

## RANCANG BANGUN ALAT UKUR KONSENTRASI GAS CO<sub>2</sub> DAN NO<sub>2</sub> UNTUK PENGAMATAN EMISI DARI PEMBAKARAN SAMPAH RUMAH TANGGA

### DESIGN OF CO<sub>2</sub> AND NO<sub>2</sub> GAS DETECTOR FOR MONITROING EMISSIONS FROM RESIDENTIAL-WASTE BURNING

Arief Abdurrachman<sup>1</sup>, Indra Chandra<sup>2</sup>, Rahmat Awaludin Salam<sup>3</sup>

Program Studi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

<sup>1</sup>ariefabdrchman@student.telkomuniversity.ac.id, <sup>2</sup>indrachandra@telkomuniversity.ac.id,

<sup>3</sup>awaludinsalam@telkomuniversity.ac.id

#### Abstrak

Pembakaran sampah secara langsung sebagai solusi jangka pendek untuk mengurangi volumenya di daerah pemukiman, apabila tidak digunakan metode insinerasi yang benar, akan menimbulkan masalah baru berupa pencemaran udara. Polutan yang dapat dihasilkan dari pembakaran sampah diantaranya adalah gas (Karbon Dioksida/CO<sub>2</sub> dan Nitrogen Dioksida/NO<sub>2</sub>) dan partikulat (ukuran <2,5 mikro meter/PM<sub>2.5</sub>). Namun, konsentrasi yang dihasilkan berbeda-beda tergantung dari jenis sampah, temperatur, reaksi, pasokan oksigen, serta arah/kecepatan angin selama proses pembakaran. Oleh karena itu, diperlukan alat ukur yang dapat mengamati fluktuasi konsentrasi polutan (CO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>) secara langsung dari pembakaran sampah rumah tangga. Sensor CO<sub>2</sub> yang digunakan, terlebih dahulu dibandingkan dengan CO<sub>2</sub> Meter (model GCH-2018, Lutron Electronic Enterprise, Co. Ltd.) di Laboratorium dengan hasil regresi linear,  $R^2 = 0,49$ . Sedangkan pada sensor NO<sub>2</sub>, prosedur persiapan modul sensor menggunakan perangkat lunak untuk memvalidasi luaran data konsentrasinya. Kedua sensor dipasang pada boks yang dilengkapi kipas dengan laju aliran (~4200 rpm) yang telah di optimasi (*pulse width modulation* (PWM) 90-100%). Kipas digunakan untuk menarik gas di udara dengan rerata tingkat kesalahan pembacaan kurang dari masing-masing akurasi sensor (CO<sub>2</sub> < 50 ppm ±3% nilai pembacaannya dan NO<sub>2</sub> < 0,4 ppm ± 2%). Pengukuran dilakukan di tiga lokasi tempat pembakaran sampah di sekitar kampus Universitas Telkom, Bandung. Data hasil pengukuran selalu dibandingkan dengan data dari dua stasiun tetap (di dalam kawasan kampus) yang dilengkapi dengan stasiun cuaca. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi gas CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari tempat pembakaran sampah selalu lebih tinggi dari udara sekitar (>800 ppm). Sementara, konsentrasi gas NO<sub>2</sub> berfluktuasi dengan konsentrasi tertinggi mencapai ~17 ppm. Walaupun alat ukur emisi gas berbasis *low-cost sensor* dari hasil pembakaran sampah dapat dibuat, tetapi tidak disarankan untuk meletakkan alatnya terlalu dekat dengan sumber serta pengukuran dalam periode yang lama.

**Kata kunci : CO<sub>2</sub>, low-cost sensor, NO<sub>2</sub>, pembakaran sampah**

#### Abstract

*Direct combustion of waste as a short-term solution to reduce its volume in residential areas will cause a new problem, i.e. air pollution, if not used the correct incineration method. Pollutants that can be produced from waste burning are, for example, gas (Carbon Dioxide/CO<sub>2</sub> and Nitrogen Dioxide/NO<sub>2</sub>) and particulate (size of less than 2.5 micrometer/PM<sub>2.5</sub>). However, those concentrations varied depending on the type of waste, temperature, reaction, oxygen capacity, and wind direction/speed during the combustion process. Therefore, we need an instrument that can measure the fluctuation of gas concentrations directly from the waste burning. We compared the data between the CO<sub>2</sub> sensor and the CO<sub>2</sub> Meter (GCH-2018 model, Lutron Electronic Enterprise, Co. Ltd.) in the Laboratory with linear-regression results  $R^2 = 0.49$ . Whereas on the NO<sub>2</sub> sensor, we used software-based data validation before it used in the measurement. Both sensors are mounted on a box, and it was equipped with a fan with an optimized flow rate (pulse width modulation 90-100% at ~ 4200 rpm). A fan was used to withdrawal the air with average reading errors are less than those sensor accuracies (CO<sub>2</sub> < 50 ppm ± 3% reading and NO<sub>2</sub> < 0,4 ppm ± 2%). Measurements are located in three locations of incinerators around Telkom University, Bandung. The data results from the field observation are always compared to the data from two*

*fixed stations (both sites are inside campus), which equipped with weather stations. Results show that the concentration of CO<sub>2</sub> produced from the incinerator is always higher than the ambient atmosphere (>800 ppm). Meanwhile, NO<sub>2</sub> gas concentrations fluctuate with the highest level is up to ~17 ppm. Although a gas emission detector based on low-cost sensors from the combustion can be made, it is not recommended to place the device too close to the source and measurements for an extended period.*

**Keywords:** CO<sub>2</sub>, low-cost sensor, NO<sub>2</sub>, residential waste burning

---

## 1. Pendahuluan

Salah satu permasalahan yang sedang dihadapi oleh Indonesia adalah sampah. Dalam satu hari, rata-rata timbunan sampah yang dihasilkan di beberapa kota besar sekitar 480-1300 ton [1]. Beberapa solusi digunakan untuk mengurangi volume dari timbunan sampah yang semakin hari semakin tinggi, diantaranya adalah konsep 3R (*reuse, reduce, recycle*). Namun, konsep ini belum cukup efektif untuk diterapkan di Indonesia mengingat perlunya kesadaran, pengetahuan, serta partisipasi masyarakat secara aktif agar bisa diterapkan dengan baik [2]. Beberapa masyarakat Indonesia cenderung memilih untuk mengurangi volume timbunan sampah dengan cara dibakar. Metode ini, walaupun terbilang efektif mengurangi volumenya, tetapi dapat menimbulkan masalah baru berupa pencemaran udara.

Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 41 Tahun 1999, baku mutu kualitas udara ambien untuk berbagai zat telah didefinisikan [3]. Salah satu komponen pencemar udara yang bisa dihasilkan dari pembakaran sampah diantaranya Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>), Nitrogen Dioksida (NO<sub>2</sub>), dan partikulat berukuran kurang dari 2,5 mikro meter (PM<sub>2.5</sub>). Konsentrasi yang dihasilkan dari pencemar udara tersebut tergantung pada jenis sampah yang dibakar, proses/reaksi pembakaran yang terjadi, temperatur, dan pasokan oksigen selama pembakaran [4].

Oleh karena itu, diperlukan suatu alat ukur yang dapat mengamati fluktuasi dari konsentrasi emisi yang dihasilkan dari pembakaran sampah rumah tangga. Instrumen utama yang biasa digunakan untuk mengukur konsentrasi dari pencemar udara, terutama untuk CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dan partikulat PM<sub>2.5</sub> diantaranya adalah *carbon dioxide gas analyzer* (Model 410i, Thermo Fisher Scientific, Inc.), *nitrogen oxides gas analyzer* (Model 42iQ, Thermo Fisher Scientific, Inc.), dan *Tapered Element Oscillating Microbalance* (TEOM, Model 1400a). Namun demikian, alat tersebut harganya mahal dan tidak mudah untuk dipindahkan. Salah satu teknologi yang sedang tren, murah, dan portabel untuk digunakan saat ini yaitu detektor gas dan partikulat berbasis *low-cost sensors*.

Pada penelitian ini, dilakukan rancang bangun alat ukur kualitas udara berbasis sensor tersebut pada pengamatan emisi gas dan partikulat dari hasil pembakaran sampah rumah tangga. Parameter yang diukur adalah konsentrasi CO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>. Sensor PM<sub>2.5</sub> pada awalnya dimasukkan ke dalam rancangan sistem, akan tetapi tidak dapat mengukur konsentrasi massanya secara akurat ketika asap memasuki ruang pengukuran. Kalibrasi sensor, penggunaan kipas, dan faktor-faktor yang menyebabkan tinggi/rendahnya konsentrasi gas yang terbaca pada alat ukur akan dibahas pada bagian selanjutnya.

## 2. Rancangan Penelitian

### 2.1 Sensor Gas CO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>

Sensor gas CO<sub>2</sub> yang digunakan pada penelitian ini menggunakan prinsip NDIR (*Non Dispersive Infrared (IR)*), artinya cahaya IR yang dipancarkan tidak dibiaskan atau dibelokkan. Sensor NDIR biasanya terdiri dari sumber IR, detektor IR, filter optik, dan ruang ukur [5]. Sensor ini memanfaatkan kemampuan gas CO<sub>2</sub> dalam menyerap intensitas gelombang IR pada panjang gelombang tertentu. Gas CO<sub>2</sub> yang berada di dalam ruang ukur akan menyerap beberapa intensitas cahaya IR yang dipancarkan oleh sumber, sedangkan intensitas cahaya yang tidak diserap kemudian diteruskan ke detektor yang telah dilengkapi oleh filter optik. Perbedaan dari intensitas cahaya sumber dengan intensitas cahaya yang diterima oleh detektor sebanding dengan jumlah konsentrasi gas CO<sub>2</sub> yang ada di dalam ruang ukur [6].

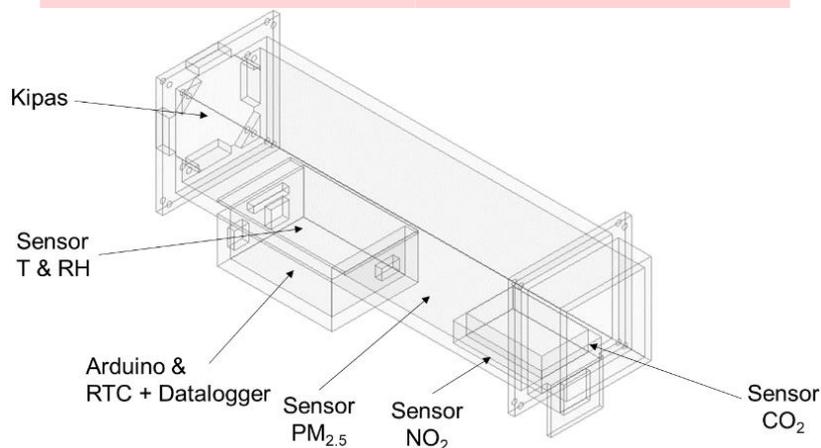
Sementara itu, sensor gas NO<sub>2</sub> menggunakan prinsip elektrokimia yang memanfaatkan reaksi reduksi-oksidasi (redoks) untuk menghasilkan energi listrik. Sensor berbasis elektrokimia yang digunakan terdiri dari elektrode kerja, elektrode bantu, elektrode referensi, elektrolit, dan penghalang difusi. Reaksi redoks terjadi pada elektrode kerja dan elektrode bantu. Ketika tidak ada gas NO<sub>2</sub> yang masuk ke dalam sensor, maka tidak ada reaksi redoks sehingga tidak ada perbedaan

potensial pada kedua elektrode (elektrode kerja dan elektrode bantu) yang dapat menghasilkan arus. Namun ketika gas  $\text{NO}_2$  masuk ke dalam sensor, maka gas tersebut akan mengalami reaksi redoks yang menyebabkan perbedaan potensial dua elektrode sehingga arus bisa dihasilkan. Arus yang dihasilkan berbanding lurus dengan konsentrasi gas yang masuk ke dalam sensor [7].

Kedua sensor-sensor tersebut dihubungkan pada mikrokontroler Arduino yang dilengkapi dengan pewaktu dan penyimpanan data (RTC & *data logger*), serta sensor temperatur, kelembapan dan  $\text{PM}_{2.5}$  (Tabel 1). Alat ukur dirancang dengan menggunakan boks berbahan akrilik yang dapat menyimpan semua sensor yang digunakan (Gambar 1).

Tabel 1. Sensor yang digunakan pada pengukuran emisi hasil pembakaran sampah rumah tangga.

Sensor	Parameter Ukur	Jangkauan
SKU:SEN0219	Karbon Dioksida ( $\text{CO}_2$ )	0 – 5000 ppm
DGS-RESPIRR-968047	Nitrogen Dioksida ( $\text{NO}_2$ )	0 – 20 ppm
SKU:SEN0177	Partikulat ukuran $<2,5 \mu\text{m}$ ( $\text{PM}_{2.5}$ )	0 – 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
DHT22	Temperatur (T) dan kelembapan relatif (RH)	-40-80 $^\circ\text{C}$ dan 0-100 %



Gambar 1. Rancangan alat ukur kualitas udara ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , dan  $\text{PM}_{2.5}$ ) berbasis *low-cost sensor* yang dilengkapi dengan sensor temperatur dan kelembapan.

### 2.3 Lokasi dan Teknik Pengukuran

Lokasi pembakaran sampah yang dijadikan objek pada penelitian ini terdapat di sekitar kampus Universitas Telkom, yaitu (1) Jalan Radio, (2) Jalan Sukabirus, dan (3) Makam Cigombong (Gambar 2). Ketiga lokasi tersebut berada paling jauh, yaitu sekitar 1 km dari kawasan kampus. Masing-masing tempat pembakaran sampah menggunakan teknik pembakaran sampah secara langsung sehingga asapnya mengganggu kualitas udara setempat.

Parameter ukur adalah konsentrasi  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , dan  $\text{PM}_{2.5}$ , serta T dan RH yang dibandingkan dengan data dari stasiun pemantauan kualitas udara di atap Gedung Deli dan Gedung Tokong Nanas (di dalam kawasan kampus). Teknik pengukuran yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan meletakkan alat ukur di tempat pembakaran sampah dengan jarak  $\sim 30$  cm dari tempat keluar asap untuk menjaga sensor pada alat ukur bekerja pada temperatur di bawah  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  (Gambar 3). Pengukuran dilakukan selama satu jam, sebanyak tiga kali pengukuran di setiap tempat pembakaran sampah, pada April-Mei 2019.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Kalibrasi Sensor Gas

Pengukuran sensor gas  $\text{CO}_2$  dibandingkan dengan  $\text{CO}_2$  Meter (model GCH-2018, Lutron Electronic Enterprise, Co. Ltd.). Sensor dan detektor diletakkan berdampingan dengan melakukan pengukuran di Laboratorium Kualitas Udara, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, selama satu jam. Data perbandingan pengukuran diambil setiap dua menit dengan nilai  $R^2 = 0,49$ . Pada sensor gas  $\text{NO}_2$ , dilakukan *setting zero* menggunakan perangkat lunak *Tera Term* yang sesuai dengan prosedur dari pihak pengembang. *Setting zero* dilakukan jika pembacaan di dalam ruangan melebihi dari batas konsentrasi di udara ( $>0,075$  ppm). Pengukuran

tersebut dilakukan selama satu jam di dalam ruangan dengan udara bersih, kemudian dilakukan perintah untuk melakukan *setting zero* pada perangkat lunak. Hasil pembacaan sensor menjadi berada di bawah nilai ambang batas udara ambien ( $\sim 0,01-0,04$  ppm).



Gambar 2. Lokasi pembakaran sampah di sekitar kampus Universitas Telkom.

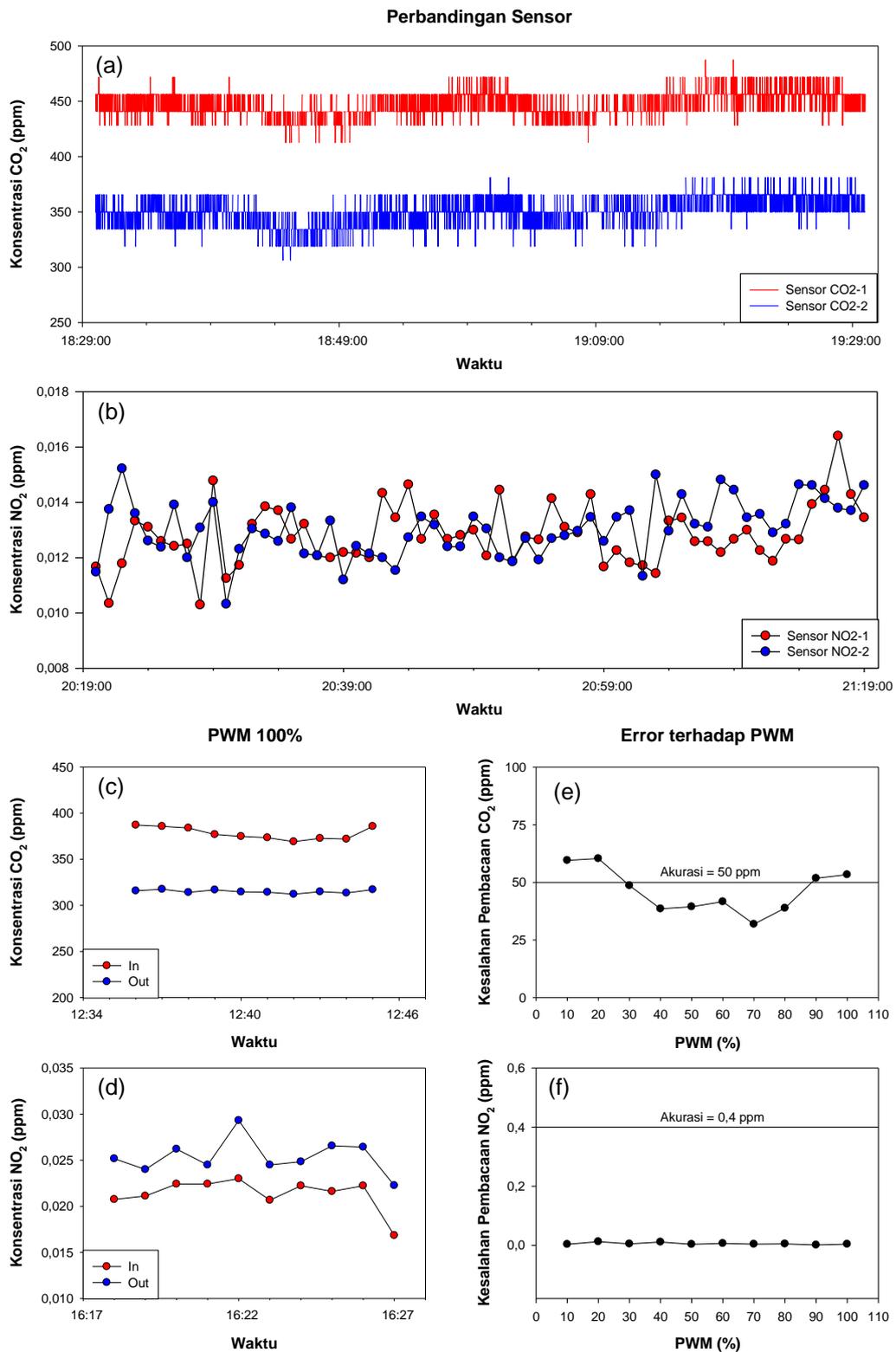


Gambar 3. Ilustrasi teknik pengukuran konsentrasi gas dan partikulat dari tempat pembakaran sampah.

### 3.2 Pengaruh Laju Aliran Kipas terhadap Pembacaan Sensor Gas

Alat ukur yang dibangun pada penelitian ini memanfaatkan laju aliran udara yang dihasilkan oleh kipas sebagai penarik udara untuk masuk ke dalam ruang ukur. Kipas yang digunakan memiliki diameter 6 cm, serta tegangan kerja 5 volt dan arus 0,4 ampere. Pemanfaatan kipas telah dioptimalisasi dengan pengujian *pulse width modulation* (PWM) dari 10-100 % pada kecepatan putaran mencapai  $\sim 4200$  rpm. Sebelum pengujian dilakukan, dilakukan perbandingan pengukuran antara sensor yang sama selama satu jam. Hasilnya, untuk sensor gas  $\text{CO}_2$ , terdapat perbedaan pengukuran antara kedua sensor dengan rata-rata perbedaan  $\sim 100$  ppm (Gambar 4 (a)). Sedangkan untuk sensor gas  $\text{NO}_2$ , perbedaan pengukuran antara kedua sensor rata-rata perbedaan sebesar  $\sim 0,001$  ppm (Gambar 4 (b)). Perlu dicatat bahwa kedua sensor memiliki akurasi masing-masing adalah  $50 \text{ ppm} \pm 3\%$  pembacaan dan  $0,4 \text{ ppm} \pm 2\%$  pembacaan.

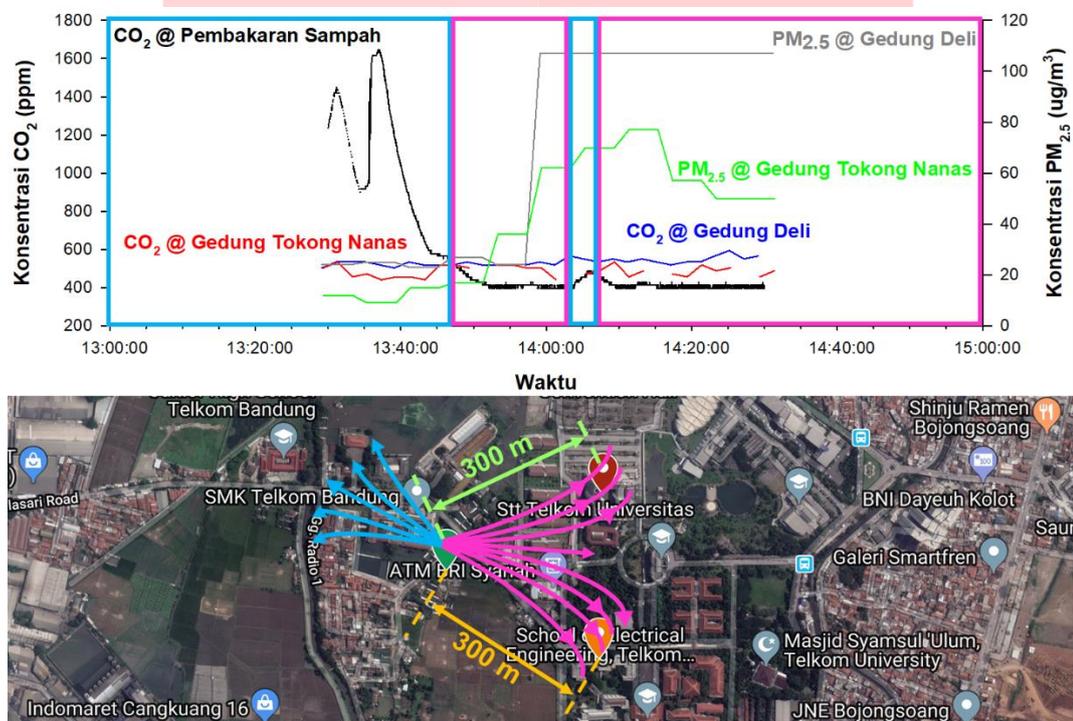
Pengukuran konsentrasi  $\text{CO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di dalam dan luar boks memiliki tren data yang cukup baik satu sama lainnya, mengikuti fluktuasi konsentrasi gas sekitar (Gambar 4 (c) dan (d)). Ketika dilakukan pengujian sensor untuk berbagai nilai PWM, sensor  $\text{CO}_2$  memiliki tingkat kesalahan rata-rata di bawah akurasi sensor pada PWM  $> 20\%$  (Gambar 4 (e)). Sedangkan untuk sensor gas  $\text{NO}_2$ , tingkat kesalahan rata-rata sebesar  $\sim 0,001-0,004$  ppm (Gambar 4 (f)). Dengan demikian, penggunaan kipas pada sistem selain memiliki keunggulan karena sistem secara aktif mengambil sampel di udara ke dalam ruang pengukuran sehingga mengurangi ketergantungan pada arah/kecepatan angin udara, tetapi juga tidak mempengaruhi akurasi pengukuran itu sendiri.



Gambar 4. Perbandingan pengukuran konsentrasi (a) CO<sub>2</sub> dan (b) NO<sub>2</sub> dengan menggunakan masing-masing dua buah *low-cost sensor* yang dipasang secara bersamaan selama ~1 jam, serta (c) dan (d) perbandingan pengukurannya di dalam dan luar boks ukur. (e) dan (f) merupakan pengujian akurasi pengukuran di dalam boks untuk nilai PWM 10-100%. Akurasi pada CO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> adalah 50 ppm ± 3% pembacaan dan 0,4 ppm ± 2% pembacaan.

### 3.3 Persebaran Emisi dari Pembakaran Sampah

Pada saat pengukuran konsentrasi  $\text{CO}_2$  dan  $\text{PM}_{2.5}$  di tempat pembakaran sampah Jalan Radio (25 April 2019) serta pengamatan konsentrasinya di dua stasiun tetap di kawasan kampus Universitas Telkom, terjadi perubahan arah angin (Gambar 5). Pada saat awal (<20 menit; boks biru atau arah angin ditunjukkan dengan warna biru), arah angin menuju alat ukur sehingga emisi yang dihasilkan oleh pembakaran sampah dapat terdeteksi (konsentrasi  $\text{CO}_2$  mencapai ~1600 ppm). Namun, terjadi perubahan arah angin dari arah timur ke barat, yang menyebabkan emisi dari pembakaran sampah tidak dapat terdeteksi alat ukur (konsentrasi  $\text{CO}_2$  yang terukur sama dengan udara sekitar). Dari data arah/kecepatan angin, tampak bahwa emisi dari pembakaran sampah tersebut menuju ke Gedung Deli dan Gedung Tokong Nanas, yang keduanya berjarak 300 m dari tempat pembakaran sampah. Pada Gedung Deli, terjadi peningkatan nilai konsentrasi  $\text{PM}_{2.5}$  sebesar  $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sedangkan konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  relatif stabil (~519 ppm). Di Gedung Tokong Nanas,  $\text{PM}_{2.5}$  meningkat secara gradual dari  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sampai  $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sedangkan konsentrasi  $\text{CO}_2$  berada pada rentang 440-534 ppm. Namun demikian, tidak menutup kemungkinan terdapat sumber emisi lainnya yang dapat meningkatkan nilai konsentrasi  $\text{CO}_2$  dan  $\text{PM}_{2.5}$  di kedua lokasi pengukuran tersebut.

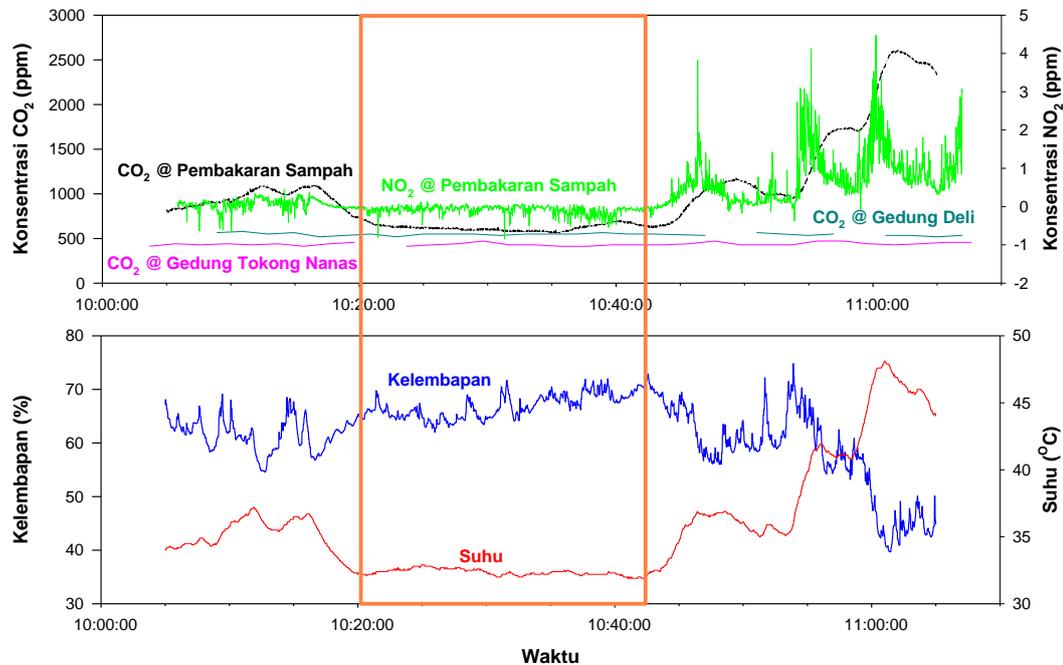


Gambar 5. Persebaran emisi gas dan partikulat dari hasil pembakaran sampah rumah tangga pada 25 April 2019 di kawasan Universitas Telkom, Bandung.

### 3.4 Reaksi Pembakaran Sampah Secara Sempurna dan Tidak Sempurna

Pada 25 April 2019, ketika pemantauan kedua di tempat pembakaran sampah Jalan Sukabirus dilakukan, terjadi penurunan nilai konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  yang dihasilkan dari tempat pembakaran sampah (Gambar 6). Hal tersebut dipengaruhi oleh reaksi pembakaran yang terjadi. Umumnya, reaksi pembakaran terdiri dari pembakaran sempurna dan pembakaran tidak sempurna. Pembakaran sempurna merupakan sebuah reaksi pembentukan gas  $\text{CO}_2$  dan uap air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) dari bahan bakar dengan bantuan pasokan gas oksigen serta temperatur yang cukup [8]. Sedangkan pembakaran tidak sempurna merupakan reaksi pembakaran yang terjadi karena kurangnya pasokan oksigen dan temperatur yang dibutuhkan untuk menghasilkan gas  $\text{CO}_2$  sehingga gas yang terbentuk adalah karbon monoksida ( $\text{CO}$ ) [9]. Hasil pembacaan sensor  $\text{CO}_2$  dari tempat pembakaran sampah mendekati konsentrasi  $\text{CO}_2$  di Gedung Deli dan Gedung Tokong Nanas (~578 ppm). Hal ini diakibatkan api dalam proses pembakaran tersebut sempat padam (boks jingga; 10:20-10:42), sebelum kemudian kembali menyala. Api merupakan elemen yang dihasilkan dari suatu proses pembakaran. Api membutuhkan gas oksigen, bahan bakar, serta energi/panas untuk dapat dihasilkan

sehingga jika salah satu dari faktor tersebut tidak dapat dipenuhi, maka api tidak dapat dihasilkan [10]. Ketika api dalam keadaan padam, bahan yang dibakar (sampah) tidak mendapatkan pasokan oksigen dan temperatur yang cukup untuk bereaksi menghasilkan gas CO<sub>2</sub> [11], sehingga konsentrasi gas CO<sub>2</sub> yang dihasilkan terbaca menurun. Namun, setelah api kembali dinyalakan, pembacaan sensor CO<sub>2</sub> menjadi meningkat melebihi konsentrasi di Gedung Deli dan Gedung Tokong Nanas mencapai lebih dari 2000 ppm karena sampah yang dibakar mendapat pasokan oksigen dan temperatur yang cukup untuk bereaksi menghasilkan gas CO<sub>2</sub>.



Gambar 6. Emisi dari pembakaran sempurna dan tidak sempurna dari sampah rumah tangga pada 25 April di Jalan Sukabirus, Dayeuhkolot, Bandung.

#### 4. Kesimpulan

Telah dilakukan rancang bangun alat ukur konsentrasi gas CO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> untuk pengamatan emisi dari pembakaran sampah rumah tangga. Sensor CO<sub>2</sub> yang digunakan, terlebih dahulu dibandingkan dengan CO<sub>2</sub> Meter (model GCH-2018, Lutron Electronic Enterprise, Co. Ltd.) di laboratorium dengan hasil regresi linear yang cukup baik ( $R^2 = 0,49$ ). Sedangkan pada sensor NO<sub>2</sub>, kalibrasi dilakukan dengan melakukan prosedur kalibrasi pada perangkat lunak. Kedua sensor dipasang pada boks yang dilengkapi kipas dengan laju aliran (~4200 rpm) yang telah di optimasi (*pulse width modulation* (PWM) 90-100%). Pemanfaatan laju aliran udara pada alat ukur memiliki tingkat kesalahan pembacaan sensor CO<sub>2</sub> sebesar ~50 ppm, sedangkan untuk sensor NO<sub>2</sub> sebesar 0,001 - 0,004 ppm, dengan nilai yang dihasilkan masih berada di bawah akurasi dari masing-masing sensor tersebut.

Pengukuran dilakukan di tiga lokasi tempat pembakaran sampah di sekitar kampus Universitas Telkom, Bandung. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi gas CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari tempat pembakaran sampah selalu lebih tinggi dari atmosfer sekitar (~380-780 ppm). Konsentrasi gas NO<sub>2</sub> berfluktuasi dengan konsentrasi tertinggi berada pada ~17 ppm. Ketika arah angin berlawanan dengan arah aliran pada boks, konsentrasi polutan yang terbaca pada alat ukur mengalami penurunan dan cenderung membaca udara sekitar. Demikian pula ketika temperatur dan pasokan oksigen pada pembakaran terbatas, konsentrasi gas CO<sub>2</sub> yang dihasilkan akan mendekati nilai udara sekitar (~580 ppm). Namun ketika kedua faktor tersebut mendukung, konsentrasi gas CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dapat melebihi nilai udara di sekitar (>2000 ppm).

#### Daftar Pustaka:

- [1] Timbunan Sampah Nasional Capai 64 juta ton per Tahun (<https://ekonomi.bisnis.com/read/20190221/99/891611/timbunan-sampah-nasional-capai-64-juta-ton-per-tahun>) (diakses 15 Agustus 2019).

- [2] Puspitawati, Y. dan Rahdriawan, M. (2012). Kajian Pengelolaan Sampah Berbasis Masyarakat dengan Konsep 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*) di Kelurahan Larangan Kota Cirebon. *Jurnal Pembangunan Wilayah dan Kota*, 8 (4), 349-359. Doi: 10.14710/pwk.v8i4.6490.
- [3] Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 41 Tahun 1999 tentang pengendalian pencemaran udara.
- [4] Wielgosiński, G. (2012). *Pollutant formation in combustion processes*. *Advances in Chemical Engineering*, Chapter-12, 295-324. Doi: 10.5772/36258.
- [5] Hodgkinson, J., Smith, R., Ho, W. O., Saffell, J. R., and Tatam, R. P. (2013). *Non-dispersive infra-red (NDIR) measurement of carbon dioxide at 4.2 μm in a compact and optically efficient sensor*. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 186, 580-588. Doi: 10.1016/j.snb.2013.06.006.
- [6] Ranucci, M., Carboni, G., Cotza, M., and de Somer, F. (2017). *Carbon dioxide production during cardiopulmonary bypass: pathophysiology, measure and clinical relevance*. *Perfusion*, 32 (1), 4-12. Doi: 10.1177/0267659116659919.
- [7] Anderson, G. L., and Hadden, D. M. (1999). *The gas monitoring handbook*. New York, Ickis Guides, Avocet Press Inc.
- [8] Flaring (2012). *Underbalanced drilling: limits and extremes*. Chapter-12, 537-575. Doi: 10.1016/B978-1-933762-05-0.50019-X.
- [9] Miller, B. G. (2011). *Clean coal technologies for advanced power generation*. *Clean Coal Engineering Technology*, Chapter-7, 251-300. Doi: 10.1016/b978-1-85617-710-8.00007-8.
- [10] Innes, A., and Innes, J. (2012). *Handbook of environmental degradation of materials, 2nd Edition*. Chapter-10, 309-335. Doi: 10.1016/b978-1-4377-3455-3.00010-9.
- [11] Speight, J. G. (2011). *Handbook of industrial hydrocarbon processes*. Chapter-10, 355-393. Doi: 10.1016/b978-0-7506-8632-7.10010-6.