keseluruhan, semakin besar nilai tegangan dan arus yang terdistribusi, volume hidrogen akan semakin meningkat. Terutama arus yang tinggi, maka semakin tinggi pula volume hidrogen yang dihasilkan [6]. Hal ini disebabkan karena kenaikan arus listrik meningkatkan laju muatan listrik dalam larutan dan laju reaksi penguraian senyawa air menjadi hidrogen dan oksigen semakin cepat [7]. Hal tersebut menyebabkan semakin banyak elektron yang ditransfer perunit waktu sehingga volume hidrogen yang terbentuk semakin besar [8].

c. Hubungan Daya dan Produksi HHO Terhadap Kecepatan Angin

Grafik daya dan produksi HHO terhadap kecepatan angin pada pengujian di Pantai Marina Semarang dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.





(g)

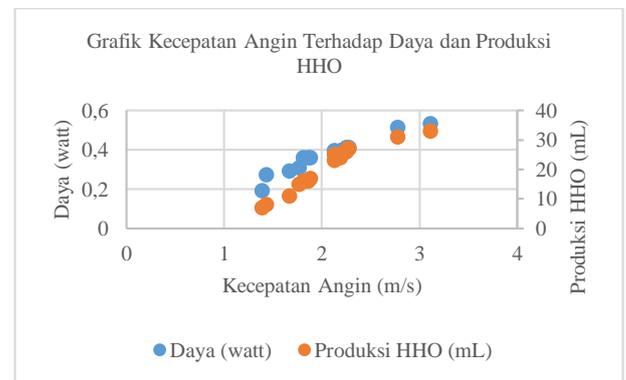
Gambar 3. Grafik Daya dan Produksi HHO Terhadap Kecepatan Angin di Pantai Marina Hari-1 (a) Sampai Hari-7 (g)

Dari Gambar 3. dapat diketahui bahwa pada pengujian di Pantai Marina Semarang semakin besar kecepatan angin maka semakin besar daya yang dihasilkan begitu juga dengan produksi HHO yang dihasilkan. Namun terdapat beberapa data yang tidak beraturan pada hari-4 dan hari-6 dimana produksi HHO menurun tetapi daya yang masuk kurang lebih sama. Hal ini terjadi karena kelemahan dari metode *alkaline water electrolysis* berupa proses inisiasinya yang lambat dan terdapat kabut alkali pada gas yang dihasilkan sehingga ketika kecepatan angin fluktuatif maka proses elektrolisis yang sedang berjalan akan melambat atau mungkin berhenti untuk sementara.

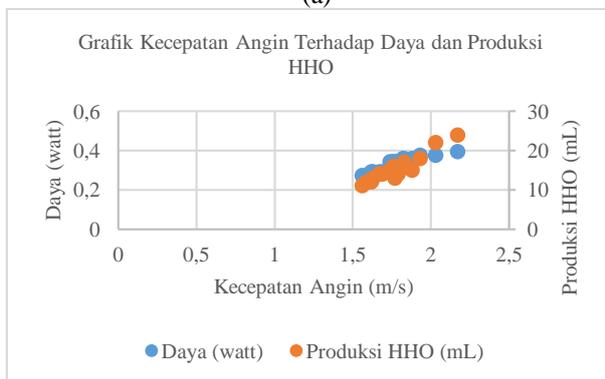
Grafik daya dan produksi HHO terhadap kecepatan angin pada pengujian di *Rooftop Training Center* UNDIP dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



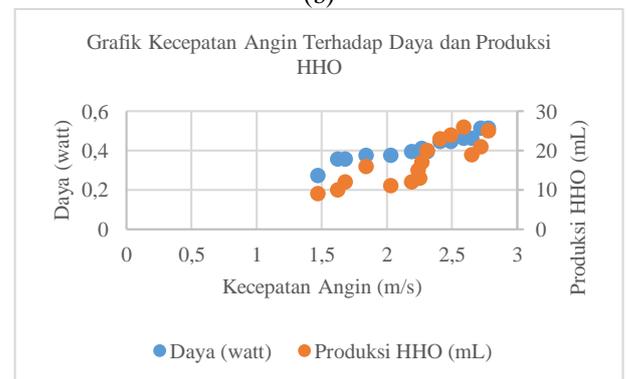
(a)



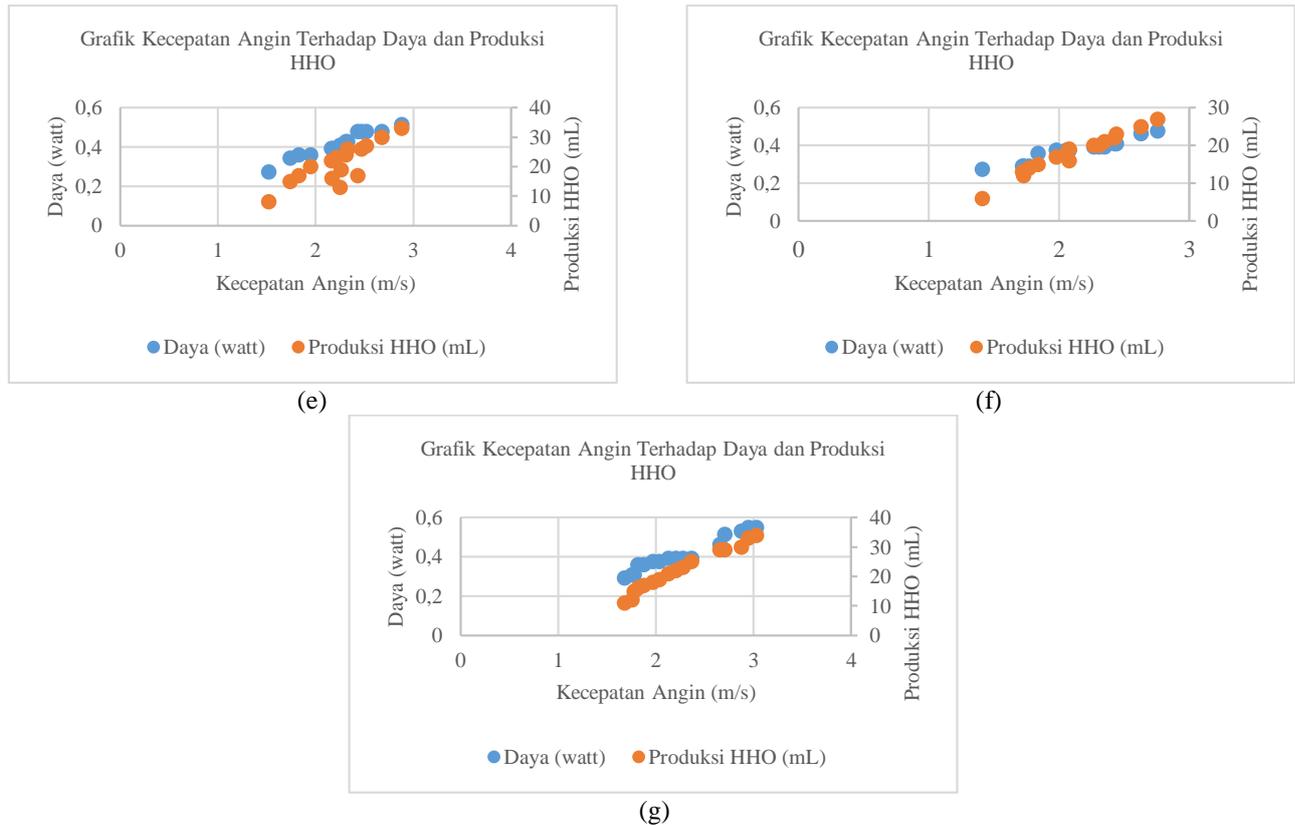
(b)



(c)



(d)



Gambar 4. Grafik Daya dan Produksi HHO Terhadap Kecepatan Angin di *Rooftop* TC UNDIP Hari-1 (a) Sampai Hari-7 (g)

Dari Gambar 4 dapat diketahui bahwa pada pengujian di *Rooftop Training Center* UNDIP semakin besar kecepatan angin maka semakin besar daya yang dihasilkan begitu juga dengan produksi HHO yang dihasilkan sama seperti pada pengujian di Pantai Marina Semarang. Namun terdapat beberapa data yang tidak beraturan pada hari-3 sampai hari-6 dimana produksi HHO menurun tetapi daya yang masuk kurang lebih sama. Hal ini terjadi karena kelemahan dari metode *alkaline water electrolysis* berupa proses inisiasinya yang lambat dan terdapat kabut alkali pada gas yang dihasilkan sehingga ketika kecepatan angin fluktuatif maka proses elektrolisis yang sedang berjalan akan melambat atau mungkin berhenti untuk sementara.

d. Efisiensi Sistem

Hasil perhitungan efisiensi elektroliser di Pantai Marina Semarang dapat dilihat pada Tabel 5 berikut ini.

Tabel 5. Rangkuman Data Efisiensi Percobaan di Pantai Marina Semarang

Hari ke-	Total E_{H_2} (kJ)	Total E_{angin} (kJ)	Total Produksi HHO (mL)	Efisiensi Total (%)
1	3,288995	123,863507	438	2,655
2	4,30326	208,4360006	573	2,064
3	2,544764	49,26324808	339	5,165
4	2,119823	43,57014574	281	4,865
5	4,254972	170,9584107	566	2,488
6	3,64138	133,8220626	483	2,721
7	2,484257	47,61388614	329	5,217

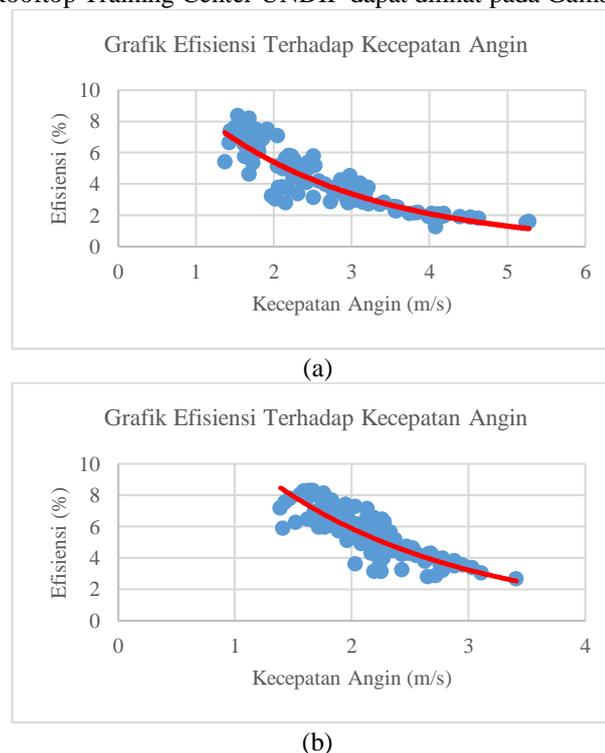
Tabel 2 menunjukkan bahwa produksi HHO tertinggi dihasilkan pada hari ke-2 sebesar 573 mL dengan kecepatan angin rata-rata 3,213 m/s. Sedangkan produksi HHO terendah dihasilkan pada hari ke-4 sebesar 281 mL dengan kecepatan angin rata-rata 2,057 m/s. Namun pada Tabel 5 dapat dilihat bahwa efisiensi pada hari ke-2 sebesar 2,064%, lebih rendah dibandingkan dengan efisiensi pada hari ke-4 yaitu sebesar 4,865%. Efisiensi tertinggi dihasilkan pada hari ke-7 sebesar 5,217%, dengan kecepatan angin rata-rata 2,109 m/s dan produksi HHO yang dihasilkan 329 mL. Ini berarti kecepatan angin yang tinggi, belum tentu mencapai efisiensi elektroliser maksimal. Hasil perhitungan efisiensi elektroliser di *Rooftop Training Center* UNDIP dapat dilihat pada Tabel 6 berikut ini.

Tabel 6. Rangkuman Data Efisiensi Percobaan di *Rooftop Training Center* UNDIP

Hari ke-	Total E_{H_2} (kJ)	Total E_{angin} (kJ)	Total Produksi HHO (mL)	Efisiensi Total (%)
1	2,361790251	51,05460878	315	4,626
2	2,482288	43,81626791	331	5,665
3	1,848752	25,08336023	246	7,37
4	2,039113	51,80385454	273	3,936
5	2,51131	51,51380249	336	4,875
6	2,158427	44,61170209	288	4,838
7	2,655109	55,98607527	354	4,742

Tabel 2 menunjukkan bahwa produksi HHO tertinggi dihasilkan pada hari ke-7 sebesar 354 mL dengan kecepatan angin rata-rata 2,259 m/s. Sedangkan produksi HHO terendah dihasilkan pada hari ke-3 sebesar 246 mL dengan kecepatan angin rata-rata 1,78 m/s. Namun pada Tabel 6 dapat dilihat bahwa efisiensi pada hari ke-7 sebesar 4,742%, lebih rendah dibandingkan dengan efisiensi pada hari ke-3 yaitu sebesar 7,37% yang merupakan efisiensi tertinggi yang didapatkan. Ini berarti kecepatan angin yang tinggi, belum tentu mencapai efisiensi elektroliser maksimal.

Untuk mengetahui kecenderungan kecepatan angin terhadap efisiensi elektroliser yang terjadi pada pengujian di Pantai Marina Semarang dan Rooftop Training Center UNDIP dapat dilihat pada Gambar 7 berikut ini.



Gambar 7. Grafik Efisiensi Terhadap Kecepatan Angin di Pantai Marina (a) dan *Rooftop* TC UNDIP (b)

Gambar 7 menunjukkan persebaran efisiensi setiap 15 menit selama 4 jam dalam 7 hari terhadap kecepatan angin. Secara keseluruhan, tren yang ditunjukkan adalah semakin besar kecepatan angin maka semakin rendah efisiensi sistem secara keseluruhan. Hal ini disebabkan karena elektrolisis metode air alkali memiliki kekurangan berupa kabut alkali dalam gas yang dihasilkan, memiliki persiapan awal atau preparasi yang cukup lama, dan reaksi inisiasi yang lambat [4]. Sedangkan kecepatan angin di alam sekitar sangat fluktuatif. Sehingga proses elektrolisis sedang berjalan namun kecepatan angin terkadang rendah dan kadang tidak ada angin yang berhembus sehingga menyebabkan proses elektrolisis sempat menurun atau berhenti. Berbeda dengan angin dengan kecepatan sedang namun stabil. Proses elektrolisis mampu berjalan lebih lama dikarenakan proses elektrolisis tidak harus mengulang kembali dari awal sehingga energi yang masuk melanjutkan proses elektrolisis yang sudah berjalan. Hal tersebutlah yang mengakibatkan angin dengan kecepatan sedang namun stabil lebih efisien dalam menghasilkan hidrogen dibandingkan dengan angin berkecepatan tinggi yang sesaat.

3.4 Pengaruh Elektroda SS 316 Terhadap Elektrolisis

Material elektroda yang digunakan pada percobaan ini adalah material baja tahan karat (*stainless steel*) seri 316. Pada Tabel 7 menunjukkan komposisi material dari elektroda SS 316.

Tabel 7. Komposisi Paduan SS 316 [9]

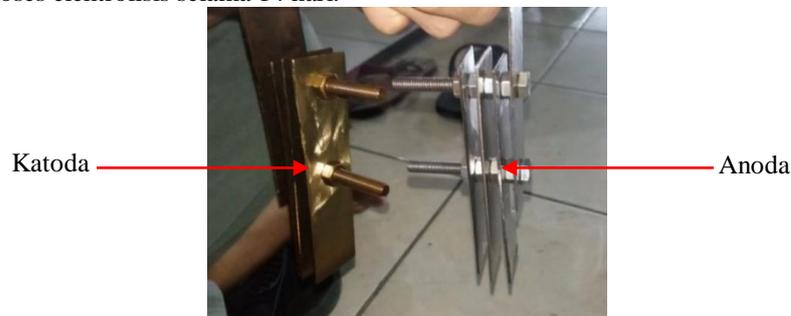
Komposisi (%)								
SS 316	Ni	Cr	C	Si	Mn	P	S	N
	10-13	16,5-18,5	≤ 0,07	≤ 1,00	≤ 2,00	0,034	≤ 0,015	≤ 0,11

Material SS 316 memiliki kandungan nikel 10-13% [9]. Nikel merupakan salah satu unsur paduan logam yang banyak digunakan sebagai bahan dasar elektroda dalam elektrolisis air alkali baik sebagai anoda maupun katoda [4] [10]. Hal ini karena nikel merupakan bahan yang stabil, harga relatif murah, memiliki ketahanan korosi dan stabilitas kimia yang cukup baik [11] [12] [13] [14].

Untuk kandungan kromiumnya, SS 316 mengandung kromium sekitar 16,5-18,5% [9]. Penambahan kromium memberikan ketahanan yang sangat baik terhadap oksida besi, baja dan logam. Ini karena kromium mengkonsentrasikan lapisan terdalam dari film oksida besi, membentuk lapisan kromium oksida tepat di bawah oksida besi. Lapisan ini lebih tahan terhadap difusi ion atau elektron daripada lapisan oksida besi saja, menghasilkan laju oksidasi yang lebih lambat.

Kandungan karbon juga mempengaruhi korosi pada *stainless steel*. Kadar karbon yang tinggi dapat menyebabkan korosi, karena karbon bergabung dengan kromium membentuk senyawa kromium karbida, yang dapat mengurangi lapisan kromium oksida pada permukaan logam [15]. Material SS 316 memiliki kandungan karbon ≤ 0,07% [9]. Kandungan karbon yang rendah mengakibatkan SS 316 tidak cukup mudah mengalami korosi.

Elektroda harus menunjukkan ketahanan terhadap lingkungan alkali dan bersifat katalitik, tidak bereaksi dengan larutan elektrolit [16]. Kandungan nikel dan kromium yang lebih besar, membuat material elektroda lebih tahan terhadap korosi sehingga lebih stabil dan tidak bereaksi dengan larutan sehingga dapat menghasilkan volume hidrogen yang lebih banyak [17]. Pada percobaan ini, menggunakan elektroda SS 316 yang memiliki kandungan nikel dan kromium yang cukup besar serta kandungan karbon yang cukup kecil sehingga tidak mudah terkorosi. Sifat logam adalah mudah melepaskan elektron dimana korosi adalah reaksi logam dengan oksigen atau bahan lain dan korosi akan terjadi lebih cepat dengan adanya elektrolit, misalnya asam atau larutan garam. Pada Gambar 8 ditunjukkan kondisi elektroda SS 316 sesudah mengalami proses elektrolisis selama 14 hari.



Gambar 8. Kondisi Elektroda SS 316 Setelah Proses Elektrolisis Selama 14 Hari

Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa katoda menghitam, hal itu dikarenakan adanya deposit logam dengan konsentrasi kecil. Sehingga akan terjadi endapan/lapisan yang terbakar berwarna hitam pada rapat arus yang relatif rendah. Kemudian anoda pada material SS 316 mulai mengalami korosi coklat kemerahan (karat) pada bagian tepi anoda. Korosi dimulai dengan rusaknya lapisan pasif yang terbentuk, memungkinkan elektron dari unsur penyusun *stainless steel* menembus dan mengubah unsur-unsur tersebut menjadi ion logam. Menurut Hakim [18], produk korosi hanya terlihat pada anoda karena reaksi oksidasi yang terjadi pada anoda merupakan penyebab utama terjadinya korosi. Semakin besar arus yang terdistribusi, semakin banyak logam yang terionisasi sehingga anoda kehilangan massa atau dengan kata lain berkarat. Akibatnya larutan elektrolit menjadi berubah warna karena bereaksi dengan ion-ion logam yang terkorosi saat proses elektrolisis berlangsung. Gambar 9 menunjukkan warna larutan elektrolit setelah proses elektrolisis.



Gambar 9. Perubahan Warna Larutan Elektrolit

Pada Gambar 9 terlihat bahwa pada percobaan elektrolisis SS 316 larutan elektrolit mengalami sedikit perubahan warna. Perubahan warna ini terjadi dikarenakan adanya logam mangan yang terkorosi sehingga elektron dari logam mangan terlepas dan membentuk ion mangan. Mangan sendiri merupakan salah satu logam penyusun SS 316 dengan kandungan sekitar $\leq 2,00\%$ yang terbilang cukup rendah [9]. Dalam deret volta, logam mangan lebih mudah terkorosi dan melepaskan elektron di antara logam lain penyusun SS 316. Ion mangan akibat korosi bereaksi dengan larutan elektrolit menyebabkan warna baru muncul dalam larutan elektrolisis. Sehingga proses elektrolisis yang sedang berlangsung terganggu yang mengakibatkan produksi HHO tidak maksimal.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Alat elektrolisis dengan sumber daya menggunakan turbin angin mampu menghasilkan tegangan tertinggi 1,82 V dengan kuat arus 0,69 A dan daya yang dihasilkan sebesar 1,2558 watt di Pantai Marina. Sedangkan di *Rooftop Training Center* UNDIP menghasilkan tegangan tertinggi 1,67 V dengan kuat arus 0,34 A dan daya yang dihasilkan sebesar 0,5678 watt.
2. Proses elektrolisis menghasilkan volume hidrogen total selama 7 hari 3009 mL di Pantai Marina dan 2143 mL di *Rooftop Training Center* UNDIP.
3. Efisiensi sistem tertinggi di Pantai Marina adalah 5,217% dan di *Rooftop Training Center* UNDIP adalah 7,37% dengan asumsi kemurnian hydrogen 75%. Semakin besar kecepatan angin dan fluktuatif maka efisiensi semakin kecil.

5. Daftar Pustaka

- [1]. Muliawati, Neni. (2008). *Hidrogen Sebagai Sel Bahan Bakar Sumber Energi Masa Depan*. Lampung: Universitas Lampung.
- [2]. Sebastian dan Sitorus. (2013). *Analisa Efisiensi Elektrolisis Air dari Hydrofill Pada Sel Bahan Bakar*. Medan: Universitas Sumatera Utara
- [3]. Aditya dan Harto. (2011). *Pengaruh Variasi Masukan Rapat Arus Listrik Menggunakan Molten Salt Reactor (MSR) Terhadap Nilai Efisiensi Produksi Hidrogen Dengan Sistem Elektrolisis Air Suhu Tinggi*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- [4]. J. Chi and H. Yu. (2018) *Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production*, Chinese J. Catal., vol. 39, no. 3, pp. 390–394. doi: 10.1016/S1872-2067(17)62949-8
- [5]. Kaddami, M. and Mikou, M. (2017). *ScienceDirect Effect of operating parameters on hydrogen production by electrolysis of water*, International Journal of Hydrogen Energy. Elsevier Ltd, 42(40), pp. 25550–25557. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.015.
- [6]. Chennouf, N. *et al.* (2012) ‘Experimental study of solar hydrogen production performance by water electrolysis in the south of Algeria’, *Energy Procedia*. Elsevier B.V., 18, pp. 1280–1288. doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.145.
- [7]. Ursúa, A., Gandía, L. M. and Sanchis, P. (2012). *Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends*, Proceedings of the IEEE, 100(2), pp. 410–426. doi: 10.1109/JPROC.2011.2156750.
- [8]. Domga Richard, G. B. N. and Tchatchueng, J. B. (2017). *Study of Some Electrolysis Parameters for Chlorine and Hydrogen Production Using a New Membrane Electrolyzer*, International Journal of Chemical Engineering and Analytical Science, Vol. 2(No. 1), pp. 1–8.
- [9]. Euro, Inox. (2007). *Stainless steel: tables of technical properties, 2nd edition*, Materials and Applications Series, 5(5). Available at: http://www.worldstainless.org/Files/issf/nonimagefiles/PDF/Euro_Inox/Tables_TechnicalProperties_EN.pdf.
- [10]. Dahbi, S., Aboutni, R., Aziz, A., Benazzi, N., Elhafyani, M., & Kassmi, K. (2016). Optimised hydrogen production by a photovoltaic-electrolysis system DC’, International Journal of Hydrogen Energy. Elsevier Ltd, 41(45), pp. 20858–20866. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.111
- [11]. Ganley, J. C. (2009) ‘High temperature and pressure alkaline electrolysis’, *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 34(9), pp. 3604–3611. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.02.083
- [12]. David, M., Ocampo-Martínez, C. and Sánchez-Peña, R. (2019) ‘Advances in alkaline water electrolyzers: A review’, *Journal of Energy Storage*, 23(April), pp. 392–403. doi: 10.1016/j.est.2019.03.001
- [13]. Wei, Z. D. *et al.* (2007) ‘Water electrolysis on carbon electrodes enhanced by surfactant’, *Electrochimica Acta*, 52(9), pp. 3323–3329. doi: 10.1016/j.electacta.2006.10.011.
- [14]. Mazloomi, S. K. and Sulaiman, N. (2012). *Influencing factors of water electrolysis electrical efficiency*, Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier Ltd, 16(6), pp. 4257–4263. doi: 10.1016/j.rser.2012.03.052.
- [15]. Pelsue B. M., Zinelis S., Bradley G. T., Berzins D. W., Eliades T., Eliades G. (2009). *Structure, Composition, and Mechanical Properties of Australian Orthodontic Wires*. The Angle Orthodontics, 79(1): 97-101.
- [16]. Ursúa, A. *et al.* (2009). *Influence of the power supply on the energy efficiency of an alkaline water electrolyser*, International Journal of Hydrogen Energy, 34(8), pp. 3221–3233. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.02.017.

- [17]. Olivares-Ramírez, J. M. *et al.* (2007) ‘Studies on the hydrogen evolution reaction on different stainless steels’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(15 SPEC. ISS.), pp. 3170–3173. doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.03.017.
- [18]. Hakim, A. R. (2012). *Analisa Korosi Atmosfer pada Material Baja Karbon-Sedang di Kota Semarang* (Tugas Akhir), Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia). Diambil dari http://eprints.undip.ac.id/41465/3/BAB_II.pdf.