

OPTIMASI KUALITAS DALAM PENANGANAN PRODUK *LIQUID OXYGEN (LOX) OFF-SPECIFICATION* DI PT X

Salma Alisia Salsabila^{1*}, Budi Sulistiyo Nugroho¹

¹Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jalan Gajah Mada No. 38 Cepu, Blora, 5831

*E-mail: salma.alisiaa@gmail.com

ABSTRAK

Liquid Oxygen (LOX) merupakan salah satu produk utama hasil dari proses *Air Separation Unit (ASU)* yang memiliki peran penting dalam dunia industri dan medis. Tingkat kemurnian oksigen cair harus dikontrol secara ketat karena kandungan pengotor sekecil apa pun dapat menurunkan kualitas dan menimbulkan risiko keselamatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kestabilan kemurnian *Liquid Oxygen* dan mengidentifikasi faktor penyebab variasi hasil pengujian menggunakan OXYMAT 64 analyzer berbasis sensor zirkonia (ZrO_2). Pengujian dilakukan dengan metode vaporasi cepat (*flash vaporization*) untuk memastikan gas hasil uapannya menunjukkan kondisi aktual *Liquid Oxygen*. Hasil pengujian yang telah didapatkan menunjukkan nilai kemurnian oksigen berkisar antara 99,32% hingga 99,95% dengan rata-rata sebesar 99,70%. Sebagian besar sampel memenuhi spesifikasi minimal $\geq 99,7\%$, meskipun terdapat hasil di bawah standar yang mengindikasikan adanya fluktuasi proses pada sistem *Air Separation Unit (ASU)* akibat perubahan tekanan, kebocoran, atau kontaminasi gas inert. Pengendalian proses yang konsisten, kalibrasi rutin analyzer, serta evaluasi performa peralatan secara berkala sangat efektif dalam menjaga mutu produk *Liquid Oxygen* agar sesuai dengan standar industri dan regulasi keselamatan kerja yang berlaku.

Kata kunci: *Liquid Oxygen (LOX)*, OXYMAT 64, *Air Separation Unit (ASU)*

1. PENDAHULUAN

Liquid Oxygen (LOX) atau oksigen cair merupakan salah satu bahan *cryogenic* yang paling penting serta banyak digunakan di berbagai bidang industri dan teknologi modern. Secara termodinamika, oksigen cair memiliki titik didih 90,2 K pada tekanan atmosfer dan menunjukkan karakteristik khas fluida *cryogenic*, seperti densitas tinggi, konduktivitas termal rendah, serta potensi kehilangan massa akibat *boil-off* yang tinggi. Oleh karena itu, pengendalian suhu dan tekanan dalam tangki penyimpanan LOX menjadi hal krusial dalam menjaga kestabilan dan keselamatan sistem penyimpanan bahan *cryogenic* [1].

Sistem penyimpanan dan pelepasan (*pressurization discharge*) LOX melibatkan proses termodinamika yang kompleks meliputi perpindahan panas, aliran dua fase (*two phase flow*), serta perubahan fasa antara gas dan cairan. Oksigen cair juga digunakan dalam industri medis, metalurgi, dan energi, misalnya pada proses pembakaran oksidatif, pemotongan logam, serta sistem oksigen medis skala besar. Namun demikian, karena memiliki sifat yang sangat reaktif dan mendukung terjadinya pembakaran, maka LOX dapat menimbulkan risiko kebakaran dan ledakan apabila terjadi kontak dengan bahan organik atau hidrokarbon. Oleh karena itu, pengelolaan, penyimpanan, dan transportasi oksigen cair memerlukan standar keselamatan yang ketat [2].

Kontaminasi kelembapan (*moisture contamination*) merupakan salah satu masalah utama dalam produksi gas *cryogenic* berkemurnian tinggi, termasuk *Liquid Oxygen (LOX)*. Uap air yang masuk atau terakumulasi di dalam sistem pemisahan *cryogenic* dapat menyebabkan

pembentukan es pada permukaan dingin kolom distilasi dan penukar panas, sehingga menurunkan efisiensi perpindahan panas serta menghambat aliran fluida. Selain itu, keberadaan uap air dapat menurunkan kemurnian gas produk hingga di bawah 99,999% terjadi karena air cenderung berpindah ke komponen dengan titik didih tinggi. Untuk menjaga kemurnian gas di atas 99,999%, maka konsentrasi uap air pada aliran umpan ke unit pemisahan *cryogenic* yang tidak boleh melebihi batas sebesar 0,5 ppm. Setelah operasi jangka panjang, unit *cryogenic* harus dikeringkan menggunakan nitrogen kering dengan kadar uap air di bawah 1 ppm pada suhu sekitar 150°C. Selain itu, proses pengisian silinder gas juga menjadi sumber potensial kontaminasi air karena dapat terjadinya desorpsi kelembapan dari permukaan bagian dalam tabung. Oleh karena itu, silinder harus dibuat vakum hingga tekanan residual sekitar 10^{-6} mbar sambil dipanaskan pada suhu minimal 100 – 150°C untuk menghilangkan sisa uap air [3].

Dalam proses analisis oksigen cair, penggunaan *analyzer* memiliki peran penting untuk pengendalian proses dan penjaminan kemurnian produk. Analisis oksigen cair umumnya dilakukan menggunakan *Thermal Conductivity Analyzer* (TCA) dan *Infrared Analyzer* (IR). *Thermal Conductivity Analyzer* digunakan untuk mengontrol aliran fraksi udara cair selama proses distilasi, terutama pada saat pengendalian berbasis tekanan tidak dapat diterapkan. Sedangkan, *Infrared Analyzer* dimanfaatkan untuk mendeteksi secara *continue* keberadaan gas pengotor, seperti karbon dioksida dan senyawa karbon lainnya pada hasil penguapan oksigen cair. Sebelum dianalisis, oksigen cair diuapkan menggunakan *flash vaporizer* agar sampel gas yang terbentuk benar-benar mewakili komposisi cairan yang diuji, sehingga hasil pembacaan *analyzer* akurat. Penggunaan *analyzer* ini memberikan keuntungan dalam bentuk pemantauan otomatis dan *real time*, mengurangi ketergantungan pada metode manual, serta meningkatkan keandalan dan keselamatan proses produksi oksigen cair, khususnya dalam menghindari kontaminasi yang berpotensi berbahaya dalam sistem *cryogenic* [4].

Analyzer yang digunakan adalah OXYMAT yang merupakan *analyzer* gas berbasis sensor zirkonia (ZrO_2) yang digunakan untuk mengukur kadar oksigen dengan tingkat sensitivitas dan akurasi yang tinggi, baik dalam bentuk jejak (*trace oxygen*) maupun pada konsentrasi besar. Prinsip kerjanya didasarkan pada perbedaan tekanan parsial oksigen antara gas sampel dan udara referensi, yang menghasilkan beda potensial listrik (tegangan Nernst) pada membran zirkonia padat bersuhu tinggi sekitar 650°C. Tegangan ini kemudian diubah menjadi nilai konsentrasi oksigen melalui sistem elektronik internal. *Analyzer* ini dilengkapi dengan pemanas, sensor tekanan, serta *flowmeter* untuk menjaga kestabilan kondisi operasi dan dapat dikalibrasi secara otomatis dengan menggunakan *zero gas* dan *span gas* untuk memastikan bahwa hasil yang diperoleh akurat. OXYMAT juga mendukung komunikasi digital melalui antarmuka RS-485 atau PROFIBUS yang memungkinkan pemantauan data secara *real time* dalam sistem industri. Dengan kemampuan mendeteksi kadar oksigen hingga level 10 vpm, respon cepat, serta kestabilan jangka panjang, maka OXYMAT banyak digunakan dalam industri gas, sistem pemisahan udara, proses *cryogenic*, dan kontrol kualitas oksigen untuk memastikan kemurnian serta keselamatan operasional sesuai standar industri [5].

Kemurnian oksigen merupakan faktor penting yang menentukan kinerja dan keamanan sistem konsentrator oksigen. Nilai kemurnian oksigen harus dijaga pada rentang 90% hingga 96% untuk memastikan efektivitas oksigen serta mencegah masuknya gas-gas yang tidak diinginkan, seperti nitrogen dan argon ke dalam aliran produk. Apabila kemurnian oksigen berada di bawah batas tersebut, maka efektivitasnya dapat menurun. Namun, apabila kadar yang diperoleh terlalu tinggi, maka menandakan adanya kerusakan atau kontaminasi pada sistem penyaring (*sieve bed*). Oleh karena itu, pemantauan kemurnian oksigen secara terus-menerus sangat diperlukan untuk memastikan bahwa oksigen yang dihasilkan memenuhi standar yang berlaku [6].

Kemurnian oksigen merupakan faktor penting dalam menjamin keselamatan operasional pada fasilitas produksi dan penyimpanan gas di suatu industri. Dalam sistem *cryogenic*, oksigen yang tidak murni dapat mengandung gas inert atau hidrokarbon sehingga berpotensi menimbulkan reaksi yang tidak terkendali pada tekanan dan suhu rendah. Kontaminasi seperti ini dapat menyebabkan peningkatan risiko kebakaran, ledakan, atau kerusakan pada peralatan bertekanan tinggi, sehingga pemantauan kadar kemurnian oksigen menjadi bagian penting dari prosedur keselamatan kerja. Oleh karena itu, setiap proses produksi, pengisian, dan distribusi oksigen cair harus dilakukan pemantauan dengan menggunakan *analyzer* dengan melakukan prosedur kalibrasi yang sesuai secara berkala untuk menjamin kestabilan dan keamanan suatu produk [7].

Dalam bidang medis, kemurnian oksigen sangat berpengaruh terhadap efektivitas dan keselamatan pasien. Sebuah dokumen internasional pada tahun 2024 menegaskan bahwa oksigen medis yang dihasilkan melalui teknologi PSA memiliki tingkat kemurnian sebesar $93 \pm 3\%$, yang telah cukup untuk penggunaan pasien sesuai standar global. Oleh karena itu, pemantauan kemurnian oksigen secara *continue*, termasuk penggunaan *analyzer*, kalibrasi rutin, dan kontrol kualitas menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa oksigen medis yang dihasilkan aman dan efektif [8].

Dari sisi regulasi keselamatan kerja, kemurnian oksigen berpengaruh terhadap pengendalian risiko kebakaran dan ledakan pada lingkungan industri. Menurut pedoman *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA), penggunaan dan penyimpanan oksigen harus dilakukan dengan pengawasan ketat terhadap kemurnian gas, tekanan, serta ventilasi ruangan. Ketidaksesuaian kadar oksigen dapat menyebabkan kondisi atmosfer yang mudah terbakar atau mempercepat proses oksidasi pada bahan tertentu, sehingga penerapan pemantauan dan kalibrasi alat ukur secara rutin menjadi kewajiban dalam manajemen K3 [9].

Selain itu, *National Fire Protection Association* (NFPA) juga menekankan bahwa oksigen dengan kemurnian tinggi harus disimpan dan ditransfer menggunakan peralatan tahan api serta diberi tanda peringatan bahaya. Standar NFPA 55 menyebutkan bahwa sistem penyimpanan oksigen harus dirancang untuk mencegah kebocoran, mengendalikan tekanan, dan menjaga stabilitas suhu agar tidak terjadi kondisi yang memicu kebakaran. Dengan demikian, penerapan standar kemurnian oksigen tidak hanya menjamin kualitas produk, tetapi juga menjadi bagian penting dari penerapan keselamatan kerja di fasilitas industri gas dan medis [10].

2. METODE

Pengujian kadar oksigen pada *Liquid Oxygen* (LOX) dilakukan menggunakan OXYMAT 64 yang merupakan *analyzer* berbasis sensor zirkonia (ZrO_2) yang dirancang untuk mendeteksi konsentrasi *Liquid Oxygen* dengan tingkat sensitivitas sangat tinggi. Sebelum proses analisis dimulai, sampel *Liquid Oxygen* dievaporasikan terlebih dahulu menggunakan *vaporizer* secara *flash vaporization* (vaporisasi cepat) sehingga berubah menjadi fase gas tanpa adanya kontaminasi dari udara sekitar. Proses penguapan ini bertujuan agar gas hasil evaporasi memiliki komposisi yang identik dengan *Liquid Oxygen* sehingga data yang diperoleh *analyzer* dapat menggambarkan kondisi aktual *Liquid Oxygen* yang diuji. Jalur gas dari *vaporizer* ke *analyzer* dijaga agar tetap kering, bersih, dan bertekanan konstan untuk mencegah terjadinya kondensasi atau masuknya uap air yang dapat mengganggu hasil pengukuran.

Setelah oksigen dalam bentuk gas terbentuk, aliran gas diarahkan ke *inlet* OXYMAT *analyzer* dengan laju sekitar 7,5 L/jam. Pada *analyzer* tersebut, gas melewati sensor zirkonia padat yang bekerja pada suhu $\pm 650^\circ\text{C}$. Pada kondisi ini, terjadi perbedaan tekanan parsial oksigen antara gas sampel dan udara referensi yang menghasilkan beda potensial listrik (tegangan Nernst) pada membran zirkonia. Tegangan tersebut diukur oleh sistem elektronik

internal dan dikonversi menjadi konsentrasi oksigen dalam satuan persen volume atau *part per million* (ppm). Selama proses analisis, OXYMAT melakukan kompensasi terhadap tekanan dan suhu dengan menggunakan *pressure sensor internal* agar hasil pengukuran tetap akurat dan stabil.

Kalibrasi alat dilakukan secara berkala untuk memastikan keakuratan data. Langkah ini melibatkan dua tahap, yaitu *zero calibration* dan *span calibration*. Pada tahap *zero calibration* digunakan *zero gas* dengan kandungan oksigen sangat rendah (<30% dari rentang terendah), sedangkan pada tahap *span calibration* digunakan gas kalibrasi dengan kadar mendekati batas atas pengukuran (sekitar 70–100% dari rentang maksimum). Setelah kalibrasi selesai, *analyzer* siap digunakan untuk pengukuran secara *continue*. Data kadar oksigen yang terbaca ditampilkan secara *digital* pada layar dan dapat disimpan atau ditransfer ke sistem kontrol melalui RS-485 atau PROFIBUS untuk pemantauan *real time*.

Selama proses pengujian dilakukan pemantauan kestabilan sinyal dan laju alir gas untuk memastikan hasil analisis yang representatif. Apabila terjadi penyimpangan signifikan, maka dilakukan pemeriksaan pada sistem gas sampling, jalur pipa, dan *vaporizer* untuk memastikan tidak terdapat kebocoran atau kontaminasi. Dengan metode ini, OXYMAT mampu memberikan hasil pengukuran kadar oksigen yang presisi, cepat, dan berkesinambungan sehingga sangat efektif untuk pengujian kemurnian *Liquid Oxygen*.

Untuk mengoptimalkan kualitas *Liquid Oxygen* (LOX), maka dilakukan peningkatan kontrol baik pada tahap sampling maupun pada proses produksi. Jalur sampling harus dijaga pada tingkat kekeringan sangat tinggi melalui penggunaan *inline dryer*, *heated sampling line*, serta dilakukan pembersihan rutin untuk mencegah adanya kontaminasi uap air dan partikel yang dapat memengaruhi akurasi pada pembacaan *analyzer*. Pada sisi operasi *plant*, parameter *distillation column*, seperti *reflux ratio*, tekanan operasi, dan temperatur *tray* bagian atas disesuaikan untuk meningkatkan efisiensi pemisahan oksigen dari *impurities*, seperti nitrogen dan argon serta menstabilkan aliran udara dan tekanan operasi sehingga tingkat kemurnian *Liquid Oxygen* tetap terjaga. Produk *Liquid Oxygen* yang teridentifikasi *off specification* juga dialirkan ke unit *reprocessing* atau *reliquefaction* sehingga dapat diproses ulang hingga memenuhi standar kemurnian yang sesuai dengan ketentuan. Dengan penguatan pengendalian pada saat sampling, peningkatan konsistensi hasil pengukuran pada saat kalibrasi rutin, dan penyempurnaan parameter operasional, maka kualitas *Liquid Oxygen* dapat ditingkatkan secara konsisten dan frekuensi terjadinya produk *off specification* dapat diminimalkan.

3. PEMBAHASAN

OXYMAT 64 merupakan suatu *analyzer* berbasis sensor zirkonia (ZrO_2) yang dirancang untuk mendeteksi konsentrasi oksigen pada gas dengan tingkat sensitivitas yang sangat tinggi. *Analyzer* ini banyak digunakan di dunia industri terutama sebagai alat analisis gas untuk pengujian *Liquid Oxygen* (LOX) *purity*. *Analyzer* ini dirancang untuk mendeteksi kadar oksigen dengan presisi yang tinggi sehingga sangat ideal untuk *Air Separation Unit* (ASU) *plant* yang merupakan proses pemurnian gas pada PT X. *Air Separation Unit* di PT X berfungsi untuk memisahkan udara menjadi komponen utamanya, seperti oksigen, nitrogen, dan argon dengan menggunakan proses *cryogenic distillation*. Dengan menggunakan sistem ini, udara didinginkan hingga mencapai suhu sangat rendah sehingga setiap komponen dapat dipisahkan berdasarkan titik didihnya untuk menghasilkan produk dengan tingkat kemurnian yang tinggi.

Dalam pengujian kemurnian *Liquid Oxygen*, OXYMAT 64 berfungsi untuk memastikan bahwa kandungan kemurniannya berada dalam batas spesifikasi yang mengikuti prosedur pengujian yang mengacu pada ISO 2046 atau ASTM D-2504 sebagai pedoman analisis gas murni. Berikut ini merupakan data hasil pengujian *purity* dari PT X:

Tabel 1. Hasil Pengujian *Liquid Oxygen Purity* Menggunakan OXYMAT 64

Date	Time	<i>Liquid Oxygen Purity (%)</i>
01/07/2025	17.03	99,78
02/07/2025	16.47	99,62
03/07/2025	18.01	99,32
04/07/2025	16.29	99,84
05/07/2025	16.34	99,95

Pengujian *Liquid Oxygen purity* sangat penting karena digunakan untuk menentukan kualitas, keamanan, dan kinerja pada oksigen dalam berbagai industri maupun medis. Dalam industri petrokimia, pengelasan, dan beberapa industri lainnya, keberadaan pengotor dalam *Liquid Oxygen* dapat mengganggu reaksi kimia dan menurunkan efisiensi proses. Sementara itu, untuk penggunaan medis, kemurnian oksigen harus memenuhi standar tinggi karena kontaminasi sekecil apapun dapat membahayakan pasien. Oleh karena itu, pengujian *purity* dilakukan menggunakan *analyzer* presisi seperti OXYMAT yang sesuai dengan standar internasional untuk memastikan bahwa *Liquid Oxygen* memiliki tingkat kemurnian sesuai dengan spesifikasinya sebesar $\geq 99,7\%$.

Optimasi kualitas kemurnian *Liquid Oxygen* dalam penelitian ini difokuskan pada upaya untuk mencapai dan mempertahankan kadar pada nilai minimum sebesar 99,7% sebagai batas standar untuk kelayakan operasional. Proses optimasi dilakukan dengan mengidentifikasi faktor-faktor proses yang paling berpengaruh terhadap fluktuasi kemurnian, seperti stabilitas tekanan kolom distilasi, kondisi pendinginan pada *top condenser*, serta pengendalian laju alir dan pengeringan pada sistem sampling. Dengan memahami keterkaitan setiap parameter tersebut terhadap penurunan atau peningkatan *purity*, maka strategi dalam hal perbaikan kemudian diarahkan untuk meminimalkan variasi dan mencegah terjadinya kondisi *off specification*. Pendekatan ini memungkinkan penentuan kombinasi parameter operasi yang lebih stabil sehingga kualitas *Liquid Oxygen* dapat dijaga pada rentang optimal secara konsisten.

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 1, *Liquid Oxygen purity* menggunakan OXYMAT 64 menunjukkan bahwa terdapat variasi hasil *purity* dari tanggal 1 hingga 5 Juli 2025. Nilai *purity* yang diperoleh berkisar di antara 99,32% hingga 99,95% dengan rata-rata kemurnian sebesar 99,70%. Pengujian dilakukan secara *continue* pada waktu yang berbeda setiap harinya untuk memastikan bahwa adanya kestabilan kualitas *Liquid Oxygen* yang dihasilkan dari unit proses.

Apabila dibandingkan dengan spesifikasi minimal sebesar 99,7%, maka hasil pengujian menunjukkan bahwa tidak semua sampel memenuhi standar tersebut. Pada tanggal 2 Juli 2025 didapatkan sebesar 99,62% dan 3 Juli 2025 didapatkan sebesar 99,32%, maka kadar kemurnian *Liquid Oxygen* tercatat lebih rendah dari batas minimum sehingga menandakan adanya kemungkinan fluktuasi dalam proses pemisahan udara atau sistem penyimpanan cairan *cryogenic*. Sementara itu, hasil pada tanggal 1, 4, dan 5 Juli 2025 memenuhi dan sesuai dengan standar yang dipersyaratkan.

Optimasi kualitas *Liquid Oxygen* dalam penelitian ini tidak dilakukan melalui perubahan langsung pada parameter operasi, tetapi melalui evaluasi hasil pengujian *purity* dan identifikasi faktor yang menyebabkan fluktuasi pada kualitasnya. Berdasarkan data pengujian yang

diperoleh menunjukkan rentang kemurnian 99,32 – 99,95%, maka analisis diarahkan untuk mengidentifikasi faktor proses yang berpotensi menyebabkan hasil berada di bawah spesifikasi, seperti variasi tekanan kolom distilasi, kondisi pendinginan pada *top condenser*, serta kemungkinan terdapat adanya kontaminasi pada jalur sampling. Temuan ini menjadi dasar optimasi yang difokuskan pada peningkatan stabilitas tekanan, pengeringan jalur sampling, dan kalibrasi rutin *analyzer* agar kadar *Liquid Oxygen* dapat dipertahankan pada nilai minimal 99,7% secara konsisten. Dengan demikian, optimasi yang dilakukan bersifat penguatan kontrol proses berdasarkan data aktual tanpa memerlukan perubahan parameter operasi.

Fluktuasi kadar kemurnian ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti perubahan tekanan pada kolom distilasi, adanya kebocoran (*leak*) pada sistem proses, atau kontaminasi dari nitrogen dan argon selama proses penyimpanan atau transfer. Selain itu, kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembapan ruang penyimpanan juga dapat memengaruhi kestabilan kualitas *Liquid Oxygen*. Oleh karena itu, diperlukan kontrol proses yang ketat agar kemurnian oksigen tetap stabil di atas nilai spesifikasi.

Penggunaan OXYMAT 64 sebagai alat analisis memberikan hasil pengukuran yang akurat dan sensitif terhadap kandungan *Liquid Oxygen* pada tingkat jejak (*trace level*). Instrumen ini bekerja dengan prinsip *paramagnetic analysis*, yang memungkinkan deteksi oksigen hingga dalam satuan ppm (*parts per million*). Dengan demikian, *analyzer* ini sangat efektif digunakan dalam pengujian kualitas produk *Liquid Oxygen* yang digunakan pada industri maupun medis, dimana kemurnian menjadi parameter utama untuk menjamin keamanan serta efisiensi pada penggunaannya.

Secara keseluruhan, hasil pengujian *Liquid Oxygen* (LOX) *purity* pada Tabel 1 menunjukkan bahwa kualitas produk sebagian besar telah memenuhi spesifikasi, meskipun masih terdapat beberapa hasil yang berada di bawah standar. Untuk meningkatkan konsistensi kualitas, maka dilakukan pemantauan rutin terhadap *Air Separation Unit* (ASU) serta kalibrasi berkala pada *analyzer* OXYMAT 64. Upaya tersebut memastikan bahwa *Liquid Oxygen* yang dihasilkan memiliki tingkat kemurnian $\geq 99,7\%$ secara konsisten, sehingga mutu produk tetap terjaga sesuai dengan standar yang berlaku.

4. SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kemurnian *Liquid Oxygen* yang diukur menggunakan OXYMAT 64 berada pada rentang antara 99,32 – 99,95% dengan rata-rata sebesar 99,70%. Meskipun sebagian besar sampel telah memenuhi spesifikasi minimal sebesar $\geq 99,7\%$, namun masih ditemukan hasil yang terdapat di bawah standar sehingga menunjukkan ketidakstabilan proses. Melalui evaluasi hasil pengujian OXYMAT 64, maka dapat teridentifikasi bahwa terjadi fluktuasi kemurnian terutama dipengaruhi oleh variasi tekanan distilasi, kondisi pendinginan, serta potensi kontaminasi pada jalur sampling. Temuan ini menjadi dasar upaya optimasi yang difokuskan pada penguatan kontrol proses, perbaikan sistem sampling, dan kalibrasi rutin *analyzer* agar kemurnian *Liquid Oxygen* dapat dipertahankan secara konsisten di atas nilai standar spesifikasi. Dengan demikian, tujuan optimasi dalam penelitian ini tercapai melalui peningkatan kestabilan proses tanpa memerlukan percobaan operasional terhadap parameter distilasi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Liu, Z., Li, Y., & Jin, Y. (2016). *Pressurization Performance and Temperature Stratification in Cryogenic Final Stage Propellant Tank*. *Applied Thermal Engineering*, 106, 211–220.

- [2] Liu, Z., Yin, X., Liu, Y., & Li, Y. (2022). “*Investigation on Thermal Behavior During Pressurization Discharge of Liquid Oxygen Under Different Acceleration Levels.*” *Microgravity Science and Technology*, 34 (27). Springer.
- [3] Ustyugova, T. G., & Kupriyanov, M. Y. (2020). *Moisture Contamination in High Purity Gas Separation Products*. *Chemical and Petroleum Engineering*, 56 (5–6), 371–377. Springer Science Business Media, LLC.
- [4] Smith, C. P. (1960). *Analytical Methods for Liquid Oxygen*. In K. D. Timmerhaus (Ed.), *Advances in Cryogenic Engineering* (pp. 436–437). Springer Science Business Media New York.
- [5] Siemens AG. (2008). *OXYMAT 64 – Gas Analyzer for Measurements of Trace Oxygen (Operating Instructions, A5E00880383-03)*. Industry Automation, Process Analytics, Karlsruhe, Germany.
- [6] Sivalingam, V., Jayaraj, J., & Paul, S. H. J. (2024). *Measuring Flow Rate and Purity in Portable Oxygen Concentrators*. *Bulletin of the National Research Centre*, 48(1), 58.
- [7] International Organization for Standardization. (2016). *ISO 2046: Industrial Gases–Determination of Oxygen Purity and Impurities*.
- [8] Briefing Note PSA Plant Oxygen Purity. (2024, April 30). *PSA Plant Oxygen Purity*. The Global Fund.
- [9] Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2022). *Oxygen safety and handling guidelines*. U.S. Department of Labor.
- [10] National Fire Protection Association (NFPA). (2021). *NFPA 55: Compressed Gases and Cryogenic Fluids Code*.