

Monitoring Efektivitas Alat Penangkap Karbon Dioksida Berbasis Internet of Things

Tsaqif Mughni Karim^{1*}, Chalidia Nurin Hamdani¹, Asepta Surya Wardana¹

¹ Program Studi Teknik Instrumentasi Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas
Jl. Sorogo No.38 Cepu – Blora – Jawa Tengah, 58311, INDONESIA

*Corresponding Author: tsaqifkarim6@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.53026/inhardware.v3i1.73>

Article Info

Received: 11st June 2025

Accepted: 28th June 2025

Available online: 30th June 2025

Keywords

Carbon Capture, Monitoring, Internet of Things

Abstrak

Peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂) dari sektor industri telah menjadi salah satu penyebab utama perubahan iklim global. Untuk mengatasi hal ini, penelitian ini merancang sistem penangkap karbon dioksida berbasis *Internet of Things* (IoT) yang memanfaatkan kombinasi media filtrasi membran PTFE dan adsorben zeolit. Sistem ini dilengkapi dengan sensor CO₂ (DFRobot MH-Z14A), sensor tekanan (Winsen WPT-83G), serta kontrol servo valve untuk mengatur tekanan dan aliran gas. Mikrokontroler Arduino Uno R3 digunakan untuk membaca data sensor, sementara data dikirim ke ThingsBoard melalui modul ESP32 untuk pemantauan jarak jauh. Hasil pengujian menunjukkan penurunan signifikan konsentrasi CO₂ antara sisi *inlet* dan *outlet*, membuktikan efektivitas konfigurasi sistem dalam menangkap karbon dioksida. Sistem ini diharapkan menjadi solusi awal yang efisien dan adaptif untuk pengembangan teknologi *Carbon Capture and Storage* (CCS).

Abstract

The increase of carbon dioxide (CO₂) emissions from the industrial sector is one of the main contributors to global climate change. To address this issue, this research designs a carbon dioxide capture system based on the Internet of Things (IoT), utilizing a combination of PTFE membrane and zeolite adsorbent. The system is equipped with CO₂ sensors (DFRobot MH-Z14A), pressure sensors (Winsen WPT-83G), and a servo valve to control gas pressure and flow. An Arduino Uno R3 microcontroller reads sensor data, which is transmitted to the ThingsBoard platform via an ESP32 module for remote monitoring. The test results show a significant reduction in CO₂ concentration between the inlet and outlet, proving the system's effectiveness in capturing carbon dioxide. This system is expected to be an efficient and adaptive early-stage solution for developing Carbon Capture and Storage (CCS) technologies.

This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license.



1. PENDAHULUAN

Emisi karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan dari aktivitas industri merupakan salah satu kontributor utama terhadap pemanasan global dan perubahan iklim [1]. Menurut laporan International Energy Agency (IEA), emisi CO₂ global dari sektor industri mencapai lebih dari 9,4 miliar ton pada tahun 2022, terutama dari pembakaran bahan bakar fosil dan proses produksi yang intensif energi [2]. Untuk menekan dampak lingkungan tersebut, berbagai strategi mitigasi telah dikembangkan, salah satunya melalui teknologi penangkapan karbon (carbon capture).

Teknologi penangkapan karbon saat ini berkembang ke dalam beberapa pendekatan utama, yaitu *post-combustion capture*, *pre-combustion capture*, dan *oxy-fuel combustion* [3]. Metode *post-combustion*, yang paling banyak diterapkan di sektor industri, umumnya menggunakan pelarut kimia seperti *monoethanolamine* (MEA) untuk menyerap CO₂ dari gas buang [4]. Namun, penggunaan pelarut ini memiliki kendala seperti konsumsi energi tinggi dalam regenerasi dan degradasi pelarut yang bersifat korosif [5]. Oleh karena itu, tren penelitian dan pengembangan mulai bergeser ke arah teknologi yang lebih hemat energi dan ramah lingkungan seperti adsorpsi padat, *cryogenic separation*, serta *membrane-based separation*.

Teknologi pemisahan gas menggunakan membran menjadi fokus perhatian dalam beberapa dekade terakhir karena menawarkan proses yang lebih hemat energi, operasi yang kontinu, serta jejak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan dengan metode konvensional seperti penyerapan kimia [6]. Membran gas bekerja berdasarkan prinsip perbedaan permeabilitas antar molekul gas, yang memungkinkan selektivitas tinggi terhadap CO₂ dari campuran gas lainnya. Beberapa jenis membran yang telah dikembangkan termasuk membran polimerik, anorganik, dan campuran (*mixed matrix membranes*).

Namun demikian, teknologi membran masih menghadapi beberapa tantangan dalam penerapannya di industri, seperti kompromi antara permeabilitas dan selektivitas, penurunan performa akibat fouling atau aging, serta keterbatasan dalam operasi tekanan tinggi [7]. Oleh karena itu, pendekatan sistem hybrid dengan menambahkan media adsorben seperti zeolit menjadi solusi potensial untuk meningkatkan efisiensi penangkapan CO₂. Zeolit merupakan material mikropori dengan struktur kristalin yang mampu menyerap CO₂ secara selektif melalui interaksi fisikokimia, serta memiliki stabilitas termal dan mekanik yang tinggi [8]. Kombinasi membran dan zeolit dalam satu sistem dirancang untuk menggabungkan keunggulan keduanya: kemampuan seleksi cepat dari membran dan kapasitas adsorpsi tinggi dari zeolit, sehingga meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem pemisahan gas.

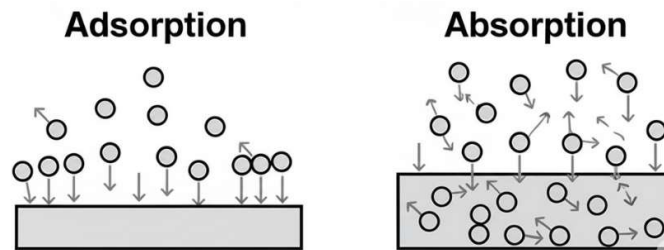
Untuk mengevaluasi performa sistem *hybrid* ini secara akurat dan berkelanjutan, dibutuhkan sistem pemantauan yang handal dan *real-time*. Penerapan *Internet of Things* (IoT) dengan *platform* ThingsBoard memungkinkan integrasi antara sensor CO₂, sensor tekanan, serta aktuator *servo-valve* yang dikendalikan melalui mikrokontroler, untuk memperoleh data operasional yang dapat dianalisis secara daring. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem *monitoring* pemisahan karbon berbasis IoT, guna menilai efektivitas kombinasi zeolit dan membran dalam menurunkan konsentrasi CO₂ dari aliran gas buang industri.

2. METODA

Teknologi *carbon capture and storage* (CCS) merupakan pendekatan strategis dalam mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂) dari sumber-sumber industri besar. Terdapat berbagai metode CCS yang umum digunakan, seperti *chemical absorption*, *cryogenic separation*, *adsorption* menggunakan material padat, serta *membrane-based separation* [9]. Di antara berbagai teknologi tersebut, metode berbasis membran dan adsorben padat seperti zeolit menjadi fokus utama dalam penelitian ini karena menawarkan potensi efisiensi tinggi dan konfigurasi yang fleksibel.

Adsorpsi dan absorpsi merupakan dua mekanisme utama dalam proses perpindahan massa, yang memiliki karakteristik fisikokimia berbeda namun keduanya berperan penting dalam sistem pemisahan berbasis zeolit dan membran [10]. Adsorpsi merujuk pada proses di mana molekul dari suatu fase, umumnya gas, menyusup dan terdistribusi secara merata ke dalam fase lain, biasanya ke dalam struktur bulk material. Mekanisme ini menjadi karakteristik utama dari material membran, di mana molekul gas CO₂ larut dalam matriks membran (baik polimerik maupun anorganik), kemudian berdifusi mengikuti gradien tekanan atau konsentrasi. Sebaliknya, adsorpsi terjadi ketika molekul dari fasa gas atau cairan menempel pada permukaan atau rongga mikroskopis dari suatu padatan, tanpa penetrasi ke dalam volumenya. Mekanisme ini sangat dominan pada zeolit, yang memiliki struktur berpori dan luas permukaan internal tinggi, memungkinkan penjerapan selektif molekul berdasarkan ukuran dan sifat kimia seperti polaritas. Perbedaan utama antara keduanya terletak pada lokasi dan interaksi molekul. Adsorpsi berlangsung dalam volume material membran, sementara adsorpsi terbatas pada permukaan dan dinding pori dari zeolit. Gambar 2.1 berikut menyajikan ilustrasi skematik dari proses adsorpsi yang terjadi pada membran serta proses adsorpsi pada zeolit yang digunakan dalam penelitian ini.

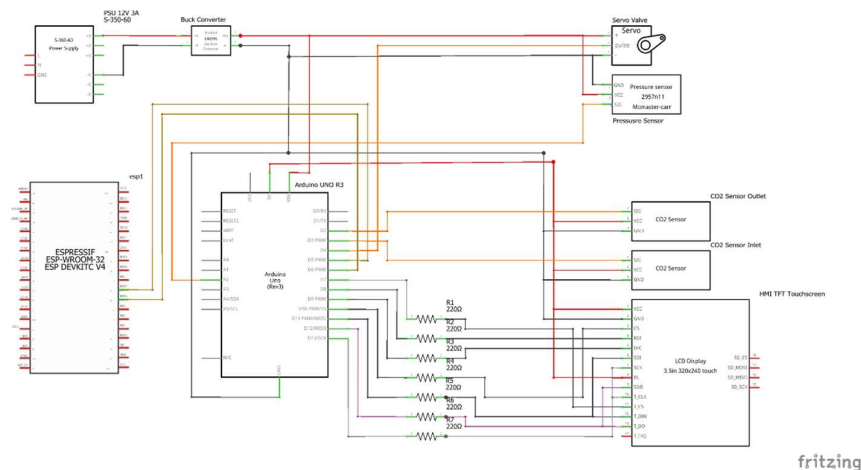
1.



Gambar 1. Ilustrasi Proses Adsorpsi pada Membran dan Absorpsi pada Zeolit

Sistem yang dirancang pada penelitian ini merupakan sistem *hybrid* yang menggabungkan prinsip adsorpsi menggunakan zeolit dan absorpsi selektif melalui membran mikrofiltrasi. Teknologi membran berfungsi sebagai pemisah gas CO_2 berdasarkan perbedaan difusivitas dan permeabilitas terhadap material polimerik. Keunggulan utama dari teknologi ini meliputi konsumsi energi rendah, operasi kontinu, dan ukuran sistem yang relatif kompak. Namun, tantangan utama dari sistem membran adalah adanya kompromi antara selektivitas dan permeabilitas, serta sensitivitas terhadap *fouling* dan tekanan. Oleh karena itu, digunakan zeolit sebagai media pendukung untuk meningkatkan kapasitas penangkapan karbon melalui mekanisme adsorpsi fisis, yang memanfaatkan struktur mikropori zeolit dan interaksi *van der Waals* antara permukaan zeolit dengan molekul CO_2 .

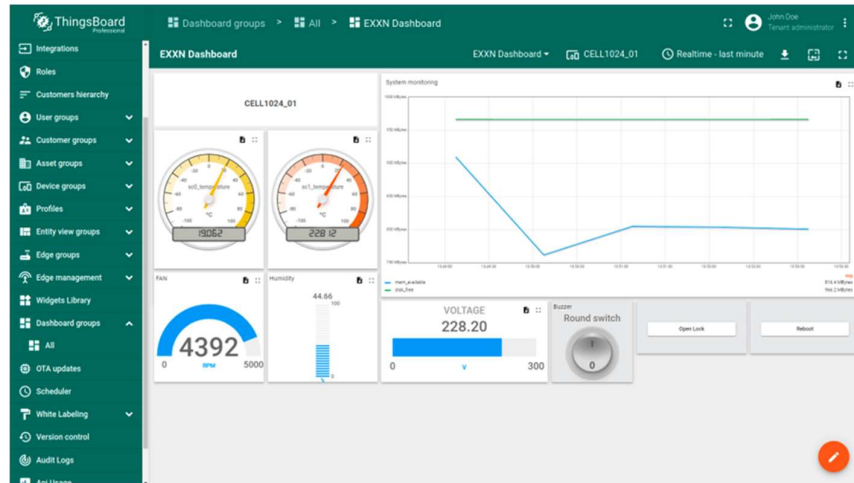
Sistem yang dirancang terdiri dari beberapa komponen utama: sensor CO_2 MH-Z14A (2 unit untuk *inlet* dan *outlet*), sensor tekanan Winsor WPT-83G, *servo valve* 1/4 inci untuk pengaturan tekanan, mikrokontroler Arduino Uno R3, dan layar TFT ILI9341 sebagai antarmuka pengguna. Komunikasi data dilakukan melalui modul ESP32 ke *dashboard* ThingsBoard. Sistem ini memanfaatkan membran PTFE dan zeolit yang diletakkan dalam tabung *adsorber* transparan. Gas CO_2 dialirkan dari tabung melalui regulator dan *servo valve*, lalu masuk ke sistem filtrasi. Data konsentrasi CO_2 dan tekanan diambil dan ditampilkan secara *real-time*.

Gambar 2. Rancangan *Schematic* Sistem Keseluruhan

Gambar 2. memperlihatkan skematik integrasi komponen dalam sistem monitoring penangkap karbon dioksida berbasis mikrokontroler. Sistem ini dikendalikan oleh Arduino Uno R3 yang mengatur kerja servo valve untuk mengendalikan aliran gas CO_2 setelah keluar dari regulator tekanan. Gas CO_2 kemudian masuk ke dalam unit filtrasi yang berisi kombinasi zeolit dan membran PTFE. Dua sensor DFRobot MH-Z14A digunakan untuk mengukur konsentrasi CO_2 pada sisi *inlet* dan *outlet*, sehingga memungkinkan evaluasi efektivitas proses pemisahan. Selain itu, sistem dilengkapi sensor tekanan Winsor WPT-83G yang terhubung ke Arduino untuk memantau tekanan gas secara *real-time*. Seluruh data dari sensor divisualisasikan melalui layar TFT touchscreen ILI9341, sementara modul ESP32 digunakan untuk mengirimkan data ke *platform* ThingsBoard melalui koneksi internet.

Sistem *monitoring* dalam penelitian ini memanfaatkan *platform Internet of Things (IoT)* ThingsBoard sebagai media utama untuk akuisisi dan visualisasi data secara daring. ThingsBoard merupakan *platform IoT open-source* yang dirancang untuk mendukung pengelolaan data sensor secara terintegrasi melalui tampilan grafis berbasis

web [11]. *Platform* ini mampu beroperasi dengan berbagai protokol komunikasi, seperti MQTT, HTTP, dan CoAP, serta mendukung integrasi dengan perangkat mikrokontroler populer seperti Arduino dan ESP32. Salah satu keunggulan ThingsBoard terletak pada kemampuannya dalam menyajikan data secara interaktif melalui *dashboard* yang dapat dikustomisasi, termasuk visualisasi dalam bentuk grafik, tampilan digital, kontrol perangkat, serta sistem notifikasi berbasis parameter tertentu. Selain itu, *platform* ini juga menyediakan fitur *device management*, pencatatan data historis (*data logging*), *rule engine* untuk automasi sistem, serta fasilitas ekspor data untuk keperluan analisis lebih lanjut. Gambar 2.3 berikut merupakan visualisasi dari *dashboard* ThingsBoard yang akan digunakan pada sistem *monitoring* berbasis IoT.



Gambar 3. Dashboard Thingsboard IoT

Dalam sistem *monitoring* penangkap karbon dioksida yang dirancang, ThingsBoard dimanfaatkan sebagai antarmuka utama untuk memantau parameter-parameter penting seperti kadar CO₂ pada sisi inlet dan outlet (dalam satuan ppm), nilai tekanan dari sensor, serta tingkat bukaan servo valve dalam derajat. Selain monitoring, ThingsBoard juga digunakan untuk melakukan kontrol jarak jauh terhadap servo valve, sehingga pengguna dapat mengatur besar tekanan dan aliran CO₂ dari mana saja secara real-time. Implementasi ini menjadikan ThingsBoard sebagai komponen sentral dalam mendukung pemantauan dan pengendalian sistem secara efisien, adaptif, dan berbasis IoT.

Implementasi sistem penangkap karbon dioksida diawali dengan perakitan struktur mekanik sebagai penopang utama. Rangka dibuat menggunakan material siku lubang berdimensi 3 meter dengan ketebalan 2 mm, yang kemudian dipotong dan dirakit menjadi ukuran 80 × 65 × 85 cm³ menggunakan mur, baut 4 mm, dan siku L sebagai penguat sambungan. Pada bagian atas rangka, dipasang alas tripleks berukuran 80 × 65 cm² yang difiksasi dengan bor guna memastikan kestabilan sistem selama pengoperasian. Komponen utama penangkap berupa *vessel* akrilik transparan berdiameter 10 cm dan tinggi 50 cm, berfungsi sebagai tempat media filtrasi zeolit dan membran PTFE. Jalur aliran CO₂ disusun menggunakan *tubing* besi dengan dimensi 10 mm (OD) dan 8 mm (ID), serta disambungkan menggunakan konektor ROKE ukuran 10 mm untuk memastikan sistem kedap tekanan. Untuk integrasi sensor CO₂, digunakan *junction box* cetak 3D sebagai wadah protektif dan modular. Sementara itu, komponen elektronika terdiri dari *power supply* 12V 3A, *step-down converter*, dan Arduino Uno R3 dipasang dan dirapikan dalam panel menggunakan kabel *duct* untuk menjaga kerapian serta meminimalkan risiko interferensi mekanik dan kelistrikan. Perakitan sistem dilakukan secara bertahap untuk memastikan kesesuaian antara aspek mekanik, elektrik, dan fungsi instrumentasi secara menyeluruh. Gambar 4. menampilkan ilustrasi dari implementasi sistem yang dibuat untuk menangkap karbon dioksida.



Gambar 4. Implementasi Rancangan Sistem Keseluruhan

Bahan, material, dan komponen utama yang digunakan dalam perancangan dan implementasi sistem penangkap karbon dioksida disajikan secara rinci pada Tabel 1. Tabel ini memuat daftar perangkat keras yang terdiri dari modul mikrokontroler, sensor, aktuator, serta media filtrasi yang digunakan dalam sistem. Komponen seperti Arduino Uno R3 dan ESP32 berperan sebagai pusat kendali dan penghubung data ke platform IoT. Media pemisah gas terdiri dari membran PTFE dan zeolit, yang masing-masing berfungsi sebagai komponen absorpsi dan adsorpsi dalam proses pemisahan CO₂. Untuk keperluan pemantauan, digunakan dua buah sensor CO₂ MH-Z14A dan satu sensor tekanan Winsen WPT 83G. Sistem kontrol aliran gas dikendalikan melalui *servo valve* ¼ inci, sementara seluruh media filtrasi ditempatkan dalam *vessel* akrilik transparan sebagai reaktor utama. Informasi pada tabel ini juga menyertakan harga estimasi dan tautan pembelian daring (*online*), yang dapat menjadi referensi bagi pengembang atau peneliti lain dalam mereplikasi sistem secara efisien dan terjangkau.

Tabel 1. Daftar Komponen yang Digunakan

Nama Komponen	Jumlah	Fungsi	Harga (Rp.)	Link Pembelian
Arduino UNO R3	1	Main Board	300.000	http://tokopedia.com
ESP32	1	IoT <i>Microcontroller</i>	85.0000	http://tokopedia.com
Membran PTFE	100	Media Pemisah	75.000	http://tokopedia.com
Zeolite	1	Media Pemisah	75.000	http://tokopedia.com
DFRobot NDIR Co ₂ Sensor	2	Sensor CO ₂	1.000.000	http://tokopedia.com
Winsen WPT 83G	1	Sensor Pressure	250.000	http://tokopedia.com
Servo Valve ¼"	1	Kontrol Masukan	300.000	http://tokopedia.com
Vessel Akrilik		Tempat Media Pemisah	450.000	http://tokopedia.com

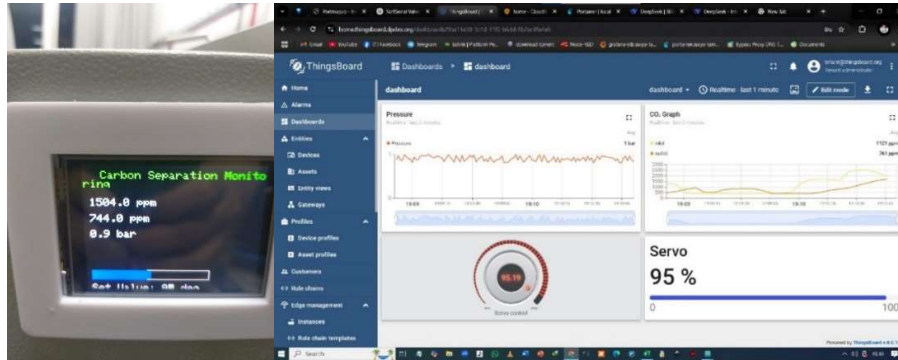
Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 2.1, total estimasi biaya yang diperlukan untuk pelaksanaan proyek tugas akhir ini adalah sebesar Rp. 4.440.000. Seluruh kebutuhan pendanaan dalam proyek ini sepenuhnya ditanggung oleh penulis secara mandiri.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dalam penelitian ini difokuskan pada evaluasi kinerja sistem *monitoring* setelah seluruh proses perancangan dan integrasi komponen selesai dilakukan. Tahap ini bertujuan untuk menilai sejauh mana sistem mampu melakukan pemantauan parameter operasional secara akurat dan berkesinambungan dalam berbagai kondisi kerja. Pengujian dilakukan sebanyak lima kali dengan variasi konfigurasi yang berbeda, guna memperoleh data yang representatif terhadap respons sistem dalam memantau konsentrasi karbon dioksida (CO₂), tekanan kerja, serta posisi bukaan *servo valve* secara *real-time*. Melalui pendekatan ini, efektivitas integrasi antara sensor, mikrokontroler, aktuator, serta antarmuka ThingsBoard dapat diuji secara menyeluruh. Hasil pengamatan dari tahap ini menjadi dasar dalam menilai keandalan dan stabilitas sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) yang dirancang.

Percobaan Pertama

Pada percobaan pertama, tabung gas CO₂ diatur dengan regulator hingga 0.07 Kg/cm². Membran yang digunakan adalah 3 lembar dan banyaknya zeolit yang digunakan adalah 8 cm dari volume tabung *adsorber*. Pengaturan *servo valve* diatur hingga membuka 95%.

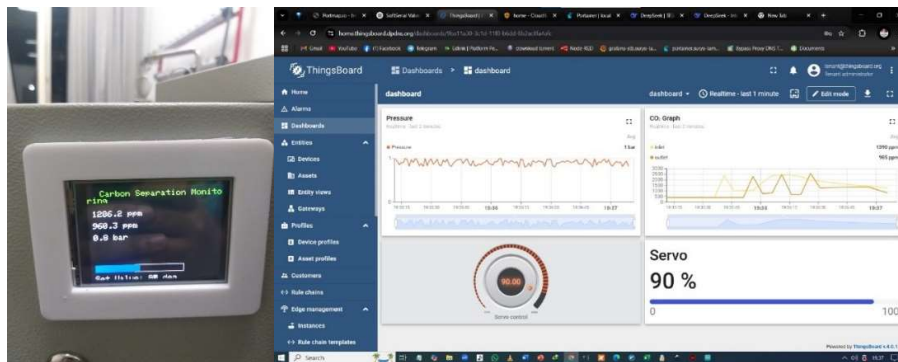


Gambar 5. Visualisasi HMI dan *Dashboard* IoT Percobaan Pertama

Gambar 5 menunjukkan layar HMI TFT dan dashboard Thingsboard yang menampilkan data proses pada sistem monitoring. Kadar karbon dioksida yang terbaca sebelum memasuki komponen penangkap adalah sebesar 1504 ppm dan setelah melewati komponen penangkap adalah sebesar 744 ppm. Tekanan yang terbaca adalah 0.9 bar dan bukaan valve sebesar 95%

Percobaan Kedua

Pada percobaan kedua, tabung gas CO₂ diatur dengan regulator hingga 0.07 Kg/cm². Membran yang digunakan adalah 3 lembar dan banyaknya zeolit yang digunakan adalah 8 cm dari volume tabung *adsorber*. Pengaturan *servo valve* diatur hingga membuka 90%.

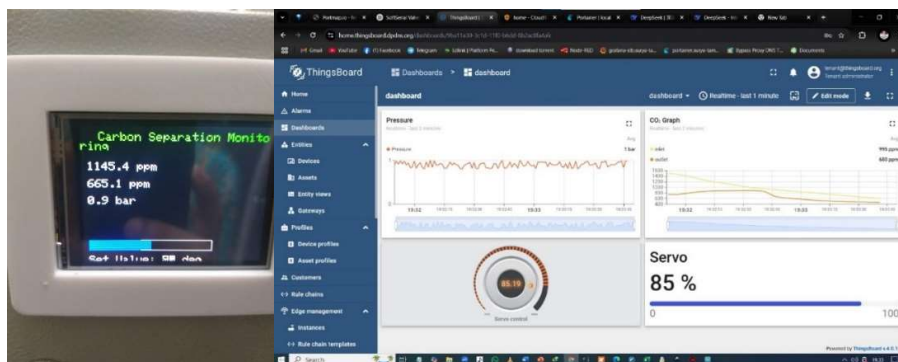


Gambar 6. Visualisasi HMI dan *Dashboard* IoT Percobaan Kedua

Gambar 6 menunjukkan layar HMI TFT dan *dashboard* Thingsboard yang menampilkan data proses pada sistem *monitoring*. Kadar karbon dioksida yang terbaca sebelum memasuki komponen penangkap adalah sebesar 1286 ppm dan setelah melewati komponen penangkap adalah sebesar 960 ppm. Tekanan yang terbaca adalah 0,8 bar dan bukaan valve sebesar 90%

Percobaan Ketiga

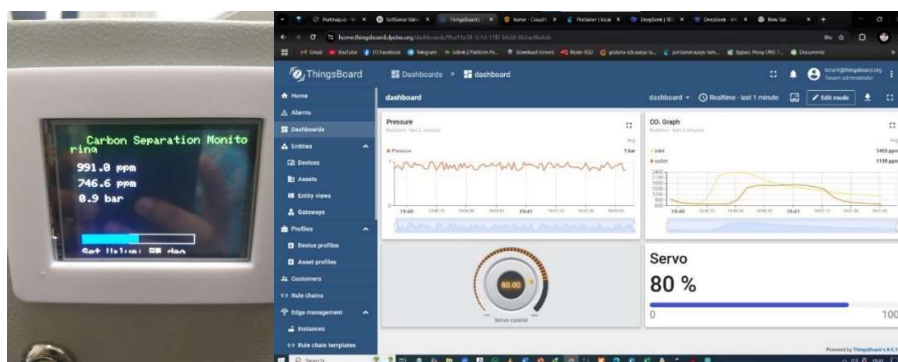
Pada percobaan ketiga, tabung gas CO₂ diatur dengan regulator hingga 0.07 Kg/cm². Membran yang digunakan adalah 3 lembar dan banyaknya zeolit yang digunakan adalah 8 cm dari volume tabung *adsorber*. Pengaturan *servo valve* diatur hingga membuka sebesar 85%

Gambar 7. Visualisasi HMI dan *Dashboard* IoT Percobaan Ketiga

Gambar 7 menunjukkan layar HMI TFT dan *dashboard* Thingsboard yang menampilkan data proses pada sistem *monitoring*. Kadar karbon dioksida yang terbaca sebelum memasuki komponen penangkap adalah sebesar 1145 ppm dan setelah melewati komponen penangkap adalah sebesar 665 ppm. Tekanan yang terbaca adalah 0.9 bar dan bukaan *valve* sebesar 85%.

Percobaan Keempat

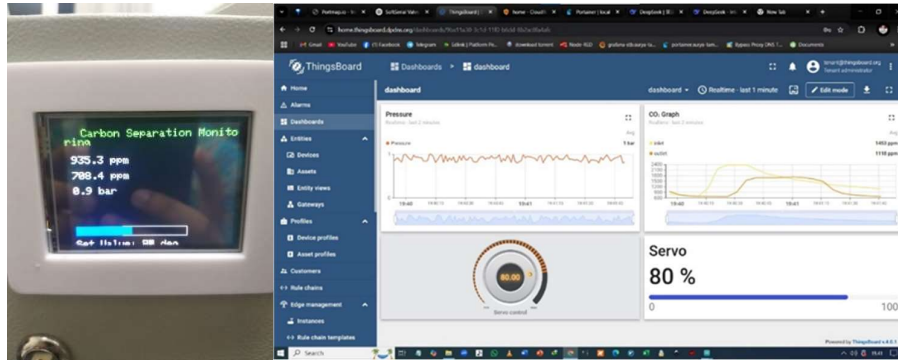
Pada percobaan keempat, tabung gas CO₂ diatur dengan regulator hingga 0.07 Kg/cm². Membran yang digunakan adalah 3 lembar dan banyaknya zeolit yang digunakan adalah 8 cm dari volume tabung *adsorber*. Pengaturan *servo valve* diatur hingga membuka sebesar 80%

Gambar 8. Visualisasi HMI dan *Dashboard* IoT Percobaan Keempat

Gambar 8 menunjukkan layar HMI TFT dan *dashboard* Thingsboard yang menampilkan data proses pada sistem *monitoring* kadar karbon dioksida yang terbaca sebelum memasuki komponen penangkap adalah sebesar 991 ppm dan setelah melewati komponen penangkap adalah sebesar 746 ppm. Tekanan yang terbaca adalah 0.9 bar dan bukaan *valve* sebesar 80%.

Percobaan Kelima

Pada percobaan kelima, tabung gas CO₂ diatur dengan regulator hingga 0.07 Kg/cm². Membran yang digunakan adalah 3 lembar dan banyaknya zeolit yang digunakan adalah 8 cm dari volume tabung *adsorber*. Pengaturan *servo valve* diatur hingga membuka sebesar 76%



Gambar 9. Visualisasi HMI dan Dashboard IoT Percobaan Kelima

Gambar 9 menunjukkan layar HMI TFT dan dashboard ThingsBoard yang menampilkan data proses pada sistem monitoring. Kadar karbon dioksida yang terbaca sebelum memasuki komponen penangkap adalah sebesar 935 ppm dan setelah melewati komponen penangkap adalah sebesar 708 ppm. Tekanan yang terbaca adalah 0.9 bar dan bukaan valve sebesar 76%.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring penangkapan karbon dioksida berbasis IoT dengan kombinasi media membran PTFE dan zeolit. Hasil pengujian menunjukkan sistem efektif dalam menurunkan konsentrasi CO_2 . Sistem ini dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai prototipe awal teknologi CCS yang efisien, adaptif, dan mudah diintegrasikan dalam skala industri kecil hingga menengah.

SPESIFIKASI

Nama Alat	Sistem Monitoring Penangkapan CO_2 Berbasis IoT
Bidang	Instrumentasi, Pengendalian Proses, Lingkungan.
Kegunaan	Memantau dan mengatur proses penangkapan CO_2 secara <i>real-time</i>
Harga Alat	Rp 4.440.000

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, khususnya Laboratorium Instrumentasi, atas dukungan fasilitas selama penelitian ini berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Regina Citra Kurnia Pangestu and Anak Agung Ketut Ayuningsasi, "Pengaruh Konsumsi Energi Sektor Industri, Rumah Tangga, dan Transportasi terhadap Emisi Karbon di Indonesia," *Inisiatif: Jurnal Ekonomi, Akuntansi dan Manajemen*, vol. 3, no. 4, pp. 297–311, Aug. 2024, doi: 10.30640/inisiatif.v3i4.3154.
- [2] N. P. E. Simarmata, Y. Estefani, B. S. Bahri, and S. S. Sibarani, "Penggunaan Energi Bersih Menggunakan Panel Surya Di India," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 4, no. 3, pp. 274–284, Dec. 2023, doi: 10.14710/jebt.2023.21518.
- [3] M. Mubashir, Y. F. Yeong, T. L. Chew, and K. K. Lau, "Comparison of Post-Treatment Methods on the Performance of Hollow Fiber Membranes Containing Metal Organic Framework in Gases Separation," *Ind Eng Chem Res*, vol. 58, no. 17, pp. 7120–7130, May 2019, doi: 10.1021/acs.iecr.8b05773.
- [4] P. Luis, "Use of monoethanolamine (MEA) for CO_2 capture in a global scenario: Consequences and alternatives," *Desalination*, vol. 380, pp. 93–99, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.desal.2015.08.004.
- [5] L. Farell Zavira, D. Bintang Narariyadi, and M. Ramadianti Musadi, "Simulasi Penangkapan Gas CO_2 Dengan Pelarut Monoethanolamine Menggunakan Simulator Aspen Hysys V.11."

- [6] R. Ramezani, L. Di Felice, and F. Gallucci, "A Review on Hollow Fiber Membrane Contactors for Carbon Capture: Recent Advances and Future Challenges," Oct. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/pr10102103.
- [7] L. Li, G. Ma, Z. Pan, N. Zhang, and Z. Zhang, "Research progress in gas separation using hollow fiber membrane contactors," *Membranes (Basel)*, vol. 10, no. 12, pp. 1–20, Dec. 2020, doi: 10.3390/membranes10120380.
- [8] I. Saraswati, "Zeolite-A Synthesis from Glass," *Jurnal Sains dan Matematika*, vol. 23, no. 4, pp. 112–115, 2015.
- [9] A. W. Prasetyo and J. Windarta, "Pemanfaatan Teknologi Carbon Capture Storage (CCS) dalam Upaya Mendukung Produksi Energi yang Berkelanjutan," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 3, pp. 231–238, Nov. 2022, doi: 10.14710/jebt.2022.14509.
- [10] E. Kusumawati and D. Nirwantoro Nur, *Peningkatan Kualitas Biogas Melalui Proses Adsorpsi Menggunakan Zeolite Alam*, vol. Vol. 6. Politeknik Negeri Bandung. doi: <https://doi.org/10.35313/irwns.v6i0.230>.
- [11] M. Henschke, X. Wei, and X. Zhang, "Data Visualization for Wireless Sensor Networks Using ThingsBoard," 2020. [Online]. Available: www.digi.com