

**SISTEM PENGUKURAN LOW WATER MASS FLOWRATE BERBASIS
LOAD CELL 10 KG
RANGKUMAN TESIS UNTUK KEPERLUAN PERPUSTAKAAN**

Disusun Oleh:

Gian Gustiana Gufron

248070004



Program Studi Magister Teknik Mesin

Universitas Pasundan

Bandung, 2026

Eksekutif

Tesis ini mengevaluasi sistem pengukuran laju massa air rendah (low water mass flowrate) berbasis load cell 10 kg dengan pendekatan gravimetri dinamis. Load cell 10 kg digunakan sebagai instrumen utama, sedangkan load cell 3 kg digunakan sebagai pembanding. Prinsip pengukuran dilakukan dengan merekam perubahan massa air yang tertampung terhadap waktu, kemudian mengestimasi laju massa melalui kemiringan regresi massa–waktu pada setiap run.

Sistem yang dikaji menggabungkan sensor, transmitter dengan keluaran arus 4–20 mA, modul input analog, komunikasi RS485/Modbus RTU, dan pencatatan komputer. Pengujian dikelompokkan ke dalam tujuh label target, yaitu 0,15; 0,30; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50; dan 2,20 g/s. Evaluasi meliputi model kalibrasi arus–massa, perilaku sinyal no-flow, estimasi slope, repeatability antar-run, perbandingan dengan load cell 3 kg, serta penelaahan keterbatasan data SYNMORE dan loading–unloading.

Kalibrasi load cell 10 kg menggunakan 40 titik menghasilkan model $m \text{ (g)} = 600,197304 X \text{ (mA)} - 2425,496345$, dengan $R^2 = 0,99998592$, $RMSE = 8,876 \text{ g}$, dan $MAE = 4,939 \text{ g}$. Rata-rata slope pengujian meningkat dari 0,1812 g/s pada label target 0,15 g/s menjadi 1,8881 g/s pada label target 2,20 g/s. CV antar-run dalam ringkasan utama berada pada rentang 0,55–7,60%.

Temuan mendukung penggunaan pendekatan gravimetri dinamis untuk mengestimasi laju massa air rendah pada konfigurasi yang diuji. Namun, penelitian tidak menyatakan akurasi absolut atau ketidakpastian total sebagai hasil yang telah terbukti. Verifikasi kanal akuisisi, validasi terhadap referensi laju massa independen, penanganan sampel di luar rentang kalibrasi, serta evaluasi ketidakpastian masih diperlukan.

BAB I. PENDAHULUAN DAN KONTEKS PENELITIAN

Latar Belakang

Pengukuran laju massa air pada nilai rendah memiliki tantangan karena perubahan massa dalam interval waktu pendek relatif kecil. Hasil pengukuran tidak hanya dipengaruhi oleh sensor, tetapi juga oleh pengondisian sinyal, resolusi dan kestabilan akuisisi, ketepatan timestamp, kondisi aliran, serta prosedur pengolahan data. Karena itu, evaluasi sistem perlu mencakup rancangan perangkat dan bukti yang mendukung validitas hasil.



Gambar 1.1. Rig pengujian gravimetri dinamis.

Metode gravimetri dinamis merupakan pendekatan yang menggunakan pertambahan massa fluida di dalam wadah sebagai dasar estimasi laju massa. Secara ideal, jika aliran relatif stabil, massa akan meningkat secara hampir linear terhadap waktu. Kemiringan garis regresi massa terhadap waktu menjadi estimasi laju massa rata-rata. Pendekatan ini tidak memerlukan flowmeter konvensional sebagai sumber nilai utama, tetapi tetap memerlukan kalibrasi, baseline yang stabil, dan waktu pencatatan yang valid.

Penelitian menggunakan load cell 10 kg sebagai instrumen utama dan load cell 3 kg sebagai pembanding. Label target digunakan untuk membedakan kondisi operasi yang diatur melalui valve. Label target bukan otomatis nilai referensi yang benar; hasil sensor harus diperlakukan sebagai estimasi pengukuran sampai dibandingkan dengan metode independen yang tertelusur.

Rumusan Masalah

Permasalahan penelitian mencakup hubungan pembacaan load cell 10 kg dengan massa standar pada rentang kalibrasi; karakteristik sinyal no-flow dan kaitannya dengan apparent flow; karakteristik slope massa terhadap waktu serta variasi antar-run pada tujuh label target; dan batas klaim yang dapat dibuat berdasarkan kalibrasi, repeatability, data SYNMORE, serta data loading–unloading.

Tujuan dan Manfaat

Tujuan utama adalah mengevaluasi sistem pengukuran laju massa air rendah berbasis load cell 10 kg melalui pendekatan gravimetri dinamis. Tujuan khususnya meliputi analisis model kalibrasi dan residual, karakterisasi no-flow, estimasi slope massa–waktu, evaluasi repeatability, dan perbandingan deskriptif dengan load cell 3 kg. Manfaat penelitian adalah menyediakan dasar teknis untuk pengembangan sistem pengukuran dan memperjelas pemeriksaan yang diperlukan sebelum klaim akurasi tertentu dibuat.

Ruang lingkup dibatasi pada fluida air, pengukuran berbasis perubahan massa terhadap waktu, tujuh label target 0,15 sampai 2,20 g/s, serta penggunaan load cell 10 kg sebagai instrumen utama. Data SYNMORE yang tersedia berupa pembacaan awal dan akhir, sedangkan data loading–unloading belum menyediakan pasangan titik yang cukup untuk menetapkan nilai hysteresis kuantitatif.

BAB II. LANDASAN TEORI DAN POSISI PENELITIAN

Pengukuran Laju Massa dan Gravimetri Dinamis

Laju massa merupakan perubahan massa terhadap waktu. Untuk interval pengukuran, laju massa rata-rata dapat ditentukan dari perubahan massa dibagi selang waktu. Dalam metode gravimetri, massa yang terkumpul diamati langsung, kemudian laju massa diestimasi dari kemiringan hubungan massa–waktu. Model regresi linear dapat ditulis sebagai $m(t) = a + bt + \epsilon(t)$, dengan b sebagai slope dan $\epsilon(t)$ sebagai residu.

Regresi menggunakan seluruh sampel pada interval analisis, tetapi kualitas hasil bergantung pada timestamp, kestabilan aliran, prosedur pengalihan, dan kondisi mekanik. Transien awal, percikan, limpasan, perubahan posisi selang, atau kontak selang dengan wadah dapat memengaruhi gaya yang diterima sensor. Nilai R^2 tinggi hanya menunjukkan kecocokan data terhadap model linear dan bukan bukti otomatis bahwa hasil laju massa benar.

Load Cell dan Kalibrasi

Load cell mengubah deformasi elemen elastis akibat beban menjadi sinyal listrik. Dalam sistem ini, sinyal diteruskan melalui transmitter dan direpresentasikan sebagai arus 4–20 mA. Persamaan konversi massa ditentukan dari pasangan arus dan massa standar untuk konfigurasi sensor, transmitter, kanal, serta skala yang digunakan. Model linear $m = aX + b$ memiliki sensitivitas a dan intersep b . Intersep tidak harus nol karena offset dan prosedur pemasangan dapat memengaruhi regresi.

Evaluasi kalibrasi perlu memperhatikan jumlah titik, rentang input, persamaan, R^2 , MAE, RMSE, residual maksimum, dan pola residual. Rentang kalibrasi menjadi batas penting: penerapan persamaan di luar rentang merupakan ekstrapolasi. Sampel di luar rentang perlu ditandai dan dianalisis sensitivitasnya, bukan diam-diam dihapus atau dipaksa ke batas kalibrasi.

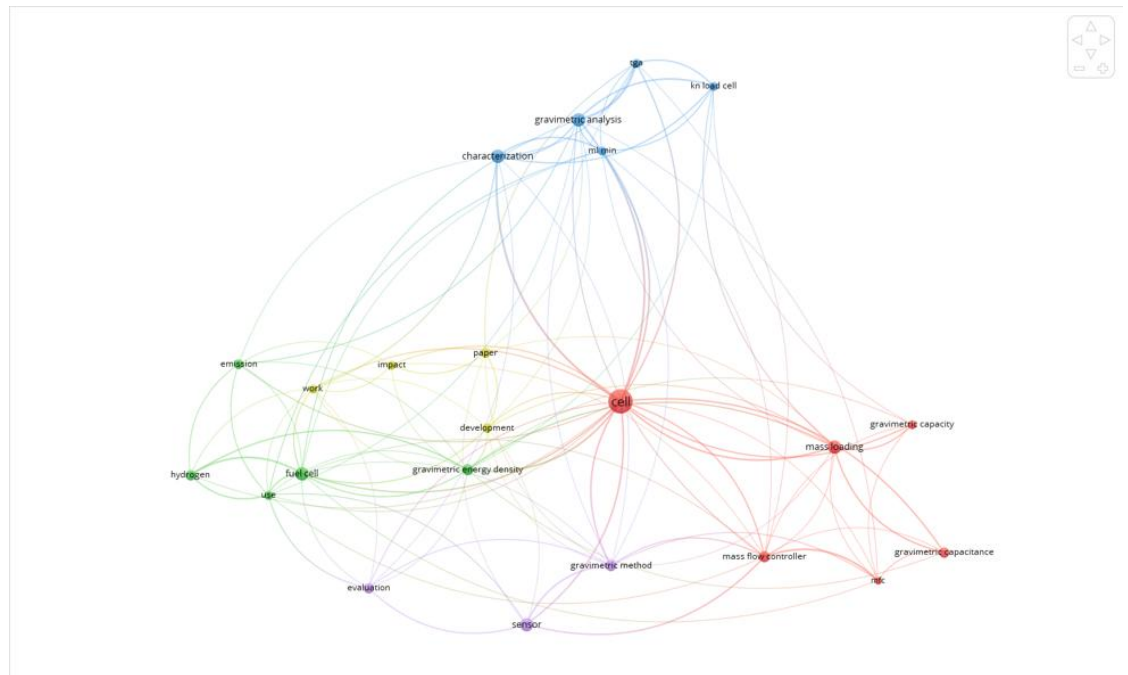
Repeatability, No-flow, dan Hysteresis

Repeatability dievaluasi dari sebaran slope antar-run. Simpangan baku menggambarkan variasi absolut, sedangkan CV membandingkan variasi relatif terhadap rata-rata. CV rendah menunjukkan hasil pengulangan lebih rapat, tetapi tidak membuktikan kedekatan terhadap nilai benar. Interval berbasis repeatability juga tidak sama dengan ketidakpastian total karena belum tentu mencakup kalibrasi, akuisisi, waktu, mekanik, dan referensi.

Pengujian no-flow membantu menilai noise dan perubahan baseline ketika tidak ada aliran yang disengaja. Hysteresis memerlukan perbandingan respons pada massa sama saat beban dinaikkan dan diturunkan. Satu lintasan massa menurun saja tidak cukup untuk memisahkan hysteresis dari drift, creep, atau perubahan kondisi.

Posisi Penelitian

Kontribusi penelitian ditempatkan sebagai karakterisasi eksperimental terpadu untuk konfigurasi yang diuji: menghubungkan kalibrasi arus–massa, sinyal no-flow, slope pada tujuh label target, repeatability antar-run, perbandingan sensor, serta batas interpretasi data. Penelitian tidak mengklaim menemukan prinsip gravimetri baru secara universal.



Gambar 2.1. Peta jaringan bibliometrik VOSviewer dari kajian awal.

BAB III. RANCANGAN DAN KONFIGURASI SISTEM

Rancangan Eksperimental

Penelitian merupakan eksperimen karakterisasi sistem, bukan eksperimen optimasi desain mekanik. Konfigurasi yang tersedia dipertahankan, sementara pengujian dilakukan pada berbagai kondisi target. Alur analisis meliputi audit berkas dan identitas kanal, evaluasi kalibrasi, pemeriksaan baseline no-flow, pemrosesan sinyal tiap run, estimasi slope, agregasi statistik, perbandingan deskriptif dengan sensor 3 kg, dan analisis sensitivitas.

Konfigurasi Hidrolik

Sistem hidrolik terdiri atas sumber air, tangki constant-head dengan overflow, valve pengatur aliran, saluran atau selang keluaran, dan wadah penampung di atas load cell. Tangki constant-head dimaksudkan untuk mengurangi perubahan tinggi tekan selama pengujian. Valve digunakan untuk mengatur kondisi aliran, sedangkan wadah penampung mengubah aliran massa menjadi pertambahan massa yang diamati sensor.



Gambar 3.1. Konfigurasi sistem pengukuran gravimetri dinamis.

Sebelum pencatatan, aliran diarahkan ke jalur waste sampai kondisi dianggap stabil. Setelah itu, aliran dialihkan ke collection vessel untuk merekam pertambahan massa. Tahap pengalihan merupakan bagian sensitif karena transien awal atau perbedaan waktu pengalihan dapat memengaruhi slope. Konsistensi posisi selang, jarak ujung selang terhadap wadah, posisi wadah, dan waktu mulai pencatatan perlu dijaga.

Sambungan mekanik antara selang dan wadah perlu diperhatikan karena gaya tarik atau sentuhan dapat terbaca sebagai gaya tambahan oleh load cell. Percikan, air yang menempel di bagian luar, dan perubahan posisi wadah juga berpotensi mengubah hasil. Kondisi tersebut merupakan sumber gangguan potensial yang perlu dipertimbangkan ketika membahas residual atau variasi antar-run.

Rantai Akuisisi Data

Rantai akuisisi yang didokumentasikan meliputi load cell, transmitter DAPRA WXD-D70, modul input analog Waveshare 8CH(B), komunikasi RS485/Modbus RTU, serta komputer dengan perangkat lunak Modbus Poll. Keluaran transmitter berupa arus 4–20 mA dibaca oleh modul input analog dan disimpan sebagai log. Setiap tahapan dapat menambahkan offset, resolusi terbatas, noise, atau kesalahan skala sehingga seluruh rantai diperlakukan sebagai satu sistem ukur.



Gambar 3.2. Dokumentasi perangkat dan setup akuisisi data.

Identitas kanal pada kalibrasi dan eksperimen harus diverifikasi melalui penelusuran kabel, kanal fisik, register Modbus, format data, satuan, dan perbandingan terhadap indikator atau sumber referensi yang tersedia. Kesamaan satuan mA saja tidak menjamin bahwa kanal yang digunakan sama. Jika pemetaan belum terkonfirmasi, hasil konversi massa dan slope harus dibaca secara bersyarat.

Timestamp aktual digunakan sebagai variabel waktu dalam regresi. Audit mencakup pengurutan timestamp, deteksi nilai duplikat, jeda pencatatan, jumlah sampel, durasi aktual, dan nilai sinyal yang tidak wajar. Nama file serta jumlah sampel berfungsi sebagai metadata, bukan bukti tunggal bahwa setiap file merupakan pengulangan independen.

BAB III. TARGET, KALIBRASI, DAN PROSEDUR

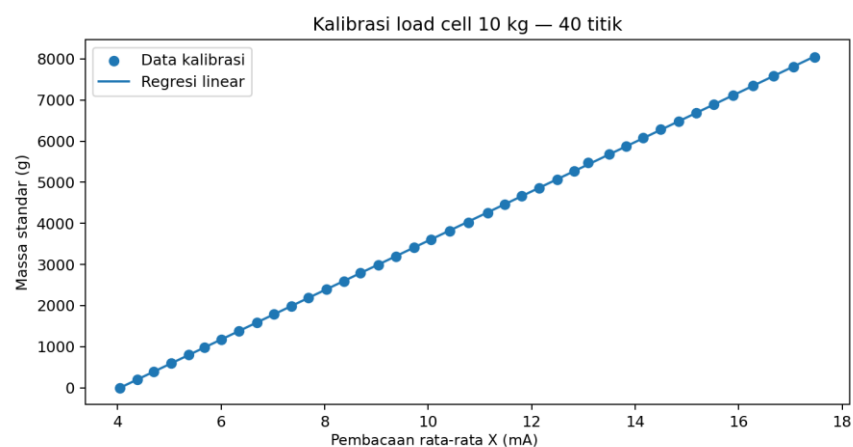
Target Pengujian

Pengujian dikelompokkan dalam tujuh label target: 0,15; 0,30; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50; dan 2,20 g/s. Label ini merepresentasikan kondisi operasi yang ditetapkan selama eksperimen, bukan nilai referensi independen yang telah dibuktikan melalui pengukuran gravimetri terpisah. Jumlah sampel dan durasi run tidak seragam; sebagian rekaman sekitar 620 titik dan sebagian lainnya mencapai 2.000 titik.

Karena durasi berbeda, slope dihitung menggunakan timestamp aktual. Statistik antar-run dihitung dari slope setiap run sehingga run yang lebih panjang tidak otomatis memperoleh bobot statistik lebih besar hanya karena memiliki lebih banyak sampel. Run diperlakukan sebagai unit analisis, dengan tetap mempertimbangkan apakah pelaksanaan run benar-benar independen.

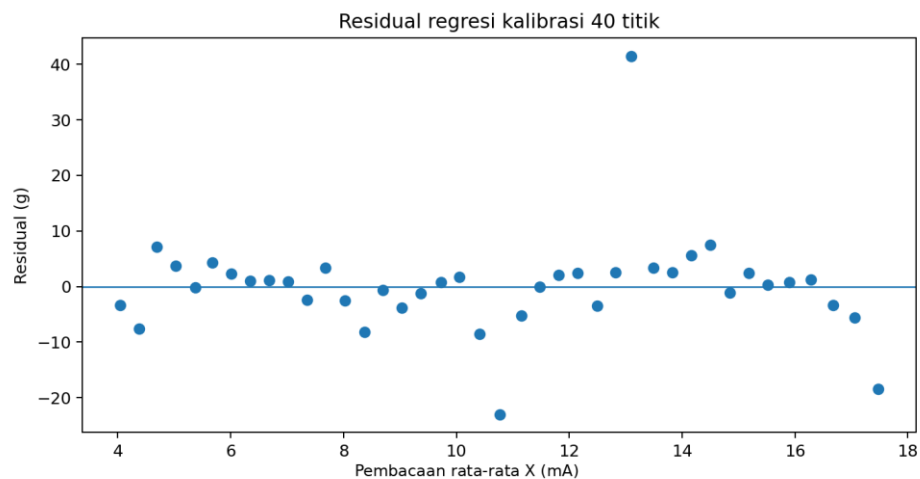
Kalibrasi Load Cell 10 kg

Kalibrasi load cell 10 kg menggunakan 40 pasangan data massa standar dan arus. Persamaan yang digunakan adalah $m \text{ (g)} = 600,19730395 X \text{ (mA)} - 2425,49634517$. Rentang arus tercatat 4,0467–17,4733 mA. Evaluasi menghasilkan R^2 sekitar 0,9999859, RMSE sekitar 8,876 g, MAE sekitar 4,939 g, dan residual absolut maksimum sekitar 41,513 g pada titik kalibrasi ke-28.



Gambar 4.1. Kurva kalibrasi load cell 10 kg berdasarkan 40 titik.

Residual maksimum ditinjau sebagai indikasi penyimpangan lokal, tetapi titik tersebut tidak dihapus tanpa bukti kesalahan pencatatan atau prosedur. R^2 tinggi mengindikasikan linearitas keseluruhan yang kuat, sementara MAE, RMSE, dan residual maksimum memberi informasi tambahan tentang besaran penyimpangan. Karena itu, evaluasi kalibrasi tidak berhenti pada R^2 .



Gambar 4.2. Analisis residual kalibrasi.

Kalibrasi pembandingan load cell 3 kg

Untuk load cell 3 kg, persamaan terpisah yang tercatat adalah $m \text{ (g)} = 192,653882 X \text{ (mA)} - 777,623331$, berdasarkan 51 titik kalibrasi, dengan R^2 sekitar 0,99998869, RMSE sekitar 2,718 g, dan MAE sekitar 1,718 g. Persamaan kedua sensor tidak dipertukarkan. Nilai residual kalibrasi yang lebih kecil pada data 3 kg tidak otomatis membuktikan kinerja dinamis yang lebih baik karena kapasitas, rentang, konfigurasi mekanik, kanal, dan kondisi eksperimen berbeda.

Prosedur Pengambilan Data

Sebelum run, operator memeriksa posisi wadah, kondisi load cell, sambungan selang, identitas sensor, jalur akuisisi, dan kesiapan pencatatan. Aliran diarahkan ke waste sampai stabil, lalu dialihkan ke wadah penampung dan direkam. Setelah pengujian, berkas disimpan dengan identitas target dan sensor. Pemeriksaan pascapengambilan data mencakup jumlah sampel, rentang

timestamp, durasi, pembacaan nol, sinyal di luar rentang kalibrasi, serta konsistensi label.

BAB IV. HASIL KALIBRASI DAN NO-FLOW

Hasil Kalibrasi

Model kalibrasi load cell 10 kg memiliki sensitivitas sekitar 600,197 g/mA. Secara matematis, perubahan arus 0,01 mA berkaitan dengan perubahan massa hasil konversi sekitar 6,00 g. Nilai tersebut merupakan kemiringan model regresi, bukan resolusi nyata atau akurasi sistem secara keseluruhan. Penilaian perubahan massa kecil harus mempertimbangkan noise no-flow, resolusi input analog, perilaku transmitter, dan kestabilan sistem.

Intersep model sebesar $-2425,496$ g menyebabkan massa prediksi pada batas bawah arus kalibrasi tidak persis nol. Offset konstan idealnya saling menghilangkan ketika slope dihitung dari perubahan massa terhadap waktu, tetapi offset yang berubah terhadap waktu atau sampel di luar rentang dapat tetap memengaruhi hasil. Oleh sebab itu, rentang kalibrasi menjadi aspek penting dalam interpretasi hasil laju rendah.

Proporsi observasi di bawah batas bawah 4,0467 mA berbeda menurut target: sekitar 20,55% pada label 0,15 g/s; 14,23% pada 0,30 g/s; 11,26% pada 0,50 g/s; 7,94% pada 0,75 g/s; 4,58% pada 1,00 g/s; 0,44% pada 1,50 g/s; dan 1,56% pada 2,20 g/s. Kondisi tersebut paling dominan pada target terendah sehingga hasil di daerah ini memerlukan kehati-hatian lebih besar.

No-flow dan Kestabilan Sinyal

Dataset no-flow memuat 7.438 timestamp valid dengan durasi sekitar 1.533,451 detik dan interval sampling median sekitar 0,202 detik. Simpangan baku sinyal mentah tercatat sekitar 0,01035 pada kanal berlabel 3 kg dan 0,00862 pada kanal berlabel 10 kg, dengan rentang puncak-ke-puncak sekitar 0,08 satuan sinyal. Karena pemetaan kanal perlu dikonfirmasi, hasil ini dilaporkan pada domain sinyal mentah dan tidak langsung dikonversi menjadi gram atau g/s.

No-flow memberikan informasi awal mengenai noise dan perubahan baseline, tetapi tidak otomatis menjadi ukuran apparent flow. Estimasi apparent flow memerlukan kanal yang valid, persamaan kalibrasi yang sesuai, dan regresi

pada timestamp aktual menggunakan prosedur yang sama dengan pengujian aliran. Bila perubahan massa selama interval tidak jauh lebih besar daripada perubahan baseline, slope dapat memiliki kontribusi besar dari noise atau drift.

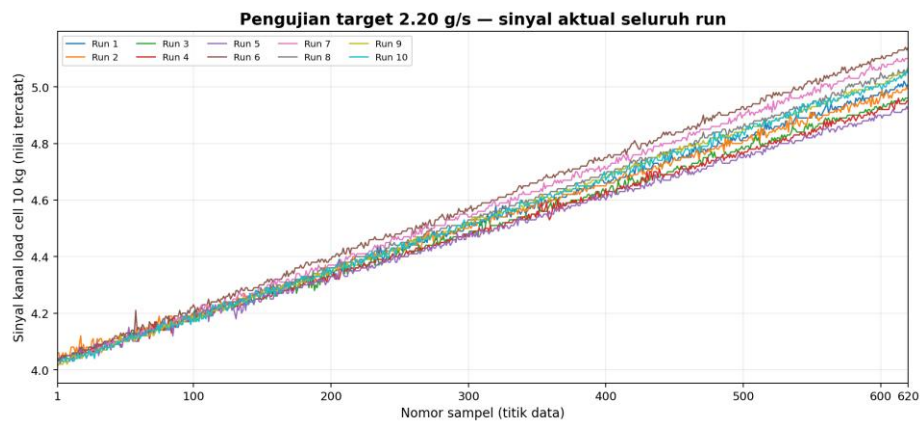
Pengujian no-flow sebelum dan sesudah setiap seri target disarankan agar perubahan baseline sepanjang waktu dapat diidentifikasi. Pemeriksaan ini penting untuk memisahkan respons yang berkaitan dengan aliran dari perubahan sinyal yang mungkin berasal dari sensor, akuisisi, atau kondisi mekanik.

BAB IV. HASIL PENGUJIAN TUJUH TARGET

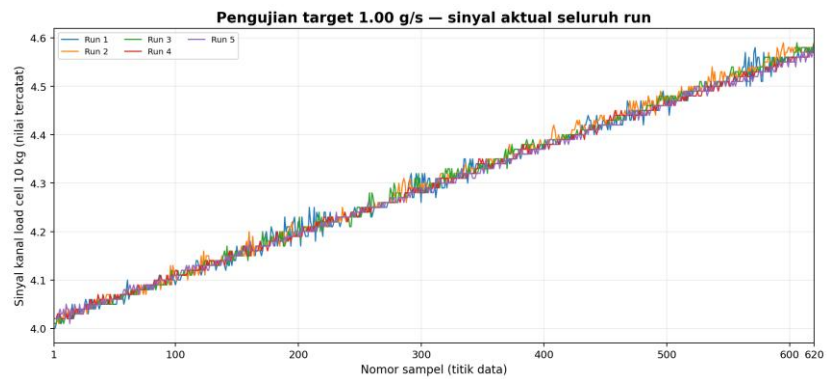
Estimasi Slope Massa terhadap Waktu

Rata-rata slope load cell 10 kg meningkat dari 0,1812 g/s pada label target 0,15 g/s menjadi 1,8881 g/s pada label target 2,20 g/s. Secara umum, sistem memberikan respons slope yang lebih tinggi pada label target operasi yang lebih tinggi. Hasil ini mendukung karakterisasi respons sistem dalam konfigurasi eksperimen, tetapi tidak membuktikan akurasi absolut atau linearitas terhadap referensi independen.

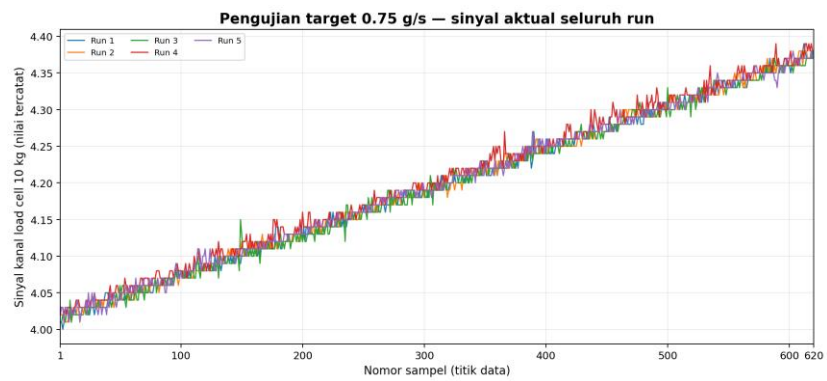
Pada target 0,15 g/s, rata-rata slope adalah 0,1812 g/s dengan SD 0,0059 g/s dan CV 3,24%. Pada 0,30 g/s, rata-rata 0,2827 g/s dengan CV 3,29%. Pada 0,50 g/s, rata-rata 0,3806 g/s dengan CV 7,60%, yang menunjukkan variasi relatif antar-run paling tinggi dalam ringkasan utama. Pada 0,75 g/s, rata-rata 0,6803 g/s dengan CV 0,55%, sedangkan target 1,00 g/s menghasilkan rata-rata 1,0643 g/s dengan CV 1,64%.



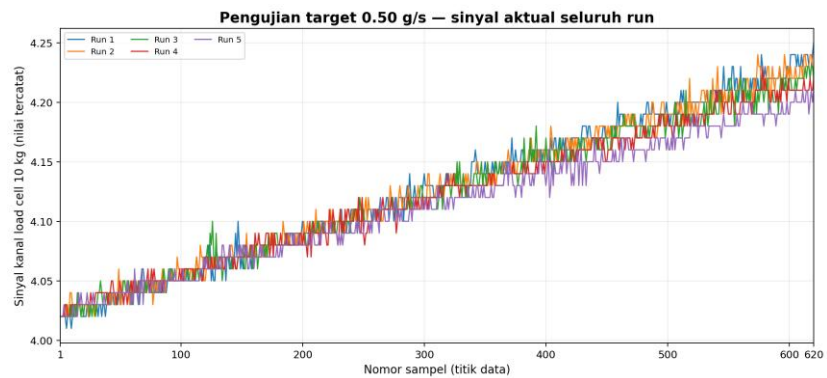
Gambar 4.10. Hasil pengujian load cell 10 kg pada target 2,20 g/s.



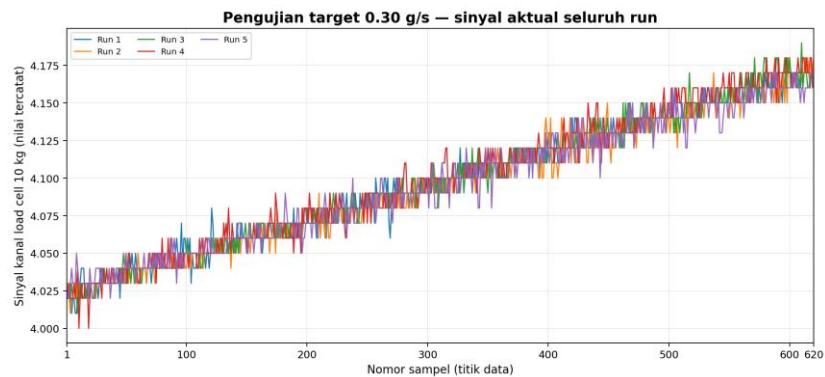
Gambar 4.8. Hasil pengujian load cell 10 kg pada target 1,00 g/s.



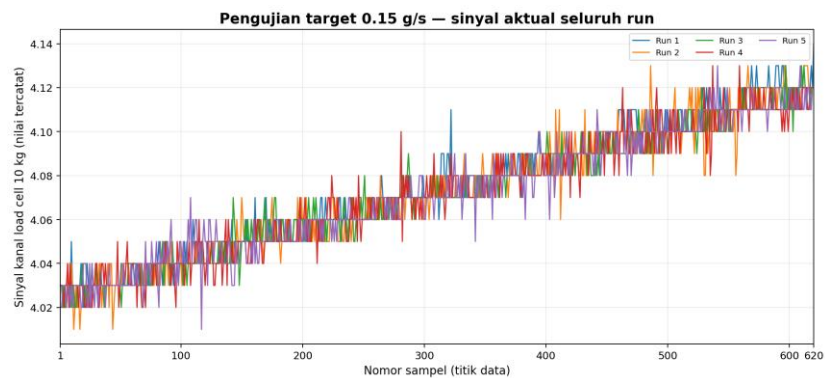
Gambar 4.7. Hasil pengujian load cell 10 kg pada target 0,75 g/s.



Gambar 4.6. Hasil pengujian load cell 10 kg pada target 0,50 g/s.

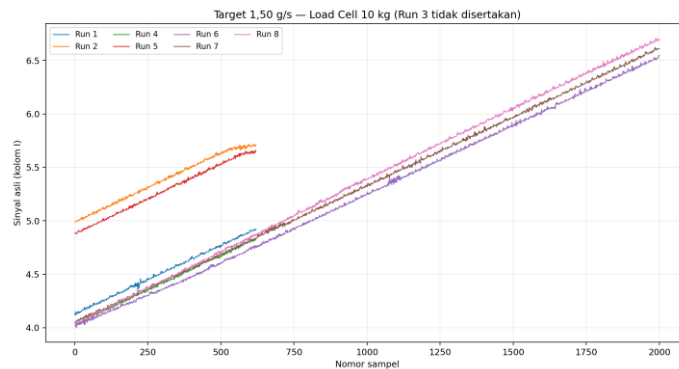


Gambar 4.5. Hasil pengujian load cell 10 kg pada target 0,30 g/s.



Gambar 4.4. Hasil pengujian load cell 10 kg pada target 0,15 g/s.

Pada target 1,50 g/s, analisis utama menggunakan tujuh run dan menghasilkan rata-rata 1,5148 g/s, SD 0,0333 g/s, dan CV 2,20%. Pada target 2,20 g/s, sepuluh run load cell 10 kg menghasilkan rata-rata 1,8881 g/s, SD 0,1386 g/s, dan CV 7,34%. Variasi ini menunjukkan repeatability tidak berubah secara monoton seiring kenaikan target.



Gambar 4.9. Hasil pengujian load cell 10 kg pada target 1,50 g/s, analisis utama.

Interpretasi Hasil

Selisih antara rata-rata slope dan label target tidak dinyatakan sebagai persentase galat akurasi. Label target berasal dari pengaturan operasi, sedangkan nilai referensi independen yang tertelusur belum tersedia secara memadai. Penilaian akurasi memerlukan pengukuran laju massa referensi pada interval waktu yang sama, misalnya dengan menimbang massa air yang terkumpul selama durasi terukur menggunakan prosedur independen.

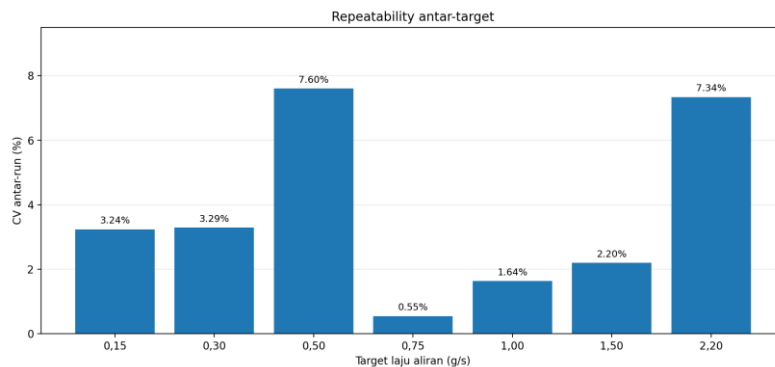
Nilai R^2 rata-rata per-run pada beberapa target meningkat ketika target lebih tinggi, tetapi R^2 hanya menggambarkan kecocokan perubahan massa pada interval analisis terhadap garis lurus. R^2 bukan indikator tunggal akurasi. Karena itu, slope, variasi antar-run, rentang kalibrasi, dan kualitas akuisisi harus dibaca bersama.

Hasil pengujian menunjukkan sistem dapat membedakan kecenderungan kondisi operasi pada rentang yang diuji. Akan tetapi, sampel di luar rentang kalibrasi, variasi durasi, transien, dan belum terverifikasinya pemetaan kanal merupakan batas yang harus diperhitungkan sebelum hasil digunakan sebagai nilai ukur yang tertelusur.

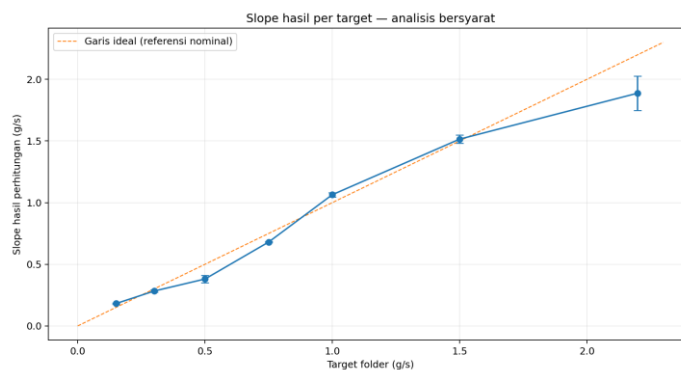
BAB IV. REPEATABILITY DAN PERBANDINGAN SENSOR

Repeatability Antar-Run

Repeatability dinilai berdasarkan slope setiap run. CV terendah pada load cell 10 kg adalah 0,55% pada target 0,75 g/s. CV tertinggi adalah 7,60% pada target 0,50 g/s, diikuti 7,34% pada target 2,20 g/s. Lima dari tujuh target berada di bawah CV 5% jika nilai tersebut dipakai semata-mata sebagai pembanding deskriptif. Ambang 5% bukan kriteria penerimaan metrologi universal dalam penelitian ini.



Gambar 4.12. Koefisien variasi antar-run pada tujuh target.



Gambar 4.11. Perbandingan deskriptif slope hasil terhadap target nominal.

CV rendah berarti hasil pengulangan lebih rapat secara relatif, tetapi tidak memastikan hasil dekat dengan nilai benar. Sebaliknya, rata-rata yang dekat dengan target tidak otomatis menunjukkan variasi yang rendah. Interpretasi juga perlu memperhatikan jumlah run yang relatif kecil dan apakah setiap run benar-benar merupakan pengulangan independen.

Interval U95 yang dihitung dari repeatability hanya mewakili komponen variasi antar-run. Sebagai contoh, interval berbasis repeatability pada target 0,75 g/s sekitar $\pm 0,0046$ g/s, sedangkan pada target 0,50 g/s sekitar $\pm 0,0359$ g/s. Nilai tersebut tidak mencakup seluruh komponen kalibrasi, kanal akuisisi, waktu, mekanik, dan referensi sehingga tidak disebut sebagai ketidakpastian total sistem.

Perbandingan Load Cell 3 kg dan 10 kg

Pada target 0,15 g/s, CV load cell 3 kg sekitar 4,78%, sedangkan load cell 10 kg 3,24%. Pada 0,30 g/s, CV masing-masing sekitar 7,60% dan 3,29%. Pada 0,50 g/s, load cell 3 kg menunjukkan CV sekitar 1,35%, lebih rendah daripada 7,60% pada load cell 10 kg. Pada 0,75 g/s, CV load cell 3 kg sekitar 7,06%, sedangkan load cell 10 kg 0,55%. Pada 1,00 g/s, keduanya berdekatan, yaitu sekitar 1,59% dan 1,64%.

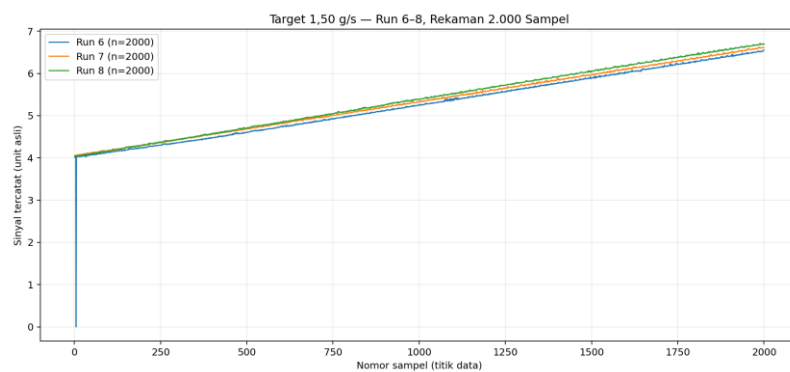
Pada label 1,50 g/s, ringkasan 3 kg menggunakan delapan run dengan rata-rata 1,4211 g/s dan CV 10,52%, sedangkan ringkasan utama 10 kg menggunakan tujuh run dengan rata-rata 1,5148 g/s dan CV 2,20%. Pada 2,20 g/s, ringkasan 3 kg mencantumkan 15 run dengan rata-rata 2,0265 g/s dan CV 8,98%, sementara 10 kg menggunakan sepuluh run dengan rata-rata 1,8881 g/s dan CV 7,34%.

Perbedaan jumlah run, kemungkinan file duplikat, dan ketidakseragaman label membatasi perbandingan langsung. Data tidak mendukung klaim bahwa sensor berkapasitas lebih kecil selalu lebih baik atau bahwa sensor 10 kg selalu lebih stabil. Perbandingan yang lebih kuat memerlukan pengujian berpasangan, kondisi hidrolik yang sama, kanal terverifikasi, jumlah run independen yang memadai, dan nilai referensi yang sama.

BAB IV. ANALISIS SENSITIVITAS DAN DATA PEMBANDING

Analisis Sensitivitas Run 3 pada Target 1,50 g/s

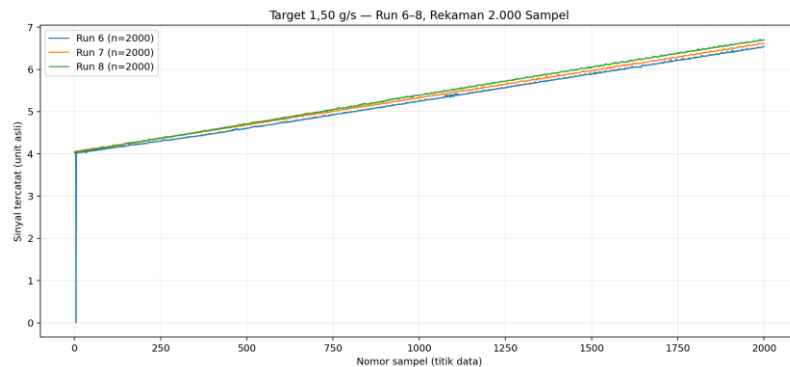
Delapan slope yang tercatat pada label 1,50 g/s adalah 1,511; 1,460; 0,554; 1,520; 1,523; 1,506; 1,510; dan 1,574 g/s. Tujuh hasil berada pada rentang 1,460–1,574 g/s, sedangkan Run 3 menghasilkan 0,554 g/s. Perbedaan tersebut cukup besar untuk mengubah rata-rata dan simpangan baku kelompok.



Gambar 4.13. Sinyal mentah target 1,50 g/s untuk Run 6–8.

Tanpa Run 3, tujuh run menghasilkan rata-rata 1,5148 g/s, SD 0,0333 g/s, dan CV sekitar 2,20%. Dengan seluruh delapan run, rata-rata menjadi sekitar 1,3948 g/s dan CV meningkat menjadi sekitar 24,46%. Perubahan ini menunjukkan bahwa ringkasan statistik sensitif terhadap satu hasil yang menyimpang.

Run 3 tidak dinyatakan sebagai kesalahan pencatatan yang telah terbukti. Slope rendah dapat terkait dengan kondisi aliran, prosedur pengalihan, masalah mekanik, perubahan sinyal, atau faktor lain yang belum dapat dipastikan. Data mentah tetap dipertahankan dan kedua skenario perlu dilaporkan agar pembaca dapat menilai dampak keputusan analitis.



Gambar 4.14. Perbandingan baseline asli Run 6–8.

SYNMORE sebagai Pembanding Operasional

Data SYNMORE yang tersedia terutama berupa pembacaan awal dan akhir untuk sejumlah target. Pembacaan tersebut dapat memberi konteks operasional, tetapi belum cukup menjadi referensi independen laju massa. Pembandingan yang sah memerlukan definisi pengukuran, interval waktu yang sama, massa atau volume tertelusur, serta ketidakpastian alat referensi.

Jika hanya tersedia dua pembacaan tanpa durasi yang sepadan, selisih pembacaan tidak dapat langsung disejajarkan dengan slope hasil regresi. Karena itu, SYNMORE tidak digunakan untuk menyatakan bias atau galat persentase. Untuk validasi berikutnya, laju massa referensi dapat ditetapkan dengan menimbang massa air yang terkumpul selama interval waktu terukur menggunakan timbangan terkalibrasi, disertai pengendalian waktu mulai dan akhir serta kehilangan air.

Loading–Unloading dan Hysteresis

Dataset yang tersedia memuat 38 pasangan titik valid pada lembar terkait loading–unloading, tetapi urutan yang dianalisis berupa massa menurun. Regresi menghasilkan slope sekitar 599,2306, intersep $-2408,3409$, R^2 sekitar 0,9999961, RMSE sekitar 4,643 g, MAE sekitar 3,072 g, dan residual maksimum sekitar 18,724 g.

Statistik tersebut menggambarkan kecocokan regresi pada data yang tersedia, bukan besaran hysteresis. Evaluasi hysteresis membutuhkan respons

yang dapat dipasangkan pada massa sama atau setara ketika beban dinaikkan dan diturunkan. Tanpa pasangan tersebut, perbedaan lintasan tidak dapat dipisahkan secara sah dari drift atau perubahan kondisi. Oleh sebab itu, penelitian belum menetapkan nilai hysteresis kuantitatif.

BAB V. KESIMPULAN, KETERBATASAN, DAN SARAN

Kesimpulan Utama

Pertama, sistem pengukuran laju massa air rendah berbasis load cell 10 kg telah dievaluasi dengan pendekatan gravimetri dinamis, yaitu mengestimasi laju massa melalui slope regresi massa terhadap waktu. Kedua, kalibrasi 10 kg dengan 40 titik menghasilkan persamaan $m \text{ (g)} = 600,197304 \times (mA) - 2425,496345$, dengan R^2 0,99998592, RMSE 8,876 g, dan MAE 4,939 g. Hubungan massa–arus sangat linear pada data kalibrasi, tetapi hal ini belum membuktikan akurasi absolut sistem.

Ketiga, pada tujuh label target, rata-rata slope meningkat dari 0,1812 g/s pada label 0,15 g/s menjadi 1,8881 g/s pada label 2,20 g/s. CV antar-run pada ringkasan utama berada pada rentang 0,55–7,60%. Keempat, perbandingan dengan load cell 3 kg menunjukkan repeatability yang bergantung pada target; tidak ada dasar yang cukup untuk menyatakan satu sensor selalu lebih baik atau lebih akurat pada seluruh konfigurasi.

Kelima, metode gravimetri dinamis dapat digunakan untuk mengestimasi laju massa air rendah pada konfigurasi yang diuji. Namun, validasi akurasi absolut dan ketidakpastian total tetap memerlukan referensi independen, verifikasi kanal dan skala, penanganan sampel di luar rentang kalibrasi, serta evaluasi komponen ketidakpastian. Data loading–unloading yang tersedia juga belum cukup untuk menetapkan hysteresis kuantitatif.

Keterbatasan Penelitian

Keterbatasan utama meliputi belum tuntasnya verifikasi pemetaan kanal antara kalibrasi dan eksperimen; sebagian sampel berada di bawah rentang kalibrasi, terutama pada target rendah; jumlah sampel dan durasi run tidak seragam; terdapat satu run menyimpang pada target 1,50 g/s; terdapat kemungkinan file pembanding yang identik; serta belum tersedia referensi laju massa independen yang berpasangan dengan interval pengukuran.

Keterbatasan tersebut tidak menghilangkan nilai karakterisasi yang diperoleh, tetapi menentukan batas klaim yang dapat dibuat. Hasil harus dipahami sebagai evaluasi respons dan repeatability pada konfigurasi eksperimen, bukan sertifikasi akurasi atau bukti ketertelusuran metrologi penuh.

Saran Pengembangan

Pengembangan selanjutnya perlu memverifikasi kanal fisik, alamat register Modbus, faktor skala, dan satuan pada proses kalibrasi serta pengujian. Validasi laju massa perlu dilakukan menggunakan referensi gravimetri independen pada interval waktu yang sama. Durasi run, kondisi awal, interval sampling, dan kriteria stabilisasi sebaiknya distandarkan. Pengujian no-flow sebelum dan sesudah setiap seri target dapat membantu mengidentifikasi perubahan baseline.

Selain itu, pengujian loading–unloading perlu dilakukan berulang dengan pasangan massa yang sepadan. Analisis anomali harus mempertahankan data mentah dan menyajikan hasil dengan serta tanpa run yang menyimpang. Anggaran ketidakpastian total perlu mencakup massa standar, regresi kalibrasi, resolusi dan noise sensor, stabilitas nol, timestamp, akuisisi analog, repeatability, pengaruh mekanik, dan metode referensi.

Kontribusi Akhir

Kontribusi utama tesis adalah dokumentasi karakterisasi eksperimental sistem gravimetri dinamis berbasis load cell 10 kg pada tujuh label target laju massa air rendah, disertai load cell 3 kg sebagai pembanding. Penelitian mengintegrasikan evaluasi kalibrasi, no-flow, slope massa–waktu, repeatability, analisis sensitivitas, dan batas validitas data. Kerangka tersebut dapat menjadi dasar untuk pengujian lanjutan yang lebih tertelusur dan untuk peningkatan kualitas sistem pengukuran.

ABSTRAK

Pengukuran laju massa air rendah memerlukan sistem yang mampu merekam perubahan massa terhadap waktu secara konsisten. Penelitian ini mengevaluasi sistem pengukuran low water mass flowrate berbasis load cell 10 kg menggunakan pendekatan gravimetri dinamis, dengan load cell 3 kg sebagai pembanding. Sistem akuisisi data terdiri atas transmitter dengan keluaran 4–20 mA, modul input analog, komunikasi RS485/Modbus RTU, dan pencatatan berbasis komputer. Pengujian dilakukan pada tujuh label target laju massa, yaitu 0,15; 0,30; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50; dan 2,20 g/s. Analisis mencakup kalibrasi massa terhadap arus, karakteristik sinyal no-flow, estimasi laju massa berdasarkan slope regresi massa terhadap waktu, serta evaluasi repeatability antar-run. Kalibrasi load cell 10 kg menggunakan 40 titik menghasilkan persamaan $m(g) = 600,197304 X(mA) - 2425,496345$, dengan $R^2 = 0,99998592$, RMSE = 8,876 g, dan MAE = 4,939 g. Rata-rata slope hasil pengujian meningkat dari 0,1812 g/s pada label target 0,15 g/s menjadi 1,8881 g/s pada label target 2,20 g/s. Koefisien variasi antar-run pada ringkasan analisis utama berada pada rentang 0,55–7,60%. Pada target 1,50 g/s, analisis sensitivitas menunjukkan bahwa satu run dengan slope 0,554 g/s memengaruhi rata-rata dan variasi kelompok secara signifikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan gravimetri dinamis dapat digunakan untuk mengestimasi laju massa air rendah pada konfigurasi yang diuji. Namun, akurasi absolut dan ketidakpastian total belum dapat dinyatakan karena verifikasi kanal akuisisi, validasi terhadap referensi laju massa independen, penanganan data di luar rentang kalibrasi, dan evaluasi komponen ketidakpastian masih diperlukan.

Kata kunci: low water mass flowrate; load cell; gravimetri dinamis; kalibrasi; repeatability.

ABSTRACT

Low water mass flow measurement requires a system capable of consistently recording mass changes over time. This study evaluates a low water mass flowrate measurement system based on a 10 kg load cell using a dynamic gravimetric approach, with a 3 kg load cell serving as a comparator. The data acquisition system consists of a transmitter with a 4–20 mA output, an analog input module, RS485/Modbus RTU communication, and computer-based data logging. Experiments were conducted at seven target flowrate labels: 0.15, 0.30, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50, and 2.20 g/s. The analysis covered mass-to-current calibration, no-flow signal characteristics, mass flowrate estimation using the regression slope of mass versus time, and inter-run repeatability. Calibration of the 10 kg load cell using 40 data points produced the equation $m \text{ (g)} = 600.197304 X \text{ (mA)} - 2425.496345$, with $R^2 = 0.99998592$, $RMSE = 8.876 \text{ g}$, and $MAE = 4.939 \text{ g}$. The mean experimental slope increased from 0.1812 g/s at the 0.15 g/s target label to 1.8881 g/s at the 2.20 g/s target label. The coefficient of variation across runs ranged from 0.55% to 7.60% in the main analysis. At the 1.50 g/s target, sensitivity analysis showed that one run with a slope of 0.554 g/s substantially affected the group mean and variability. The findings indicate that the dynamic gravimetric approach can estimate low water mass flowrate under the tested configuration. However, absolute accuracy and total measurement uncertainty cannot yet be established because acquisition-channel verification, validation against an independent flowrate reference, treatment of observations outside the calibration range, and a complete uncertainty evaluation remain necessary.

Keywords: low water mass flowrate; load cell; dynamic gravimetric method; calibration; repeatability.

ABSTRAK

Pangukuran laju aliran massa cai anu handap merlukeun sistem anu mampuh ngarékam parobahan massa kana waktu sacara ajeg. Ieu panalungtikan ngaévaluasi sistem pangukuran low water mass flowrate dumasar kana load cell 10 kg ngagunakeun métode gravimétri dinamis, kalayan load cell 3 kg minangka alat pangbanding. Sistem akuisisi data diwangun ku transmitter anu miboga kaluaran 4–20 mA, modul input analog, komunikasi RS485/Modbus RTU, sarta prosés ngarékam data ngagunakeun komputer.

Pangujian dilaksanakeun kana tujuh label target laju aliran massa, nyaéta 0,15; 0,30; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50; jeung 2,20 g/s. Analisis ngawengku kalibrasi massa kana arus listrik, karakteristik sinyal no-flow, estimasi laju aliran massa dumasar kana slope régrési massa kana waktu, sarta évaluasi repeatability antar-run. Hasil kalibrasi load cell 10 kg dumasar kana 40 titik ngahasilkeun persamaan
$$m \text{ (g)} = 600 \{, \} 197304 X \text{ (mA)} - 2425 \{, \} 496345$$
, kalayan
$$R^2 = 0 \{, \} 99998592$$
, RMSE = 8,876 g, jeung MAE = 4,939 g.

Rata-rata slope hasil pangujian ngaronjat ti 0,1812 g/s dina label target 0,15 g/s jadi 1,8881 g/s dina label target 2,20 g/s. Koéfisién variasi antar-run dina ringkesan analisis utama aya dina rentang 0,55–7,60%. Dina target 1,50 g/s, analisis sensitipitas némbongkeun yén hiji run anu ngahasilkeun slope 0,554 g/s mangaruhan sacara signifikan kana rata-rata jeung variasi kelompok data.

Hasil panalungtikan némbongkeun yén métode gravimétri dinamis bisa digunakeun pikeun ngira-ngira laju aliran massa cai anu handap dina konfigurasi sistem anu diuji. Sanajan kitu, akurasi absolut jeung kateupastian total can bisa ditangtukeun, sabab masih diperlukeun vérifikasi kanal akuisisi data, validasi ngagunakeun rujukan laju aliran massa anu mandiri, pananganan data di luar rentang kalibrasi, sarta évaluasi kana sakabéh komponén kateupastian.

Kecap konci: low water mass flowrate; load cell; gravimétri dinamis; kalibrasi; repeatability.

Daftar Pustaka Utama

Bartel, T. W., & Yaniv, S. L. (1997). Creep and Creep Recovery Response of Load Cells Tested According to U.S. and International Evaluation Procedures. *Journal of Research of NIST*, 102(3), 349–362.
<https://doi.org/10.6028/jres.102.024>

Büker, O., & Stolt, K. (2022). RISE Test Facilities for the Measurement of Ultra-Low Flow Rates and Volumes with a Focus on Medical Applications. *Applied Sciences*, 12(16), 8332. <https://doi.org/10.3390/app12168332>

ITTC. Calibration of Load Cells, Recommended Procedures and Guidelines 7.6-02-09. <https://www.ittc.info/media/8205/76-02-09.pdf>

JCGM. (2008). Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008). Joint Committee for Guides in Metrology.

JCGM. (2012). International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms (VIM), 3rd edition (JCGM 200:2012). Joint Committee for Guides in Metrology.

OIML. (2021). OIML R 60:2021—Metrological regulation for load cells. https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r060-e21.pdf

Saba, F., Malengo, A., & Santiano, M. (2021). A dynamic gravimetric standard for liquid flow measurements. *Metrologia*, 58, 015007.
<https://doi.org/10.1088/1681-7575/abc410>

van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84, 523–538.
<https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>