

Sistem Kontrol Dan Monitoring Hidrogen - Oksigen (HHO) Generator Berbasis Internet Of Things (IoT)

Chandra Syah Putra*

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Lhokseumawe, Kota Lhokseumawe

*Koresponden email: chandrasyahputra898@gmail.com

ABSTRACT

Electrolysis is a way to separate water (H₂O) into hydrogen (H₂) and oxygen (O₂) gas by using an electric current through the water. The aim of this research is to create an Internet of Things (IoT) based prototype system that can monitor and control the hydrogen gas (H₂) production process using the water electrolysis method. This research was carried out in several stages starting with a technology survey, then continuing with prototype design (including hardware design, software design, and circuit schematic design). This monitoring system device is designed with 3 sensors, namely: MQ-8 gas sensor, ACS712 current sensor, and BME280 pressure-temperature sensor. The MQ-8 sensor is set with a reading scale of 200-1000 ppm (parts per million) with an RMSE value obtained of 0.0288%. The ACS712 current sensor has an accuracy of 88.35% with a reading scale of 0-3.3 amperes, and the BME280 sensor has an accuracy of 94.47% for temperature and 99.37% for pressure with an ambient air reading scale. The results of water electrolysis testing of the entire system show that the system can work well in measuring parameters in accordance with the data sheet provisions, as well as providing flexibility in monitoring for users via smartphone.

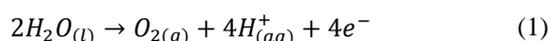
Keywords— Internet of Things, Hidrogen, Elektrolisis.

I. PENDAHULUAN

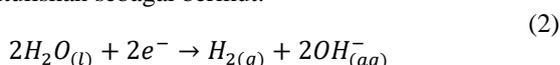
Saat ini eksplorasi sumber energi fosil semakin gencar dilakukan demi memenuhi kebutuhan energi dunia. Eksplorasi tersebut pada akhirnya menghasilkan berbagai masalah, salah satu masalah yang harus dihadapi adalah menipisnya cadangan minyak dan gas bumi di dunia. Selain itu terdapat pula permasalahan lingkungan berupa emisi gas karbon dioksida (CO₂) yang dapat mengurangi kualitas hidup manusia. Oleh karena itu pemerintah di berbagai negara telah mengambil langkah dalam membuat kebijakan untuk mengendalikan emisi gas karbon (carbon tax and the carbon cap and trade mechanism) [1].

Salah satu upaya saat ini gencar dikembangkan adalah penggunaan energi hidrogen, dikarenakan hidrogen adalah salah satu jenis energi yang ramah lingkungan. Hidrogen diklasifikasikan ke dalam energi ramah lingkungan karena produksi gas hidrogen didapat dari proses elektrolisis air suling dengan arus listrik [2].

Salah satu metode yang umum digunakan adalah elektrolisis air. Elektrolisis air adalah proses kimia di mana air dipecah menjadi hidrogen dan oksigen menggunakan listrik. Dalam elektrolisis air, dua elektroda (anoda dan katoda) dicelupkan ke dalam air yang mengandung elektrolit. Ketika arus listrik melewati air, reaksi elektrokimia terjadi di elektroda. Pada elektroda anoda, oksidasi terjadi dan oksigen (O₂) dihasilkan. Pada elektroda katoda, reduksi terjadi dan hidrogen (H₂) dihasilkan [3].



Pada elektroda katoda, reduksi terjadi di mana ion hidrogen (H⁺) menerima elektron dan membentuk molekul hidrogen (H₂). Reaksi ini dituliskan sebagai berikut:



Pengembangan gas hidrogen sebagai salah satu energi terbarukan tentu harus diikuti dengan penerapan sebuah sistem modern yang mampu mengoptimalkan proses 1 produksi gas

hidrogen. Salah satu sistem yang populer adalah Internet of Things (IoT) yang mana sistem ini dapat mengontrol dan memonitoring parameter penting dalam proses produksi gas hidrogen. Selain itu, penerapan sistem IoT dalam penelitian energi terbarukan juga dapat mendukung ISEC (Industrial Smart Energy Consortium) sebagai regulasi dan standar IoT di industri [4].

Penelitian tentang perancangan sistem yang dapat memproduksi gas hidrogen telah dilakukan oleh Anisa Ambarwati [5], penelitian tersebut berjudul "Rancang Bangun Proses Produksi Gas Hidrogen (H₂) Melalui Elektrolisis Air Dan Sistem Monitoring Berbasis Human Machine Interface (HMI)." Dalam penelitian tersebut Anisa Ambarwati membuat sebuah alat yang dapat menguraikan air (H₂O) menjadi gas hidrogen dan oksigen melalui proses elektrolisis, hasil penguraian tersebut kemudian akan dibaca oleh sensor dan diproses oleh mikrokontroler untuk ditampilkan pada layar LCD. Berdasarkan beberapa pengujian yang telah dilakukan, maka dapat diketahui jika yang mempengaruhi proses produksi gas hidrogen adalah suhu dan besaran arus yang diberikan pada elektroda

Penelitian lainnya tentang perancangan produksi gas hidrogen juga pernah dilakukan oleh Yoyon Wahyono. dkk [6], penelitiannya dipublikasikan dalam sebuah jurnal berjudul "Produksi gas hidrogen menggunakan metode elektrolisis dari elektrolit air dan air laut dengan penambahan katalis NaOH." Tujuan utama dari penelitian tersebut adalah untuk menentukan konsentrasi (ppm) dan kemurnian (% vol) gas H₂ yang diproduksi melalui proses elektrolisis air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa produksi gas H₂ dengan konsentrasi tertinggi diperoleh pada elektrolisis aqua DM + NaCl + NaOH dengan tegangan 12 volt 4500 ppm. Produksi gas H₂ pada elektrolisis aqua DM, aqua DM + NaCl, dan aqua DM + NaOH tidak terdeteksi adanya gas pencemar seperti CO, CO₂, HC, NO [7].

Penelitian lainnya yang menjadi acuan peneliti dalam merancang sistem IoT untuk hidrogen generator adalah "Data acquisition and monitoring system framed in Industrial Internet of Things for PEM hydrogen generators" [8]. Dimana tujuan dari penelitian tersebut adalah untuk mengembangkan sistem akuisisi data dan monitoring produksi gas hidrogen berbasis IoT digenerator bertipe Polymer Electrolyte Membrane (PEM).

Berdasarkan pengujian dan analisa yang telah dilakukan, maka hasil dari penelitian tersebut menyatakan bahwa penerapan sistem IoT dalam memproduksi, menyimpan, dan distribusi hidrogen sangat mungkin dilakukan dalam industri. Sehingga nantinya dapat diterapkan pada manajemen energi untuk jaringan mikro.

Dengan adanya penelitian-penelitian terdahulu yang telah dilakukan, membuat peneliti tertarik untuk membuat prototipe sistem dan alat yang mampu memantau parameter seperti suhu, kadar gas, dan tekanan dalam reaktor elektrolisis secara real-time, untuk memastikan proses elektrolisis berjalan dengan aman dan optimal dalam memproduksi gas hidrogen. Sehingga nantinya memberikan informasi tentang perancangan sistem kontrol dan monitoring gas hidrogen-oksigen (HHO) melalui proses elektrolisis air, serta mendorong inovasi dan pengembangan teknologi terkait Internet of Things (IoT) dalam kemajuan industri energi terbarukan.

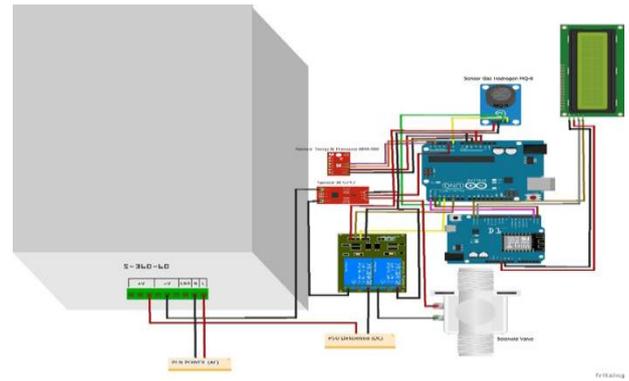
II. METODOLOGI PELAKSANAAN

Pembuatan prototipe sistem kontrol dan monitoring hidrogen generator dilakukan dengan beberapa tahapan penting secara bersamaan. Tahapan tersebut berupa pembuatan kode program menggunakan aplikasi Arduino IDE. Kode program yang dibuat disesuaikan dengan kebutuhan yang sudah diterapkan pada desain perangkat lunak dan juga diselaraskan dengan skematik rangkaian untuk mendeklarasikan pin input dan output pada semua komponen.

Komponen-komponen elektronik yang digunakan pada sistem dirakit sesuai dengan posisi yang sudah digambarkan pada skematik rangkaian. Setelah semua komponen dirakit maka dilakukan proses upload kode program yang sudah dibuat. Pengujian prototipe ini dilakukan dalam 2 tahap yaitu kalibrasi komponen elektronik dan juga pengujian sistem setelah proses pembuatan prototipe selesai dilakukan. Tahapan pertama adalah kalibrasi komponen, kalibrasi komponen elektronik prototipe berupa; pemeriksaan sensor suhu, sensor tekanan, dan sensor gas hidrogen. Ini dilakukan dengan pengecekan setiap komponen yang digunakan dalam pembuatan prototipe sesuai dengan datasheet masing-masing sensor.

Tahap pengujian selanjutnya adalah pengujian prototipe sistem kontrol dan monitoring hidrogen generator. Ini adalah pengujian kinerja alat dari nilai-nilai yang diberikan oleh sensor, lalu diubah ke dalam gerak mekanik pada relay dan solenoid valve. Parameter nilai tersebut harus dapat ditampilkan pada LCD dan ditransmisikan pada aplikasi android menggunakan jaringan internet secara real-time.

Untuk analisis hasil dilakukan dengan cara menyesuaikan data yang ditampilkan pada sistem yang telah dibuat dengan data yang didapatkan dari literatur dan datasheet modul sensor. Analisis hasil ini bertujuan untuk melihat efisiensi dari prototipe yang telah dibuat dan juga untuk melihat persentase efisiensi alat atau kesalahan yang terdapat pada pembacaan data dari sensor yang digunakan pada sistem kontrol dan monitoring hidrogen generator berbasis internet of things (IoT).



Gambar 1. Skematik rangkaian prototipe HHO

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kalibrasi Sensor

Kalibrasi komponen elektronik atau sensor adalah proses yang sangat penting dan merupakan tahap awal sebelum pengujian keseluruhan sistem. Tujuan utamanya adalah untuk menjaga kepresisian alat ukur dan hasilnya agar tetap sesuai dengan spesifikasinya (Datasheet). Dengan melakukan kalibrasi, peneliti dapat memastikan bahwa hasil pengukuran yang diperoleh memiliki tingkat ketepatan yang sesuai. Selain itu, kalibrasi juga digunakan untuk mengetahui jika ada penyimpangan atau deviasi yang terjadi pada sensor. Ada tiga jenis sensor yang harus dikalibrasi pada penelitian ini, yaitu sensor MQ-8, sensor BME 280, dan sensor ACS 712.

Validasi sensor dapat dilakukan dengan cara mengukur dan membandingkan kesalahan antara nilai yang ditunjukkan oleh sensor dengan nilai yang ditunjukkan oleh alat ukur yang telah divalidasi. Berikut adalah rumus untuk menghitung kesalahan pada pembacaan sensor BME 280, dan sensor ACS 712, sedangkan untuk sensor MQ-8 perhitungannya menggunakan RMSE.

$$Error \% = \left(\frac{x_1 - x_2}{x_1} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$Confidence Level(\%) = 100(\%) - Error(\%) \quad (4)$$

Kalibrasi sensor gas hidrogen menggunakan MQ-8 melibatkan penyesuaian sensor MQ-8 untuk mendapatkan pembacaan konsentrasi hidrogen dalam satuan ppm. Setelah penyesuaian sensor dilakukan, nilai RMSE (Root mean square error) dihitung untuk menentukan kesalahan antara nilai observasi dan nilai perkiraan.

RMSE merupakan sebuah metode untuk menilai akurasi pembacaan observasi dengan membandingkannya dengan nilai perkiraan, dengan menghasilkan nilai rata-rata residu dari nilai observasi. RMSE biasanya digunakan untuk data yang membentuk grafik linier. RMSE dihitung dengan cara mengkuadratkan kesalahan, dibagi dengan jumlah data (n), lalu diakarkan [9]. Berikut adalah rumus untuk menghitung RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}{n}} \quad (5)$$

Nilai pembacaan sensor BME 280, dan sensor ACS 712 setelah penyesuaian akan dihitung untuk mendapatkan nilai Simpangan Rata-rata (SR) atau Mean Deviation (MD) menggunakan rumus berikut:

$$SR = \frac{(x-\hat{x})}{n} \quad (6)$$

Selanjutnya, menghitung nilai standar deviasi (Standard Deviation) (σ) menggunakan rumus berikut:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x-\hat{x})^2}{n-1}} \quad (7)$$

Di mana x adalah nilai perbedaan antara hasil pengukuran sensor dan hasil pengukuran alat valid ($x_2 - x_1$), n adalah jumlah data, dan \hat{x} adalah nilai rata-rata yang dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x}{n} \quad (8)$$

Alat pengukur yang telah terverifikasi digunakan sebagai patokan validasi untuk sensor-sensor dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 1. Alat ukur Pembeding dalam kalibrasi

Sensor	Alat Ukur
Sensor MQ-8	Grafik karakteristik sensor MQ-8 (Datasheet)
Sensor ACS 712	Amper Meter Digital
Sensor BME 280	Termometer

3.2 Kalibrasi Sensor MQ – 8 Untuk Gas Hidrogen

Sensor MQ-8 digunakan untuk mengukur konsentrasi gas hidrogen yang dihasilkan oleh proses elektrolisis dalam satuan parts per million (ppm). Sensor ini menghasilkan pembacaan analog yang kemudian dikonversi menjadi sinyal digital oleh Arduino Uno. Proses konversi ini dikenal sebagai ADC (Analog to Digital Converter).

Sensor MQ-8 merupakan jenis sensor MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) yang mana menggunakan semikonduktor, dioksida timah (SnO_2), untuk mendeteksi gas. Sehingga dapat menggunakan persamaan berikut untuk menentukan resistansi sensor [10].

$$\frac{R}{R_0} = (1 + K_{gas} \cdot C_{gas})^{-\beta} \quad (9)$$

Sehingga rumusnya adalah fungsi pangkat dengan eksponen negatif sebagai berikut:

$$ppm = ax^b, b < 0 \quad (10)$$

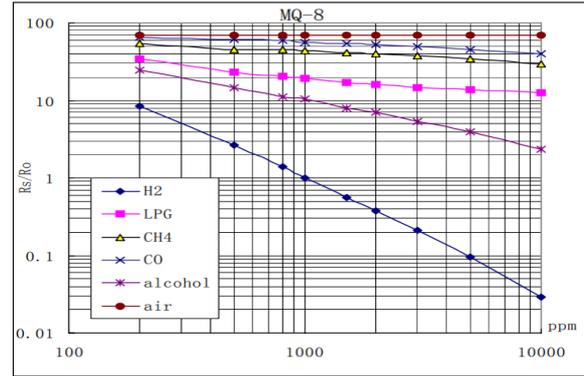
Untuk menyelesaikan persamaan tersebut menggunakan persamaan yaitu:

$$ppm = a \left(\frac{R_s}{R_0}\right)^b \quad (11)$$

$$\log ppm = \log a + \log b \left(\frac{R_s}{R_0}\right) \quad (12)$$

$$ppm = 10^{\log a + b \log \left(\frac{R_s}{R_0}\right)} \quad (13)$$

Tahapan selanjutnya dalam kalibrasi sensor MQ-8 adalah mengekstrak jenis gas H_2 yang ada dalam grafik datasheet melalui bantuan WebPlot Digitizer sehingga diperoleh data yang presisi.

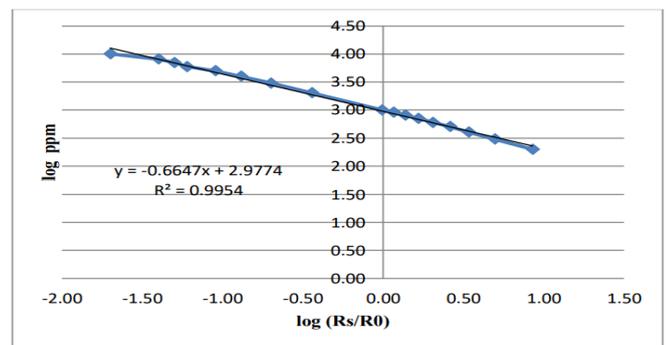


Gambar 2. Kurva Karakteristik Sensor MQ-8

Data yang diperoleh dari grafik selanjutnya diproses menggunakan bantuan microsoft Excel, sehingga diperoleh persamaan sensor seperti tabel dibawah:

Tabel 2. Data logaritma yang bersumber dari datasheet

R_s/R_0	Ppm	$\log (R_s/R_0)$	$\log (\text{ppm})$
8,51	199,25	0,92992956	2,29939833
4,97	301,32	0,69635639	2,479027959
3,42	400,67	0,53402611	2,602786826
2,61	504,1	0,41664051	2,702516697
2,04	600,4	0,30963017	2,778440684
1,66	708,4	0,22010809	2,850278553
1,37	805,7	0,13672057	2,906173364
1,16	907,99	0,06445799	2,958081066
0,98	1.004,6	-0,0087739	3,001993174
0,36	2.020,17	-0,4436975	3,305387917
0,2	3.020,17	-0,69897	3,480031389
0,13	3.988,39	-0,8860566	3,600797619
0,09	5.018,78	-1,0457575	3,700598159
0,06	5.976,5	-1,2218487	3,776446924
0,05	7.051,85	-1,30103	3,848303066
0,04	8.094,38	-1,39794	3,908183589
0,02	1.0092,3	-1,69897	4,003991873



Gambar 3. Grafik logaritma linier (log ppm dan log R_s/R_0)

$$H_2 \text{ ppm} = 4.324 \left(\frac{R_s}{R_0}\right)^{-824.8} \quad (14)$$

$$H_2 \log \text{ ppm} = -0.664 \log \left(\frac{R_s}{R_0}\right) + 2.977 \quad (15)$$

Sehingga, rumus sensor MQ-8 untuk H_2 adalah:

$$H_2 \text{ ppm} = 10^{-0,664 \log \left(\frac{R_s}{R_0}\right) + 2,977} \quad (16)$$

Berikutnya adalah menghitung nilai resistansi dengan Arduino yang memiliki resolusi 10 Bit ADC (1024 bit), maka menghitung nilai resistansi dapat dilakukan dengan persamaan

berikut:

$$R_s = RL \times \frac{1024 - \text{Pembacaan ADC}}{\text{Pembacaan ADC}} \quad (17)$$

Pengukuran dilakukan dengan sensor ditempatkan pada udara bersih untuk mencari nilai resistansinya (R_s), dengan kapasitor modul (RL) 10 K Ω . Berikut ini menampilkan data pembacaan sensor MQ-8 dalam kondisi udara bersih.

Tabel 3. Nilai pembacaan sensor MQ-8 pada udara bersih

Menit	ADC	R_s (K Ω)	Ratio Air
1	381	16.850,39	70
2	387	16.434,10	70
3	366	17.950,81	70
4	377	17.135,27	70
5	372	17.500	70
Rata-rata	376,6	17.174,12	70

Berdasarkan data yang telah diambil, dapat diketahui bahwa nilai R_s di udara bersih adalah 17.174,12 K Ω , dan nilai Ratio air adalah 70. Selanjutnya barulah nilai R_0 dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$R_0 = \frac{R_s}{\text{Ratio air}} \quad (18)$$

$$R_0 = \frac{17.174,12}{70} = 245,34 \quad (19)$$

Hasil dari persamaan yang telah didapat, selanjutnya ditulis dalam program Arduino Uno untuk konfigurasi sensor MQ-8, yang digunakan untuk mendeteksi konsentrasi gas hidrogen dalam satuan ppm. Selanjutnya, menghitung tingkat error sensor dengan menggunakan Root Mean Square Error (RMSE) seperti pada tabel berikut:

Tabel 4. Perhitungan error sensor MQ-8

x	\hat{y}	($y=bx+a$)	$y-\hat{y}$	($y-\hat{y}$) ²
0,93	2,30	2,10	-0,19	$3,80 \times 10^2$
0,70	2,48	1,41	-1,07	1,14
0,53	2,60	0,93	-1,68	2,81
0,42	2,70	0,58	-2,13	4,52
0,31	2,78	0,26	-2,52	6,35
0,22	2,85	-0,01	-2,86	8,17
0,14	2,91	-0,26	-3,16	10,01
0,06	2,96	-0,47	-3,43	11,77
-0,01	3,00	-0,69	-3,69	13,63
-0,44	3,31	-1,98	-5,29	27,99
-0,70	3,48	-2,74	-6,22	38,75
-0,89	3,60	-3,30	-6,90	47,65
-1,05	3,70	-3,78	-7,48	55,92
-1,22	3,78	-4,30	-8,08	65,25
-1,30	3,85	-4,54	-8,39	70,32
-1,40	3,91	-4,83	-8,73	76,28
-1,70	4,00	-5,72	-9,73	94,59
Jumlah rata-rata (Σ)				314,80
RMSE				17,74

Hasil analisis data dari sensor MQ-8 menunjukkan bahwa terdapat penyimpangan antara hasil pengukuran sensor dan nilai yang diperoleh dari grafik sensor MQ-8. Nilai penyimpangan ini, yang dihitung menggunakan metode RMSE, adalah 17.74 %.

Datasheet menyarankan agar sensor beroperasi dalam lingkungan dengan suhu 20 °C dan kelembaban 65%. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, sensor MQ-8 ditempatkan dalam tabung gas hidrogen yang berisi air. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa sensor MQ-8 beroperasi dalam rentang suhu dan kelembaban yang disarankan oleh datasheet. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu rata-rata di sekitar sensor MQ-8 berkisar antara 23 – 26 °C.

3.3 Kalibrasi Sensor BME 280

Untuk memastikan sensor yang digunakan beroperasi dengan baik, peneliti melakukan serangkaian pengujian (kalibrasi). Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil dari sensor yang digunakan dengan hasil dari alat ukur standar. Alat ukur standar yang digunakan adalah GEA Medical S 092 untuk pengukuran temperatur. Sedangkan untuk kalibrasi nilai tekanan, peneliti membandingkan nilai sensor dengan standard atmosphere (1013.25 hPa).

Tabel 5. Data Kalibrasi Sensor BME280 (Temperatur)

Menit	Termometer °C X_2	Sensor (X_1)	Selisih (X) $ x_1-x_2 $	$ x-\bar{x} $	$(x-\bar{x})^2$	Error (%)
1	28	29,24	1,24	0,399	0,159	4,240
2	28	29,27	1,27	0,369	0,136	4,338
3	28	29,34	1,34	0,299	0,089	4,567
4	28	29,89	1,89	0,251	0,063	6,323
5	28	29,82	1,82	0,181	0,032	6,103
6	28	29,78	1,78	0,141	0,019	5,977
7	28	29,75	1,75	0,111	0,012	5,882
8	28	29,78	1,78	0,141	0,019	5,977
9	28	29,76	1,76	0,121	0,014	5,913
10	28	29,76	1,76	0,121	0,014	5,913
Rata-rata (\bar{x})			1,639			
Jumlah				2,134	0,561	
Simpangan Rata-rata (MD)						$\pm 0,1$
Standar Deviasi (σ)						$\pm 0,128$
Rata-rata Error (%)						5,523

Tabel 6. Data Kalibrasi Sensor BME280 (Tekanan)

Menit	Tekanan (1 atm - hPa) x_2	Sensor hPa x_1	Selisih (x) $ x_2-x_1 $	$ x-\bar{x} $	$(x-\bar{x})^2$	Error (%)
1	1013	1006,93	6,32	0,006	$3,6 \times 10^{-5}$	0,623
2	1013	1006,96	6,29	0,024	0,00058	0,620
3	1013	1006,97	6,28	0,034	0,00116	0,619
4	1013	1006,93	6,32	0,006	$3,6 \times 10^{-5}$	0,6234
5	1013	1006,9	6,35	0,036	0,0013	0,626
6	1013	1006,92	6,33	0,016	0,00026	0,624
7	1013	1006,89	6,36	0,046	0,00212	0,627
8	1013	1006,95	6,3	0,014	0,0002	0,621
9	1013	1006,95	6,3	0,014	0,0002	0,621
10	1013	1006,96	6,29	0,024	0,00058	0,620
Rata-rata (\bar{x})			6,314			
Jumlah				0,22	0,00644	
Simpangan Rata-rata (MD)						0,1
Standar Deviasi (σ)						0,1
Rata-rata Error (%)						0,6231

Berdasarkan analisis data dari sensor BME 280, ditemukan bahwa simpangan rata-rata dan standar deviasi dari hasil validasi sensor terhadap termometer pembanding adalah $\pm 0.1^\circ\text{C}$ dan $\pm 0.128^\circ\text{C}$. Ini menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang masih tergolong baik, dikarenakan simpangan pembacaan yang masih berada dalam batas standar deviasi.

Sedangkan untuk nilai pembacaan nilai tekanan, sensor BME 280 memberikan nilai yang masih sesuai karena belum melebihi batas standar deviasi, yaitu ± 0.1 untuk simpangan rata-rata, dan ± 0.1 untuk standar deviasi. Meskipun parameter pembandingnya menggunakan nilai tekanan udara bebas (1 atm \leftrightarrow 1013.25 hPa), nantinya satuan hectopascal (hPa) yang merupakan satuan bawaan sensor akan diubah menjadi Pounds per Square Inch (PSI) untuk memperkecil nilai pembacaan.

3.4 Kalibrasi Sensor Arus ACS 712

Sensor arus dapat melakukan pengukuran hingga 5 A dengan tingkat sensitivitas sebesar 0,185/A. Berdasarkan datasheet sensor ACS712 arus yang diukur dapat bernilai negatif atau positif. Pada kondisi arus 0 Ampere, sensor ini menunjukkan nilai 2,5 Volt. Sensor ini membutuhkan tegangan masuk sebesar 5 Volt. Nilai tegangan yang masuk ke sensor dapat dihitung menggunakan persamaan yang diberikan dari datasheet:

$$V_{\text{terukur}} = \frac{ADC \times VCC_{\text{Sensor}}}{1024} = \frac{ADC \times 5 \text{ Volt}}{1024} \quad (20)$$

Jadi, untuk menentukan nilai arus yang masuk, dapat menggunakan persamaan berikut:

$$I = \frac{V_{\text{terukur}} - \left(\frac{1}{2} \times VCC_{\text{sensor}}\right)}{\text{Sensitivitas}} \quad (21)$$

$$I = \frac{V_{\text{terukur}} - \left(\frac{1}{2} \times 4.9 \text{ Volt}\right)}{0.185 \text{ A}} \quad (22)$$

Ini adalah persamaan yang diterapkan dan diekspor ke dalam program Arduino uno. Data yang diperoleh dari sensor arus kemudian diambil dan dibandingkan dengan pembacaan dari Amperemeter. Tabel. 7 menampilkan data yang diukur dalam rentang 0 - 3,3 Ampere.

Tabel. 7 Data kalibrasi sensor ACS712

Menit	Multimeter A (x_2)	Sensor A (x_1)	Selisih (x) $ x_1-x_2 $	$ x-\bar{x} $	$(x-\bar{x})^2$	Error (%)
1	1,05	1,26	0,21	0,056	0,003136	16,66667
2	1,11	1,6	0,49	0,336	0,112896	30,625
3	1,03	1,1	0,07	0,084	0,007056	6,363636
4	1,06	1,53	0,47	0,316	0,099856	30,71895
5	1	0,87	0,13	0,024	0,000576	14,942
6	1	1,02	0,02	0,134	0,017956	1,960784
7	1,03	0,94	0,09	0,064	0,004096	9,574
8	1,05	1,05	0	0,154	0,023716	0
9	1	1,05	0,05	0,104	0,010816	4,761905
10	1,06	1,07	0,01	0,144	0,020736	0,934579
Rata-rata (\bar{x})			0,154			
Jumlah					1,416	0,30084
Simpangan Rata-rata (MD)						0,1
Standar Deviasi (σ)						0,1
Rata-rata Error (%)						11,654

Berdasarkan analisis data kalibrasi dari sensor ACS712, ditemukan bahwa ada penyimpangan rata-rata sebesar $\pm 0,1$ Ampere dan standar deviasi $\pm 0,1$ Ampere dalam hasil validasi sensor dibandingkan dengan Amperemeter digital yang digunakan. Ini menunjukkan bahwa sensor masih belum melewati batas standar deviasi.

Sensor ACS712 menunjukkan tingkat kesalahan sebesar 11,65% jika dibandingkan dengan Amperemeter pembanding yang digunakan. Sensor ini divalidasi dengan skala pembacaan antara 0 hingga 3,3. Dari perhitungan kesalahan (error), dapat diketahui bahwa sensor ini memiliki tingkat ketelitian sebesar 88,35 %.

3.5 Pengaturan Kontrol Relay

Relay adalah elemen elektronik yang berfungsi sebagai saklar listrik. Relay sendiri dapat dioperasikan melalui program yang dijalankan pada arduino. Fungsinya dalam sistem ini adalah untuk memutus/menghubungkan arus listrik dari converter ACDC ke power supply elektrolisis, dan mengaktifkan selenoid valve. Dengan kata lain, relay adalah bagian utama dalam menjalankan gerak mekanik untuk otomatisasi sistem, dengan tujuan agar sistem tetap bekerja dalam batas aman yang telah disetting.

Tabel. 8 Data Setting Relay

No.	Kondisi	Status	Keterangan
Relay 1	$\leq 3,3$ A	HIGH	Relay akan terus hidup, dan mati jika melebihi 3,3 A
Relay 2	0 – 73,4797 psi	LOW	Relay akan terus mati, dan akan hidup jika tekanan melebihi 73,4797 psi

Relay 1 akan tetap dalam status HIGH atau menyala selama arus listriknya kurang dari atau sama dengan 3.3 A. Jika arusnya melebihi 3.3 A, relay ini akan berubah menjadi status LOW atau mati, sehingga proses elektrolisis pada reaktor hidrogen akan berhenti. Sementara itu, Relay 2 beroperasi berdasarkan nilai tekanan BME280. Dalam kondisi normal, Relay 2 akan dalam status LOW atau mati. Namun, jika tekanannya melebihi 73.4797 psi, relay ini akan berubah menjadi status HIGH atau menyala. Dengan demikian, kedua relay ini dirancang untuk merespons kondisi tertentu dan berubah status sesuai dengan kondisi tersebut.

3.6 Integrasi Internet

WeMos D1 R2 adalah sebuah mikroprosesor yang dilengkapi dengan WiFi berbasis ESP8266 dan bisa disambungkan dengan jalur RX-TX pada Arduino-UNO. Hal ini memungkinkan WeMos untuk membaca data secara langsung dari papan Arduino Uno. Data yang diperoleh kemudian akan dikirimkan ke aplikasi Blynk dengan cara mengatur akses jaringan WiFi pada program, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL60Z_9y9y9"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "monitoring gas hidrogen"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "kNp1lw0MP81-nm0kcPXf8Sb7f6r5s2Es"

#include <ESP8266WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp8266.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

BlynkTimer timer;

char ssid[] = "v"; // Nama WiFi
char pass[] = "delta123"; // Password WiFi

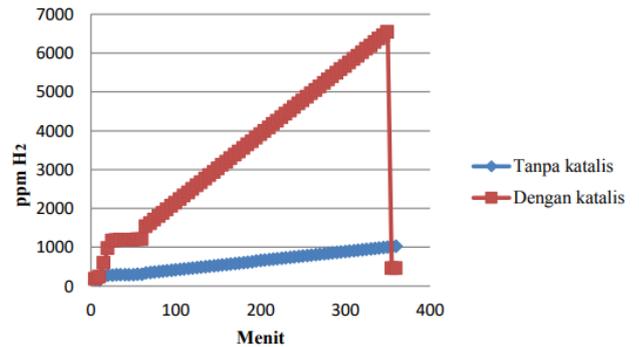
void update();
```

Gambar 4. Pengkodean inisiasi komunikasi

3.7 Evaluasi Data Elektrolisis

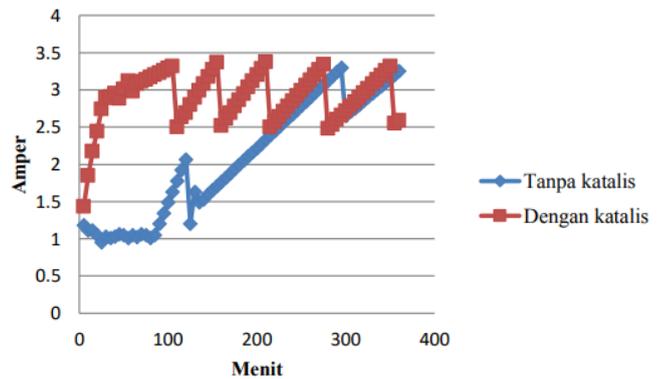
Setelah berhasil menyelesaikan pengaturan dan validasi sensor, data elektrolisis kemudian dikumpulkan. Elektrolisis air dilakukan menggunakan tegangan 12 Volt yang diperoleh dari converter AC-DC 3.3 A. Data elektrolisis dikumpulkan sebanyak 360 kali, dengan interval pengambilan data setiap lima menit. Dalam pengumpulan data ini, ada dua variasi yang dilakukan, yaitu proses elektrolisis air tanpa adanya katalis dan proses dengan penambahan katalis.

Sensor-sensor mengukur parameter tertentu selama proses elektrolisis, yaitu konsentrasi gas (ppm), arus (Ampere), tekanan (PSI), dan suhu (dalam °C). Elektrolisis berlanjut sampai arus turun ke 0 Ampere, yang menandakan bahwa proses elektrolisis telah berakhir karena tidak ada arus yang mengalir. Hal ini bisa terjadi karena relay yang telah diprogram memutus arus jika melebihi 3.3 Ampere demi menjaga sistem elektrik pada PSU tetap aman.



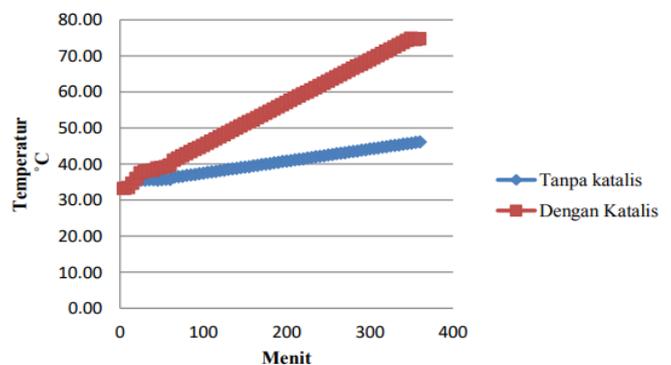
Gambar 5. Hasil pengukuran gas hidrogen setiap pertambahan waktu elektrolisis

Gambar di atas menunjukkan perbandingan konsentrasi gas hidrogen (H_2) selama reaksi elektrolisis dengan dan tanpa katalis. Sumbu x menunjukkan waktu dalam menit, sedangkan sumbu y menunjukkan konsentrasi gas hidrogen dalam PPM. Pada grafik dapat dilihat bahwa katalis membantu meningkatkan efisiensi reaksi elektrolisis, dengan nilai tertinggi berada pada 6532.45 ppm dengan konsumsi arus 3.32 Ampere.

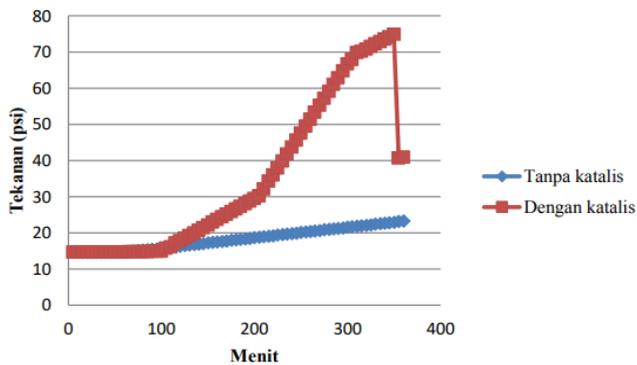


Gambar 6. Perbandingan nilai arus dalam proses elektrolisis dengan katalis dan tanpa katalis

Gambar 6 menunjukkan perbandingan nilai arus dalam proses elektrolisis dengan katalis dan tanpa katalis. Nilai arus lebih tinggi pada reaksi yang menggunakan katalis untuk memproduksi gas hidrogen, rata-rata yaitu 2,90 Ampere dalam rentang waktu 360 menit, ini menunjukkan bahwa katalis meningkatkan efisiensi proses elektrolisis. Namun, juga meningkatkan penggunaan arus listrik.



Gambar 7. Perbandingan temperatur dalam proses elektrolisis dengan katalis dan tanpa katalis



Gambar. 8 Perbandingan tekanan dalam proses elektrolisis dengan katalis dan tanpa katalis

Pengukuran terakhir yang dilakukan berasal dari sensor BME 280, mencakup tekanan dan suhu. Dapat dilihat dari Grafik bahwa tekanan yang dihasilkan terus meningkat seiring dengan kenaikan temperatur, hingga mencapai tekanan tertinggi 74.81 psi yang mana telah melewati set point sistem, sehingga memicu relay untuk mengaktifkan selenoid valve yang membuat tekanan kembali turun menjadi 40.65 psi. Sementara itu, suhu menunjukkan kenaikan yang cukup konsisten seiring berjalannya proses elektrolisis, serta terlihat perbedaan temperature antara proses elektrolisis yang menggunakan katalis dan tanpa menggunakan katalis.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan dan analisis dari hasil penelitian tentang pembuatan alat elektrolisis air yang menggunakan berbagai sensor berbasis Arduino uno dan kontrol arus converter AC-DC melalui sensor ACS270, dapat disimpulkan bahwa: pembuatan perangkat pemantauan parameter elektrolisis air menjadi gas hidrogen dilakukan dengan menggunakan berbagai sensor berbasis Arduino uno, menghasilkan sebuah sistem pemantaun secara real-time. Sehingga data yang dibaca oleh sensor dapat dipantau secara langsung melalui smartphone menggunakan aplikasi Blynk. Hasil validasi untuk sensor gas, arus, tekanan, dan suhu menunjukkan bahwa setiap sensor memiliki tingkat kesalahan yang relatif rendah. Seperti akurasi sensor temperature 94.47%, akurasi sensor tekanan 99.37%, akurasi sensor arus 88.35%. Selain itu, pengaturan sensor MQ-8 menunjukkan nilai RMSE yang sangat rendah, yaitu 17,74%. Oleh karena itu, alat monitoring ini dapat digunakan untuk memastikan proses elektrolisis berjalan dengan aman dan optimal. Hasil pengujian elektrolisis air menunjukkan bahwa saat menggunakan katalis KOH dengan tegangan yang sama, yaitu 12 Volt, produksi gas hidrogen lebih tinggi dibandingkan saat tidak menggunakan katalis, tetapi terdapat perbedaan dalam konsumsi arus. Saat tidak menggunakan katalis konsumsi arus rata-rata 1.07 Amper, sedangkan saat menggunakan katalis konsumsi arus rata-rata 2.90 Amper.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rui, Z., Peng, W., Qin, X., & Wang, J. 2023. Assessing carbon cap-and-trade policies on hybrid renewable energy investments: Implications for pricing and capacity decisions. *Resources Policy*, 86(PA), 104113.
- [2] Zhuk, A. Z., Shkolnikov, E. I., Borodina, T. I., Valiano, G. E., Dolzhenko, A. V., Kiseleva, E. A., Kochanova, S. A., Filippov, E. D., & Semenova, V. A. (2023). Aluminium – Water hydrogen generator for domestic and mobile application. *Applied Energy*, 334(January), 120693.

- [3] Kumar, S. S., & Lim, H. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports*, 8, 13793–13813.
- [4] Zhang, D., Chan, C. C., & Zhou, G. Y. (2018). Enabling Industrial Internet of Things (IIoT) towards an emerging smart energy system. *Global Energy Interconnection*, 1(1), 39–47.
- [5] Anisa Ambarwati. 2017. Rancang Bangun Proses Produksi Gas Hidrogen (H₂) Melalui Elektrolisis Air Dan Sistem Monitoring Berbasis Human Machine Interface (HMI). Program Studi Elektronika Industri. Departemen Teknik Elektro Otomasi. Fakultas Vokasi Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [6] Yoyon Wahyono. Dkk. 2017. Produksi gas hydrogen menggunakan metode elektrolisis dari elektrolit air dan air laut dengan penambahan katalis NaOH. *Youngster Physics Journal*. Vo.6. No.4.
- [7] Wahyono, Y., Sutanto, H., & Hidayanto, E. (2017). Produksi gas hydrogen menggunakan metode elektrolisis dari elektrolit air dan air laut dengan penambahan katalis NaOH. *Youngster Physics Journal*, 6(4), 353–359.
- [8] Folgado, F. J., González, I., & Calderón, A. J. (2023). Data acquisition and monitoring system framed in Industrial Internet of Things for PEM hydrogen generators. *Internet of Things (Netherlands)*, 22(March).
- [9] Karunasingha, D. S. K. (2022). Root mean square error or mean absolute error? Use their ratio as well. *Information Sciences*, 585, 609–629.
- [10] Dorcea, D.; Hnatiuc, M.; Lazar, I. Acquisition and calibration interface for gas sensors. In *Proceedings of the 2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Iasi, Romania, 25–28 October 2018; 2018; pp. 120–123.