

RANCANG BANGUN ALAT UKUR KONSENTRASI MASSA PM_{2.5} BERBASIS OPTIK

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN OPTICAL-BASED DETECTOR PM_{2.5} MASS CONCENTRATION

Niki Adi Negoro, Indra Chandra*, Ismudiati Puri Handayani

Program Studi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
nikiadi@student.telkomuniversity.ac.id, *indrachandra@telkomuniversity.ac.id,
iphandayani@telkomuniversity.ac.id,

Abstrak

Bandung Raya memiliki keunikan dari segi topografi yang dikelilingi oleh pegunungan sehingga membentuk cekungan yang dapat mengakibatkan terjebakanya berbagai polutan di udara, seperti partikulat berukuran kurang dari 2,5 μm (PM_{2.5}). Saat ini, *low-cost sensor* banyak digunakan sebagai alternatif untuk mendeteksi partikel polutan dari PM₁₀-PM_{1.0} karena biayanya yang relatif lebih murah dan bentuknya yang portabel dibandingkan dengan instrumen utama, seperti *TEOM*. Walaupun demikian, *low-cost sensor* memiliki kekurangan yaitu tidak mampu mendeteksi partikel lebih kecil dari 0,3 μm . Penelitian ini bertujuan untuk membuat alat ukur yang memiliki kemampuan seperti instrumen utama yang mampu mendeteksi keberadaan PM_{2.5} sampai dengan ukuran 0,1 μm dengan desain yang portabel dan harga yang lebih murah berbasis *low-cost sensor*. Alat dibuat dengan memanfaatkan diode laser (NWM-960448) dengan panjang gelombang 405 nm serta foto detektor (PDA25K) yang mampu mendeteksi cahaya pada panjang gelombang dari 150-550 nm dan memiliki variasi gain dari 0-70 dB. Cahaya laser yang bertabrakan dengan partikel berukuran < 1 μm akan terhambur, dan hamburan cahaya ditangkap foto detektor. Luaran foto detektor berupa tegangan yang selanjutnya dikonversi menjadi konsentrasi massa partikel. Terdapat dua kondisi pengukuran yang dilakukan yaitu pada saat lingkungan udara bersih tanpa ada partikel polutan (*clean Air*) dan pada saat lingkungan udara terbuka yang memiliki partikel polutan (*ambient air*). Pengukuran *clean air* memanfaatkan pompa bersih, HEPA filter, *chamber* dan SKU SEN0177 untuk mendapatkan kondisi pengukuran udara bersih. Pengukuran *ambient air* memanfaatkan SKU SEN0177 untuk membandingkan hasil pengukuran Alat ukur yang dibuat. Pengukuran *clean air* menghasilkan nilai linierisasi data $y = 0.1994(x) - 273.2$ yang digunakan untuk mengonversi tegangan menjadi konsentrasi massa. Pengukuran *ambient air* dilakukan di dua tempat yaitu di dalam dan luar ruangan. Pengujian di dalam ruangan menunjukkan alat ukur yang dibuat memiliki tren yang cukup sama dengan alat pembanding SKU SEN0177. Nilai pembacaan alat uji mulai tidak akurat ketika konsentrasi massa partikel di atas 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tidak-akuratan dikarenakan perlunya optimalisasi *flow-rate* pada pompa yang digunakan.

Kata kunci: foto detektor, kualitas udara, laser diode, *low-cost sensor*, PM_{2.5}

Abstract

Bandung Raya has a unique topography. It is surrounded by mountains forming a basin which results in pollutant trappings. Besides conventional instruments such as *TEOM* which is pricy, *low-cost sensors* are often used as an alternative to detect pollutant particles of PM₁₀ to PM_{1.0} because of their relatively lower cost and portable size. However, *low cost sensors* have a disadvantage of being unable to detect particles smaller than 0.3 μm . This study aims to build a low cost portable instrument that is able to detect the presence of PM_{2.5} up to 0.1 μm . The instrument consists of a 405 nm NWM-960448 laser diode and a PDA25K photodetector that is able to detect light at wavelengths from 150-550 nm and has a gain variation of 0-70 dB. The laser light that collides with particles <1 μm is scattered and captured by the photodetector. The photodetector output is voltage which is then converted to a particle mass concentration. There are two measurement conditions that are carried out, namely when the air environment is clean without any pollutant particles (*Clean Air*) and when the open air environment has pollutant particles (*Ambient Air*). *Clean Air* measurement utilizes a clean pump, HEPA filter, *chamber* and SKU SEN0177 to obtain the clean air conditions. *Ambient air* measurement uses SKU SEN0177 to compare the measurement

results. The Clean Air measurement resulting a linear data value $y = 0.1994(x) - 273.2$ which is used to convert voltage to mass concentration Ambient Air measurements were carried out in two places, indoors and outdoors. The indoor test shows that the measuring instrument has a trend that is quite similar as SKU SEN0177. The reading of the test equipment begins to be inaccurate when the mass concentration of the particles is above $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Inaccurate measurement is due to the un-optimal flow-rate of pump.

Keywords: air quality, laser diode, low-cost sensor, photodetektor, $\text{PM}_{2.5}$

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara berkembang yang mengalami pertumbuhan pesat di sektor ekonomi maupun industri. Dalam beberapa dekade, Indonesia telah berubah dari negara pedesaan-agraris menjadi perkotaan-industri. Perubahan ini mempengaruhi lingkungan, sumber daya alam, dan juga menurunnya kualitas udara [1]. Salah satu kota di Indonesia yang mengalami hal tersebut adalah Bandung Raya. Pertumbuhan populasi dan ekonomi yang terjadi menyebabkan penggunaan energi fosil juga bertambah sehingga jumlah polutan yang dilepaskan ke udara ikut bertambah [2]. Negara berkembang menghasilkan partikulat (PM) lebih banyak dibandingkan negara maju yang disebabkan oleh penggunaan bahan bakar fosil untuk kebutuhan industri maupun transportasi [3]. PM sendiri mengacu pada campuran yang kompleks antara partikel kecil solid dan tetesan cairan yang berada di udara dan dapat menyebabkan gangguan pada kesehatan [4]. Seseorang yang memiliki penyakit seperti asma dan penyakit paru-paru lainnya merupakan yang paling rapuh jika terkena PM yang memiliki diameter di bawah $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) dikarenakan bisa membuat penyakit tersebut semakin parah. Bahkan terdapat penelitian yang menunjukkan PM yang memiliki ukuran $0,1 \mu\text{m}$ dapat menembus membran sel, masuk ke darah dan sampai ke otak [5]. Oleh karena itu, penting untuk memantau konsentrasi dari partikulat untuk mengetahui kualitas udara di lingkungan.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengukur konsentrasi PM yaitu metode *gravimetric* [6]. Metode ini memanfaatkan perubahan berat pada filter sebelum dan sesudah adanya PM yang masuk. Salah satu alat ukur yang menggunakan metode ini untuk mengukur $\text{PM}_{2.5}$ adalah *Tapered Element Oscillating Microbalance* (TEOM) [7]. TEOM memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan mampu mendeteksi PM sampai dengan ukuran $0,1 \mu\text{m}$. Tetapi kekurangan yang dimiliki TEOM yakni harga relatif mahal yaitu di atas US\$ 2500, memiliki ukuran yang besar dengan berat mencapai 18 kg yang membuatnya tidak portabel dan sulit digunakan untuk pengukuran banyak titik [7,8]. Metode lain yang digunakan untuk mengukur konsentrasi PM adalah metode optik [6] yang memanfaatkan hamburan cahaya sebagai prinsip pengukurannya. Alat ukur lain yang biasanya menggunakan metode ini adalah *low-cost sensor*. Di dalam *low-cost sensor* terdapat detektor berupa fotodiode dan laser dioda. Ketika partikel bertabrakan dengan cahaya dari laser diode akan terjadi hamburan cahaya dan akan ditangkap oleh fotodiode. Intensitas cahaya yang dihamburkan akan sebanding dengan jumlah partikel yang menghamburkan sedangkan panjang gelombang cahaya dihamburkan secara efektif oleh partikel dipengaruhi oleh ukuran partikel tersebut. Dengan demikian, hamburan cahaya yang diterima oleh fotodiode dapat digunakan untuk menghitung dan mengukur partikel yang ada di udara. *Low-cost sensor* memiliki ukuran yang portabel dan harga yang relatif murah yaitu di sekitar US\$ 100 [9]. Kekurangan yang biasa dimiliki *low-cost sensor* yaitu masih belum terkalibrasi sehingga tingkat akurasi pengukuran tidak setinggi instrumen utama seperti TEOM dan batas deteksi hanya mencapai $0,5 \mu\text{m}$ [7].

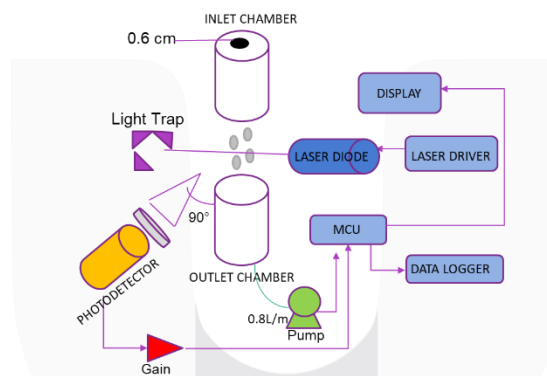
Penelitian ini bertujuan untuk membuat alat ukur yang memiliki kemampuan untuk mendeteksi PM seperti TEOM yang mampu mendeteksi PM sampai ukuran $0,1 \mu\text{m}$, alat yang portabel seperti *low-cost sensor* berbasis laser diode yang memiliki panjang gelombang 405 nm. Panjang gelombang yang lebih pendek menghasilkan intensitas cahaya lebih tinggi, sehingga frekuensi lebih banyak dan sensitivitas lebih baik dibanding laser dioda dengan panjang gelombang 630-680 nm yang digunakan *low-cost sensor* pada umumnya, sehingga alat ukur yang dibuat dapat mendeteksi partikel dengan ukuran $0,1 \mu\text{m}$ [10]. Pengujian pada alat ukur yang dibuat dilakukan pada dua lokasi yaitu dalam ruangan dan luar ruangan. Dimana lokasi dalam ruangan merupakan ruangan laboratorium yang digunakan sebagai tempat riset mahasiswa dan lokasi luar ruangan merupakan atap gedung perkuliahan dengan latar belakang lingkungan sekitar terdapat emisi dari debu jalanan, asap industri dan asap transportasi. Alat ukur menghasilkan hasil yang baik pada pengujian dalam ruangan tapi tidak terlalu baik pada pengujian luar ruangan.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Skema Rancangan Alat Ukur

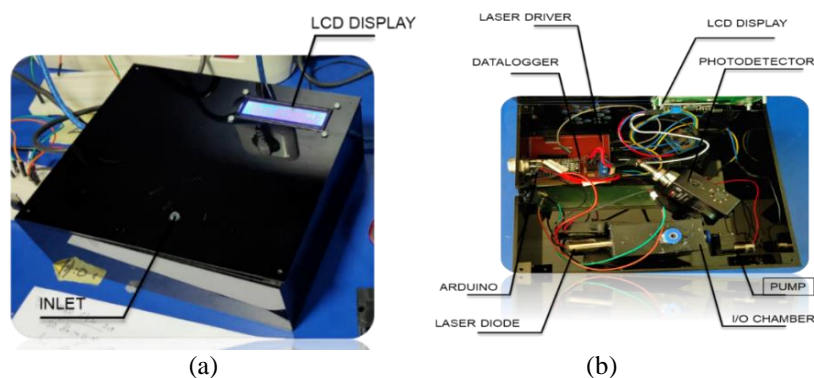
Skematis diagram alat ukur yang dibuat ditampilkan pada **Gambar 1**. Alat ukur ini memiliki komponen utama yaitu laser diode (NWM-960448) dan foto detektor (PDA25K). Laser dioda membutuhkan tegangan 5 V dan arus maksimal 130 mA untuk memancarkan cahaya dengan panjang gelombang 405 nm. Agar cahaya yang dipancarkan juga stabil, maka dibutuhkan daya yang stabil sehingga laser diode terhubung dengan *laser driver* (XL4015) yang mampu menstabilkan arus dan tegangan dengan rentang 0-5 A dan 5-30 V. Partikel di udara masuk melalui *inlet chamber* yang dibuat dengan *3D printer*, dan ditarik keluar melalui *outlet chamber* oleh pompa dengan laju aliran 0,8 L/min. Di antara *inlet* dan *outlet chamber*, terdapat cahaya laser yang dihasilkan oleh laser diode.

Ketika partikel masuk dan bertabrakan dengan cahaya laser, akan dihasilkan hamburan cahaya yang kemudian ditangkap oleh foto detektor yang memiliki kemampuan mengubah intensitas cahaya menjadi tegangan. Foto detektor diletakkan dengan posisi 90° dari posisi fokus cahaya dari laser diode. Posisi 90° ini merupakan sudut dimana hamburan cahaya yang dihasilkan partikel dengan ukuran diameter lebih kecil dari panjang gelombang cahaya yaitu 405 nm sehingga partikel dengan diameter 0,1 μm dapat terdeteksi [11]. Nilai intensitas cahaya yang dihasilkan dari hamburan cahaya bergantung pada banyak faktor. Setiap partikel memiliki massa jenis, indeks bias, bentuk, dan diameter yang berbeda. Intensitas cahaya yang dihamburkan tiap partikel tergantung panjang gelombang cahaya yang digunakan sehingga harus dipilih panjang gelombang yang tepat agar nilai intensitas cahaya hamburan yang diterima detektor tepat dengan nilai konsentrasi massa partikel dengan ukuran tertentu [12]. Keseluruhan proses pada alat uji dikendalikan secara serempak menggunakan Arduino nano. Data pengukuran disimpan dengan menggunakan *data logger* dan informasi proses dan hasil pengukuran ditampilkan pada LCD.



Gambar 1. Skematis rancangan alat ukur.

Seluruh komponen ditempatkan dalam wadah yang terbuat dari akrilik. Tampilan luar dan bagian dalam alat uji ditampilkan pada **Gambar 2**. Pada Tampilan luar terdapat LCD yang menampilkan tegangan dan konsentrasi massa partikel dan lubang *inlet* berdiameter 6 mm. Pada bagian dalam terdapat seluruh komponen yang digunakan seperti laser diode, foto detektor, *chamber*, pompa, *laser driver*, *data logger*, dan LCD yang saling terhubung dengan Arduino Nano.



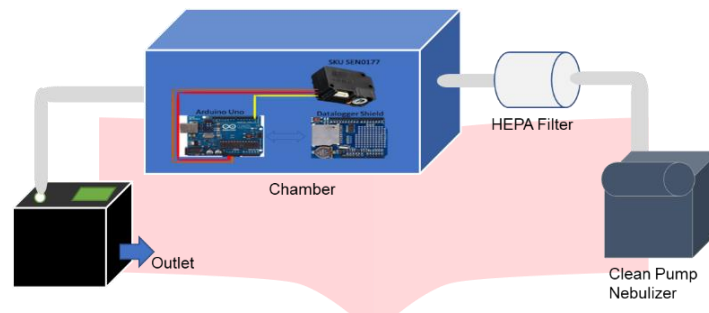
(a)

(b)

Gambar 2. Hasil realisasi alat ukur: (a) tampak luar, dan (b) tampak dalam.

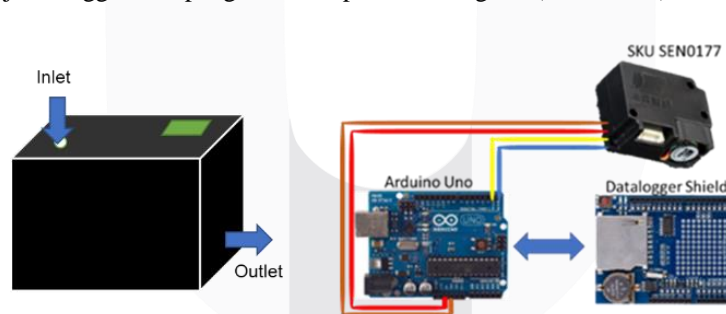
2.2 Kondisi Pengukuran

Terdapat dua kondisi pengukuran yang dilakukan, *clean air* dan *ambient air*. Dua metode pengujian dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan pada pembacaan alat ukur jika dalam keadaan bersih (tidak ada partikel masuk) dan di ruangan terbuka (partikel bisa masuk). *Clean air* merupakan kondisi untuk mengukur ketika udara sekitar alat uji dalam keadaan minim ataupun bersih tanpa PM, sehingga alat uji tidak mendeteksi apapun atau hanya membaca derau. Metode ini memanfaatkan pompa bersih yang menghasilkan udara bersih kemudian udara tersebut melewati *HEPA Filter* untuk menyaring PM yang tersisa lalu menuju *chamber* yang terdapat sensor PM_{2.5} komersial (SKU SEN0177) untuk mengetahui konsentrasi massa yang terdapat di dalam *chamber* sebelum akhirnya menuju alat uji sehingga dapat dibandingkan hasil pengukuran antara SKU SEN0177 dengan alat ukur tersebut (**Gambar 3**).



Gambar 3. Skema pengukuran kondisi *clean air*.

Sementara itu *ambient air* merupakan kondisi pengukuran alat uji secara langsung tanpa ada rancangan tambahan dimana alat ukur dipaparkan secara langsung di lingkungan terbuka sehingga pembacaan yang dihasilkan merupakan kondisi PM pada lingkungan tersebut. Kondisi ini akan digunakan untuk pengukuran *indoor* dan *outdoor*. Pengujian dilakukan secara paralel dengan sensor SKU SEN0177 yang memiliki nilai kesalahan sekitar $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [13]. Sensor ini diletakkan di samping alat uji sehingga hasil pengukuran dapat dibandingkan (**Gambar 4**).



Gambar 4. Skema pengukuran pada lingkungan *ambient air*.

2.3 Lokasi Pengukuran

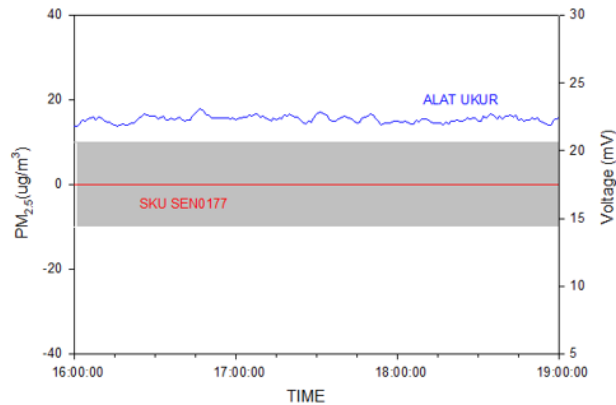
Kegiatan pengukuran dilakukan pada dua lokasi yaitu di dalam dan luar ruangan. Lokasi *indoor* merupakan ruangan laboratorium *Atmospheric Environment* (P316), Universitas Telkom, Bandung, ruangan yang digunakan mahasiswa untuk melakukan penelitian. Lokasi *outdoor* merupakan atap Gedung Tokong Nanas, Universitas Telkom Bandung (~ 675 mdp!; $6^\circ 58' 22.4''\text{S}$ dan $107^\circ 37' 47.1''\text{E}$). Lokasi terletak pada ketinggian 150 meter dari permukaan tanah. Alat ukur akan diletakkan di dalam *shelter*. Desain *shelter* sebagai stasiun pengukuran memiliki ukuran $50 \times 50 \times 100$ cm untuk kotaknya, ketinggian kaki-kaki 50 cm serta ketinggian atap 30 cm. Alat ditaruh di dalam *shelter* untuk menghindari kerusakan akibat terkena cuaca luar.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengujian Komponen

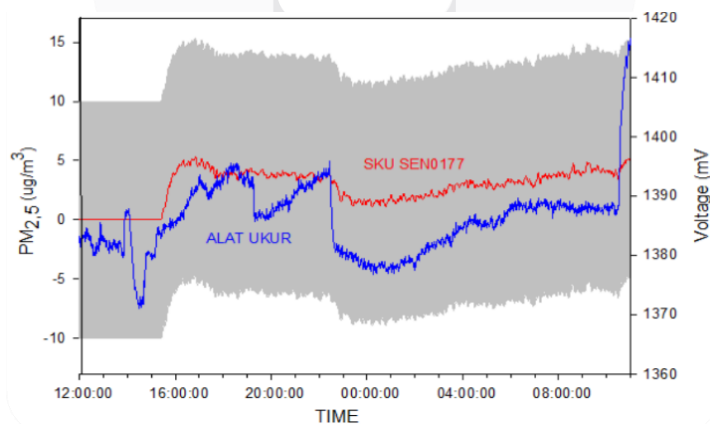
Pengujian dilakukan dengan kondisi *clean air* sehingga pembacaan yang dihasilkan murni dari komponen tanpa ada nilai tambahan dari masukkan. SKU SEN0177 juga diaktifkan untuk

memastikan udara yang diukur merupakan udara yang bersih. Pengujian pertama dilakukan pada foto detektor pada penguatan 70 dB. Gain tertinggi dipilih dikarenakan memiliki sensitivitas tertinggi sehingga diharapkan dapat mendeteksi segala perubahan terkecil apapun yang terjadi selama pengukuran. Pengukuran dilakukan dengan *clean pump* menyala selama 3 jam di Lab. Hasil pengujian yang dihasilkan seperti terlihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Data tegangan dan konsentrasi massa hasil pengujian foto detektor alat ukur (biru), SKU SEN0177 (merah), dan nilai kesalahan SKU SEN0177 (abu-abu) pada penguatan 70 dB.

SKU SEN0177 menghasilkan pembacaan dengan nilai $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ saat tidak ada PM. Berbeda dengan alat ukur, meskipun tanpa ada masukan cahaya, foto detektor menghasilkan pembacaan berupa derau yang disebabkan oleh material dari foto detektor itu sendiri yaitu *Gallium Phosphide* (GaP), yang menghasilkan derau yang paling kecil dibandingkan material yang lain [14]. Pembacaan berfluktuasi di dua angka yaitu 19 dan 29 mV setiap detik. Untuk menghaluskan pembacaan yang dan menekan angka derau yang dihasilkan maka data akan dirata-ratakan menjadi per menit [15]. Kemudian dilakukan pengujian pada komponen laser diode dan foto detektor dilakukan dalam kondisi *clean air*. Pengujian dilakukan selama 24 jam dengan 3 jam awal pompa bersih diaktifkan kemudian dimatikan dan didapatkan hasil pembacaan seperti pada **Gambar 6**. Perbandingan hasil pengujian menunjukkan alat ukur memiliki tren yang cukup sama dengan SKU SEN0177 walaupun fluktuasi data tidak sama persis. Ini menunjukkan bahwa alat ukur mampu mendeteksi keberadaan partikel.

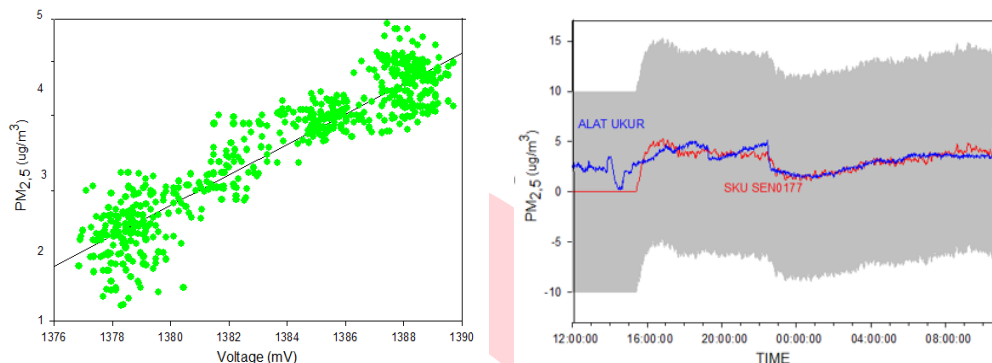


Gambar 6. Hasil pengukuran konsentrasi massa pada kondisi *clean air* selama 12 jam dengan menggunakan alat ukur (biru), SKU SEN0177 (merah), dan nilai kesalahan SKU SEN0177 (abu-abu).

3.2 Konversi Data

Data yang didapatkan dari hasil pengukuran pada **Gambar 6**, keluaran alat ukur masih dalam bentuk tegangan, sedangkan sensor SKU SEN0177 menghasilkan pembacaan dalam bentuk konsentrasi massa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Banyak aspek yang harus dipenuhi untuk mengonversi data keluaran

alat uji menjadi konsentrasi massa, seperti panjang gelombang cahaya, diameter, indeks bias, sudut hamburan cahaya, dan intensitas hamburan dari partikel [12]. Karena keterbatasan banyak aspek yang tidak bisa dipenuhi, sehingga cara lain untuk mengubah keluaran yang dihasilkan yaitu dengan membandingkan keluaran dari alat ukur dengan sensor pembanding dan mendapatkan data linierisasi [. Pengujian dilakukan antara alat ukur dan sensor pembanding SKU SEN0177 dengan sumbu X keluaran dari alat ukur berupa tegangan dan sumbu Y keluaran dari SKU SEN 0177 berupa konsentrasi massa sehingga masukan dalam bentuk tegangan bisa dikonversi menjadi keluaran dalam bentuk konsentrasi massa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Data diambil dari pengujian pada komponen laser diode dan foto detektor dalam kondisi *clean air* dan didapatkan persamaan linierisasi $y = 0.1994(x) - 273.2$ dengan korelasi (R^2) 0.92. Hasil percobaan diperlihatkan pada **Gambar 7**.

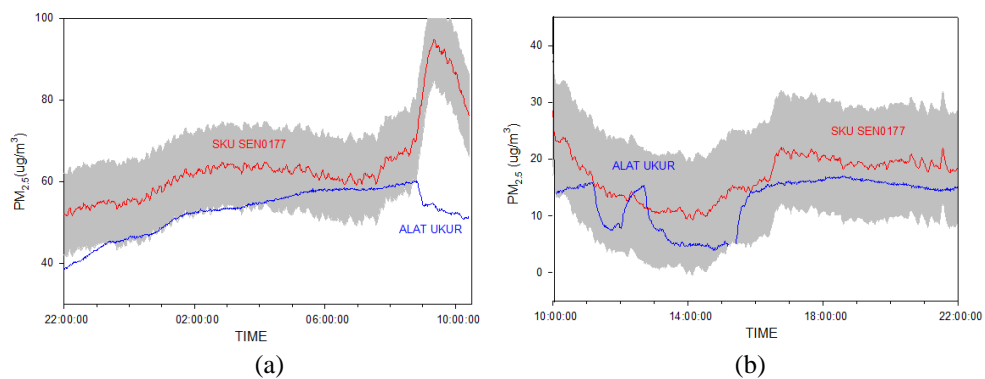


Gambar 7. (a) Konversi tegangan ke konsentrasi massa. Garis hitam menunjukkan derajat linierisasi data. (b) Hasil pengukuran konsentrasi massa pada kondisi *clean air* selama 12 jam setelah dikonversi dengan menggunakan alat ukur (biru), SKU SEN0177 (merah), dan nilai kesalahan SKU SEN0177 (abu-abu).

Hasil pengujian setelah dilakukan konversi, didapatkan tren pembacaan yang sama tetapi berbeda di awal dan di akhir pengujian, hasil pembacaan juga masih dalam batas toleransi yang dimiliki SKU SEN0177. Pada pengujian di tiga jam pertama pompa bersih dinyalakan sehingga kondisi di *chamber* pengukuran dalam keadaan bersih dan tidak ada PM yang masuk sehingga konsentrasi massa sensor SKU SEN0177 menjadi 0. Nilai ini berbeda dengan alat ukur yang berfluktuasi di jangkauan $1-3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ yang dapat disebabkan oleh derau dari foto detektor dan cahaya sekitar ketika tidak ada partikel yang terdeteksi. Derau pada pembacaan awal ini dapat di-cut-off dengan menggunakan *high pass filter* [16] sehingga ketika tidak ada partikel yang masuk ke dalam alat uji, pembacaan akan menghasilkan nilai $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan hanya akan berubah ketika ada PM yang terdeteksi.

3.3 Pengukuran Dalam Ruangan

Pengukuran dilakukan di laboratorium, Universitas Telkom dengan kondisi *ambient air* selama 12 jam dengan penguatan foto detektor 70 dB di dua hari yang berbeda. Alat ukur dibandingkan dengan SKU SEN0177 yang memiliki nilai kesalahan $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hasil yang didapatkan seperti pada **Gambar 8**. Hasil yang didapatkan dari pengujian *indoor* bahwa alat uji menghasilkan tren pembacaan yang sama dengan konsentrasi massa yang masih di dalam jangkauan toleransi pengukuran sensor SKU SEN0177. Hasil pengukuran pada **Gambar 8 (a)** menunjukkan alat ukur mampu mengukur PM sampai dengan konsentrasi $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pada pukul 22:00-09:00 Saat pembacaan dibawah $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, hasil pembacaan alat ukur yang masih masuk pada jangkauan nilai kesalahan SKU SEN0177 sebanyak 78,1%. Hasil pembacaan yang tidak masuk dalam jangkauan kesalahan SKU SEN0177 ini dapat disebabkan oleh teknik linierisasi data yang digunakan untuk karakterisasi alat ukur akan memberikan hasil yang berbeda saat dilakukan pengujian lapangan dengan sampel PM yang berbeda [19]. Pada pukul 09:00-10:00 hasil pengukuran dengan alat uji menghasilkan kecenderungan berbanding terbalik dengan SKU SEN017. Pada saat konsentrasi massa di atas $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, alat uji menghasilkan nilai pengukuran yang jauh berbeda dengan SKU SEN0177. Hal ini dapat disebabkan oleh semakin besar ukuran PM makin besar juga aliran udara yang dibutuhkan alat ukur. Ketika konsentrasi massa di atas $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM mungkin memiliki ukuran yang besar dan aliran udara dari pompa sebesar $0,8 \text{ L}/\text{min}$ tidak cukup kuat untuk menarik PM dengan diameter tersebut [20].

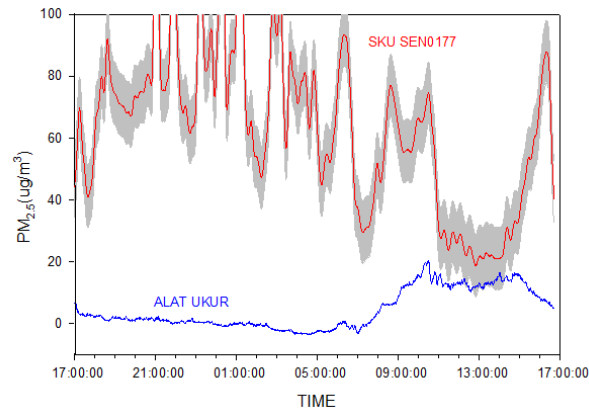


Gambar 8. (a) Hasil pengukuran dalam ruangan di P316 selama 12 jam dari pukul 22:00- 10:00- dengan menggunakan alat ukur (biru), SKU SEN0177 (merah), dan nilai kesalahan SKU SEN0177 (abu-abu). (b) Hasil pengukuran di waktu yang berbeda (10:00-22:00).

Pada **Gambar 8 (b)**, saat pukul 11:00-12:00 terdapat lonjakan pembacaan pada alat ukur sedangkan SKU SEN0177 tidak. Hal itu mungkin disebabkan oleh PM dengan ukuran relatif kecil yang tidak dapat dideteksi oleh SKU SEN0177. Kedua alat memiliki menggunakan sumber cahaya dengan panjang gelombang yang berbeda. Alat ukur menggunakan sumber laser dengan panjang gelombang 405 nm dan sumber laser SKU SEN0177 memiliki panjang gelombang 635 nm. Kedua panjang gelombang memiliki karakteristik yang berbeda jika dihadapkan pada partikel dengan diameter partikel (D_p) di bawah $0,5 \mu\text{m}$. SKU SEN0177 dengan sumber cahaya 635 nm tidak mampu mendeteksi partikel dengan diameter di bawah $0,3 \mu\text{m}$ [17], sedangkan panjang gelombang 405 nm masih secara efektif dihamburkan oleh partikel $D_p 0,1 \mu\text{m}$ sehingga sensor dengan sumber cahaya yang memiliki panjang gelombang 405 nm diharapkan mampu mendeteksi partikel $0,1-2 \mu\text{m}$ [11].

3.4 Pengujian Luar Ruangan

Pengujian luar ruangan dilakukan di atap Gedung Tokong Nanas, Universitas Telkom, selama 24 jam. Di lingkungan sekitar tempat pengukuran terdapat pembakaran sampah dan juga kendaraan yang lewat. Emisi yang dihasilkan kedua hal tersebut merupakan penyumbang terbesar untuk aerosol dan karbon [17]. Hasil yang didapatkan ditampilkan pada **Gambar 9**. Hasil yang didapatkan dari pengujian luar ruangan juga memiliki hasil yang sama seperti *indoor* saat konsentrasi massa berada di atas $60 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$. Alat ukur menunjukkan nilai yang berbeda dengan SKU SEN0177. Selain faktor ukuran diameter partikel yang kemungkinan sangat besar dan tidak mampu dipompa dengan baik, hal tersebut juga dapat disebabkan oleh karakteristik dari panjang gelombang cahaya 405 nm yang cenderung diserap oleh karbon. Karbon dalam aerosol merupakan komponen utama dari PM yang memiliki karakteristik yaitu menyerap lebih banyak cahaya yang memiliki panjang gelombang lebih pendek [17]. Cahaya yang diserap oleh karbon dari panjang gelombang 405 nm sebanyak 34% lebih banyak dibanding cahaya dengan panjang gelombang 635nm sehingga pembacaan alat uji yang menggunakan cahaya 405 nm cenderung lebih rendah dibandingkan dengan sensor yang menggunakan cahaya 635 nm [20]. Selain itu, karbon yang telah lama diudara akan bercampur dengan komposisi partikel lain yang berada di udara dan penyerapan cahaya hingga 50% [18].



Gambar 9. Hasil pengukuran luar ruangan di atap Gedung Tokong Nanas pada pukul 17:00-05:00 dengan menggunakan alat ukur (biru), SKU SEN0177 (merah), dan nilai kesalahan SKU SEN0177(abu-abu).

4. Kesimpulan

Telah berhasil dirancang sebuah alat ukur konsentrasi massa $PM_{2.5}$ dengan laser diode 405nm. Pengujian dilakukan pada dua kondisi yaitu *clean air* dan *ambient air* dengan dua lokasi yaitu di dalam dan luar ruangan. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, Alat ukur yang dibuat pada penelitian ini dapat mendeteksi partikel hingga konsentrasi massa $60 \mu g m^{-3}$. Saat di bawah $60 \mu g m^{-3}$, tren dan nilai konsentrasi massa yang dihasilkan alat ukur mirip dan masih berada di jangkauan pengukuran SKU SEN0177. Pada percobaan di dalam ruangan pertama alat ukur menghasilkan pembacaan yang masuk dalam jangkauan koreksi SKU SEN0177 sebanyak 78.1%. Pada saat konsentrasi massa di atas $60 \mu g m^{-3}$ alat ukur menghasilkan tren dan nilai yang jauh berbeda dengan SKU SEN0177. Dari dua lokasi pengujian alat ukur menghasilkan pembacaan yang baik saat di dalam ruangan tapi tidak dengan luar ruangan. Diperlukan pengujian laboratorium pada alat ukur dengan sampel partikel dengan berbagai ukuran dan komposisi yang berbeda, sehingga alat ukur dapat mendapatkan faktor kalibrasi yang lebih tepat dan menghasilkan pembacaan yang lebih akurat, serta perlu dilakukan uji laju aliran dan diketahui nilai laju aliran yang ideal sehingga performa alat ukur bisa lebih optimal.

Daftar Pustaka

- [1] Tugaswati.A.T.1993."Review of Air Pollution and Its Health Impact in Indonesia"
- [2] Asiati.S, Budiawati.T,Avia,L.O.2001." Acid Deposition in Bandung"
- [3] Abulude,F.O.2016," Particulate Matter: An Approach To Air Pollution"
- [4] Lestari.P, Savitri.2003."Atmospheric Particulate Concentration Measured in an Urban Area Bandung".
- [5] Cauda.E, Hernandez.S, Fino.D, Saraco.G.2006." PM0.1 Emissions during Diesel Trap Regeneration ”,
- [6] S.Amaral, De C.S,Costa.J & C.Pinheiro, 2015. "An overview of particulate matter measurement instruments."
- [7] Zikova.N, Hopke.P.K, Ferro.A.P.2017, "Evaluation of new low-cost particle monitors for PM2.5 concentrations measurements",
- [8] Nakayama, T., Matsumi, Y., Kawahito, K., & Watabe, Y. 2018."Development and evaluation of a palm-sized optical PM2. 5 sensor"
- [9] T.Njalson, I.Novosellov," Design and Optimization of a Compact Low-Cost Optical Particle Sizer",2018
- [10] Gao, R. S, Perring, A. E., Thornberry, T. D., Rollins, A. W., Schwarz, J. P., Ciciora, S. J, & Fahey, D. W. 2013" A High-Sensitivity Low-Cost Optical Particle Counter Design".
- [11] Gao, R. S., H. Telg, R. J. McLaughlin, S. J. Ciciora, L. A. Watts, M. S. Richardson, J. P. Schwarz et al. "A light-weight, high-sensitivity particle spectrometer for PM2. 5 aerosol measurements.2016. " *Aerosol Science and Technology* 50 "
- [12] Yu, Xiaoyu, Yunbo Shi, Tian.W, and Xu.S.2017."Dust-concentration measurement based on Mie scattering of a laser beam."

- [13] Ginting,C.C.,2020. "Rancang bangun sistem kalibrasi sederhana untuk low-cost sensor pm2.5 berbasis nebulizer"
- [14] Thorlabs [Online]. <https://www.thorlabs.com/drawings/b928edcf1a2da9c6-84059D80-A3B6-1AE1-57C3C746E7711DE3/PDA25K-Manual.pdf>
- [15] Mamali, Dimitra, Eleni Marinou, Jean Sciare, et al.2018."Vertical profiles of aerosol mass concentration derived by unmanned airborne in situ and remote sensing instruments during dust events."
- [16] Shao, Wenjia, Hongjian Zhang, and Hongliang Zhou.2017."Mathematical modeling and parameter optimization of fine particle sensors based on laser light scattering".
- [17] Vaicdan, F,Chandra,I, and Suhendi.A.2019."Pengamatan Konsentrasi Massa Pm2.5 Di Cekungan Udara Bandung Raya."
- [18] Liu, Shang, Allison C. Aiken, Kyle G, Manvendra K. Dubey, Christopher D. Cappa, Leah R. Williams, Scott C. Herndon et al.2015."Enhanced light absorption by mixed source black and brown carbon particles in UK winter."
- [19] T. Sayahi, A. Butterfield, K.E. Kelly.2018." Long-term field evaluation of the plantower PMS low-cost particulate matter sensors"
- [20] Gao, R.S., Telg, H., McLaughlin, R.J., Ciciora, S.J., Watts, L.A., Richardson, M.S., Schwarz, J.P., Perring, A.E., Thornberry, T.D., Rollins, A.W. and Markovic, M.Z., 2016."A light-weight, high-sensitivity particle spectrometer for PM2.5 aerosol measurements".

