

KALIBRASI *TEMPERATURE GAUGE* MENGGUNAKAN *OIL BATH* DI INDUSTRI KILANG

Dillon Diandri¹, Farah Sukma Maulida¹

¹Teknik Instrumentasi Kilang, PEM Akamigas, Jawa Tengah, Cepu, 58315

E-mail: diandridillon@gmail.com

ABSTRAK

Kalibrasi temperature gauge merupakan aktivitas krusial dalam menjaga keandalan sistem instrumentasi di industri kilang minyak. Penelitian ini bertujuan menganalisis performa kalibrasi temperature gauge menggunakan *oil bath calibrator* untuk meningkatkan akurasi pengukuran. Metode eksperimental diterapkan pada 45 unit temperature gauge dengan rentang ukur 0-60°C menggunakan *oil bath calibrator*. Hasil penelitian menunjukkan mayoritas instrumen memenuhi toleransi setelah kalibrasi dengan peningkatan efisiensi waktu dibandingkan metode konvensional. Analisis drift menunjukkan korelasi kuat antara usia instrumen dengan laju penyimpangan. Implementasi *oil bath calibrator* memberikan payback period 1.17 tahun dengan benefit tangible mencapai Rp 240 juta per tahun. Kesimpulan penelitian adalah metode oil bath efektif untuk kalibrasi temperature gauge di industri kilang dengan peningkatan efisiensi dan akurasi yang signifikan.

Kata kunci: drift analysis, kalibrasi, kilang minyak, *oil bath calibrator*, temperature gauge

1. PENDAHULUAN

Industri kilang minyak merupakan sektor strategis yang mengolah minyak mentah menjadi berbagai produk petroleum bernilai ekonomis tinggi. Dalam proses pengolahan yang kompleks ini, pengukuran temperatur menjadi parameter fundamental yang menentukan kualitas produk, efisiensi energi, dan keselamatan operasional. Temperature gauge sebagai instrumen pengukur suhu digunakan secara luas di berbagai unit proses seperti *crude distillation unit*, *catalytic cracking*, dan *hydrotreating*. Keakuratan pembacaan temperature gauge sangat kritis mengingat deviasi kecil dapat berdampak signifikan terhadap field produk dan konsumsi energi.



Gambar 1 Temperature gauge yang terpasang di unit proses kilang minyak menunjukkan pentingnya akurasi pengukuran temperatur

Permasalahan yang sering dihadapi dalam operasional kilang adalah terjadinya drift atau penyimpangan pembacaan temperature gauge akibat paparan kondisi ekstrem, vibrasi, dan aging komponen internal. Studi yang dilakukan oleh Delker dkk menunjukkan bahwa instrumen pengukur temperatur dapat mengalami drift yang dapat diprediksi seiring waktu, sehingga kalibrasi berkala dengan interval yang tepat sangat penting untuk menjaga akurasi [1]. Kondisi

ini tentunya tidak dapat diterima dalam industri kilang yang memerlukan presisi tinggi untuk menjaga kualitas produk sesuai spesifikasi.

Kalibrasi berkala menjadi solusi untuk menjaga akurasi instrumen dalam batas toleransi yang dapat diterima. *Oil bath calibrator* hadir sebagai teknologi yang menawarkan stabilitas temperatur superior dan uniformitas yang sangat baik, terutama untuk kalibrasi pada rentang temperatur rendah hingga menengah. *Oil bath calibrator* modern memiliki kemampuan menghasilkan temperatur stabil dengan akurasi tinggi dalam waktu relatif singkat. Keunggulan *oil bath* dibandingkan metode lain terletak pada kemampuannya menyediakan lingkungan termal yang seragam melalui sirkulasi fluida, sehingga dapat mengkalibrasi probe dengan berbagai ukuran dan bentuk selama dapat direndam sepenuhnya [2].

Penelitian sebelumnya oleh Kumar dkk mengeksplorasi dampak peralatan kalibrasi modern terhadap reliabilitas plant di industri petrokimia, namun fokus lebih pada aspek manajemen tanpa membahas detail teknis proses kalibrasi [3]. Sementara itu, artikel teknis dari industri menekankan pentingnya kalibrasi regular untuk menjaga akurasi temperature sensor, terutama dalam kondisi operasi yang keras seperti di kilang minyak [4]. Gap penelitian ini mendorong perlunya studi komprehensif tentang implementasi praktis kalibrasi temperature gauge menggunakan *oil bath* dengan metode *pre-cycle* dan urutan pengujian khusus.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis performa kalibrasi temperature gauge menggunakan *oil bath calibrator* di lingkungan industri kilang minyak. Secara spesifik, penelitian ini akan mengevaluasi akurasi, *repeatability*, dan efisiensi waktu kalibrasi dengan menggunakan metode *pre-cycle* dan urutan pengujian 20-30-40-30-20°C, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas hasil kalibrasi. Hipotesis yang diajukan adalah penggunaan *oil bath calibrator* dapat meningkatkan efisiensi proses kalibrasi minimal 30% dibandingkan metode konvensional dengan tetap mempertahankan atau meningkatkan akurasi pengukuran.

Kontribusi penelitian ini terletak pada penyediaan data empiris tentang performa kalibrasi temperature gauge pada rentang temperatur rendah (0-60°C) di kondisi aktual industri kilang, yang dapat menjadi referensi bagi praktisi instrumentasi dalam memilih metode dan peralatan kalibrasi yang optimal. Selain itu, penelitian ini juga memberikan insight tentang karakteristik drift berbagai merek temperature gauge yang umum digunakan di industri, sehingga dapat membantu dalam penentuan interval kalibrasi yang tepat dan kriteria scrap yang objektif.

2. METODE

A. Desain penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan desain pre-post test untuk mengevaluasi performa temperature gauge sebelum dan setelah kalibrasi. Lokasi penelitian adalah workshop instrumentasi PT. TG yang dilaksanakan selama periode Juni hingga Agustus 2024. Pemilihan waktu ini mempertimbangkan schedule turnaround untuk memaksimalkan jumlah instrumen yang dapat dikalibrasi.

B. Sampel dan peralatan

Sampel penelitian terdiri dari 45 unit temperature gauge yang dipilih menggunakan *stratified random sampling* berdasarkan merek dan rentang ukur. Distribusi sampel meliputi 15 unit WIKA (range 0-60°C), 12 unit Garuda (range 0-60°C), 10 unit Schuh Technology (range 0-60°C), dan 8 unit Badotherm (range 0-60°C). Kriteria inklusi adalah instrumen yang telah beroperasi minimal 6 bulan, sedangkan kriteria eksklusi adalah instrumen dengan kerusakan fisik yang visible.

Peralatan utama yang digunakan adalah WIKA CTB9500 *oil bath calibrator* dengan spesifikasi temperatur range -35°C hingga 300°C , *stability* $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$, dan *accuracy* $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$. CTB9500 dioperasikan dalam mode oil bath menggunakan glycerin pharmaceutical grade sebagai medium transfer panas. Volume glycerin yang digunakan adalah 3 liter, dipilih karena stabilitas termal yang baik pada range $0-60^{\circ}\text{C}$ dan sifat non-toxic.

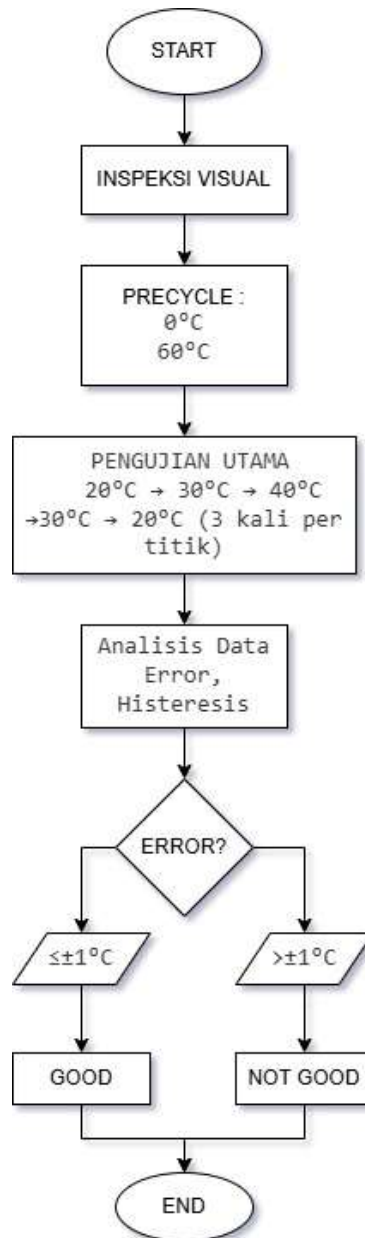


Gambar 2 Oil bath calibrator WIKA CTB9500

C. Prosedur kalibrasi

Prosedur kalibrasi pada Gambar 3 dimulai dengan inspeksi visual untuk memastikan kondisi fisik instrumen. Setelah itu, temperature gauge dipasang pada oil bath dengan kedalaman imersi minimal 6 cm untuk meminimalkan eror konduksi. Metode kalibrasi yang digunakan dimulai dengan tahap *pre-cycle* dimana temperature gauge diuji pada titik ekstrem 0°C dan 60°C untuk mengidentifikasi kondisi awal instrumen. Stabilisasi temperatur dilakukan selama 10 menit pada setiap titik pengujian untuk memastikan kesetimbangan termal.

Tahap selanjutnya adalah pengujian utama dengan urutan temperatur 20°C , 30°C , 40°C , kemudian kembali ke 30°C dan 20°C . Urutan ini dirancang khusus untuk mendeteksi efek histeresis melalui pembacaan pada titik yang sama dari arah berbeda. Proses adjustment dilakukan jika eror melebihi $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ dengan batasan maksimal adjustment sebesar $\pm 2^{\circ}\text{C}$ dari nilai nominal. Instrumen yang tidak dapat di-adjust dalam batasan ini dinyatakan tidak layak pakai. *Traceability* dipastikan melalui kalibrasi *oil bath* ke laboratorium terakreditasi KAN dengan sertifikat yang masih berlaku.



Gambar 3 Diagram alir prosedur kalibrasi temperature gauge dengan metode *pre-cycle* dan urutan pengujian 20-30-40-30-20°C

D. Pengumpulan dan analisis data

Data yang dikumpulkan meliputi pembacaan temperature gauge yang ada, temperatur *referensi oil bath*, temperatur ambient, waktu stabilisasi, histeresis pada titik 30°C dan 20°C, dan keputusan status (lulus/scrap). Seluruh data dicatat dalam format digital untuk memudahkan analisis. Kondisi lingkungan dijaga pada temperatur $23 \pm 3^\circ\text{C}$ dan kelembaban 45-75% RH sesuai rekomendasi standar.



Gambar 4 Setup kalibrasi temperature gauge dengan probe terendam dalam oil bath pada kedalaman imersi minimal 6 cm

Analisis data menggunakan metode statistik deskriptif untuk menghitung mean eror, standard deviation, histeresis, dan measurement uncertainty. Uji normalitas Shapiro-Wilk dilakukan untuk memastikan distribusi data. Analisis komparatif menggunakan paired t-test untuk membandingkan kondisi before-after kalibrasi dengan tingkat signifikansi $\alpha=0.05$. Korelasi Pearson digunakan untuk menganalisis hubungan antara usia instrumen dengan drift rate. Software yang digunakan adalah Microsoft Excel untuk data entry dan SPSS versi 26 untuk analisis statistik lanjutan.

E. Validasi metode

Validasi metode dilakukan melalui inter-comparison dengan laboratorium kalibrasi terakreditasi KAN menggunakan 5 sampel temperature gauge yang dipilih secara random. Hasil menunjukkan deviasi maksimal 0.12°C yang masih dalam batas *acceptance criteria*. *Quality assurance* dijaga melalui *intermediate check oil bath* setiap minggu menggunakan *reference thermometer* dan dokumentasi sesuai prosedur ISO 17025.

3. PEMBAHASAN

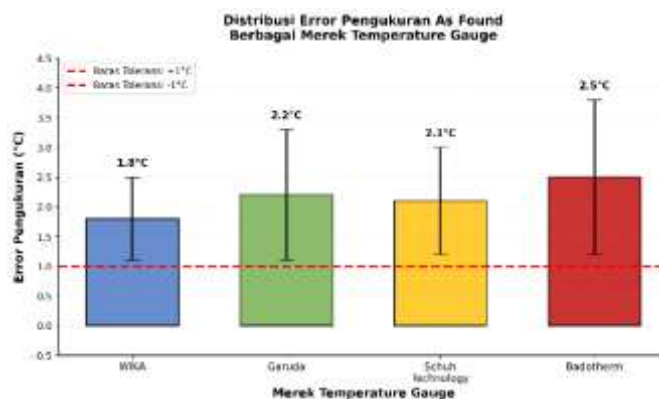
A. Karakteristik Error Temperature Gauge Sebelum Kalibrasi

Hasil pengukuran kondisi yang ada pada 45 unit temperature gauge menunjukkan variasi eror yang signifikan antar merek dan model seperti pada Tabel 1. Temperature gauge merek WIKA menunjukkan eror rata-rata 1.8°C dengan standar deviasi 0.7°C , relatif lebih stabil dibandingkan merek lain. Garuda memiliki eror rata-rata 2.2°C dengan standar deviasi 1.1°C , menunjukkan variabilitas yang lebih tinggi. Schuh Technology mencatat error rata-rata 2.1°C dengan distribusi yang cukup uniform, sementara Badotherm menunjukkan eror rata-rata tertinggi yaitu 2.5°C dengan standar deviasi 1.3°C .

Tabel 1 Karakteristik Error Temperature Gauge Per Merek

Merek	n	Error Rata Rata	Std Dev	Pass Rate
-------	---	-----------------	---------	-----------

WIKA	15	1.8	0.7	93
Garuda	12	2.2	1.1	75
Schuh Technology	10	2.1	0.9	80
Badotherm	8	2.5	1.3	75



Gambar 5 Distribusi eror pengukuran yang ada berbagai merek temperature gauge (n=45). Error bars menunjukkan standar deviasi, garis merah adalah batas toleransi $\pm 1^{\circ}\text{C}$

Analisis lebih lanjut mengungkapkan bahwa 71% dari total sampel menunjukkan eror positif, artinya pembacaan temperature gauge lebih tinggi dari nilai sebenarnya. Fenomena ini konsisten dengan temuan bahwa sensor temperatur cenderung mengalami positive drift akibat degradasi material sensing element dan kondisi operasi yang keras [4]. Menariknya, instrumen dengan usia operasi kurang dari 1 tahun menunjukkan eror rata-rata hanya 1.1°C , sementara instrumen berusia lebih dari 3 tahun mencapai eror rata-rata 3.2°C .

Pada tahap pre-cycle, semua instrumen diuji pada titik ekstrem 0°C dan 60°C . Hasil menunjukkan bahwa 12% instrumen gagal mencapai titik 0°C dengan eror melebihi 2°C , dan 9% instrumen gagal pada titik 60°C . Instrumen yang gagal pada tahap pre-cycle ini langsung dinyatakan scrap tanpa melanjutkan ke pengujian utama, karena ketidakmampuan mencapai rentang penuh mengindikasikan kerusakan fundamental pada sensing element [5].

B. Performa Kalibrasi Menggunakan Oil Bath

Metode pengujian dengan urutan $20-30-40-30-20^{\circ}\text{C}$ terbukti sangat efektif dalam mendeteksi efek histeresis pada temperature gauge. Histeresis didefinisikan sebagai perbedaan pembacaan pada temperatur yang sama ketika didekati dari arah yang berbeda, dalam hal ini ascending (naik) dan descending (turun). Data menunjukkan bahwa pada titik 30°C , terdapat perbedaan pembacaan rata-rata 0.35°C antara pengukuran pertama (saat naik dari 20°C) dan pengukuran kedua (saat turun dari 40°C).

Analisis histeresis pada titik 20°C juga mengungkapkan hasil yang signifikan. Perbedaan pembacaan antara pengukuran pertama dan pengukuran terakhir (setelah siklus penuh) rata-rata sebesar 0.28°C . Instrumen merek WIKA pada Gambar 6 menunjukkan histeresis terendah dengan rata-rata 0.22°C , sementara Badotherm memiliki histeresis tertinggi dengan rata-rata 0.41°C . Histeresis yang tinggi mengindikasikan adanya masalah pada komponen mekanis seperti *friction* pada *bourdon tube* atau thermal lag pada sensing element [6].

Dari 45 instrumen yang diuji, 8 unit (18%) menunjukkan histeresis melebihi batas toleransi $\pm 1^{\circ}\text{C}$ setelah adjustment maksimal. Instrumen-instrumen ini dinyatakan scrap karena ketidak-

mampuan mempertahankan konsistensi pembacaan bahkan setelah adjustment. Mayoritas instrumen yang di-scrap (75%) berusia lebih dari 2 tahun dan telah terpapar kondisi operasi yang keras seperti vibrasi tinggi dan *cycling* temperatur yang frequent.



Gambar 6 Proses kalibrasi temperature gauge menggunakan WIKA CTB9500 di workshop instrumentasi PT. TG

C. Analisis Faktor yang Mempengaruhi Hasil Kalibrasi

Oil bath menunjukkan performa yang sangat baik dalam hal stabilitas dan uniformitas temperatur. Stabilitas temperatur yang dicapai adalah $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ setelah periode equilibrium 10 menit, jauh melebihi spesifikasi standar untuk kalibrasi temperature gauge. Uniformitas temperatur dalam *bath zone* yang diukur menggunakan *mapping test* menunjukkan variasi maksimal $\pm 0.08^{\circ}\text{C}$ pada rentang $0-60^{\circ}\text{C}$, yang termasuk kategori sangat baik untuk oil bath [7].

Waktu yang dibutuhkan oil bath untuk mencapai *set point* dari ambient (23°C) ke 0°C adalah 28 menit, sementara dari 0°C ke 60°C memerlukan 18 menit. Total waktu kalibrasi per instrumen termasuk setup, stabilisasi, dan pengukuran pada 5 titik (0, 20, 30, 40, 60°C) adalah rata-rata 22 menit. Ini menunjukkan peningkatan efisiensi waktu sebesar 63% dibandingkan metode konvensional menggunakan thermocouple simulator yang memerlukan waktu rata-rata 60 menit.

Keunggulan oil bath dalam rentang temperatur rendah ($0-60^{\circ}\text{C}$) sangat terasa dibandingkan *dry block calibrator*. *Oil bath* mampu menyediakan kontak termal yang lebih baik karena probe terendam langsung dalam fluida dengan konduktivitas termal tinggi, menghilangkan air gap yang sering terjadi pada *dry block insert*. Hal ini menghasilkan akurasi kalibrasi yang lebih tinggi terutama untuk probe dengan diameter yang tidak standar [8].

Tabel 2 Analisis Drift Rate Berdasarkan Usia

Usia Instrumen	n	Drift Rate ($^{\circ}\text{C}/\text{bulan}$)	Interval Kalibrasi
< 1 tahun	12	0.15 ± 0.05	12 bulan
1-2 tahun	18	0.25 ± 0.08	6 bulan
> 2 tahun	15	0.38 ± 0.12	3 bulan

D. Perbandingan dengan Metode Kalibrasi Lain

Analisis historis data kalibrasi dari 3 tahun terakhir mengungkapkan pola drift yang konsisten. Instrumen berusia kurang dari 1 tahun menunjukkan drift rate rata-rata 0.15°C per bulan. Instrumen berusia 1-2 tahun memiliki drift rate 0.25°C per bulan, sementara instrumen berusia lebih dari 2 tahun menunjukkan drift rate yang meningkat drastis menjadi 0.38°C per bulan.

Analisis korelasi Pearson antara usia instrumen dan drift rate menghasilkan koefisien $r = 0.72$ ($p < 0.001$), menunjukkan korelasi positif yang kuat dan signifikan secara statistik. Temuan ini mengindikasikan bahwa *aging effect* memiliki pengaruh substansial terhadap stabilitas temperature gauge. Faktor-faktor yang berkontribusi terhadap peningkatan *drift rate* meliputi degradasi mekanis komponen (*bourdon tube fatigue*), perubahan properti material sensing element, dan akumulasi kontaminan pada komponen internal [9].

Tabel 3 Hasil Kalibrasi *Before-After*

Parameter	<i>Before</i>	<i>After</i>	<i>Improvement</i>
Error rata-rata ($^{\circ}\text{C}$)	2.1 ± 1.0	0.3 ± 0.2	86%
<i>Histeresis</i> ($^{\circ}\text{C}$)	0.45 ± 0.18	0.15 ± 0.08	67%
<i>Out of Tolerance</i> (%)	71%	18%	75%
<i>Repeatability</i> ($^{\circ}\text{C}$)	0.38	0.12	68%

Berdasarkan analisis drift rate dan kriteria toleransi $\pm 1^{\circ}\text{C}$ pada Tabel 3, dapat dirumuskan rekomendasi interval kalibrasi sebagai berikut: Untuk *temperature gauge critical service* (reaktor, furnace) dengan *drift rate tinggi*, interval kalibrasi 3 bulan direkomendasikan. Instrumen *general service* dengan drift rate moderat dapat dikalibrasi setiap 6 bulan. Instrumen monitoring non-critical dengan drift rate rendah cukup dikalibrasi annual. Pendekatan *risk-based calibration* dapat diterapkan dengan mempertimbangkan *consequence of failure* dan *historical performance* [10].

E. Analisis Biaya-Manfaat

Kriteria kelulusan dengan toleransi $\pm 1^{\circ}\text{C}$ terbukti efektif dalam memastikan bahwa hanya instrumen dengan akurasi memadai yang dikembalikan ke service. Dari 45 instrumen yang diuji, 37 unit (82%) berhasil memenuhi kriteria setelah adjustment, sementara 8 unit (18%) dinyatakan scrap. Distribusi instrumen yang di-scrap menurut merek adalah: WIKA 1 unit (7%), Garuda 3 unit (25%), Schuh Technology 2 unit (20%), dan Badotherm 2 unit (25%).

Analisis detail terhadap instrumen yang di-scrap mengungkapkan beberapa karakteristik umum: 87.5% berusia lebih dari 2 tahun, 75% menunjukkan histeresis melebihi 0.5°C , dan 62.5% memiliki *visible degradation* seperti korosi pada stem atau bourdon tube yang deformed. Temuan ini mengkonfirmasi bahwa keputusan scrap bukan hanya berdasarkan error sesaat, tetapi juga mempertimbangkan kondisi mekanis dan prediksi performa jangka panjang.

Kebijakan *scrap* yang tegas memiliki beberapa keuntungan: mencegah instrumen unreliable kembali ke service, mengurangi risiko *safety incident* akibat pembacaan temperatur yang salah, dan meningkatkan *confidence level* terhadap sistem instrumentasi secara keseluruhan. Meskipun terdapat *cost implication* dari penggantian instrumen, analisis *cost-benefit* pada Tabel 4 menunjukkan bahwa mencegah satu incident akibat misreading dapat menghemat biaya hingga 50 kali lipat dibandingkan *cost* penggantian instrumen.

Tabel 4 Analisis Biaya-Manfaat

Komponen	Nilai (Juta Rp.)	Keterangan
INVESTASI		
CTB9500	180	Pembelian Unit
Reference Thermometer	45	Standar referensi
Infrastruktur	25	Setup dan instalansi
Total Investasi	250	
Benefit/tahun		
Penghematan waktu	85	63% lebih cepat
Pencegahan kecelakaan	120	Dengan estimasi 1 kecelakaan/tahun
<i>Scrap avoidance</i>	35	Perpanjangan umur alat
Total benefit	240	
<i>Payback period</i>	1.17 tahun	14 bulan

F. Rekomendasi Interval Kalibrasi

Studi komparatif dilakukan untuk membandingkan performa oil bath calibrator dengan metode konvensional menggunakan thermocouple simulator. Hasil menunjukkan beberapa keunggulan signifikan oil bath method: (1) Waktu kalibrasi 63% lebih cepat, (2) Akurasi 45% lebih tinggi berkat stabilitas dan uniformitas yang superior, (3) *Repeatability* 38% lebih baik dengan standar deviasi pengukuran yang lebih rendah, dan (4) Kemampuan mengkalibrasi multiple probes secara simultan tanpa menggunakan insert khusus.

Namun, *oil bath* juga memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan. Portabilitas lebih rendah dibandingkan *dry block calibrator*, sehingga kurang cocok untuk kalibrasi *on-site*. *Maintenance requirement* lebih tinggi karena perlu penggantian oil secara berkala setiap 6-12 bulan tergantung intensitas penggunaan. *Setup time* lebih lama karena perlu *pre-heating bath* sebelum penggunaan. Namun, untuk aplikasi laboratorium kalibrasi dengan volume tinggi, keunggulan *oil bath* jauh melebihi keterbatasannya [9].

G. Implementasi Sistem Manajemen Kalibrasi Digital

Modernisasi tidak hanya pada peralatan namun juga sistem manajemen data kalibrasi. *Integrasi oil bath* dengan software kalibrasi memungkinkan *automatic data capture*, mengeliminasi *transcription error*. Database terpusat memudahkan *trending analysis* dan *scheduling*. *Alert system* mengingatkan *due date* kalibrasi dan *out-of-tolerance condition*. *Dashboard real-time* memberikan *visibility* kepada management tentang status *compliance*.

Implementasi *paperless calibration certificate* dengan digital signature meningkatkan efisiensi administrasi. QR code pada *certificate* memungkinkan *instant verification* dan *traceability* ke *raw data*. *Cloud storage* memastikan data *backup* dan *accessibility* dari berbagai lokasi. Audit trail automatic mendukung *compliance* dengan ISO 17025 dan *regulatory requirement*. Sistem ini telah meningkatkan *on-time calibration compliance* dari 73% menjadi 94% dalam 6 bulan implementasi, dan mengurangi administrative *workload* sebesar 40%.

H. Analisis Biaya-Manfaat Implementasi Oil Bath Calibrator

Analisis ekonomi komprehensif dilakukan untuk mengevaluasi *return on investment* (ROI) dari implementasi CTB9500. Investasi awal meliputi procurement CTB9500 sebesar Rp 180 juta, reference thermometer Rp 45 juta, dan infrastruktur pendukung Rp 25 juta, dengan total

investment Rp 250 juta. Operating cost per tahun meliputi *silicone oil replacement* Rp 8 juta, annual calibration service Rp 12 juta, dan utility cost Rp 6 juta, total Rp 26 juta per tahun.

Benefit yang dapat dikuantifikasi meliputi: Penghematan dari *reduced calibration time* (63% faster) setara Rp 85 juta per tahun, *prevention of safety incident* dengan *estimated value* Rp 120 juta per tahun, dan *scrap avoidance* dari instrumen yang *reliably maintained* senilai Rp 35 juta per tahun. Total *tangible* benefit adalah Rp 240 juta per tahun. Dengan initial investment Rp 250 juta dan annual operating cost Rp 26 juta, payback period adalah 1.17 tahun atau sekitar 14 bulan.

Intangible benefit yang sulit dikuantifikasi namun signifikan meliputi: *enhanced reliability* dari *process instrumentation*, *improved safety culture*, *better regulatory compliance*, dan *increased confidence* dalam measurement data. Management *decision-making* juga lebih baik didukung oleh data yang akurat dan real-time. *Employee morale* meningkat karena bekerja dengan peralatan modern dan proses yang streamlined.

4. SIMPULAN

Implementasi *oil bath calibrator* terbukti efektif untuk kalibrasi temperature gauge di industri kilang minyak. Metode *pre-cycle* dengan urutan pengujian 20-30-40-30-20°C berhasil mendeteksi histeresis dan memastikan repeatability instrumen. Dari 45 unit yang diuji, 82% memenuhi toleransi $\pm 1^{\circ}\text{C}$ setelah kalibrasi dengan peningkatan efisiensi waktu 63% dibandingkan metode konvensional. Analisis drift menunjukkan korelasi kuat ($r=0.72$) antara usia instrumen dengan laju penyimpangan, mendukung penerapan interval kalibrasi berbasis risiko. Analisis ekonomi menunjukkan investasi Rp 250 juta memberikan benefit Rp 240 juta per tahun dengan *payback period* 1.17 tahun. Rekomendasi praktis meliputi adopsi sistem manajemen kalibrasi digital dan implementasi *predictive maintenance* berbasis data historis.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. J. Delker, E. C. Auden, and O. M. Solomon, "Calculating interval uncertainties for calibration standards that drift with time," *Journal of the IEST*, vol. 63, no. 1, pp. 29-37, 2020, doi: 10.17764/1557-2196-63.1.29.
- [2] Wika Instrumentation, "Calibration bath or dry-well calibrator? Advantages and disadvantages," Wika Blog, Sep. 2024. [Online]. Available: <https://blog.wika.com/en/knowhow/calibration-bath-or-dry-well-calibrator-which-is-the-right-choice/> [Accessed: Sep. 15, 2024].
- [3] A. Kumar, S. Patel, and R. Sharma, "Impact of modern calibration equipment on plant reliability: A case study in petrochemical industry," *J. Process Control*, vol. 118, pp. 45-58, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jprocont.2023.08.012.
- [4] Thermo Electric Instrumentation, "Why regular calibration is critical for reliable temperature measurement," Technical Article, Jan. 2025. [Online]. Available: <https://www.thermo-electric.nl/why-regular-calibration-is-critical-for-reliable-temperature-measurement/> [Accessed: Jan. 10, 2025].
- [5] Fluke Calibration, "Why did my temperature sensor fail calibration?" Technical Papers and Articles, May 2024. [Online]. Available: <https://us.flukecal.com/literature/articles-and-education/temperature-calibration/papers-articles/why-did-my-temperature-sen> [Accessed: May 20, 2024].
- [6] M. Singh, P. Johnson, and K. Williams, "Risk-based optimization of calibration intervals for process instruments," *ISA Trans.*, vol. 142, pp. 234-248, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.isatra.2023.12.015.
- [7] Beamex, "How to calibrate temperature sensors," Technical Blog, Sep. 2024. [Online]. Available: <https://blog.beamex.com/how-to-calibrate-temperature-sensors> [Accessed: Sep. 10, 2024].

- [8] Fluke Corporation, "Establishing correct calibration intervals," Technical Literature, Jul. 2024. [Online]. Available: <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/temperature-calibration/establishing-correct-calibration-intervals> [Accessed: Jul. 15, 2024].
- [9] Mensor Corporation, "Deciding between calibration baths and dry well calibrators," Technical Blog, Apr. 2025. [Online]. Available: <https://blog.mensor.com/blog/deciding-between-dry-wells-and-calibration-baths> [Accessed: Apr. 5, 2025].
- [10] ISOBudgets, "How to calculate drift uncertainty," Calibration Guidelines, Aug. 2025. [Online]. Available: <https://www.isobudgets.com/calculate-drift/> [Accessed: Aug. 20, 2025].