

# ***Programmable Logic Control Sebagai Sistem Kontrol Waktu pada Vacuum Pressure Swing Adsorption untuk Konsentrator Oksigen Tiga Bed***

**Amelia<sup>1\*</sup>, Roche Alimin<sup>1</sup>, William Odhiwara<sup>1</sup>, Hariyanto Gunawan<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra  
Jl. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236, Indonesia

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Chung Yuan Christian University  
Taoyuan 32023, Taiwan

\*Penulis korespondensi; E-mail: [amelia@petra.ac.id](mailto:amelia@petra.ac.id)

---

## **ABSTRAK**

Oksigen murni banyak diperlukan dalam dunia medis khususnya untuk orang dengan gangguan pernapasan. Penggunaan tabung oksigen biasanya dijumpai di rumah sakit. Pada penelitian ini akan dikembangkan penggunaan konsentrator oksigen untuk mendapatkan oksigen murni. Konsentrator oksigen dirancang dengan memanfaatkan siklus *pressure vacuum swing adsorption* (PVSA). Siklus PVSA memanfaatkan kompresor sebagai suplai udara dari lingkungan dan pompa vakum untuk meningkatkan efisiensi penyaringan. Siklus ini membutuhkan sistem kontrol untuk mengendalikan dan memantau jalannya proses pemurnian oksigen. Pada penelitian kali ini, *programmable logic control* (PLC) Delta DVP-SS2 series digunakan untuk mengatur waktu *blowdown* pada siklus PVSA dengan tiga *bed*. Eksperimen dilakukan dengan pada tekanan adsorpsi 3 bar dan tekanan vakum 0,5 bar dengan variasi waktu *blowdown* sebesar 20 detik dan 60 detik. Eksperimen direplikasi sebanyak empat kali untuk menunjukkan kepresisian dan dihasilkan standar deviasi rata-rata 1,314% untuk waktu *blowdown* 20 detik dan 0,647% waktu *blowdown* 60 detik. Dari hasil eksperimen didapatkan bahwa pengaturan waktu *blowdown* yang semakin cepat memberikan tingkat kemurnian oksigen yang semakin tinggi, namun terdapat kondisi optimumnya, selain itu dampaknya jumlah produk yang dihasilkan menjadi semakin rendah.

**Kata Kunci** : kemurnian oksigen, konsentrator oksigen, *Pressure Vacuum Swing Adsorption*, PLC, waktu *blowdown*.

## **ABSTRACT**

*Pure oxygen is widely needed in the medical field, especially for people with respiratory disorders. Oxygen tanks (beds) are commonly found in hospitals. In this research, an oxygen concentrator will be developed to produce pure oxygen. The oxygen concentrator is designed using the Pressure vacuum swing adsorption (PVSA) cycle. The PVSA cycle utilizes a compressor to supply air from the environment and a vacuum pump to increase filtration efficiency. This cycle requires a control system to control and monitor the oxygen purification process. In this study, a Delta DVP-SS2 series programmable logic controller (PLC) was used to regulate the blowdown time in a three-bed PVSA cycle. Experiments were conducted at an adsorption pressure 3 bar and a vacuum pressure of 0.5 bar with varying blowdown times of 20 seconds and 60 seconds. The experiment was replicated four times to demonstrate accuracy and produced an average standard deviation of 1.314% for a blowdown time of 20 seconds and 0.647% for a blowdown time of 60 seconds. The results showed that faster blowdown time settings resulted in higher oxygen purity, but there were optimum conditions, besides that the amount of oxygen as a product produced became lower.*

**Keywords:** oxygen purity, oxygen concentrator, *pressure vacuum swing adsorption* (PVSA), PLC, *blowdown time*.

---

## **PENDAHULUAN**

Peningkatan polusi udara yang terjadi menyebabkan terjadinya gangguan pernafasan seperti penyakit paru obstruktif kronik atau PPOK. Penderita PPOK dianjurkan untuk terapi oksigen dalam jangka panjang sehingga memerlukan suplai oksigen [1]. Untuk mengatasinya dapat

menggunakan *portable oxygen cylinder*, namun perlu sering dilakukan penggantian dengan batas maksimal dua hari, dari sisi penyimpanan tidak dapat diletakkan dekat panas atau api, hingga tabung oksigen akan kosong akibat adanya beda suhu dalam di dalam dan lingkungan [1]. Standar medis, kemurnian oksigen yaitu minimal 82% [2]. Kebutuhan oksigen dapat dilakukan dengan pemisahan unsur oksigen dari udara. Pemisahan dapat dilakukan dengan tiga metode yaitu *membrane*, adsorpsi dan kriogenik. Pemilihan metode tersebut berdasarkan tingkat kemurnian oksigen dan jumlah produksinya. Metode *membrane* digunakan untuk pemisahan unsur oksigen dengan jumlah kecil dan tingkat kemurnian oksigen mencapai 50%. Metode adsorpsi digunakan ketika jumlah produksinya sedang dengan tingkat kemurnian mencapai 95%. Metode kriogenik dapat menghasilkan oksigen murni dalam jumlah besar dengan tingkat kemurnian paling tinggi di antara dua lainnya [3]. Metode adsorpsi dikenal sebagai *pressure swing adsorption (PSA)*. Metode ini dikategorikan berdasarkan tekanan kerjanya, yaitu *pressure swing adsorption (PSA)* untuk proses dengan tekanan kerja di atas tekanan atmosfer, *vacuum swing adsorption (VSA)* serta *pressure vacuum swing adsorption (PVSA)* untuk proses dengan tekanan kerja di bawah atmosfer [4]. *PVSA* lebih banyak digunakan sebagai konsentrator oksigen dengan jumlah produksi kecil dengan performa yang lebih baik daripada *PSA* maupun *VSA* karena siklus regenerasinya lebih efisien [5]. Permana mengembangkan *PSA* sebagai konsentrator oksigen dengan menggunakan 2 tabung *zeolite*, didapatkan kadar kemurnian oksigen yang dapat dihasilkan berkisar 88% hingga 95% tanpa diperlukan adanya pengisian ulang [6]. Pengaruh bahan adsorben seperti *zeolite sitesis*, *silica gel*, *zeolite* alami dan karbon aktif terhadap kadar kemurnian oksigennya diteliti pada konsentrator oksigen dengan metode *PSA*, dan didapatkan bahwa *zeolite* buatan memiliki kadar kemurnian oksigen paling tinggi [7]. Kadar kemurnian oksigen juga dipelajari dengan mengatur jumlah *zeolite* yang digunakan untuk mendapatkan kemurnian yang paling tinggi dengan menggunakan *PSA*, dan didapatkan kadar kemurnian tertinggi hanya mencapai 81,5% [8]. Sistem *PVSA* ada yang menggunakan *oxygen concentrator 3 bed* [9] dan *PVSA* dengan *2 bed* [4]. Konsentrasi oksigen yang menggunakan *3 bed* dapat menghasilkan konsentrasi oksigen dengan kemurnian hingga 94%, sedangkan konsentrasi oksigen *2 bed* didapatkan konsentrasi oksigen dengan kemurnian berkisar 50% hingga 70%. Untuk kebutuhan medis, kemurnian oksigen yang dipersyaratkan sebesar 82%. Kemurnian oksigen yang didapatkan melalui sistem *PVSA* dapat dikontrol melalui lama waktu proses adsorpsi udara yang terjadi pada tangki dan tekanan dalam tangki. Pada sistem *PVSA*, kendali proses dilakukan dengan melakukan buka tutup *valve*. Kondisi ini akan mempengaruhi waktu siklus. Beeyani [10] mempelajari pengaruh waktu siklus terhadap kemurnian kadar oksigen.

Pada eksperimen ini mengacu pada proses *PVSA* dengan sistem kendali *valve* secara otomatis dengan menggunakan *programmable logic controller (PLC)* [11]. Tujuannya agar dapat dilakukan kendali proses yang presisi dan dapat dilakukan variasi sesuai dengan rancangan percobaan, sehingga didapat hasil berupa kemurnian oksigen yang optimum. *PLC* adalah kontroler yang dikembangkan untuk aplikasi di industri (*industrial standard*) untuk menggantikan sistem kontroler *hardwire relay* yang dominan di awal tahun 80-an. Keunggulannya yang menonjol adalah mudah dimodifikasi sesuai keperluan, bentuknya yang kompak, konversi komponen mekanik (*timer*, *counter* etc.) ke *software* sehingga kemampuan menjadi lebih tidak terbatas, serta relatif lebih murah harganya. Bahkan hal-hal sebelumnya yang tidak dapat dilakukan oleh kontroler *hardwire relay* karena masalah *speed* dan komunikasi data digital, dengan *PLC* dapat dilakukan. Beberapa contoh aplikasi yang menggunakan *PLC* antara lain: kendali *crane* dan *conveyor* [12]-[14], pemantauan dan kendali rumah pintar [15],[16], sistem kendali motor induksi [17], dan yang sejalan dengan eksperimen ini adalah pemantauan dan kendali *oxygent plant* [18].

Secara garis besar unit kendali *PLC* terdiri dari *power supply module*, *CPU module*, *communication module* dan *I/O (Input/Output) modules*. Pada eksperimen ini *I/O module* yang diperlukan adalah *digital input (DI)*, *digital output (DO)* dan *analog input (AI)*. Pemantauan tekanan hanya dilakukan oleh *pressure gauge*, tidak menggunakan layar *human machine interface (HMI)*, sedangkan pemantauan temperatur dilakukan dengan menggunakan sensor temperatur *RTD PT100*. Semua *valve* dikendalikan oleh *PLC* melalui *DO module* sehingga diperlukan jenis *solenoid valve* untuk semua *valvenya*. Bahasa pemrograman standar untuk *PLC* mengikuti aturan standar IEC 1131-3, yaitu *ladder diagram (LD)*, *function block diagram (FBD)*, *structured text (ST)*, *instruction list (IL)* dan *sequential function chart (SFC)*. Bahasa pemrograman yang paling mudah dipelajari adalah *LD* [12], tetapi untuk siklus urutan yang kompleks bahasa ini kurang

efisien. Sehingga diputuskan untuk mengkombinasi dengan *SFC*, yang mana bahasa ini memang dirancang untuk urutan kendali proses yang kompleks [11],[19]. Pada eksperimen ini dipilih *PLC Delta DVP-14SS2*, yang mana memiliki *analog input* untuk sensor tekanan dan mengakomodasi kedua bahasa pemrograman tadi. Pemilihan *PLC* juga disiapkan untuk eksperimen lanjutan, yang mana ada potensi untuk dikoneksikan dengan sistem *supervisory control and data acquisition (SCADA)* dan *building management system (BMS)* [20],[21]. Bahkan dapat diinterkoneksi dengan sistem *enterprise resource planning (ERP)* suatu perusahaan/industri, seperti *SAP*, *Odoo* dan lainnya [22].

## METODE

Model konsentrator oksigen tiga *bed* dengan menggunakan metode *PVSA* telah dikembangkan [23]. Pada penelitian kali ini menekankan pada pengendalian proses dengan menggunakan *PLC* digunakan sebagai sistem pemantau dan kendali pada metode *PVSA*. *PLC Delta DVP-14SS2* sebagai sistem kontrol dapat dilihat pada Gambar 1. *PLC* tersebut digunakan untuk mengatur buka tutup *valve* untuk mengetahui pengaruh lama waktu *blowdown* terhadap kemurnian oksigen. Pada penelitian ini, pemrograman menggunakan *LD* hanya dilakukan untuk program induk, sedangkan detail urutan proses menggunakan *SFC*. Hal ini dikarenakan *SFC* merupakan *graphical programming language* yang prinsip kerjanya mirip *flow chart diagram*. Perpindahan ke urutan proses berikutnya dapat bersyarat maupun tidak bersyarat, yaitu dapat dipicu oleh proses sebelumnya dan/atau oleh satu atau serangkaian sensor. Dua buah sensor yang mengeluarkan sinyal analog yaitu sensor tekanan dan sensor temperatur akan memberikan input ke *AI PLC*, sedangkan eksternal saklar atau tombol akan memberikan input ke *DI PLC*. Semua solenoid *valve*, motor kompresor dan vakum akan dikendalikan melalui relay oleh *DO PLC*. Sedangkan logika pemrograman, *timer* dan *counter*, semuanya dilakukan secara *software* oleh *PLC*. Rangkaian siklus konsentrator oksigen dengan metode *PVSA 3 bed* dapat dilihat pada gambar 2, dimana komponen yang digunakan adalah 2 *pressure gauge (PG)*, 2 *pressure switch (PS)*, 14 solenoid *valve (V)*, 1 *check valve (CV)*, dan 1 *rotameter (RM)*. Urutan proses dan lama waktu *solenoid* menyala dapat dilihat pada tabel 1, sedangkan untuk *flowchart* dari sistem kontrol dapat dilihat pada Gambar 3.

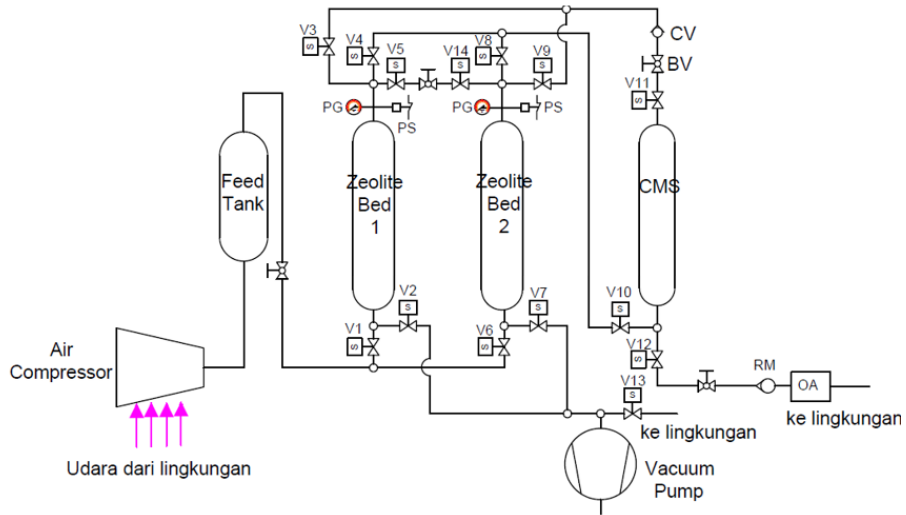
Tabel 1. *Timer setting* untuk setiap step

Bed	Step [detik]							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1st Zeolite	PR (100)	AD(40)		DPE (20)	VU(120)		BF(20)	PPE(20)
2st Zeolite	VU (120)		BF(20)	PPE (20)	PR (100)	AD(40)		DPE(20)
CMS	BD (100)	PR (20)	AD (20)	ID (20)	BD (100)	PR(20)	AD(20)	ID(20)

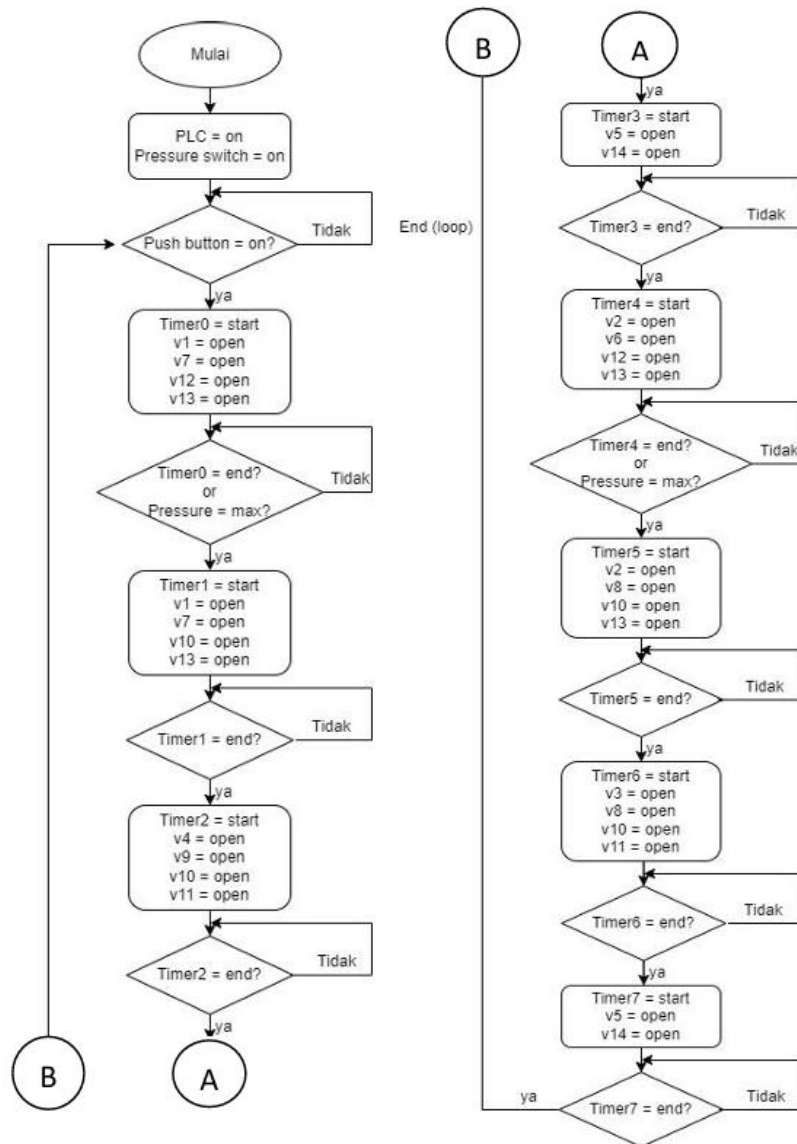


Gambar 1. Delta DVP-14SS2

Perancangan sistem monitor dan kontrol dimulai dengan menentukan urutan proses (*sequence*). Urutan proses (*sequence*) dan pengaturan waktu untuk tiap langkah (*step*) dapat dilihat pada tabel 1, dimana langkah-langkah yang diperlukan adalah sebagai berikut proses *pressurization (PR)*, proses *vacuum (VU)*, proses *blowdown (BD)*, proses *adsorption (AD)*, proses *backfill (BF)*, proses *depressurization (DPE)* dan proses *pre-pressurization (PPE)*.



Gambar 2. Rangkaian siklus VPSA dengan Tiga Bed



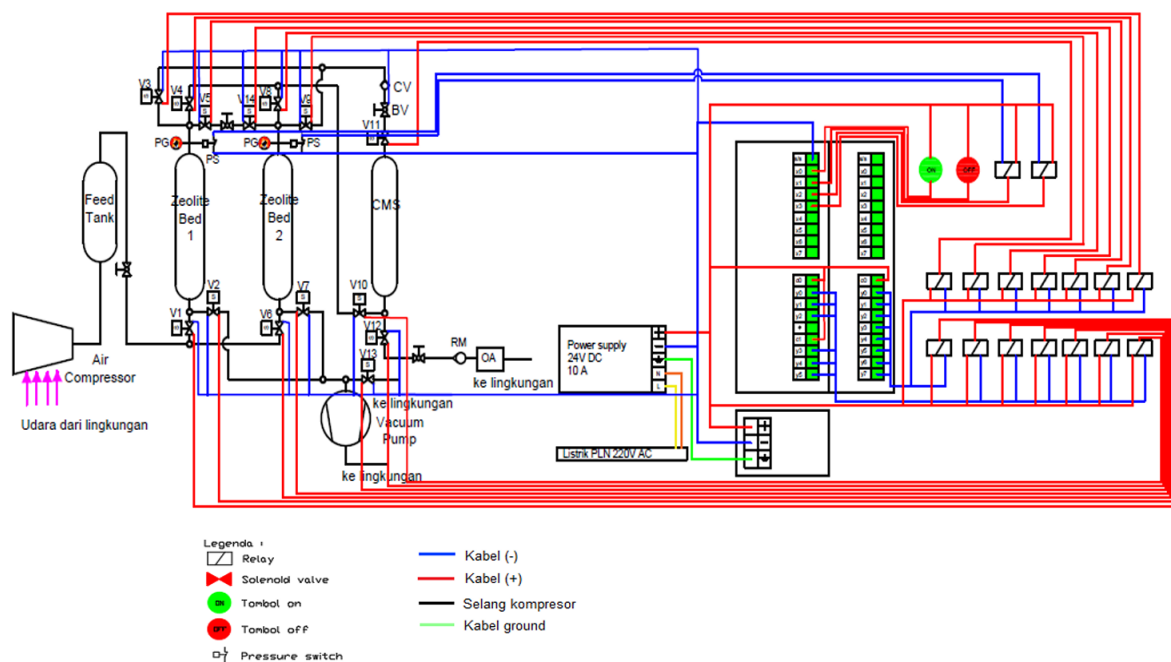
Gambar 3. Flowchart sistem kontrol metode VPSA dengan tiga bed

Saat *pressurization* (PR) terjadi peningkatan tekanan pada *bed*, sedangkan proses pemisahan nitrogen dari udara di dalam *bed zeolite* akan terjadi pada tekanan tinggi yang digolongkan sebagai proses *adsorption* (AD). Proses *depressurization* (DPE) merupakan proses dimana pada kedua *bed zeolite* akan terjadi penyetaraan tekanan hingga akhirnya pada salah satu *bed zeolite* terjadi penurunan tekanan. Proses *pressurization* (PPE), serupa dengan proses DPE, yaitu akan terjadi penyetaraan tekanan dari kedua *bed zeolite* dan dilanjutkan terjadinya peningkatan tekanan pada salah satu *bed*. Proses *blowdown* (BD) merupakan proses dikeluarkannya oksigen sebagai produk. Pada proses *vacuum* (VU), *zeolite* akan mengalami proses regenerasi. Proses *blackfill* (BF), sebagian produk dari *bed CMS* menuju *bed zeolite* untuk proses regenerasi. *Zeolite* merupakan material yang digunakan untuk menangkap nitrogen dari udara, sedangkan *CMS* merupakan penyaring nitrogen dan argon.

Metode pengambilan data dilakukan ketika kondisi *steady*, dimana kemurnian oksigen stabil dari waktu ke waktu saat proses *blowdown* [10]. Kemurnian oksigen diukur pada waktu proses *blowdown* dengan melakukan 4 kali pengulangan untuk tiap waktu *blowdown*. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan *oxygen analyzer* (OA) tipe Cy12C dengan akurasi 0,10% dan resolusi 0,01%. Eksperimen dilakukan pada kondisi lingkungan dengan temperatur 29,5 °C dan *relative humidity* berkisar 66%-68%. Pengukuran kondisi lingkungan dilakukan dengan *Hygrometer Clock, Exttech*. Untuk tekanan adsorpsi diatur konstan pada 3 bar dan tekanan *vacuum* diatur pada 0,5 bar. Pengaturan lama waktu *blowdown* yaitu pada 20°C dan 60°C untuk menganalisa akurasi sistem kontrol.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan urutan proses yang disesuaikan dengan Tabel 1, skematik sistem pengkabelan yang digunakan untuk mengendalikan proses dapat dilihat pada Gambar 4. Pada tahapan ini, kabel *input* dan *output* yang tersambung harus sesuai dengan penugasan pada *I/O*. Gambar 5 menunjukkan model dari pemasangan kabel yang sesuai dengan skematik sistem *wiring* pada Gambar 4. Bagian *common* akan dihubungkan dengan tegangan negatif, sedangkan tegangan positif dihubungkan pada komponen *input* seperti *switch* dan *push button* yang kemudian akan dihubungkan dengan modul *input* PLC sesuai dengan alamat *input* X. Pada bagian *output* Y yaitu *solenoid valve*. PLC dihubungkan dengan *relay* terlebih dahulu, baru dihubungkan ke *solenoid valve*.



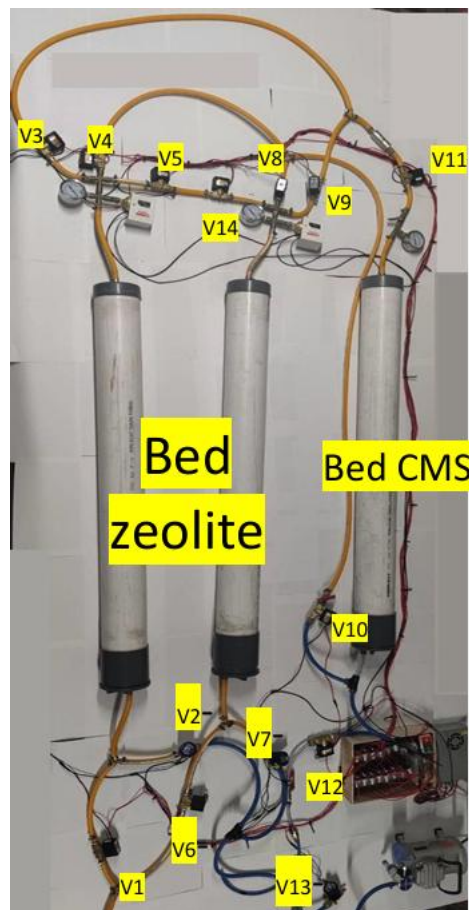
Gambar 4. Skematik sistem *wiring* PLC untuk *oxygen concentrator* 3 bed dengan metode VPSA

Gambar 6 merupakan prototipe konsentrator oksigen model VPSA dengan tiga *bed* yang digunakan untuk eksperimen. Sistem kontrol PLC berfungsi mengatur *solenoid valve* dengan menggunakan

gabungan parameter waktu dan tekanan. Tekanan dan waktu berlangsungnya setiap siklus selalu dimonitor untuk menjaga efisiensi *adsorbent* dalam menyaring udara. Setiap siklus dipasang *timer* untuk menjaga konsistensi proses penyaringan oksigen, dan pada setiap tangki terpasang satu buah *pressure switch* yang membatasi tekanan dalam tangki. Setelah tekanan tangki terpenuhi, *pressure switch* akan mengirimkan sinyal pada PLC untuk mematikan *solenoid valve* yang terhubung pada *supply* udara dari kompresor.



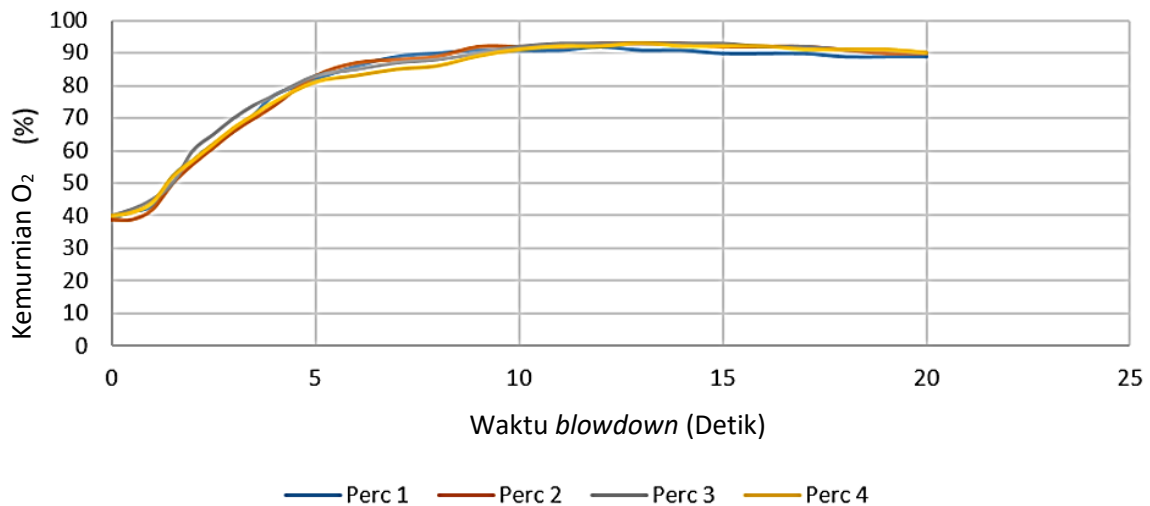
Gambar 5. Pemasangan kabel pada PLC



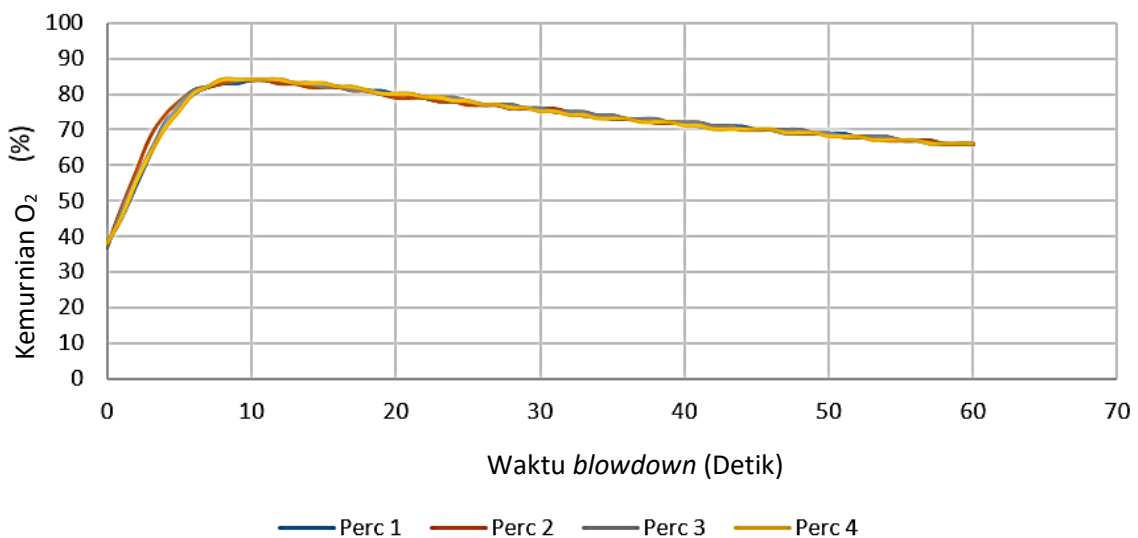
Gambar 6. Model VPSA untuk *oxygen concentrator* dengan Tiga Bed

Pada Gambar 7 dan 8 ditunjukkan hasil pengujian yang diperoleh melalui empat kali percobaan untuk setiap kondisi. Rata-rata standar deviasi pengujian tersebut masing-masing adalah 1,314% untuk waktu *blowdown* 20 detik dan 0,647% untuk waktu *blowdown* 60 detik. Kemurnian

oksigen terlihat meningkat secara bertahap hingga mencapai optimum di waktu *blowdown* mencapai 10 detik. Direntang waktu tersebut, tekanan *bed* masih relatif tinggi sehingga nitrogen dan argon yang sebelumnya teradsorpsi oleh CMS mulai dilepaskan sehingga pemisahan oksigen berlangsung secara lebih efektif. Kondisi ini juga berkontribusi bagi terbentuknya kemurnian oksigen menjadi lebih tinggi. Namun ketika waktu *blowdown* terlalu singkat, sebagian nitrogen dan argon masih tersisa di dalam *bed* sehingga kapasitas *adsorben* untuk siklus berikutnya akan berkurang, kondisi ini dapat dilihat pada gambar 7 dan 8 melalui data percobaan ke-1 sampai dengan percobaan ke-4 di kondisi yang sama. Dari gambar tersebut, juga terlihat bahwa ketika waktu *blowdown* bertambah, terjadi penurunan kemurnian oksigen. Dari fenomena ini dapat disimpulkan kalau terdapat waktu *blowdown* optimum untuk menghasilkan kemurnian oksigen yaitu antara adsorpsi nitrogen dan argon dan menahan oksigen. Dari hasil uji coba, kemurnian oksigen yang dihasilkan dapat mencapai 92% untuk lama waktu *blowdown* 20 detik, sedangkan ketika waktu *blowdown* diatur selama 60 detik, kemurnian oksigen menurun menjadi sekitar 84%. Fenomena ini terjadi karena ketika waktu *blowdown* singkat dan tekanan dalam *bed* CMS yang masih cukup tinggi menyebabkan argon pada fase gas mulai terdesorpsi sehingga pemisahan lebih efektif. Kondisi ini serupa dengan yang dilakukan oleh Jee [24]. Pada sistem VPSA untuk *oxygen concentrator 3 bed*, kemurnian oksigen mengalami penurunan hingga 2% ketika waktu *blowdown* diatur 20 detik dan 21% ketika waktu *blowdown* diatur selama 60 detik.



Gambar 7. Hasil pengujian program PLC untuk waktu *blowdown* 20 detik



Gambar 8. Hasil pengujian program PLC untuk waktu *blowdown* 60 detik

## KESIMPULAN

Sistem kendali konsentrator oksigen tiga *bed* dengan metode VPSA menggunakan PLC Delta DVP-14SS2 dapat berfungsi sesuai dengan yang diharapkan. Lama waktu *blowdown* 20 detik menghasilkan kemurnian oksigen tertinggi hingga mencapai 92%, sedangkan waktu *blowdown* 60 detik mencapai 84% dengan nilai *relative standar deviasi* berturut-turut 1,314% dan 0,647%.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dilakukan melalui dana mandiri dan hibah penelitian Lempaga Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat Universitas Kristen Petra. Terima kasih kepada semua pemberi dana yang terlibat, selain Dekan FTI dan Kaprodi Teknik Mesin Universitas Kristen Petra yang telah memberikan dukungan dan fasilitas pada proses penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S.K. Sameer and P. Eswaran, "Development and integration of oxygen generator for home air conditioner," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 912, no. 4, p. 042054, Aug. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/912/4/042054.
- [2] U. WHO, *Who-Unicef Technical Specifications And Guidance For Oxygen Therapy Devices*. 2019.
- [3] A.A. Tishin, "Study of adsorption properties of Zeolites NaX, CaA, and CaNaA in separation of air components," *Pet. Chem.*, vol. 60, no. 8, pp. 964–970, Aug. 2020, doi: 10.1134/S0965544120080149.
- [4] M. Pan, "Experimental and Simulation Studies of an Oxygen Concentration System Using Pressure/Vacuum Swing Adsorption Technique: System Minaturization and Prototype Design.," The University of Western Ontario, 2017.
- [5] A. Arora and M.M.F. Hasan, "Flexible oxygen concentrators for medical applications," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, p. 14317, Jul. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-93796-3.
- [6] R.I.A. Permana, A.N. Zukhrufi, and A.D. Aji, "Desain pressure swing adsorption pada Oksigen konsentrator," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro*, 2022, pp. 129–132.
- [7] D.R. Saputra, K.W. Lestari, and A. Sujiwa, "Rancang bangun konsentrator oksigen menggunakan 4 Bahan filtrasi sebagai alternatif alat bantu pernafasan," in *Seminar Nasional Fortei Regional 7*, 2022, pp. 12–20.
- [8] M. Safaat and D.S. Khaerudini, "Analisis Kemurnian Oksigen pada Sistem pressure swing adsorption (PSA) dengan penambahan massa material adsorbent Zeolit 13X (600,700 dan 800 Gram)," *J. Tek. Mesin*, vol. 12, no. 3, p. 198, 2023, doi: 10.22441/jtm.v12i3.14276.
- [9] S.J. Lee, J.H. Jung, J.H. Moon, J.G. Jee, and C.H. Lee, "Parametric study of the three-bed pressure–vacuum swing adsorption process for high purity O<sub>2</sub> generation from ambient air," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 46, no. 11, pp. 3720–3728, May 2007, doi: 10.1021/ie061087l.
- [10] A. Beeyani, K. Singh, R. Vyas, S. Kumar, and S. Kumar, "Parametric studies and simulation of PSA process for oxygen production from air," *PJCT*, vol. 12, no. 2, pp. 18–28, Jan. 2010, doi: 10.2478/v10026-010-0013-2.
- [11] G.V. Krishnamurti, "A Comprehensive Survey on Programmable Logic Controllers (PLCs)," *J. Publ. Int. Res. Eng. Manag. (JOIREM)*, p. 5, 2025, [Online]. Available: [www.joirem.com](http://www.joirem.com)
- [12] A.I.J. Alzubaydy and A.B. Aziz, "Automatic control of electrical overhead smart trolley crane AEOSTC based programmable logic controller (PLC)," *Am. J. Eng. Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 54–62, 2017.
- [13] R.A. DIMaculangan, "Development of load moment control and monitoring system for 2<sup>nd</sup> hand mobile heavy load cranes," *2021 IEEE 13th Int. Conf. Humanoid, Nanotechnology, Inf. Technol. Commun. Control. Environ. Manag. HNICEM 2021*, pp. 2–7, 2021, doi: 10.1109/HNICEM54116.2021.9731948.

- [14] A.N. Latief, Silwardono, and Muchlishah, "Implementasi pemrograman PLC Pada konveyor pemilah barang," *Pros. Semin. Nas. Tek. Elektro*, vol. 9, pp. 30–37, 2024.
- [15] X. Cai, Z. Jin, H. Li, A. Kümpel, and D. Müller, "Automated PLC code generation for the implementation of mode-based control algorithms in buildings," *Buildings*, vol. 14, no. 1, p. 73, Dec. 2023, doi: 10.3390/buildings14010073.
- [16] S. Afianto, Adianto, and I. Sutrisno, "Studi efisiensi programmable logic controller sebagai kontroler sensor sistem smart home," *J. Elektron. dan Otomasi Ind.*, vol. 11, no. 3, pp. 708–716, Sep. 2024, doi: 10.33795/elkolind.v11i3.5592.
- [17] F.Y. Hartawan and M. Galina, "Implementasi programmable logic control (PLC) Omron CP1E pada sistem kendali motor induksi star-delta untuk kebutuhan industri," *JTT (Jurnal Teknol. Ter.)*, vol. 8, no. 2, p. 98, Oct. 2022, doi: 10.31884/jtt.v8i2.409.
- [18] U. Khoiriyah, M. Ridwan, and A. Cahyono, "Rancang Bangun sistem monitoring oxygen plant menggunakan citect Scada," *J. Elkolind*, vol. 8, no. 3, pp. 185–189, 2021, doi: 10.33795/elkolind.v8i3.
- [19] J. A. Rehg, "Structured PLC programming with sequential function charts," *ASEE Annu. Conf. Proc.*, pp. 9041–9046, 2001, doi: 10.18260/1-2--9802.
- [20] X. Cai, Z. Jin, H. Li, A. Kümpel, and D. Müller, "Automated PLC code generation for the implementation of mode-based control algorithms in buildings," *Buildings*, vol. 14, no. 1, p. 73, Dec. 2023, doi: 10.3390/buildings14010073.
- [21] F. Mo *et al.*, "PLC orchestration automation to enhance human–machine integration in adaptive manufacturing systems," *J. Manuf. Syst.*, vol. 71, pp. 172–187, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jmsy.2023.07.015.
- [22] N. Intawong, B. Saengchandr, M. Inkamchuer, M. Thongprom, and V. Sukontanakarn, "Design of Internet of things-integrated programmable logic controller for demonstrating automated sorting systems," *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 14, no. 4, pp. 3161–3174, Aug. 2025, doi: 10.11591/eei.v14i4.9426.
- [23] A. Sugondo, T. Sutrisno, and R.M.S. Saputra, "Pengaruh tekanan vakum terhadap kemurnian oksigen pada proses vacuum pressure swing adsorption," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 15, no. 3, pp. 1353–1361, Dec. 2024, doi: 10.21776/jrm.v15i3.1628.
- [24] J.G. Jee, M.B. Kim, and C.H. Lee, "Pressure swing adsorption processes to purify oxygen using a carbon molecular sieve," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 60, no. 3, pp. 869–882, Feb. 2005, doi: 10.1016/j.ces.2004.09.050.