

Kalibrasi Instrumen Proses Evaporator sebagai Upaya Menjamin Keselamatan Pengolahan Limbah Radioaktif Cair

(Calibration of Evaporator Process Instruments to Ensure the Safety of Liquid Radioactive Waste Treatment)

Dzulfikri Pangestu^{1,2*}, Sugianto², Krismanto²

¹Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Indonesia

²Instalasi Pengelolaan Limbah Radioaktif, Direktorat Fasilitas Ketenaganukliran, Badan Riset dan Inovasi Nasional

Abstrak

Unit evaporasi pada fasilitas pengolahan limbah radioaktif cair IPLR-BRIN telah beroperasi sejak 1989, sehingga berpotensi mengalami degradasi komponen dan instrument drift yang dapat memengaruhi akurasi pengukuran proses. Ketidakakuratan instrumen proses pada titik-titik kritis seperti laju aliran, level, tekanan, suhu, dan densitas berpotensi menempatkan operasi di luar batas keselamatan yang ditetapkan oleh BAPETEN. Untuk memastikan keandalan sistem pengukuran, dilakukan kegiatan kalibrasi internal terhadap 22 instrumen proses yang digunakan dalam operasi evaporasi. Kegiatan ini mencakup pengujian instrumen berbasis arus 4–20 mA dan sensor suhu berbasis resistansi menggunakan peralatan standar seperti current source, multimeter digital, dan resistance decade box. Setiap titik uji divalidasi melalui empat kali pengulangan untuk menilai presisi dan konsistensi pembacaan. Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa seluruh instrumen masih berada dalam kondisi kerja yang baik, dengan penyimpangan terhadap nilai acuan komisioning berada pada rentang yang sangat kecil. Estimasi ketidakpastian pengukuran berulang didominasi oleh nilai mendekati nol, menandakan bahwa variasi acak hampir tidak terjadi dan instrumen memiliki presisi yang tinggi serta tidak mengalami drift signifikan. Selain itu, seluruh sistem alarm proses meliputi parameter level, tekanan, suhu, dan densitas berfungsi pada nilai set dan reset yang sesuai batas keselamatan. Temuan ini menegaskan bahwa instrumen proses pada unit evaporasi masih memenuhi persyaratan teknis dan keselamatan operasional, serta menggarisbawahi pentingnya pelaksanaan kalibrasi internal secara berkala sebagai bagian dari pemeliharaan preventif untuk menjaga keandalan fasilitas dalam jangka panjang.

Kata Kunci : Kalibrasi internal, evaporator, instrumen proses

Abstract

The evaporator unit at the IPLR-BRIN liquid radioactive waste treatment facility has been operating since 1989, creating the potential for component degradation and instrument drift that may affect process measurement accuracy. Inaccurate readings on critical parameters such as flow rate, level, pressure, temperature, and density can place the operation outside the safety limits established by the regulatory body (BAPETEN). To ensure measurement reliability, an internal calibration activity was performed on 22 process instruments used in evaporator operation. The activity included testing current-based instruments (4–20 mA) and resistance-based temperature sensors using standard calibration equipment such as a current source, a digital multimeter, and a resistance decade box. Each test point was repeated four times to evaluate precision and reading consistency. The results show that all instruments remain in good working condition, with deviations from the commissioning reference values falling within a very small range. The estimated repeatability uncertainty was dominated by values approaching zero, indicating minimal random variation, high measurement precision, and no significant drift. Additionally, all process alarm systems covering level, pressure, temperature, and density functioned at the correct set and reset points as required by operational safety criteria. These findings confirm that the evaporator's process instruments continue to meet technical and safety requirements for nuclear facility operation and highlight the importance of periodic internal calibration as part of preventive maintenance to ensure long-term facility reliability.

Keyword : Internal calibration, evaporator, process instruments

*Penulis Korespondensi. Telp:+6285710424066;

Alamat E-mail: mubarrodsofil@gmail.com (Dzulfikri Pangestu)

1. Pendahuluan

Pengelolaan limbah radioaktif merupakan aspek yang harus dijalankan dengan standar keselamatan yang tinggi, karena limbah tersebut mengandung bahan berbahaya yang dapat menimbulkan paparan radiasi jika tidak dikelola secara benar. Kebutuhan pengolahan limbah radioaktif ini muncul karena adanya pemanfaatan energi nuklir di sektor penelitian, medis [1], dan juga industri [2]. Di Indonesia, fasilitas pengolahan limbah radioaktif yang beroperasi secara legal hanya berada di Instalasi Pengelolaan Limbah Radioaktif (IPLR), yang dikelola oleh Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran (DPFK) di bawah Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) [3]. Selain itu, IPLR juga didukung dengan dasar regulasi yang dituangkan ke dalam Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif [4].

Dalam pengolahan limbah radioaktif, IPLR mengoperasikan berbagai fasilitas seperti evaporasi, insinerasi, kompaksi, penukar ion, dan sementasi [5]. Dalam praktik manajemen fasilitas, tantangan utama yang dihadapi adalah penuaan (*aging time*) peralatan. Salah satu contohnya adalah unit evaporasi yang telah beroperasi sejak 1989 melakukan pengelolaan limbah radioaktif cair [6]. Pengoperasian jangka panjang meningkatkan risiko degradasi komponen, erosi, serta *instrument drift* yang dapat memengaruhi akurasi dan keandalan sistem. Untuk memitigasi risiko tersebut, pemeliharaan preventif menjadi wajib, termasuk pelaksanaan kalibrasi rutin secara mandiri sebagai bagian dari pengendalian performa instrumen.

Kondisi penuaan inilah yang membuat keandalan instrumen menjadi aspek yang sangat kritis pada unit evaporasi, karena seluruh parameter proses hanya dapat dikendalikan secara aman apabila instrumen pemantau bekerja dengan tepat dan stabil.

Akurasi dan keandalan sistem pengukuran serta kontrol pada fasilitas evaporasi merupakan faktor kunci dalam menjaga keselamatan operasi. Parameter proses seperti laju aliran umpan, level destilat, tekanan kolom, suhu, dan terutama densitas konsentrat harus dipantau dengan presisi tinggi karena *Setiap* deviasi dapat menempatkan proses di luar batas aman. Ketidakakuratan instrumen pada titik-titik ini dapat memicu kondisi operasi yang tidak terkendali dan berpotensi menyebabkan pelanggaran terhadap batas keselamatan yang ditetapkan oleh BAPETEN selaku badan pengawas. Untuk mencegah terjadinya kondisi tersebut, IPLR wajib menerapkan pemeliharaan yang terprogram dan memastikan seluruh instrumen pengendali tetap berfungsi sesuai

standar regulasi yang berlaku. Kalibrasi rutin menjadi bagian integral dari upaya ini, karena memastikan bahwa *Setiap* instrumen yang memantau besaran kritis tetap akurat dan andal dalam mendukung keselamatan fungsional dan perlindungan lingkungan [7].

2. Teori Dasar

Tujuan Pengolahan limbah radioaktif ialah untuk mengurangi volume, toksisitas, dan potensi bahaya limbah agar memenuhi persyaratan keselamatan sebelum disimpan atau diproses lebih lanjut. Menurut IAEA, pengolahan limbah umumnya mencakup proses pengurangan volume, pemisahan, pemadatan, evaporasi, dan immobilisasi limbah [8]. Pada fasilitas IPLR BRIN, salah satu teknologi utama yang digunakan untuk pengolahan limbah cair adalah sistem evaporasi, yang berfungsi untuk memisahkan fraksi destilat dan konsentrat agar volume limbah berkurang secara signifikan.

Evaporator bekerja dengan memanaskan larutan hingga terjadi penguapan. Uap yang terbentuk dikondensasikan menjadi destilat, sedangkan fraksi pekat yang tersisa mengandung radionuklida dan harus dikelola lebih lanjut [9]. Karena proses ini sangat sensitif terhadap perubahan kondisi operasi, parameter seperti laju alir umpan limbah, level cairan, tekanan, densitas, dan temperatur harus dipantau dengan presisi melalui instrumen proses. Instrumen tersebut mencakup flow transmitter, level transmitter, pressure transmitter, sensor suhu, meter densitas, serta alarm batas tinggi maupun rendah yang berfungsi memberi peringatan ketika kondisi mendekati titik kritis. Seluruh instrumen ini juga tercantum dalam daftar perangkat yang dikalibrasi pada unit evaporasi IPLR tahun 2025, sehingga tingkat akurasinya menjadi faktor penentu kestabilan dan keselamatan operasi. Ketidakakuratan pada salah satu instrumen dapat menyebabkan parameter proses keluar dari batas keselamatan dan berpotensi melanggar ketentuan operasional fasilitas nuklir.

Untuk menjamin keandalan pembacaan instrumen tersebut, dilakukan proses kalibrasi, yaitu kegiatan yang memastikan nilai yang ditunjukkan instrumen sesuai dengan standar acuan [10]. Kalibrasi penting karena *Setiap* instrumen dapat mengalami penyimpangan akibat penuaan komponen, variasi kondisi operasi, atau gangguan eksternal. Tanpa kalibrasi berkala, deviasi kecil dapat berkembang menjadi kesalahan signifikan yang mengganggu kontrol proses dan meningkatkan risiko keselamatan.

Dalam proses kalibrasi, hasil pengukuran tidak hanya dinilai dari koreksi atau kesesuaiannya terhadap standar, tetapi juga dari besarnya ketidakpastian yang menyertai nilai tersebut. Salah satu komponen utamanya adalah

Ketidakpastian Tipe A, yaitu ketidakpastian yang berasal dari variasi acak hasil pengukuran berulang. Menurut GUM [11], nilai ini dihitung dari dispersi pengukuran terhadap rata-ratanya menggunakan standar deviasi sampel, dengan persamaan (1):

$$u = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \dots\dots\dots(1)$$

di mana x_i adalah hasil pengukuran ke- i , \bar{x} adalah nilai rata-rata, dan n adalah jumlah pengulangan. Nilai u yang kecil menunjukkan presisi pengulangan yang tinggi, namun Ketidakpastian Tipe A hanya menggambarkan variasi acak sehingga perlu dilengkapi komponen lain untuk memperoleh penilaian ketidakpastian total secara menyeluruh.

3. Metodologi

Bahan

Kegiatan kalibrasi internal ini menggunakan instrumen proses yang terpasang pada sistem evaporasi, terdiri dari *flow transmitter* (FT), *level transmitter* (LT), *pressure transmitter* (PT), *density meter* (DR), dan *sensor suhu* (TT/TE). Selain itu digunakan pula peralatan standar kalibrasi seperti *current source*, *multimeter digital*, dan *resistance decade box* sebagai sumber referensi untuk pengujian arus dan resistansi. Seluruh instrumen merupakan perangkat yang beroperasi secara rutin pada unit evaporasi sehingga mewakili kondisi aktual proses. Gambar 3.1 merupakan panel instrumen proses evaporasi di IPLR-BRIN.



Gambar 3.1 Panel Instrumen Proses Evaporasi

Sistem penggunaan alat ukur

Setiap instrumen dihubungkan dengan peralatan kalibrator sesuai karakteristik sinyal kerjanya. *Flow transmitter*, *pressure transmitter*, dan *level transmitter* diuji menggunakan injeksi arus referensi 4–20 mA, sedangkan sensor suhu diuji menggunakan injeksi nilai resistansi sesuai spesifikasi RTD. Kalibrator menjadi sumber sinyal pembanding, sementara pembacaan output instrumen diamati melalui tampilan lokal atau panel kontrol sistem. Konfigurasi koneksi dan

pembacaan dilakukan dalam kondisi lingkungan yang stabil untuk meminimalkan pengaruh eksternal.

Teknik Kalibrasi

Proses kalibrasi dilakukan melalui penginjeksian sinyal referensi pada *Setiap* instrumen, kemudian output yang terbaca dicatat pada lima titik uji: 4, 8, 12, 16, dan 20 mA untuk instrumen berbasis arus, serta beberapa titik resistansi untuk sensor suhu. *Setiap* titik uji diulang sebanyak empat kali untuk mendapatkan data variasi pengulangan. Hasil pengukuran dibandingkan dengan nilai standar untuk menentukan penyimpangan, konsistensi, dan stabilitas respon instrumen. Jika penyimpangan melebihi batas toleransi, dilakukan penyesuaian seperti *zero/span* atau *tuning parameter output*.

Rancangan Kegiatan Kalibrasi

Rancangan kegiatan kalibrasi mengikuti alur sistematis meliputi persiapan instrumen dan lingkungan kerja, penetapan rentang ukur dan titik referensi, pengambilan data pengukuran berulang, penyesuaian instrumen bila diperlukan, serta verifikasi *pasca-adjustment*. Seluruh tahapan dilakukan dengan prosedur yang konsisten untuk memastikan ketertelusuran dan reproduibilitas data. Hasil akhir percobaan didokumentasikan untuk menjadi dasar evaluasi performa instrumen dan siklus kalibrasi berikutnya.

Hasil dan Pembahasan

Kegiatan kalibrasi internal dilakukan terhadap 22 instrumen proses pada unit evaporasi limbah radioaktif cair IPLR-BRIN selama periode 3 Agustus – 22 September 2025. *Setiap* titik uji dilakukan 4 kali pengukuran ulang untuk menilai konsistensi pembacaan.

Berdasarkan hasil kegiatan kalibrasi internal, seluruh instrumen pada sistem evaporasi menunjukkan penyimpangan yang sangat kecil terhadap nilai acuan awal yang digunakan saat komisioning fasilitas. Estimasi ketidakpastian pengukuran berulang pada sebagian besar instrumen juga berada pada nilai yang sangat rendah—banyak yang mendekati nol—yang mengindikasikan bahwa variasi acak selama pengujian hampir tidak terjadi. Kondisi ini menunjukkan bahwa instrumen masih memiliki presisi pengulangan yang tinggi, karakteristik respon yang tetap linear, dan tidak mengalami drift yang berarti sejak awal beroperasi. Secara keseluruhan, dari 22 instrumen yang diuji, seluruhnya dinyatakan bekerja dengan baik dan masih layak digunakan untuk operasi evaporasi. Ringkasan hasil kalibrasi ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Kegiatan Kalibrasi Internal Instrumen Proses Unit Evaporasi

N o	Kode Instrumen	Jenis Instrumen / Fungsi	Status Kalibrasi	Keterangan
1	FR 22001	Flow Recorder – Laju Umpan Limbah	Layak operasi	Penyimpangan & u kecil (≈ 0)
2	FLA 22001	Alarm Flow Umpan Limbah	Layak operasi	Set/reset bekerja normal
3	FR 62501	Flow Recorder Umpan Steam	Layak operasi	Respon linear
4	FLA 62501	Alarm Flow Steam	Layak operasi	Set 320 kg/jam, reset 520 kg/jam
5	LHA 22010	High Level Alarm Kolom Penenang	Layak operasi	Set 74%, reset 73%
6	LLLA 22010	Low Level Alarm Kolom Penenang	Layak operasi	Set 11%, reset 12%
7	LT 2206A	Level Transmitter Tangki Destilat A	Layak operasi	Penyimpangan kecil
8	LHA 2206A	High Level Alarm Destilat A	Layak operasi	Set 98%, reset 95%
9	LT 2206B	Level Transmitter Tangki Destilat B	Layak operasi	Respon stabil
10	LHA 2206B	High Level Alarm Destilat B	Layak operasi	Set 98%, reset 95%
11	DR 22001	Densitas Konsentrasi	Layak operasi	Ketidakpastian ≤ 0.19
12	DHA 22001	Alarm Densitas Konsentrasi	Layak operasi	Set 11.8 kg/m ³ , reset 11.5
13	FI 62201	Flow	Layak	Error kecil,

N o	Kode Instrumen	Jenis Instrumen / Fungsi	Status Kalibrasi	Keterangan
		Indicator Demin	operasi stabil	
14	FLA 62201	Alarm Flow Demin	Layak operasi	Set 72%, reset 87%
15	PR 22012	Pressure Recorder Kolom Penenang	Layak operasi	Tidak ada drift
16	PHA 22012	Alarm Tekanan Kolom Penenang	Layak operasi	Set 70%, reset 63%
17	LT 22004	Level Tangki Konsentrasi	Layak operasi	Linear terhadap input
18	LHA 22004	High Level Alarm Konsentrasi	Layak operasi	Set 93%, reset 83%
19	E 62501	Temperatur Shell Side Evaporator	Layak operasi	Ketidakpastian rendah
20	THA 62501	Alarm Temperatur Steam	Layak operasi	Set 147°C, reset 146.8°C
21	E 22003	Temperatur Condenser	Layak operasi	Respon stabil
22	THA 22003	Alarm Temperatur Condenser	Layak operasi	Set 75°C, reset 74.5°C

5. Kesimpulan

Kegiatan kalibrasi internal terhadap 22 instrumen proses pada unit evaporasi IPLR-BRIN menunjukkan bahwa seluruh instrumen berada dalam kondisi kerja yang baik dan layak digunakan untuk operasi pengolahan limbah radioaktif cair. Penyimpangan pengukuran terhadap nilai acuan komisioning berada pada rentang yang sangat kecil, sedangkan estimasi ketidakpastian pengukuran berulang didominasi oleh nilai mendekati nol. Kondisi ini mengindikasikan bahwa instrumen masih memiliki presisi tinggi, respons yang linear, dan

tidak menunjukkan adanya *drift* signifikan selama masa operasi fasilitas.

Hasil pengujian juga memastikan bahwa seluruh sistem *alarm* meliputi parameter level, tekanan, suhu, dan densitas masih bekerja pada nilai *set* dan *reset* yang sesuai dengan batas keselamatan proses. Hal ini penting karena sistem *alarm* merupakan lapisan proteksi langsung terhadap terjadinya deviasi proses yang dapat menimbulkan kondisi operasi tidak aman. Dengan berfungsinya *alarm* sesuai spesifikasi, integritas sistem proteksi fasilitas tetap terjaga.

Secara keseluruhan, hasil kalibrasi internal ini menegaskan bahwa keandalan instrumen proses pada unit evaporasi masih memenuhi persyaratan teknis dan keselamatan yang dipersyaratkan dalam pengoperasian fasilitas nuklir. Kondisi ini sejalan dengan ketentuan badan pengawas—BAPETEN—yang mewajibkan pengendalian sistem instrumen, verifikasi fungsi proteksi, serta pemeliharaan berkala untuk memastikan fasilitas nuklir tetap dalam batas keselamatan yang diterima. Dengan demikian, kalibrasi rutin tidak hanya memastikan akurasi pengukuran, tetapi juga berfungsi sebagai bagian penting dari pemenuhan regulasi keselamatan radiasi dan jaminan proteksi lingkungan dalam jangka panjang.

Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih kepada tim *Media Energy Supply* (MES)-IPLR yang telah membantu pelaksanaan kegiatan kalibrasi internal serta menyediakan akses terhadap data instrumen proses evaporator. Penghargaan juga diberikan kepada Direktorat Fasilitas Ketenaganukliran atas dukungan fasilitas yang memungkinkan kegiatan kalibrasi internal ini berjalan dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1] Senduk, P., Danes, V. R., & Rumampuk, J. F. (2015). Penggunaan Radioisotop Pada Deteksi Dini Penyakit Kanker. *Jurnal E-Biomedik*, 3(2), 3–6. <https://doi.org/10.35790/ebm.3.2.2015.8549>
- [2] Islami rad, S. Z., & Peyvandi, R. G. (2025). A simple and inexpensive design of radioactive source for accurate level and height gauging in petrochemical industries. *Measurement: Sensors*, 38(August 2024), 101817. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2025.101817>
- [3] Badan RiSet dan Inovasi Nasional. (2022, 13 Agustus). *Pengelolaan limbah radioaktif BRIN, satu-satunya di Indonesia*. <https://www.brin.go.id/news/110239/pengelolaan-limbah-radioaktif-brin-satu-satunya-di-indonesia>
- [4] Pemerintah Republik Indonesia. (2013). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2013 Nomor 159, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 5451. <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/5408/pp-no-61-tahun-2013>
- [5] Setyawan, A., Purwantara, Hendro, Muziyawati, A., Miswanto, Darmawan, S., Mas'udi, Nurhasyim, & Sugito, B. (2020). *Pengelolaan limbah radioaktif dan bahan berbahaya dan beracun di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif*. Prosiding Hasil Penelitian dan Kegiatan PTLR Tahun 2020, 21–28.
- [6] Budianti, A., Erwandi, D., & Romli, M. (2023). PENETAPAN PRIORITAS PEMELIHARAAN FASILITAS EVAPORATOR LIMBAH RADIOAKTIF CAIR MELALUI STUDI HAZOP DAN FAILURE RATE. *Jurnal Kesehatan Tambusai*, 4(2), 2168-2179. <https://doi.org/10.31004/jkt.v4i2.16153>
- [7] Pramono, E. Y., & Yusmaman, W. M. (2024, November 16). *Dampak limbah radioaktif terhadap lingkungan dan upaya mitigasi risikonya*. Dalam Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumihan SATU BUMI: Tantangan Pengelolaan Lingkungan Industri Menuju Net Zero Emission. Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, UPN “Veteran” Yogyakarta.
- [8] IAEA. (2003). *Treatment of Liquid Effluents in Nuclear Facilities* (Technical Reports Series No. 421). Vienna: International Atomic Energy Agency.
- [9] Sugito, B., Bernadi, Y., Budiyo, & Masudi. (2018). *Pengolahan limbah radioaktif cair dengan metode evaporasi di Instalasi Pengelolaan Limbah Radioaktif*. Prosiding Hasil Penelitian dan Kegiatan PTLR Tahun 2018.
- [10] ISO/IEC. (1993). *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*. ISO.
- [11] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*

(GUM 1995 with minor corrections).
JCGM 100:2008.
https://www.bipm.org/documents/20126/2/071204/JCGM_100_2008_E.pdf