

PENGEMBANGAN INSTRUMEN PENGUKURAN KUALITAS UDARA MENGGUNAKAN SENSOR PMS7003

DEVELOPMENT OF AIR QUALITY MEASUREMENT INSTRUMENT USING PMS7003 SENSOR

Tanti Tritama Okaem^{1,2*}, Yohandri¹, Nofi Yendri Sudiar^{1,3}, Hamdi¹

¹Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Padang

²Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang

³Research Center for Climate Change Universitas Negeri Padang (RCCC-UNP)

*E-mail: tantitritama@gmail.com

Naskah masuk: 09 Februari 2022 Naskah diperbaiki: 10 Maret 2022 Naskah diterima: 22 Juni 2022

ABSTRAK

Pencemaran udara menjadi salah satu permasalahan lingkungan secara global. Salah satu parameter kualitas udara yang menjadi perhatian yaitu Particulate Matter 2.5 ug/m (PM2.5) karena mengakibatkan gangguan kesehatan pada pernafasan. Informasi kualitas udara PM2.5 tersebut sangat terbatas karena terkendala jumlah dan operasional dari instrumennya, sehingga dilakukan pengembangan peralatan pengukuran kualitas udara menggunakan sensor PMS7003. Pengujian dilakukan di SPAG Bukit Kototabang selama 1 bulan, instrumen dibandingkan dengan peralatan referensi MetOne BAM 1020 untuk konsentrasi PM2.5 dan PM10. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan model pengembangan Plomp. Hasil yang diperoleh sensor PMS7003 layak digunakan untuk pengukuran konsentrasi PM2.5 dibandingkan PM10. Hasil pengujian PM2.5 dengan instrumen referensi diperoleh yaitu korelasi 0,68, RMSE 3,83, bias -0.43, MAE 2.91, ketepatan 0.92 dan konsentrasi PM2.5 pada sensor PMS7003 meningkat saat kelembaban diatas 90%.

Kata kunci: Partikulat, sensor, PMS7003

ABSTRACT

Air pollution is one of the global environmental problems. One of the air quality parameters of concern is Particulate Matter 2.5 ug/m (PM2.5) because it causes respiratory health problems. The PM2.5 air quality information is very limited due to the number and operational constraints of the instrument, so the development of air quality measurement equipment using the PMS7003 sensor is carried out. The test was carried out at SPAG Bukit Kototabang for 1 month, the instrument was compared with the MetOne BAM 1020 reference equipment for concentrations of PM2.5 and PM10. This research was conducted using the Plomp development model. The results obtained by the PMS7003 sensor are suitable for measuring the concentration of PM2.5 compared to PM10. The results of PM2.5 testing with reference instruments were obtained, namely correlation 0.68, RMSE 3.83, bias -0.43, MAE 2.91, accuracy 0.92 and PM2.5 concentration on the PMS7003 sensor increased when humidity was above 90%.

Keywords: particulate, sensor, PMS7003

1. Pendahuluan

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang terjadi secara global, yaitu berupa penurunan kualitas udara yang disebabkan oleh adanya polutan/unsur-unsur berbahaya yang masuk ke dalam udara atau atmosfer bumi. Faktor alam dan faktor manusia menjadi penyebab dari sumber polutan tersebut. Pencemaran udara dari faktor alam seperti dari abu dan gas vulkanik gunung berapi, kegiatan mikroorganisme dan kebakaran hutan. Sedangkan faktor manusia berupa semua aktivitas manusia yang menghasilkan polutan udara seperti kegiatan industri dan energi, transportasi, pertanian, pembakaran dan lainnya. Data dari *World Health Organization* (WHO) menyatakan 9 dari 10 orang di dunia menghirup udara dengan tingkat polusi yang melampaui ambang batas berdasarkan standar untuk kesehatan [1]. Tingkat konsentrasi polutan yang tinggi tidak hanya memberikan dampak terhadap manusia, satwa liar dan ternak, tetapi juga menyebabkan kerusakan lingkungan terutama pada vegetasi tumbuhan dan masa depan hutan [2]. Salah satu jenis polutan udara yang berbahaya adalah partikel udara/*Particulate Matter* (PM).

Particulate Matter (PM) merupakan salah satu bahan pencemar pada udara yang terdiri dari campuran partikel padat (seperti debu, asap, kotoran, jelaga) dan tetesan cairan pada udara yang memiliki ukuran yang cukup kecil. PM memiliki ukuran yaitu berukuran kurang dari 100 μm , namun berdasarkan studi epidemiologi PM_{2,5} lebih berbahaya dari PM₁₀ dan TSP, karena dapat menyusup jauh dalam area alveoli paru-paru manusia. PM_{2,5} dengan ukurannya yang sangat kecil apabila terhirup dan masuk ke dalam tubuh bisa berpenetrasi ke dalam saluran pernapasan bawah sehingga bisa melewati aliran darah dan mengakibatkan kematian akibat paparannya [3]. Selain itu, PM_{2,5} juga dapat mengakibatkan Infeksi Saluran Pernapasan (ISPA), penyakit kardiovaskular, kanker paru-paru, kematian dini dan penyakit paru-paru obstruktif kronis [4]. Maka dari itu informasi kualitas udara/PM sangat dibutuhkan untuk kesehatan dan untuk beraktivitas sehari-hari.

Di Indonesia, informasi kualitas udara untuk sekarang diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan peralatan otomatis yang beroperasi pada beberapa instansi pemerintahan. BMKG salah satu instansi pemerintahan yang menggunakan peralatan otomatis MetOne *Beta-Ray Attenuation Monitors* (BAM) 1020 untuk pengukuran PM_{2,5} yang

tersebar sebanyak 27 unit di seluruh Indonesia (update 20 September 2021). MetOne BAM 1020 memiliki prinsip kerja berdasarkan pelemahan partikel beta yang mana melalui materi padatan yang terkumpul pada filter fiber dalam satu volume udara ambien yang dihisap oleh pompa [5]. Selain MetOne BAM 1020 pengukuran kualitas udara juga menggunakan peralatan otomatis *Tapered Element Oscillating Microbalances* (TEOMs). Instrumen TEOM adalah satu-satunya pemantau massa berbasis filter yang mengukur massa partikel tersuspensi dalam aliran gas secara real time, melalui penggunaan transduser massa inersia [6]. Peralatan-peralatan otomatis ini memiliki harga dan perawatan yang tinggi sehingga keberadaannya sangat terbatas. Selain itu, peralatan-peralatan tersebut membutuhkan operator yang kompeten dalam pengoperasiannya. Untuk mengatasi keadaan atau permasalahan ini maka dilakukan pengembangan peralatan pengukuran kualitas udara berbasis sensor.

Pengembangan peralatan pengukuran kualitas udara dengan menggunakan sensor menjadikannya alat yang menjanjikan untuk aplikasi pemantauan kualitas udara. Sensor *Particulate Matter* mengukur kualitas udara dengan prinsip kerja mengukur cahaya yang dihamburkan oleh partikel. Sensor PM memiliki harga yang tergolong murah, selain mudah digunakan sensor PM juga bisa dihubungkan ke mikrokomputer [7]. Keuntungan lain dari sensor PM yaitu konsumsi energi yang rendah, dengan tegangan daya 5 V dan arus 250 mA, ukuran relatif kecil dan ringan serta data yang dihasilkan dapat dikumpulkan dengan frekuensi yang tinggi [8].

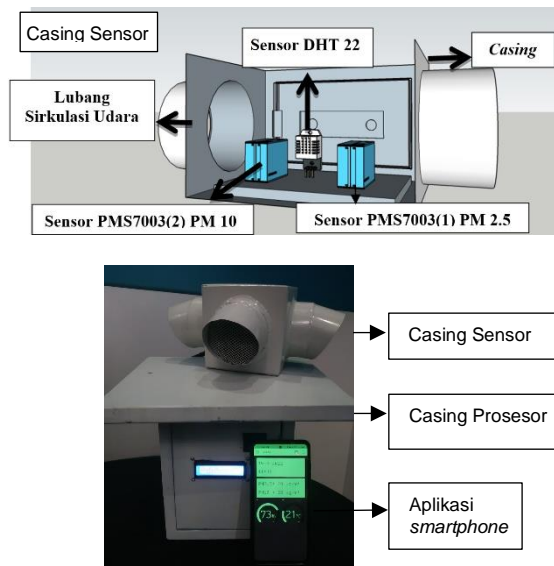
Particulate Matter Sensor (PMS) 7003 merupakan salah satu sensor yang berfungsi untuk mengukur partikel udara/*Particulate Matter*. Berdasarkan penelitian dari Badura et al, sensor PMS7003 memiliki akurasi yang tinggi dibandingkan dengan sensor lainnya (sensor SDS011, ZH03A, dan OPC-N2) [9]. Bauerová et al juga memperoleh kualitas pengukuran dari PMS7003 lebih baik dari OPC-N2 dan tidak memberikan pengaruh pada kondisi kelembaban yang tinggi [10]. Verifikasi silang beberapa sensor PMS7003 juga menunjukkan akurasi data yang tinggi, yaitu ditunjukkan dengan koefisien linieritas mendekati 1[11].

Berdasarkan alasan diatas, pentingnya dilakukan pengembangan instrumen untuk pengukuran kualitas udara dengan menggunakan sensor PMS7003. Instrumen

Particulate Matter ini diuji validasi dan tentunya akan sangat berperan dalam informasi kualitas udara untuk masyarakat dan stakeholder, sehingga bisa sebagai bentuk langkah mitigasi saat terjadinya bencana kabut asap ataupun kondisi kualitas udara yang buruk.

2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang, kabupaten Agam selama 1 bulan dari tanggal 12 November 2021 hingga 11 Desember 2021. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data konsentrasi PM_{2,5} dan PM₁₀ dari sensor PMS7003 dan BAM1020, data temperatur dan kelembaban dari sensor DHT22 yang dibandingkan dengan alat referensi BAM 1020. Instrumen PMS7003 terdiri dari casing sensor dan casing prosesor dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Instrumen PMS7003

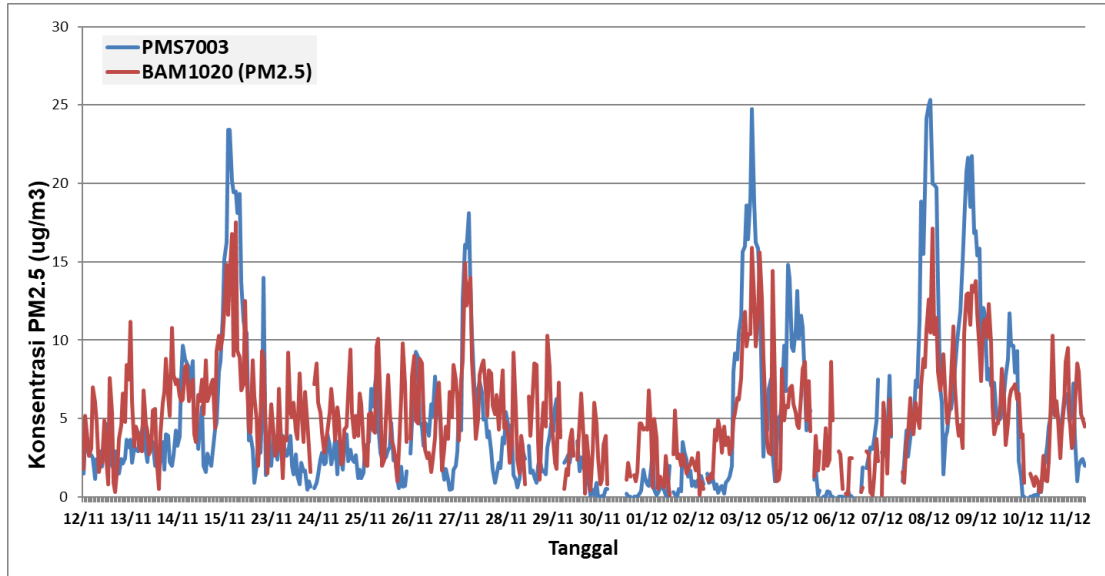
Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang (*Global Atmosphere Watch*). Stasiun yang berlokasi di kabupaten Agam, pulau Sumatera, Indonesia ($0^{\circ} 12' 07''$ LS – $100^{\circ} 19' 05''$ BT), berada di daerah ekuatorial dan di area terpencil pada ketinggian 864,5 m di atas permukaan laut dan 40 km dari garis pantai bagian Barat. Temperatur pada lokasi bervariasi dari 16 hingga 25°C dan kelembaban relatif lebih dari 80%. SPAG Bukit Kototabang memiliki instrumen pembanding yang digunakan sebagai instrumen referensi yaitu instrumen monitoring MetOne BAM 1020 untuk pengukuran konsentrasi PM_{2.5} dan PM₁₀. Instrumen PMS7003 diletakkan di atas DAK dengan lokasi yang sama dengan inlet alat referensi MetOne BAM 1020 untuk pengukuran PM_{2.5} dan PM₁₀ dilihat pada Gambar 2.



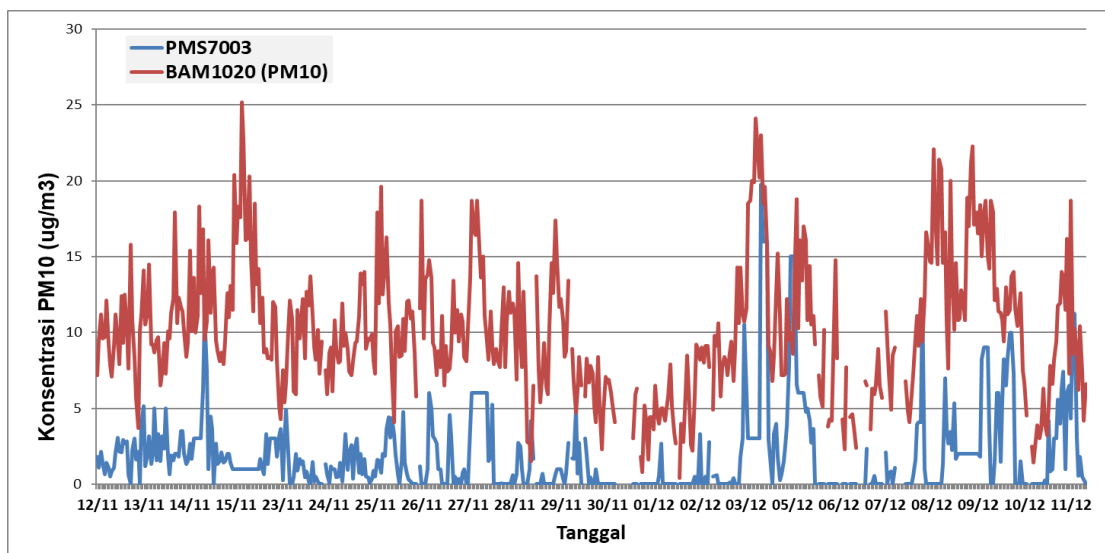
Gambar 2. Lokasi dan posisi instrumen PMS7003 dan BAM 1020

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian dan pengembangan atau *Research and Development*. Penelitian *Research and Development* ini bersifat kebutuhan terhadap informasi kualitas udara dan mengaplikasikan sensor yang dirakit dalam bentuk software pada perangkat lunak, sehingga akan diuji keefektifitasan produk dan pengaplikasiannya untuk informasi kepada masyarakat. Penelitian ini dirancang dengan menggunakan model pengembangan Plomp. Model ini memiliki lima fase pengembangan, diantaranya (1) fase investigasi awal, (2) fase desain, (3) fase realisasi, (4) fase tes, evaluasi, dan revisi, dan (5) fase implementasi. Pada penelitian ini, *Research and Development* hanya dilakukan sampai pada fase tes, evaluasi, dan revisi karena pada fase implementasi membutuhkan proses dan waktu yang cukup lama.

Uji coba tahap awal dilakukan dengan simulasi penggunaan program PMS7003 dan uji performa instrumen. Tahapan uji coba juga dimaksudkan untuk mengetahui tingkat reliabilitas dengan menggunakan metode test and retest kemudian data yang dihasilkan divalidasi menggunakan data observasi instrumen BAM 1020. Analisis yang dilakukan untuk validasi instrumen PMS7003 yaitu dengan perbandingan nilai rata-rata, Analisis Akurasi/*Correlation Coefficient* (R), Analisis bias, *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Mean Absolute Error* (MAE), selain itu juga dilakukan analisis terhadap pengaruh temperatur dan kelembaban.



Gambar 3. Tren konsentrasi PM2.5 instrumen PMS7003 dan BAM 1020



Gambar 4. Tren konsentrasi PM10 instrumen PMS7003 dan BAM 1020

3. Hasil dan Pembahasan

a. Hasil pengukuran konsentrasi Particulate Matter 2.5 μm (PM2.5)

Pengukuran konsentrasi PM2.5 dengan instrumen PMS7003 dan alat referensi menggunakan data sebanyak 501. Pengukuran dilakukan secara real time 24 jam selama satu bulan yaitu dari tanggal 12 November 2021 hingga 11 Desember 2021. Tren konsentrasi PM2.5 dari instrumen PMS7003 dibandingkan dengan alat referensi BAM 1020 dapat dilihat pada Gambar 3.

Tren konsentrasi PM2.5 pada Gambar 3 pada umumnya memiliki pola yang sama antara instrumen PMS7003 dengan instrumen referensi BAM 1020. Berdasarkan statistik deskriptif konsentrasi rata-rata PM2.5 instrumen PMS7003 dan instrumen referensi BAM 1020 memiliki selisih sebesar 0.4, mengindikasikan selisih antara kedua instrumen tidak terlalu besar antara selisih rata-ratanya.

Tabel 1. Uji validasi konsentrasi PM2.5 instrumen PMS7003 dan BAM 1020

Uji Validasi	Nilai
RMSE	3,83
BIAS	-0,43
MAE	2,91
Koefisien korelasi	0,68
Faktor Koreksi	0,64

Hasil pengukuran PM2.5 dengan instrumen PMS7003 (Tabel 1) memperoleh koefisien korelasi sebesar 0.68 yang berarti memiliki korelasi kuat ($>0.5-0.75$). Nilai RMSE yang diperoleh adalah 3.83, metode estimasi dengan nilai RMSE lebih kecil dikatakan lebih akurat, selain itu nilai bias yang diperoleh sebesar -0.43, nilai MAE 2.91 dan faktor koreksi sebesar 0.64.

b. Hasil pengukuran konsentrasi Particulate Matter 10 μm (PM10)

Konsentrasi PM10 pada pengukuran dari instrumen PMS7003 dan alat referensi BAM1020 menggunakan 499 data. Secara umum terlihat konsentrasi PM10 dari instrumen PMS7003 lebih rendah dibandingkan dengan alat referensi BAM 1020 dapat dilihat pada Gambar 4. Konsentrasi rata-rata PM10 instrumen PMS7003 dan alat referensi BAM 1020 memiliki selisih yang cukup besar yaitu 8.2, berbeda dengan konsentrasi PM2.5 sebelumnya. Pengujian validasi data dari instrumen PMS7003 dan alat referensi BAM 1020 dapat dilihat pada Tabel 2. Nilai RMSE yang diperoleh dari hasil pengukuran yaitu 9.26, nilai yang lebih besar dari pengukuran konsentrasi PM2.5.

Tabel 2. Uji validasi konsentrasi PM10 instrumen PMS7003 dan BAM 1020

Uji Validasi	Nilai
RMSE	9,26
BIAS	-8,18
MAE	8,28
Koefisien korelasi	0,34
Faktor Koreksi	5,16

Berdasarkan metode estimasi dengan nilai RMSE, RMSE dengan nilai yang lebih kecil dikatakan lebih akurat. Dengan memiliki korelasi cukup dan nilai RMSE yang besar instrumen PMS7003 lebih layak digunakan dalam pengujian konsentrasi PM2.5. Hasil penelitian ini menguatkan bahwa sensor PMS7003 digunakan untuk pengukuran PM2.5. Sesuai

dengan penelitian Badura (2018) sensor PMS7003 dari pabrikan Plantower lebih direkomendasikan untuk pengukuran PM2.5, dan didukung oleh laporan *JRC Technical* (2019) tentang reuiu monitoring kualitas udara oleh beberapa sensor menunjukkan sensor dari pabrikan plantower direkomendasikan untuk pengukuran PM2.5, dan untuk pengukuran PM10 bisa menggunakan jenis sensor lainnya seperti sensor SDS011, dan OPC-N3.

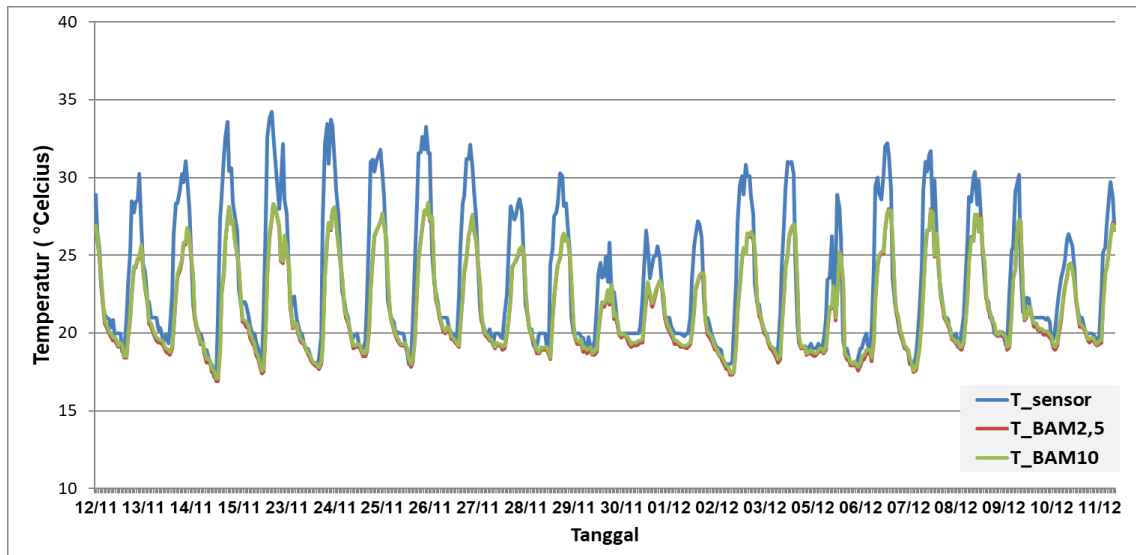
c. Hasil dan Analisis Temperatur dan Kelembaban

Selain analisis konsentrasi PM2.5 dan PM10, penelitian juga dilakukan analisis terhadap validasi data temperatur dan kelembaban dari instrumen PMS7003 menggunakan sensor DHT22 terhadap alat referensi BAM 1020. Data yang digunakan dalam analisis temperatur yaitu sebanyak 534, dan alat referensi yang digunakan yaitu kedua jenis BAM 1020 yaitu untuk pengukuran PM2.5 dan PM10. Tren nilai temperatur dari instrumen PMS7003 dan BAM 1020 dapat dilihat pada Gambar 5.

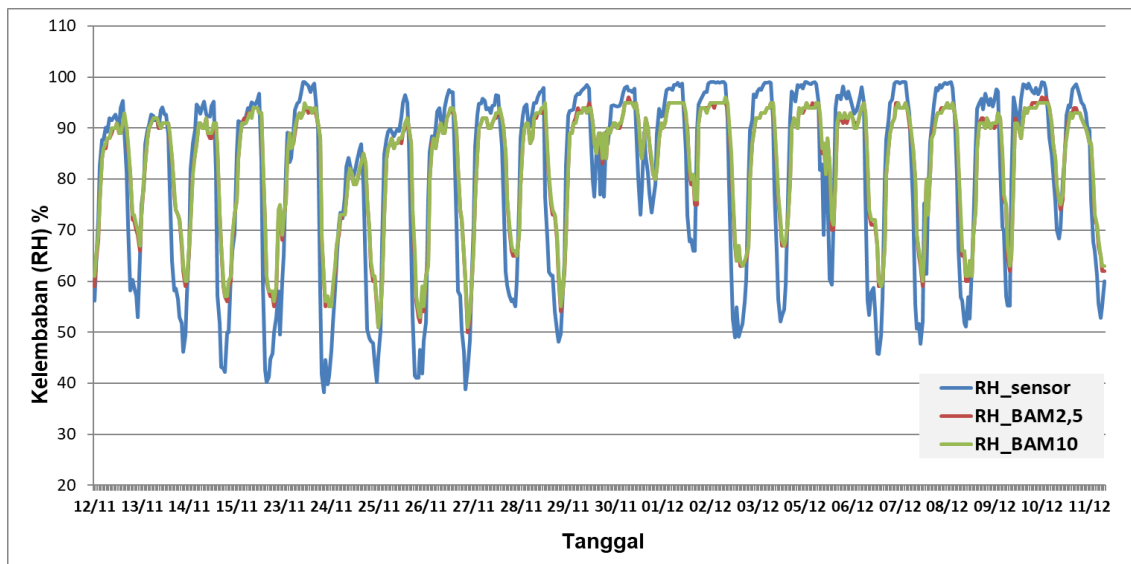
Nilai temperatur pada instrumen PMS7003 secara umum memiliki pola yang sama terhadap alat referensi BAM 1020, namun pada temperatur tinggi nilai temperatur yang terbaca pada instrumen PMS7003 lebih tinggi dibandingkan dengan alat referensi BAM 1020. Temperatur maksimum yang terbaca pada instrumen PMS7003 memiliki selisih nilai sebesar 5.9 terhadap alat referensi BAM 1020, sedangkan nilai minimum dari instrumen PMS7003 hanya memiliki selisih 0.1 hingga 0.3. Dari hasil pengukuran nilai temperatur pada instrumen PMS7003 lebih tinggi, karena adanya pengaruh dari casing yang digunakan pada instrumen PMS7003 yang menyerap panas, sehingga nilai temperatur yang terbaca pada instrumen PMS7003 tinggi pada kondisi siang hari atau saat temperatur tinggi.

Tabel 3. Uji validasi temperatur instrumen PMS7003 dan BAM1020

Uji Validasi	BAM1020 (PM2,5)	BAM1020 (PM10)
RMSE	2,70	2,64
BIAS	1,68	1,56
MAE	1,84	1,77
Koefisien korelasi	0,89	0,89
Faktor Koreksi	0,69	0,68



Gambar 5. Tren nilai temperatur instrumen PMS7003 dan BAM1020



Gambar 6. Tren nilai kelembaban instrumen PMS7003 dan BAM1020

Hasil uji validasi dapat dilihat pada Tabel 3, dimana nilai RMSE pada instrumen PMS7003 terhadap alat referensi BAM1020 tidak terlalu tinggi yaitu 2.70 pada BAM2.5 dan 2.64 pada BAM10. Nilai bias dan MAE berkisar antara 1.56 hingga 1.84. Koefisien korelasi dari sensor dan alat referensi 0,89 yaitu memiliki korelasi sangat kuat ($>0.75-0.99$). Dari hasil uji validasi instrumen PMS7003 menggunakan sensor DHT22 layak digunakan sebagai sensor pendukung pada instrumen PMS7003.

Nilai kelembaban pada instrumen PMS7003 secara umum memiliki pola yang sama terhadap alat referensi BAM 1020 pada Gambar 6, namun

kelembaban pada instrumen PMS7003 memiliki nilai maksimum dan minimum yang lebih tinggi dari alat referensi BAM 1020. Nilai maksimum temperatur yang terbaca pada instrumen PMS7003 memiliki selisih yaitu sebesar 3 terhadap nilai temperatur pada alat referensi BAM 1020. Sedangkan selisih nilai minimum instrumen PMS7003 yaitu sebesar 11.8 terhadap alat referensi BAM2.5 dan 12.8 terhadap alat referensi BAM10. Untuk nilai rata-rata kelembaban dari instrumen PMS7003 dengan alat referensi BAM2,5 dan BAM10 memiliki selisih yaitu sebesar 2.1 dan 2.3. Dari hasil penelitian nilai kelembaban pada instrumen PMS7003 lebih tinggi pada nilai maksimum dan lebih rendah pada nilai minimum.

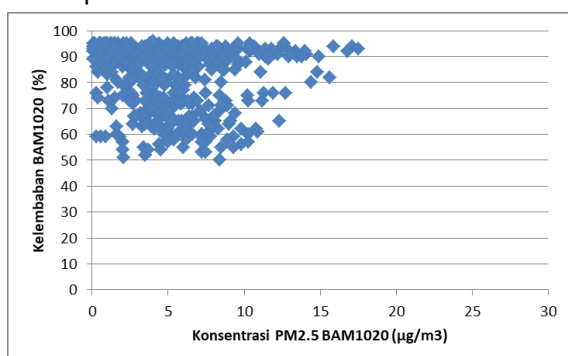
Tabel 4. Uji validasi konsentrasi PM10 instrumen PMS7003 dan BAM 1020

Uji Validasi	BAM1020 (PM2,5)	BAM1020 (PM10)
RMSE	9,20	9,47
BIAS	-2,07	-2,30
MAE	7,00	7,20
Koefisien korelasi	0,90	0,90
Faktor Koreksi	0,67	0,65

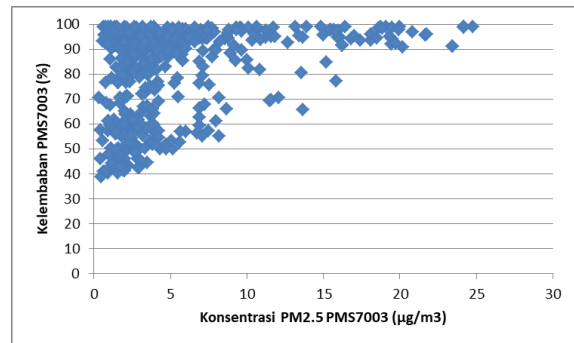
Hasil uji validasi nilai kelembaban instrumen PMS7003 terhadap alat referensi BAM1020 dapat dilihat pada Tabel 4. Nilai RMSE pada instrumen PMS7003 terhadap alat referensi BAM1020 yaitu 9.2 pada BAM2.5 dan 9.47 pada BAM10. Nilai bias dan MAE berkisar antara -2.07 hingga 7.20. Koefisien korelasi dari instrumen PMS7003 dan alat referensi dari kedua instrumen BAM1020 yaitu 0,90 yang berarti memiliki korelasi sangat kuat (>0.75-0.99).

d. Analisis Hubungan Konsentrasi PM2.5 dengan Kelembaban

Berdasarkan WHO (2018) terhadap pengujian performa sensor pada udara dengan kelembaban yang tinggi, beberapa sensor terpengaruh oleh kelembaban dan kinerjanya dapat menurun di udara yang sangat lembab. Kelembaban yang terukur pada instrumen PMS7003 lebih tinggi daripada BAM 1020 dan adanya peningkatan dan penyebaran konsentrasi PM2.5 yang terukur pada sensor PMS7003 pada kondisi RH diatas 90% dapat dilihat pada Gambar 7.



Distribusi konsentrasi PM10 harian mengalami peningkatan pada pagi hari (0-6 WIB) dan pada malam hari (19-23 WIB). Secara umum dapat dijelaskan pada kondisi kelembaban tinggi konsentrasi partikulat PM2.5 meningkat dan sebaliknya, hal ini dikarenakan kandungan dari aerosol merupakan gabungan dari partikel kering dan partikel basah.



Gambar 7. Hubungan konsentrasi PM2.5 dengan kelembaban

Kelembaban yang terukur pada instrumen PMS7003 cukup tinggi, nilai kelembaban (RH) yang terukur dari sensor berkisar antara 38% hingga 98% dan temperatur yaitu berkisar antara 17 °C hingga 34 °C. Kelembaban terukur tinggi karena pengukuran dilakukan di SPAG Bukit kototabang yang relatif berada pada hutan tropis yang memiliki kelembaban yang tinggi. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yaitu kondisi yang dekat dengan RH 100% dan pembentukan fog/mist yang mengandung uap air dapat dideteksi sebagai aerosol [12].

Hasil penelitian menunjukkan adanya pengaruh kelembaban terhadap konsentrasi PM2.5 yang terukur pada sensor PMS7003. Namun berdasarkan penelitian Badura (2018) konsentrasi PM2.5 pada sensor PMS7003 lebih sedikit terpengaruh oleh kondisi kelembaban dibandingkan dengan sensor lainnya, yaitu pengujian dilakukan pada $RH \leq 80\%$, $80\% < RH \leq 90\%$, dan $RH \geq 90\%$, dibandingkan dengan sensor lainnya yaitu sensor SDS011(Nova Fitness), ZH032A (Winsen) dan OPC-N2 (Alphasense) [9]. Penelitian Baurova (2020) juga menunjukkan kualitas pengukuran partikel oleh sensor PMS7003 (Plantower) lebih tinggi daripada OPC-N2 (Alphasense) pada kelembaban yang tinggi.

4. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Instrumen sensor PMS7003 layak digunakan untuk pengukuran konsentrasi PM2.5 untuk merepresentasikan keadaan udara ambient dibandingkan untuk pengukuran konsentrasi PM10. Kelembaban dan temperatur mempengaruhi hasil pengukuran konsentrasi dari sensor PMS7003, yaitu semakin tinggi kelembaban dan semakin rendah temperatur maka konsentrasi PM yang terbaca semakin tinggi. Kelembaban dan temperatur memberikan pengaruh pada hasil pengukuran pada sensor PMS7003 yaitu pada kelembaban diatas 90%.

Informasi *Particulate Matter* (PM) diaplikasikan melalui aplikasi *blynk* pada *smartphone*.

Saran

Pemilihan casing sangat mempengaruhi dalam pengaplikasian sensor temperatur dan kelembaban. Pengujian instrumen kualitas udara dengan alat referensi sebaiknya menggunakan lebih banyak data sehingga data yang dianalisa lebih representative. Pengujian instrumen pengukuran kualitas udara PMS7003 sebaiknya dilakukan pada topografi yang berbeda sehingga bisa mewakili kualitas udara pada kondisi lingkungan/topografi yang berbeda.

Daftar Pustaka

- [1] Buonanno, G., & Hänninen, O. (2018). Air quality and health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11), 1–9. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112399>
- [2] Felzer, B. S., Cronin, T., Reilly, J. M., Melillo, J. M., & Wang, X. (2007). Impacts of ozone on trees and crops. *Comptes Rendus - Geoscience*, 339(11–12), 784–798. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.08.008>
- [3] Cheng, Y. H., Chang, H. P., & Yan, J. W. (2012). Temporal variations in airborne Particulate Matter levels at an indoor bus terminal and exposure implications for terminal workers. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(1), 30–38. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.06.0085>
- [4] WHO. (2002). The World Health Organization Report 2002: reducing risks, promoting healthy life. WHO Library Cataloguing-in Publication Data, 232.
- [5] Instrumens, M. O., & Pass, G. (2011). E-S Ampler Particulate Monitor. 541, 1–58.
- [6] Thermo Fisher Scientific. (2007). Manual Teom® 1405. 190.
- [7] Snyder, E. G., Watkins, T. H., Solomon, P. A., Thoma, E. D., Williams, R. W., Hagler, G. S. W., Shelow, D., Hindin, D. A., Kilaru, V. J., & Preuss, P. W. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science and Technology*, 47(20), 11369–11377. <https://doi.org/10.1021/es4022602>
- [8] Gao, M., Cao, J., & Seto, E. (2015). A distributed network of low-cost continuous reading sensors to measure spatiotemporal variations of PM2.5 in Xi'an, China. *Environmental Pollution*, 199, 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.01.013>
- [9] Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., & Modzel, P. (2018). Evaluation of low-cost sensors for ambient PM2.5 monitoring. *Journal of Sensors*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5096540>
- [10] Bauerová, P., Šindelářová, A., Rychlík, Š., Novák, Z., & Keder, J. (2020). Low-cost air quality sensors: One-year field comparative measurement of different gas sensors and particle counters with reference monitors at tusimice observatory. *Atmosphere*, 11(5), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ATMOS11050492>
- [11] Rizqy Agung Nurhidayatulah, Muhammad Ilham Muharrom, M. M. J., & Hafidhoh, N. (2019). Prosiding SNST ke-10 Tahun 2019 Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim 211. 2016, 211–216.
- [12] R. Jayaratne, X. Liu, P. Thai, M. Dunbabin, and L. Morawska, "The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 11, no. 8, pp. 4883–4890, 2018