

IMPLEMENTASI IoT UNTUK PEREKAMAN DATA LINGKUNGAN LABORATORIUM SESUAI ISO/IEC 17025 : 2017

IoT IMPLEMENTATION FOR LABORATORY AMBIENT DATA LOGGING IN ACCORDANCE WITH ISO/IEC 17025 : 2017

Yonan Prihhapso¹, Aditya Achmadi², Muhammad Azzumar¹, Gigin Ginanjar¹, Suherlan¹, Purwowibowo³, lip Ahmad Rifai²

¹Pusat Riset Teknologi Pengujian Dan Standar– OREM BRIN, Gedung 417 Puspiptek Serpong

²Standar Nasional Satuan Ukuran – BSN, Gedung 420 Puspiptek Serpong

³Pusat Riset Fotonik–ORNM BRIN, Gedung 440 Puspiptek Serpong

email: yonan.prihhapso@brin.go.id

ABSTRAK

Fasilitas laboratorium kalibrasi dan pengujian harus dijaga kondisinya agar tidak memberikan pengaruh buruk pada hasil pengukuran. Kondisi lingkungan perlu dipantau, dicatat dan dikendalikan sehingga laboratorium kalibrasi dan pengujian dapat melakukan pengukuran tanpa mempengaruhi keabsahan hasil. Pada penelitian ini teknologi *Internet of Things* (IoT) diimplementasikan dalam pemantauan dan pengumpulan data lingkungan laboratorium yang berupa data suhu, kelembapan relatif, dan tekanan udara. Data kondisi lingkungan diakuisisi menggunakan mikrokontroler yang terhubung ke server melalui jaringan WIFI. Informasi mengenai kondisi laboratorium disimpan dan ditampilkan pada laman website secara *real-time*. Sebagai validasi data pengukuran kondisi lingkungan, sensor-sensor dikalibrasi terhadap termo-higrometer acuan, dan kemudian penunjukannya dikoreksi menggunakan metode *curve-fitting*. Selain itu, hasil pengukuran modul kondisi lingkungan juga dibandingkan dengan alat ukur kondisi lingkungan komersial dengan tingkat akurasi yang sama. Hasil validasi pengukuran menunjukkan performa pengukuran yang setara dengan alat ukur kondisi lingkungan komersial. Modul kondisi lingkungan hasil penelitian ini memiliki nilai ketidakpastian pengukuran yang berkaitan dengan pengukuran parameter suhu lingkungan sebesar $\pm 0,3$ °C dan $\pm 2,3$ %RH untuk parameter kelembapan relatif udara.

Kata Kunci: IoT, *internet of things*, *data logger*, ESP32, kalibrasi

ABSTRACT

The calibration and testing laboratory facilities must maintain their environmental conditions so it does not adversely affect the measurement results. The environmental condition needs to be monitored, recorded, and controlled so that calibration and testing laboratories can carry

out measurements without affecting the validity of the measurement results. In this study, Internet of Things (IoT) technology is applied to monitor and record laboratory environmental data, such as temperature, relative humidity, and air pressure. The environmental data condition is acquired using a microcontroller connected to the server through the WIFI network. The information regarding laboratory conditions is stored and displayed on web pages in real-time. In order to validate the environmental condition measurement data, the sensors are calibrated against a standard thermohygrometer, and their indications are corrected through a curve fitting method. In addition, the measurement result of the environmental condition modules is also compared with commercial environmental condition measuring instruments with the same accuracy. The measurement results show that the performance is equivalent to the commercial environmental conditions instrument. The environmental condition modules in this research have expanded uncertainty associated with the environmental temperature parameter of $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ and $\pm 2.3\%RH$ for the relative humidity parameter.

Keywords: IoT, internet of things, data logger, ESP32, calibration

1. PENDAHULUAN

Penyebaran *corona virus diseases* 2019 atau dikenal dengan COVID-19 yang terjadi secara global telah banyak mengubah kebiasaan manusia dalam berinteraksi. Sebagai salah satu perubahan yang dapat diamati adalah transformasi digital berbagai layanan publik. Seperti halnya pada proses pembelajaran yang dilakukan secara jarak jauh maupun konsultasi kesehatan yang dapat dilakukan secara mudah tanpa harus mendatangi fasilitas medis secara langsung. Transformasi digital ini juga dapat diamati pada sektor-sektor lain, seperti pada proses bisnis yang berpindah ke *platform* digital, serta pada proses pengukuran dan pengujian (Dudukalov et al., 2021; Kuster, 2020). Transformasi digital dapat memiliki banyak pengertian, namun secara garis besar dapat diartikan sebagai penggunaan

teknologi digital baru dalam penyederhanaan proses ataupun peningkatan kapasitas (Kraus et al., 2021). Teknologi digital baru tersebut dapat berupa penggunaan perangkat *internet of things* (IoT), perangkat gawai digital, komputasi awan, basis data, ataupun penggunaan *platform* digital seperti media sosial.

Saat ini dalam bidang pengukuran (metrologi), terdapat dua buah topik besar transformasi digital. Topik-topik ini adalah proses pengukuran yang mengimplementasikan teknologi IoT (Prasetyo et al., 2021; Prato et al., 2019) dan penggunaan data digital hasil pengukuran yang umumnya berupa sebuah sertifikat hasil pengukuran atau kalibrasi (Brown et al., 2020; Kuster et al., 2021). Teknologi IoT memungkinkan berbagai hal (*things*),

baik berupa sensor, perangkat, maupun orang untuk saling terhubung melalui jaringan internet. Dalam hal ini, teknologi IoT memungkinkan dilakukannya pengukuran dari jarak jauh (*remote calibration*), di mana data hasil pengukuran ditransmisikan dari lokasi pengukuran ke pusat basis data secara elektronik (Garg et al., 2021). Secara umum, transformasi pengukuran ke arah digitalisasi ini dapat mempermudah proses pengukuran, sehingga menjadi lebih efektif dan efisien.

Pada penelitian ini teknologi IoT digunakan dalam perekaman kondisi lingkungan laboratorium. Kondisi lingkungan yang dimaksud adalah perekaman data suhu, kelembapan relatif, serta tekanan atmosfer. Parameter-parameter kondisi lingkungan tersebut dalam beberapa kasus pengukuran, memiliki pengaruh yang signifikan terhadap hasil ukur. Sehingga kondisi lingkungan laboratorium sebisa mungkin selalu terpantau dan tercatat. Desain perangkat perekaman kondisi lingkungan laboratorium kalibrasi ini akan dijelaskan. Sebagai validasi hasil pengukuran, perangkat ini dikalibrasi pada beberapa titik ukur di dalam *chamber*. Sedangkan untuk mengetahui stabilitas pengukuran, pembacaan perangkat IoT ini dibandingkan dengan perekaman kondisi lingkungan menggunakan perangkat komersial yang serupa.

2. EFEK KONDISI LINGKUNGAN TERHADAP PENGUKURAN

Kondisi lingkungan merupakan parameter yang tidak dapat diabaikan dalam kegiatan pengukuran pada laboratorium pengujian dan kalibrasi. Salah satunya adalah sebagai pemenuhan persyaratan umum kompetensi laboratorium pengujian dan kalibrasi. Di mana laboratorium harus memantau, mengendalikan, dan mencatat kondisi lingkungan sesuai dengan spesifikasi, metode, atau prosedur yang relevan atau jika kondisi lingkungan laboratorium akan mempengaruhi keabsahan hasil (ISO/IEC 17025 : 2017; Belezia & Almeida, 2021). Berikut ini dipaparkan beberapa kasus, ketika kondisi lingkungan mempengaruhi hasil pengukuran.

2.1 Daya Apung Udara Pada Kalibrasi Anak Timbangan

Pada pengukuran anak timbangan, kondisi lingkungan sangat penting untuk menentukan nilai koreksi terhadap daya apung udara (*air buoyancy*) (Ismail & Kresiani, 2021). Kondisi lingkungan ini adalah tekanan atmosfer, kelembapan relatif, dan suhu udara. Kondisi lingkungan harus selalu dijaga pada batas tertentu, pada kasus penimbangan massa dengan kelas E_1 maka kondisi lingkungan harus dikontrol agar perubahan suhu maksimal $\pm 0,3$ °C per jam. Sedangkan kelembapan relatif udara berada pada nilai (40 – 60) %RH dengan

perubahan maksimum sebesar $\pm 5\%$ RH per 4 jam. Parameter-parameter tersebut harus dilakukan untuk menjamin kebenaran pengukuran sesuai dengan rekomendasi dokumen OIML R111-1:2004. Daya apung udara apabila tidak dikoreksi akan memberikan kontribusi yang cukup besar terhadap nilai ketidakpastian terentang pengukuran massa anak timbangan dengan kontribusi dapat mencapai hingga 40%.

2.2 Koefisien Ekspansi Linier Material

Mikrofon konvensional yang menggunakan diafragma, umumnya rentan terhadap pengaruh kondisi lingkungan seperti tekanan atmosfer, suhu dan kelembapan relatif. Hal ini dikarenakan material bahan yang digunakan memiliki koefisien ekspansi linier yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan tersebut (Rasmussen, 1999). Koreksi terhadap pengaruh kondisi lingkungan pada kalibrasi mikrofon memiliki kontribusi hingga 20% terhadap ketidakpastian pengukuran terentang, pada tingkat kepercayaan 95%.

Koefisien ekspansi linier juga mempengaruhi hasil pengukuran besaran-besaran lain. Seperti misalnya pada pengukuran dimensional menggunakan *gauge block*, pengukuran tekanan menggunakan piston, serta pengukuran-pengukuran lain. Sehingga, pengukuran

kondisi lingkungan dengan tingkat akurasi yang tinggi menjadi sangat penting.

2.3 Pengaruh Resolusi Alat Ukur Kondisi Lingkungan

Pada kondisi pengukuran yang sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, maka parameter-parameter seperti suhu, kelembapan relatif, dan tekanan atmosfer pada laboratorium harus dijaga dengan ketat. Untuk itu diperlukan peralatan dengan akurasi yang baik dan resolusi yang tinggi. Resolusi alat ukur dikenal menyebabkan kesalahan pembacaan, atau pergeseran dari nilai yang sebenarnya karena adanya pembulatan nilai. Hal ini terutama terjadi pada peralatan digital, sebagai contoh ketika suatu nilai yang ditunjukkan adalah suhu $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, nilai yang sebenarnya berada pada interval $(22,5 - 23,5)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sehingga sangat penting untuk memilih alat ukur dengan resolusi yang tepat.

Seperti pada kasus pengukuran anak timbangan, di mana untuk anak timbangan kelas E_1 kondisi lingkungan harus dijaga agar stabil pada suhu $\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ setiap jam selama pengukuran berlangsung. Dalam kasus ini alat ukur kondisi lingkungan paling tidak harus memiliki resolusi $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ atau lebih baik. Untuk kasus lain, pada pengukuran lux meter di mana kondisi lingkungan cukup dijaga agar tetap stabil

$\pm 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$ selama pengukuran, maka alat ukur dengan resolusi $1 \text{ }^\circ\text{C}$ sudah mencukupi. Karena perbedaan kebutuhan setiap bidang pengukuran, maka dalam penelitian ini digunakan beberapa jenis sensor dengan resolusi yang berbeda-beda.

3. METODOLOGI

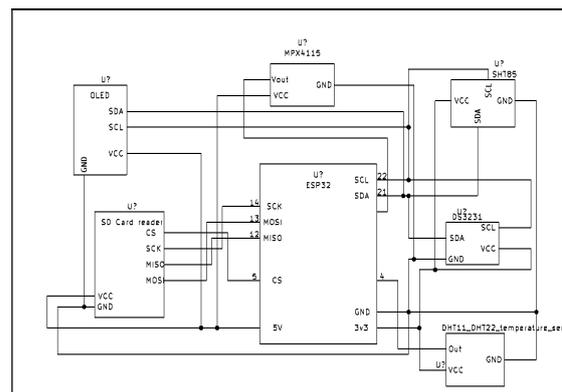
Peralatan perekaman kondisi lingkungan komersial pada umumnya mempunyai beberapa permasalahan. Permasalahan-permasalahan tersebut seperti kesulitan dalam melakukan kalibrasi ulang pada chamber dikarenakan desain peralatan yang tidak fleksibel. Permasalahan juga timbul ketika peralatan perekaman kondisi lingkungan tidak memiliki opsi perekaman otomatis ataupun terdapat fitur perekaman otomatis namun data tidak dapat diakses dengan mudah. Untuk menjawab beberapa permasalahan tersebut maka dikembangkan sebuah alat perekam berupa modul monitoring kondisi lingkungan (MML) laboratorium.

3.1 Desain Modul Monitoring Kondisi Lingkungan

Modul monitoring pada penelitian ini didesain dengan bentuk yang kompak dengan konektivitas nirkabel, serta perekaman data yang tersimpan pada basis data yang dapat diakses dari mana saja. Untuk keperluan tersebut, maka digunakan *microcontroller unit* (MCU) ESP32 dengan

WIFI 2,4 GHz dan *Bluetooth* 4.2 yang terintegrasi. Skema elektronik desain modul dapat dilihat pada Gambar 1. Untuk pembacaan parameter suhu dan kelembapan relatif digunakan dua buah sensor dengan spesifikasi berbeda sesuai dengan Tabel 1. Sensor-sensor ini dipilih untuk memenuhi kebutuhan akurasi pengukuran yang berbeda-beda sesuai dengan kebutuhan setiap laboratorium. Hal ini dikarenakan tidak semua proses pengukuran memerlukan pengaturan kondisi lingkungan yang ketat.

Sensor SHT85 dihubungkan ke MCU menggunakan jalur komunikasi I2C (*inter integrated circuit*), sedangkan sensor DHT22 dihubungkan menggunakan jalur input-output (I/O) pin 4. Perangkat lain yang juga menggunakan I2C adalah layar OLED, dan sirkuit jam waktu-nyata (RTC) DS3231.



Gambar 1. Skema elektronik desain MML, sensor yang terhubung ke MCU menggunakan SHT85 atau DHT22 (hanya salah satu)

Tabel 1. Spesifikasi sensor-sensor yang digunakan dalam modul monitoring (Adafruit Industries, 2021; Sensirion, 2021)

Type Sensor	Suhu	Kelembapan. rel
DHT22		
resolusi	0,1 °C	0,1 %RH
akurasi	± 0,5 °C	± 5 %RH
SHT85		
resolusi	0,01 °C	0,01 %RH
akurasi	± 0,1 °C	± 1,5 %RH

Ketika perangkat MML terhubung ke jaringan internet, maka MCU akan terhubung ke salah satu server *network time protocol* (NTP) dan meminta penanda waktu. NTP memiliki tingkat akurasi waktu hingga 1 ms (DeCusatis et al., 2020). Nilai penanda waktu dari NTP digunakan untuk mengatur nilai penanda waktu pada RTC. RTC dapat menyimpan data waktu, sehingga penunjukan tetap akurat hingga 3,5 ppm, meskipun ketika modul monitoring kehilangan daya.

Parameter kondisi lingkungan berupa tekanan atmosfer dibaca menggunakan sensor MPX4115AP. Sensor ini memiliki luaran berupa sinyal analog. Sensor ini memiliki respons yang linier, dengan rentang pengukuran dari (15 – 115) kPa. Luarannya sensor dihubungkan ke pengubah sinyal analog ke digital (ADC) eksternal ADS1115 16-bit. Persamaan [1] digunakan sebagai fungsi transfer dari sinyal analog ke nilai tekanan atmosfer.

$$P = \left(\frac{0.095V_{cc} + V_{out}}{0.009V_{cc}} \right) + \left(\mathcal{G}_p \times t_f \times 0.009 \times V_{cc} \right) \dots\dots\dots [1]$$

dengan:

P adalah tekanan atmosfer, dalam kPa

V_{cc} adalah tegangan input, dalam volt.

Tegangan input memiliki tingkat kesalahan hingga ± 0,25 volt.

V_{out} adalah sinyal analog luaran sensor, dalam volt.

\mathcal{G}_p adalah kesalahan pembacaan tekanan, setara dengan ± 1,5 kPa.

t_f adalah faktor kesalahan karena pengaruh suhu. Ketika pengukuran tekanan atmosfer dilakukan pada suhu (0 – 85) °C, nilai $t_f \cong 1$.

Dalam penelitian ini digunakan ADC eksternal dikarenakan adanya beberapa permasalahan pada ADC internal MCU. Walaupun ADC internal MCU memiliki resolusi hingga 12-bit, namun sinyal analog maksimum yang dapat dibaca terbatas hingga 3,3 volt. Pada beberapa kasus, sinyal analog terkecil yang dapat terukur hanya dari (0,2 – 3,3) volt karena adanya *offset* hingga sebesar 1,7 volt (Maier et al., 2017). Selain itu, ADC internal MCU memiliki respon yang tidak linier sehingga harus dikoreksi dengan penambahan komponen elektronik lain atau dikoreksi secara statistik melalui proses kalibrasi (Anshori et al., 2022; Guarnieri Calò

Carducci, 2019). Derau atau noise juga dapat diamati dari pengukuran menggunakan ADC internal MCU (Espinosa Gavira, 2022), sehingga mengurangi sensitifitas sensor.

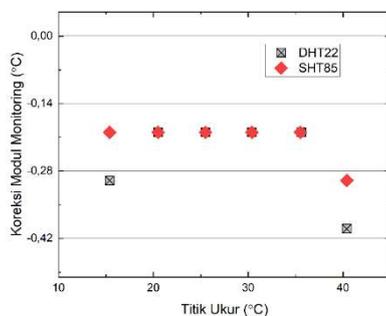
3.2 Validasi Pengukuran

Sebagai jaminan kebenaran hasil pengukuran MML dikalibrasi terhadap termohigrometer acuan pada chamber sesuai dengan ISO/IEC 17025: 2017. Kalibrasi dilakukan pada rentang (16 – 41) °C dengan perulangan untuk melihat karakteristik stabilitas sensor. Kalibrasi kelembapan relatif dilakukan pada suhu 25 °C dengan rentang ukur (39 – 66) %RH. Sensor SHT85 dan DHT22 yang digunakan pada penelitian ini merupakan tipe kapasitif. Pada penggunaan di suhu ruangan, 20 °C – 30 °C, suhu memiliki pengaruh yang dapat dikecualikan apabila dibandingkan dengan nilai ketidakpastian pengukuran (Carvajal, 2018). Sehingga kalibrasi penunjukan nilai kelembapan relatif sensor direntang suhu lain, maupun

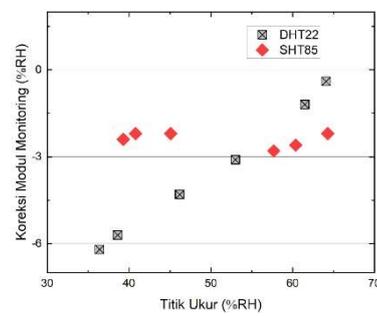
koreksi karena adanya pengaruh perubahan suhu tidak dilakukan pada penelitian ini. Kemudian, untuk pembacaan nilai tekanan, hasil pembacaan modul monitoring dibandingkan terhadap Vaisala PTU300 yang terkalibrasi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

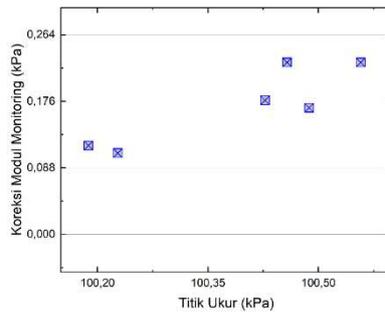
Hasil validasi pengukuran sensor-sensor MML dapat dilihat pada Gambar 3. Hasil kalibrasi memberikan nilai ketidakpastian pengukuran sebesar $\pm 0,3$ °C untuk penunjukkan suhu, $\pm 2,3$ %RH untuk penunjukkan nilai kelembapan relatif, dan $\pm 0,12$ kPa untuk penunjukkan tekanan atmosfer. Menggunakan sebaran nilai koreksi, dapat dibuat model pencocokan kurva menggunakan regresi polinomial orde tiga. Koefisien determinasi (R^2) dari model matematis untuk masing-masing pengukuran sensor suhu dan kelembapan relatif memiliki nilai $> 0,99$. Hal ini mengindikasikan penunjukan sensor dengan linieritas yang baik.



(a)



(b)

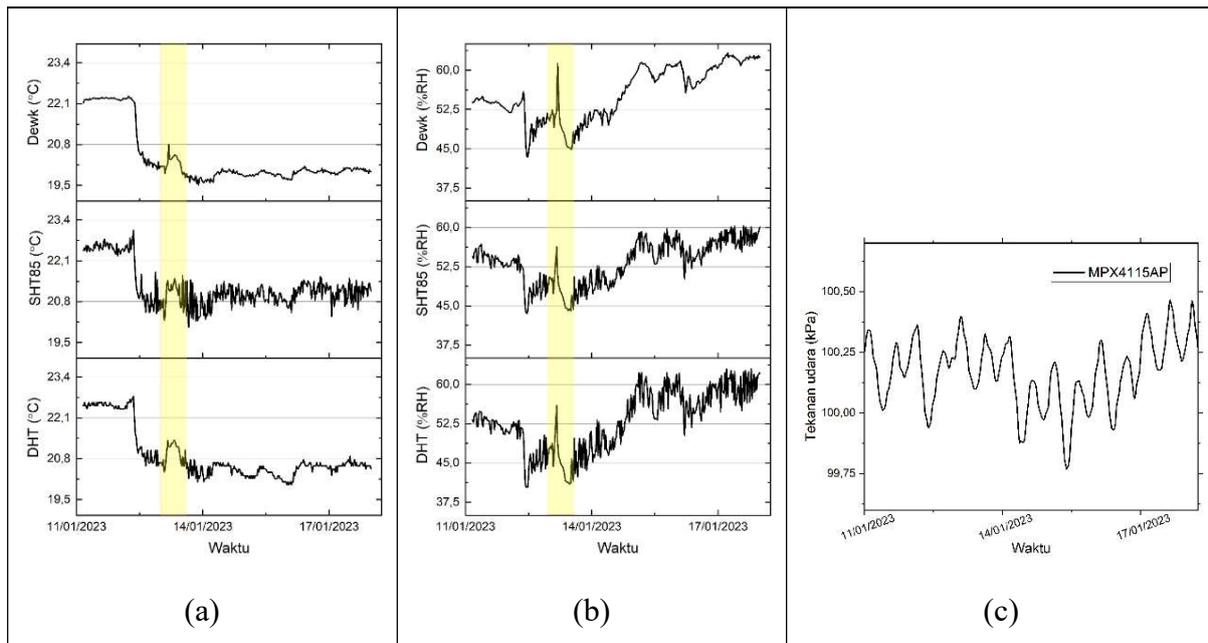


(c)

Gambar 3. Hasil validasi penunjukan modul monitoring lingkungan: (a) nilai suhu, (b) nilai kelembapan relatif, dan (c) tekanan atmosfer

Lebih jauh lagi, *logger* kondisi lingkungan Fluke 1620 (DewK) digunakan untuk melihat unjuk kerja MML. DewK memiliki akurasi penunjukan suhu sebesar $\pm 0,25$ °C dan ± 2 %RH untuk penunjukan nilai kelembapan relatif. Pembacaan sensor DewK telah terkalibrasi, dengan ketidakpastian pengukuran untuk parameter temperatur adalah sebesar $\pm 0,09$ °C, dan untuk parameter kelembapan relatif adalah sebesar $\pm 0,81$ %RH. DewK dan MML diletakkan secara berdekatan, menghindari kondisi lingkungan yang tidak seragam untuk melakukan perekaman kondisi laboratorium selama beberapa waktu.

Hasil perekaman kondisi laboratorium menggunakan DewK dan MML ditunjukkan pada Gambar 4. Grafik hasil perekaman kedua instrumen ini menunjukkan kecenderungan yang serupa. Hal ini dapat diamati terutama pada bagian yang disorot, di mana terjadi kenaikan suhu yang signifikan. Kenaikan suhu mengakibatkan penurunan kelembapan relatif udara pada ruang laboratorium. Begitu juga sebaliknya, ketika terjadi penurunan suhu ruang maka nilai kelembapan relatif mengalami kenaikan seperti terlihat pada tren grafik hasil pengukuran. Perbedaan penunjukan sensor MML terhadap DewK masih berada pada batas toleransi ketidakpastian pengukuran hasil kalibrasi.



Gambar 4. Perbandingan perekaman kondisi lingkungan dengan instrumen komersial: (a) parameter suhu, (b) parameter kelembapan relatif udara, dan (c) tekanan udara

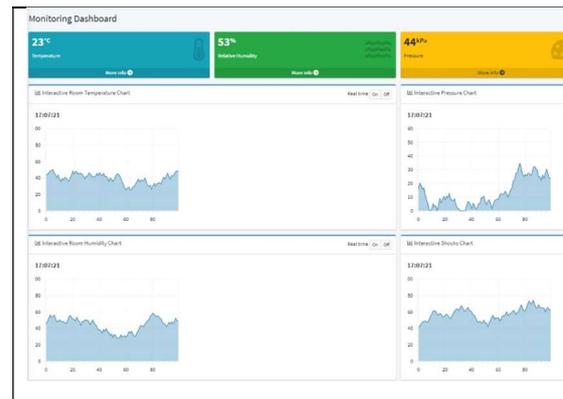
Selain itu, hal signifikan yang diamati dari hasil perekaman ini adalah adanya derau pada data perekaman MML apabila dibandingkan dengan pembacaan DewK. Hal ini karena pada sensor DewK nilai yang ditampilkan merupakan hasil rata-rata dari pembacaan data sebelumnya. Pada penelitian ini penunjukan nilai suhu dan kelembapan relatif DewK merupakan rata-rata dari data selama 2 menit. Menggunakan fungsi statistik rata-rata, plot grafik pembacaan sensor menjadi relatif lebih halus. Sedangkan modul monitoring kondisi lingkungan yang dikembangkan pada penelitian ini tidak menggunakan fungsi statistik. Nilai pembacaan sensor yang ditampilkan merupakan data terukur saat itu, dan disajikan secara waktu-nyata (*real-time*).

Selain itu data pengukuran modul monitoring kondisi lingkungan yang didesain menggunakan sensor DHT22 memperlihatkan perubahan suhu lingkungan yang bertahap/patah. Hal ini menunjukkan keterbatasan resolusi sensor yang tidak mampu mengikuti perubahan kondisi lingkungan. Selain itu, modul monitoring yang menggunakan sensor ini didesain berada dalam enklosur sehingga membatasi responsifitas sensor terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Salah satu fungsi yang tidak terdapat pada DewK adalah parameter tekanan atmosfer. Hasil perekaman tekanan atmosfer pada ruang laboratorium menggunakan MML dapat dilihat pada Gambar 4(c). Komponen ADC eksternal yang digunakan pada penelitian ini

memiliki resolusi 16-bit yang mampu mengukur perbedaan tegangan hingga sebesar 0,1875 mV atau dengan menggunakan persamaan [1], setara dengan perubahan tekanan atmosfer sebesar $4,3 \times 10^{-3}$ kPa. Siklus perubahan tekanan udara harian pada ruang laboratorium tampak mengikuti bentuk gelombang sinusoidal. Perubahan terjadi pada rentang waktu yang berulang, dengan penurunan tekanan udara terbesar selalu terjadi pada sore hari, sekitar pukul 15:00 – 16:00 WIB. Sedangkan kenaikan tekanan udara terjadi pada saat mendekati tengah malam dan pada pagi hari pukul 08:00 – 10:00 WIB. Data-data perekaman kondisi laboratorium ini juga dapat diakses pada laman *web*, seperti terlihat pada Gambar 5.

Berdasarkan hasil penelitian, maka modul monitoring ini dapat digunakan pada lingkup pengukuran atau laboratorium kalibrasi dengan kebutuhan perekaman kondisi lingkungan dengan tingkat akurasi $\pm 0,1$ °C untuk parameter suhu, $\pm 1,5$ %RH untuk parameter kelembapan relatif, dan $\pm 1,5$ kPa. Diharapkan dengan penggunaan modul ini, maka akan mempermudah laboratorium kalibrasi dalam memenuhi persyaratan klausul 6 ISO/IEC 17025:2017.



Gambar 5. Laman *web* untuk mengakses data kondisi lingkungan yang terekam

5. KESIMPULAN

Pada penelitian ini modul monitoring kondisi lingkungan dengan mengimplementasikan teknologi IoT telah berhasil didesain dan dibuat. Digunakan dua buah sensor suhu dan kelembapan udara relatif dengan akurasi yang berbeda, serta sensor tekanan udara. Pembacaan modul monitoring lingkungan pada penelitian ini telah dikalibrasi dan unjuk kerjanya dibandingkan dengan sensor komersial serupa. Modul monitoring lingkungan menunjukkan performa yang setara terhadap sensor monitoring lingkungan komersial.

Modul monitoring lingkungan ini dapat digunakan pada laboratorium kalibrasi atau pengujian untuk memenuhi persyaratan kompetensi dalam pencatatan kondisi lingkungan. Fungsi statistik seperti, nilai rata-rata, minimum dan maksimum untuk parameter suhu, kelembapan relatif udara, dan tekanan atmosfer dapat

ditambahkan pada penelitian lebih lanjut. Selain penunjukan kondisi lingkungan secara waktu-nyata, fungsi statistik tersebut dapat digunakan untuk menganalisis penyebab perubahan kondisi lingkungan. Sehingga laboratorium kalibrasi atau pengujian dapat menyiapkan langkah pencegahan ataupun tindakan perbaikan untuk mengendalikan kondisi lingkungan laboratorium.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Riset Inovatif Produktif Invitasi Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (RISPRO LPDP) selaku penyandang dana pada penelitian ini.

7. DAFTAR PUSTAKA

Adafruit Industries, "DHT11, DHT22 and AM2302 Sensors", DHT22 datasheet, Desember 2021.

Anshori I., Mufiddin, G.F., Ramadhan, I.F., Ariasena, E., Harimurti, S., Yunkins, H., and Kurniawan, C. (2022). Design of smartphone-controlled low-cost potentiostat for cyclic voltammetry analysis based on ESP32 microcontroller. In *Sensing and Bio-Sensing Research*.

Belezia, C.K., L., and Almeida, M. (2021). Self-assessment model for testing and calibration laboratories based on

ISO/IEC 17025:2017 requirements. In *Journal of Physics: Conference Series*. 1826 012026.

Brown, C., Elo, T., Hovhannisyan, K., Hutzschenreuter, D., Kuosmanen, P., Maennel, O., Mustapaa, T., Nikander, P., and Wiedenhofer, T. (2020). Infrastructure for Digital Calibration Certificates. In *IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT*. (pp. 485-489).

Carvajal, Sergio, and Sánchez, Ciro. (2018). Temperature effect in the calibration of capacitive humidity sensors. In *International Journal of Metrology and Quality Engineering*.

DeCusatis, C., Lynch, R., Kluge, W., Houston, J., Wojciak, P., and Guendert, S. (2020). Impact of Cyberattacks on Precision Time Protocol. In *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. (pp. 2172-2181).

Dudukalov, E. V., Munister, V. D., Zolkin, A. L., Galanskiy, S. A., and Rudnev, S. G. (2021). Metrological support integration in conditions of digital transformation. In *J. Phys.: Conf. Ser.* 1889 032012.

Espinosa Gavira, M., Agüera-Pérez, A., Sierra-Fernández, J., de la Rosa, J.,

- Palomares-Salas, J., and Florencias-Oliveros, O. (2022). Design and Test of a High-Performance Wireless Sensor Network for Irradiance Monitoring. In *Sensors*. (p. 2928).
- Garg, N., Rab, S., Yadav, S., and Varshney, A. (2021). Significance and implications of digital transformation in metrology in India. In *Measurement: Sensors*.
- Guarnieri Calò Carducci, C., Monti, A., Schraven, M., Schumacher, M., and Mueller, D. (2019). Enabling ESP32-based IoT Applications in Building Automation Systems. In *2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT)*. (pp. 306-311).
- International Organization for Standardization (ISO). (2017). General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (ISO/IEC Standard No. 17025).
- International Organization of Legal Metrology (OIML). (2004). Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ and M₃ – Part 1: Metrological and technical requirements (OIML International Recommendation No. R 111-1).
- Kraus, S., Jones, P., Kailer, N., Weinmann, A., Chaparro-Banegas, N., and Roig-Tierno, N. (2021). Digital Transformation: An Overview of the Current State of the Art of Research. In *SAGE Open*.
- Kuster, M. (2020). A Measurement Information Infrastructure's Benefits for Industrial Metrology and IoT. In *IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT*. (pp. 479-484).
- Kuster, M. (2021). Metrological Data Completeness for Digital Transformation. In *IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4.0&IoT)*. (pp. 374-379).
- Maier, A., Sharp, A., and Vagapov, Y. (2017). Comparative Analysis and Practical Implementation of the ESP32 Microcontroller Module for the Internet of Things. In *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*. (pp. 143-148).
- Prasetyo, H., Tularsih, Y., Pandansari, F., Prasetya, S., Priyandono, A., and Dermawan, A. (2021). Design of Power Monitoring System Based on Internet of Things (IoT) with Calibration Interface. In *2021*

International Conference on ICT for Smart Society (ICISS). (pp. 1-5).

Prato, A., Mazzoleni, F., and Schiavi, A. (2019). Metrological traceability for digital sensors in smart manufacturing: calibration of MEMS accelerometers and microphones at INRiM. In *2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT)*. (pp. 371-375).

Rasmussen, K. (2001). The influence of environmental conditions on the pressure sensitivity of measurement microphones. In Zaveri, H. K. (Eds.), *Brüel & Kjør Technical Review*, (pp. 1-13). Denmark.

Sensirion, "Datasheet SHT85 Humidity and Temperature Sensor", SHT85 datasheet version 3.1, Maret 202