

POTENSI KADAR KONSENTRASI CO₂ DAN PM_{2.5} YANG DIHASILKAN DARI PEMBAKARAN SAMPAH ORGANIK DAN ANORGANIK MENGGUNAKAN INSINERATOR

POTENTIAL LEVELS OF CO₂ AND PM_{2.5} CONCENTRATIONS RESULTING FROM BURNING ORGANIC AND INORGANIC WASTE USING INCINERATOR

Suhartanto Nugroho, Indra Chandra*, Rahmat Awaludin Salam
Program Studi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
*indrachandra@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Salah satu sumber polusi udara yang berasal dari antropogenik yaitu pembakaran sampah yang pada temperatur rendah/tinggi dapat menghasilkan gas (Karbon Dioksida/CO₂) dan/atau partikulat (PM_{2.5}). Oleh karenanya, pengelolaan sampah dengan menggunakan insinerator merupakan salah satu cara untuk membakar sampah dengan kemampuan memfilter emisi tersebut. Pada penelitian ini dilakukan pengukuran konsentrasi CO₂ dan PM_{2.5} pada pembakaran sampah daun (organik), botol plastik (anorganik), dan campuran (komposisi 1:1 dari sampah organik dan anorganik), serta derajat keasaman (pH) dan turbiditas pada cairan dari hasil kondensasi asapnya, dengan menggunakan insinerator dari Bandung Techno Park (BTP), yang berlokasi di Universitas Telkom, Bandung. Alat ukur diletakkan pada jarak 30 cm dari cerobong dengan bantuan blower untuk mengarahkan sebagian besar asapnya menuju ruang pengukuran. Teknik tersebut lebih optimal apabila dibandingkan dengan penempatan alat secara langsung pada keluaran cerobongnya yang menyebabkan terhalangnya deteksi konsentrasi massa partikulat pada sensor PM_{2.5} akibat asap tersebut. Dari hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi puncak CO₂ pada pembakaran sampah campuran mencapai ~5000 ppm. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan sampah anorganik (~3100 ppm) dan organik (~1200 ppm). Tingginya konsentrasi CO₂ sebagian besar disebabkan oleh pembakaran sampah plastik yang mengalami proses gasifikasi yang lebih besar daripada sampah daun. Hal tersebut dapat dilihat pada tingkat kekeruhan larutan hasil kondensasi asap pembakaran anorganik yang lebih jernih (~400 NTU) dibandingkan dengan organik (~2000 NTU). pH larutan anorganik adalah 2, lebih rendah daripada organik (pH = 5). Derajat keasaman pada anorganik mengandung konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan organik yang cenderung netral karena masing-masing kandungan anion/kationnya memiliki konsentrasi yang tinggi. Dengan demikian, metode dan teknik yang baik pada insinerator sangat penting untuk dipahami dan dirancang, agar penggunaannya lebih efektif untuk mereduksi paparan udara tercemar dari pembakaran sampah langsung yang masih banyak digunakan di Indonesia.

Kata kunci: CO₂, insinerator, kualitas udara, pembakaran sampah, PM_{2.5}

Abstract

One of the emission sources of polluted air from anthropogenic is waste combustion which can produce gas (i.e. carbon dioxide / CO₂) and/or particulate (PM_{2.5}) under low/high temperatures conditions. Therefore, a waste management system using an incinerator is one of a method to burn waste with an ability that it can filter those emissions. In this research, we have been measuring CO₂ and PM_{2.5} concentrations produced in waste burning of organic (leaf), inorganic (plastic bottle), and mixture (1:1 composition between organic and inorganic waste), and analyzing its physical properties of the condensed liquid (pH and turbidity), using incinerator of Bandung Techno Park (BTP), which is located at Telkom University, Bandung. The measuring device was placed around 30 cm from a chimney with an added blower to flow the most of smoke comes into the measurement chamber. This technique is more reliable when comparing to direct measuring from the outlet that it caused PM_{2.5} sensors can overestimate the mass concentration of particulate due to the optical detector is blocked by smoke. Results showed that CO₂ concentrations were higher came from mixed waste (~5000 ppm) compared to smoke from inorganic (~3100 ppm) and organic (~1200 ppm). Those concentrations mainly caused by the gasification process on plastic bottles than the leaf. Moreover, the turbidity level of inorganic waste is more clear (~400 NTU) than organic waste (up to 2000 NTU). The degree of acidity of a condensed inorganic liquid is 2, which lower than organic liquid (pH = 5). This is due to level acidity in inorganic has more acid concentration compared to the neutralization of higher concentrations of anion and cation in organic waste combustion. Thus, good techniques on incinerators are very important to be understood/ designed, so that their use is more effective in reducing exposure to polluted air from direct combustion which is still widely used in Indonesia.

Keywords: air quality, CO₂, incinerator, PM_{2.5}, waste burning

1. Pendahuluan

Rendahnya kesadaran masyarakat terhadap informasi polusi udara, menyebabkan terabaikannya potensi paparan polutan dan dampaknya terhadap kesehatan. Hal ini penting karena masyarakat memiliki peranan paling besar terhadap sumber polusi udara. Secara umum sumber polusi dibagi dua, yaitu polusi akibat kegiatan manusia dan sumber alami. Kegiatan manusia yang menyebabkan polusi udara diantaranya pembakaran sampah, aktivitas kendaraan bermotor, kegiatan industri, dan rumah tangga. Polusi udara dari sumber alami diantaranya letusan gunung berapi.¹

Seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan kebutuhan manusia, sampah yang dihasilkan setiap harinya semakin banyak. Beberapa pendekatan pengelolaan sampah diantaranya telah dilakukan oleh masyarakat ataupun pemerintah. Salah satu contohnya adalah program kampung inspirasi yang memilah sampah yang dapat dipakai, serta tempat pembuangan sampah terpadu (TPST) yang mengelola sampah agar dapat dimanfaatkan kembali.² Namun demikian, volume sampah yang terus menumpuk belum dapat ditangani secara optimal sehingga pembakaran sampah menjadi pilihan utama. Hal ini disebabkan karena jumlah TPST yang sedikit dari keseluruhan TPS di kota Bandung, serta belum optimalnya pelaksanaan Peraturan Daerah tentang sanksi pembakaran sampah terbuka secara individual maupun kelompok.³ Pada tahun 2017, rata-rata sampah di kota Bandung dari sampah rumah tangga dihasilkan ~1050 ton per hari. Komposisi sampah tersebut berasal dari organik (80%), anorganik (17%), dan lainnya (3%).⁴ Oleh karenanya, diperlukan pemilahan sampah agar lebih mudah dalam pengelolaannya.

Perlu diketahui bahwa sampah yang dibakar dapat menghasilkan gas Nitrogen Monoksida (NO), Nitrogen Dioksida (NO₂), Dinitrogen Monoksida (N₂O), Sulfur Dioksida (SO₂), Karbon Dioksida (CO₂), Asam Klorida (HCl), dan partikulat (PM_{2.5}).⁵ Apabila dibedakan sesuai jenisnya, pembakaran sampah organik seperti kayu dapat menghasilkan *Condensable Organic Compounds* (COC) dan *Volatile Organic Compounds* (VOC) pada temperatur (T) >300 °C. Pada saat pembakaran mencapai T >800 °C, akan menghasilkan Karbon Monoksida (CO), CO₂, uap air (H₂O), dan Nitrogen Oksida (NO_x), serta partikel seperti jelaga.⁶ Pada pembakaran sampah anorganik, seperti *polythrene foam*, akan menghasilkan isosianat, mina, dan asap kuning (T >300 °C). Pada T >600 °C, mulai terurai menjadi benzonitril dan anilin, kemudian terjadi perubahan ketika T >800 °C menjadi fragmen organik sederhana, *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAHs), *hydrogen cyanide* (HCN), dan CO, yang di udara berubah menjadi CO, CO₂, NO_x, H₂O, dan HCN.⁷

Polutan di udara yang dihasilkan dari pembakaran sampah memiliki karakterisasi emisi yang berbeda, apabila dibedakan dari jenis sampah yang dibakar. Maka dari itu penting untuk meneliti perbedaan emisi dari pembakaran sampah yang dipilah (organik, anorganik, dan campuran). Tujuan dari penelitian ini yaitu mengukur dan menganalisis perbandingan konsentrasi gas (CO₂ dan NO₂) dan partikulat (PM_{2.5}) serta sifat fisik cairan (derajat keasaman dan kekeruhan) dari hasil kondensasi pada pembakaran daun kering (organik), botol plastik (anorganik), dan campuran (komposisi 1:1 pada bahan sampah organik dan anorganik) menggunakan insinerator dari Bandung Techno Park (BTP). Hasil pengujian akan dianalisis dengan cara membandingkan hasil pembakaran organik dan anorganik yang telah dilakukan dengan hasil penelitian dari rujukan penelitian lainnya.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Insinerator dan Lokasi Pengukuran

Insinerator merupakan alat pembakaran sampah yang dapat menyaring emisi yang dihasilkan saat pembakaran. Insinerator yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kapasitas pembakaran 1000 Liter/jam (L/jam), temperatur ruang bakar 600-1100 °C, kebutuhan bahan bakar 0,5-1,5 L/jam (*Diesel Oil*) dengan campuran air 3-6 L/jam, dan membutuhkan energi listrik 1750 watt. Proses yang dilakukan dalam pembakaran sampah pada insinerator, yaitu: (a) sampah dimasukkan ke dalam tempat ruang pembakaran, kemudian (b) katup solar dan katup untuk udara masuk dibuka, (c) pemantikan api agar sampah terbakar dilakukan dengan cara manual, serta (d) ketika sampah sudah terbakar, pemutar sampah dinyalakan agar proses pembakaran merata. Hasil dari pembakaran sampah berupa abu residu dan asap. Asap yang dihasilkan ditarik menggunakan *blower* melewati dua tahap pengondisian asap. Pada tahap pertama, asap direduksi dengan cara disemprot air yang dipompa dari kotak air. Tahap kedua, asap dialirkan menuju kotak air, yang kemudian asap menuju ke cerobong yang menjadi akhir dari proses pembakaran menggunakan insinerator. Setelah berada di ujung cerobong, asap yang telah melalui proses reduksi dilepaskan ke udara.

Pengukuran dilakukan di kampus Universitas Telkom, Bandung. Oleh karenanya, kegiatan ini menjadi hal penting untuk dilakukan, karena lokasi pembakaran dekat dengan tempat kegiatan warga kampus dan pemukiman. Lokasi pembakaran sampah berjarak <100 m dari tempat kegiatan belajar mengajar, kantin dan pemukiman. Lokasi pengukuran dikelilingi oleh bangunan dan pepohonan di kawasan kampus dan jarak ~100 meter dari lokasi pengukuran, tidak ada sumber pencemar tidak bergerak lainnya, sehingga kemungkinan pengukuran disebabkan oleh sumber pencemar lainnya sangat kecil.

2.2 Alat Ukur

Alat ukur berbentuk kotak dari bahan akrilik yang dilengkapi dengan sensor CO₂, PM_{2.5}, NO₂, temperatur dan kelembapan.⁸ Sensor PM_{2.5} yang digunakan merupakan model SKU:SEN 0177 (DFRobot, Corp.) yang beroperasi

pada tegangan 5V, arus maksimum 120 mA, dan jangkauan pengukuran 0-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Prinsip kerja yang digunakan dalam sensor ini merupakan hamburan cahaya dalam pengukurannya. Pada saat partikulat ditarik oleh kipas masuk ke *inlet* ruang pengukuran, sinar laser yang dihasilkan akan terhambur dan diterima oleh detektor yang bergantung dari ukuran partikel, bentuk, sudut hamburan, dan indeks bias yang bervariasi.⁹ Sensor $\text{PM}_{2.5}$ telah dikalibrasi dengan cara membandingkan data pengukuran dengan alat utama *Optical Particle Counter* (OPC). Pengukuran sistem kalibrasi terdiri dari *particle generator* berbasis *nebulizer* (Model KG-02, Rion Co., Ltd.) yang berfungsi untuk menghasilkan partikel dengan diameter partikel berukuran 0,309 μm , 0,479 μm dan 1,005 μm menggunakan *polystyrene latex* (PSL), *diffusion dryer* yang berfungsi untuk menurunkan kadar kelembapan (RH) pada partikel, serta alat ukur utama dan sensor yang akan diuji.¹⁰

Sensor CO_2 yang digunakan model SKU:SEN 0219 (DFRobot, Corp.). Sensor ini beroperasi pada tegangan 4,5-5,5 V, rata-rata arus <60 mA, dan jangkauan pengukuran 0-5000 ppm. Prinsip kerja yang digunakan dalam sensor ini adalah *non-dispersive infrared* (NDIR). Inframerah dipancarkan pada panjang gelombang 4,2 μm di dalam tabung. Pada saat gas masuk maka CO_2 akan menyerap panjang gelombang yang dipancarkan oleh sumber. Cahaya yang tidak terserap oleh CO_2 akan diteruskan ke detektor melewati filter yang berfungsi untuk menyaring cahaya yang masuk, agar hanya inframerah yang tidak diserap CO_2 saja yang sampai ke detektor, sehingga terbaca intensitas yang diterima berbanding terbalik dengan nilai konsentrasi CO_2 .¹¹ Sensor telah dibandingkan dengan detektor gas (model GCH-2018, Lutron Electronic Enterprise, Co. Ltd.) dengan hasil $R^2 = 0,4826$.⁸

Dalam penelitian ini, pada alat kami tambahkan sensor NO_2 serta sensor temperatur/kelembapan relatif. Sensor yang digunakan pada pengukuran NO_2 adalah model DGS-RESPIRR-968-041 dengan jangkauan pengukuran 0-20 ppm. Sensor ini menggunakan prinsip elektrokimia yang terdiri dari *sensing electrode*, *counter electrode*, elektrolit, dan membran hidrofobik. Elektrokimia berbasis pengukuran beda potensial, pada saat gas terdeteksi terjadi reaksi oksidasi dan reduksi, maka pada saat bersamaan terjadi beda potensial sehingga menghasilkan arus yang berbanding lurus dengan konsentrasi gas.¹² Ketika sensor pengukurannya di atas jangkauan pengukuran ketika kondisi dalam ruangan, maka dilakukan *setting zero* selama 1 jam sehingga pengukuran kembali normal.⁸ Spesifikasi sensor dan alat yang digunakan di dalam penelitian ini terdapat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Spesifikasi dari modul sensor yang digunakan di dalam penelitian.

No.	Modul Sensor	Fungsi	Spesifikasi
1	DGS-RESPIRR968-041 ¹³	konsentrasi NO_2	0-20 ppm
2	SKU:SEN 0177 ¹⁴	konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$	0-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
3	SKU:SEN0219 ¹⁵	konsentrasi CO_2	0-5000 ppm
4	DHT 22 ¹⁶	kelembapan dan temperatur	0-100 (%/°C)
5	SKU : SEN 0189 ¹⁷	tingkat kekeruhan	0-3000 NTU
6	SKU : SEN 0161 ¹⁸	derajat keasaman	0-14 pH

2.3 Teknik Pengambilan Sampel Cairan

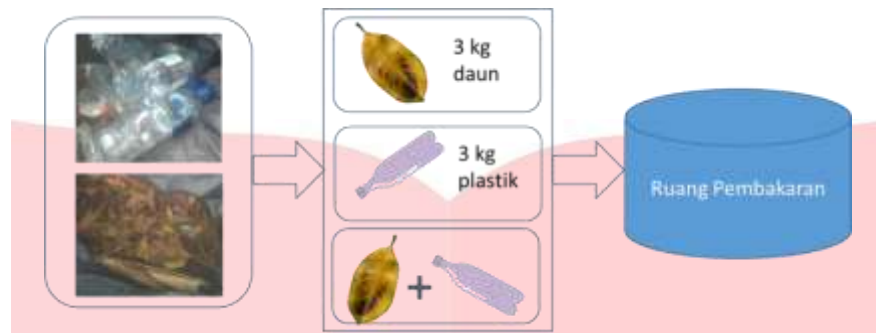
Pada pengambilan sampel cairan dari asap pembakaran sampah, menggunakan prinsip kondensasi. Kondensasi merupakan terjadinya perubahan uap air menjadi cairan yang diakibatkan perbedaan temperatur pada uap air dengan temperatur permukaan yang lebih rendah sehingga terjadinya pengembunan.¹⁹ Alat pendingin terdiri dari *peltier* TC12706 dan *blower* dengan kecepatan perputaran ~2460 rpm sebagai penarik asap dari cerobong asap insinerator. Kerangka untuk pemasangan alat menggunakan pipa dengan diameter 10 cm, ukuran panjang alat 71,5 cm yang disesuaikan dengan penempatan alat dan cerobong asap, serta lebar 54 cm. Pada saat pembakaran, asap akan keluar dari cerobong asap lalu ditarik menggunakan *blower* ke *inlet* alat kondensasi dan di dinginkan dengan tujuan menurunkan temperatur dari asap sehingga proses kondensasi menghasilkan cairan setelah itu akan disimpan dan diuji parameter sifat fisiknya.

Hasil yang diperoleh dari teknik ini adalah cairan kondensat yang berasal dari asap pembakaran. Setelah mendapatkan tiga sampel cairan dari pembakaran organik, anorganik dan campuran. Ketiga sampel tersebut disimpan di dalam *vacutainer*. Sampel cairan diuji dengan parameter derajat keasaman (pH) dan kekeruhan (*turbidity*). Pengukuran menggunakan sensor pH meter (model SKU:SEN 0161, DFRobot, Corp) dan sensor turbiditas (model SKU:SEN0189, DFRobot, Corp.). Hasil pengujian dari ketiga sampel cairan dibandingkan dengan air akuades dan air minum komersial.

2.4 Metode Pengukuran

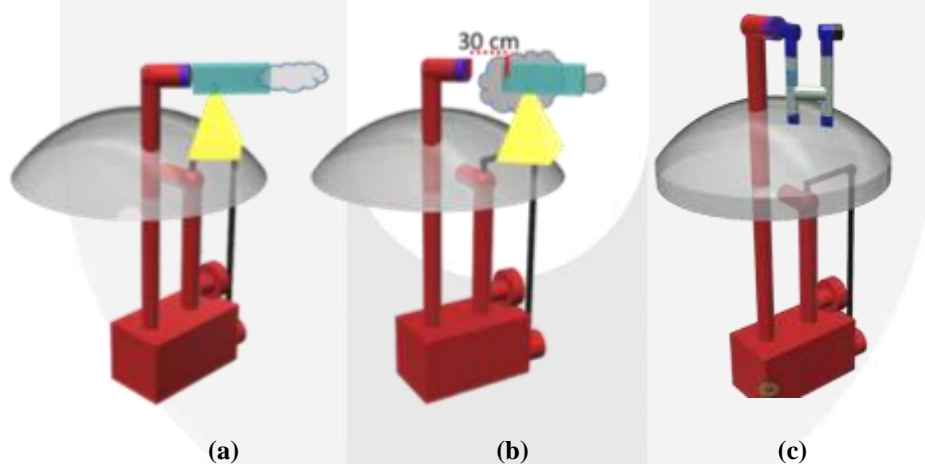
Sebelum pengukuran hasil emisi dari pembakaran sampah, dilakukan proses pemilahan sampah yang dibedakan sesuai jenisnya. Sampah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampah daun dan sampah botol plastik *polyethylene terephthalate* (PET). Selanjutnya sampah yang terpilah tersebut diukur massanya dengan timbangan. Massa sampah botol plastik dan sampah daun adalah masing-masing 3 kilogram, sedangkan campuran antara botol plastik dan sampah daun sebanyak 6 kilogram. Proses pembakaran sampah dibagi menjadi tiga tahap yaitu sampah daun, sampah botol plastik, dan sampah campuran. Setiap tahapan selesai jika sampah yang dibakar sudah habis. Sampah pertama yang dibakar yaitu bahan organik. Sampah dimasukkan ke ruang pembakaran,

kemudian pengoperasian insinerator dengan waktu pembakaran ~1 jam. Sampah anorganik yang dimasukkan ke dalam ruang pembakaran memerlukan waktu pembakaran <1 jam atau lebih cepat dari pembakaran organik. Terakhir, pembakaran sampah campuran yang dimasukkan dengan sampah yang sudah dicampur (organik dan anorganik) dengan waktu pembakaran >1 jam atau lebih lama dari pada pembakaran organik. Proses pemilahan sampah organik dan anorganik ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Proses pemilahan sampah rumah tangga berupa daun kering (organik) dan botol plastik (anorganik).

Setelah tahap persiapan sampah yang akan dibakar, maka selanjutnya adalah pemasangan alat ukur pada cerobong asap dengan percobaan mengukur di dua titik pada posisi tanpa dan dengan jarak 30 cm agar mengetahui posisi optimal dalam pengukuran (**Gambar 2 (a)** dan **(b)**). Setelah pengukuran pembakaran sampah dengan tiga tahapan selesai, selanjutnya adalah teknik pengambilan sampel cairan dengan penempatan *inlet* alat kondensasi yang langsung terhubung dengan cerobong asap insinerator (**Gambar 2 (c)**). Mekanisme yang dilakukan setelah penempatan alat kondensasi yaitu (a) persiapan sampah organik seberat 3 kg, (b) memasukkan sampah, dan (c) pengoperasian Insinerator. Selama pembakaran yang dilakukan ~1 jam, blower dinyalakan untuk menarik asap. Setelah selesai pembakaran, cairan diambil menggunakan *syringe* dan dimasukkan ke dalam *vacutainer* dengan dilapisi aluminium foil. Perlu dicatat bahwa pada pengambilan sampel cairan dari hasil pembakaran sampah anorganik dan campuran, dilakukan di hari yang berbeda karena harus dilakukan pemindahan sampel dari alat ke *vacutainer* dan pembersihan alat kondensasi terlebih dahulu. Pada pengambilan sampel pembakaran anorganik dan campuran, prosesnya sama ketika pembakaran organik, hanya saja waktu yang dibutuhkan campuran lebih lama dari pembakaran organik (>1 jam).



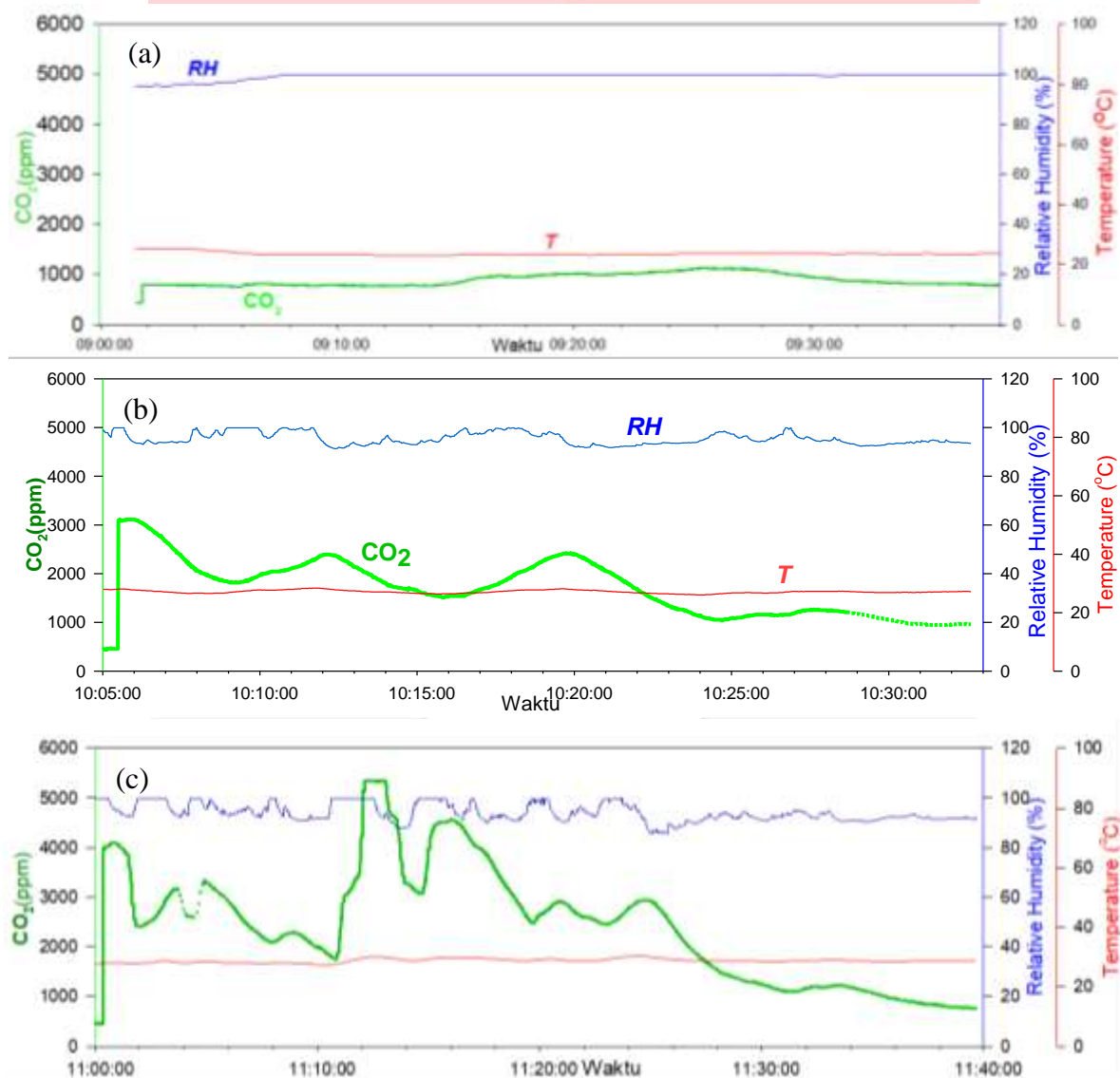
Gambar 2. Teknik pengukuran ketika alat ukur dipasang pada (a) posisi tanpa jarak dan (b) dengan jarak 30 cm dari cerobong, serta (c) penempatan alat kondensator untuk mengambil cairan dari asap hasil pembakaran.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengukuran Tanpa jarak dan Dengan Jarak 30 cm

Hasil pengukuran tanpa jarak dilakukan dengan tiga tahap yaitu menggunakan sampah daun (organik), plastik (anorganik) dan campuran (anorganik dan organik). Pengukuran emisi hasil pembakaran yang langsung dari luaran cerobong asap insinerator dari ketiga jenis sampah tersebut menghasilkan konsentrasi CO₂ mencapai 5000 ppm pada temperatur (T) >40 °C dan kelembapan relatif (RH) >90%. Terlihat bahwa ketika percobaan ini dilakukan, hasil konsentrasi CO₂ tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Oleh karenanya, kami mencoba melakukan percobaan jarak lainnya yang terdekat dari cerobong tetapi tidak di atas maksimal temperatur kerja dari masing-masing sensor yang digunakan.

Pada pengujian kedua, alat diletakkan pada posisi sejauh 30 cm. Hal ini dilakukan karena jarak tersebut merupakan jarak optimal agar temperatur kerja dari sensor tidak melebihi 50 °C. Selanjutnya kembali dilakukan proses pembakaran sampah organik, anorganik dan campuran. Pada pengukuran ini, sampah yang dibakar masing-masing sebesar 1 kg agar terukur emisinya sampai setelah proses pembakaran selesai. Pengukuran pada ketiga tahap ini menggunakan blower pada cerobong asap, agar asap yang masuk ke alat ukur lebih stabil, tidak bergantung arah dan kecepatan angin, serta dapat terlihat perbedaan hasil pengukuran pada ketiga tahap tersebut. Hasil dari pembakaran dengan jarak 30 cm pada sampah organik menghasilkan konsentrasi CO₂ mencapai ~1000 ppm pada T <40 °C dan RH >90% (**Gambar 3 (a)**). Pada pembakaran sampah jenis anorganik, konsentrasi CO₂ mencapai ~3000 ppm (T <40 °C dan RH >90%) (**Gambar 3 (b)**). Konsentrasi CO₂ tertinggi diperoleh ketika jenis sampah yang dibakar adalah sampah campuran. Pada temperatur dan kelembapan relatif yang hampir sama dengan pembakaran jenis sampah lainnya, konsentrasi CO₂ mencapai ~5000 ppm (**Gambar 3 (c)**). Rendahnya konsentrasi CO₂ yang dihasilkan dari sampah organik, dikarenakan sebagian hasil pembakarannya berupa partikulat, misalnya jelaga.

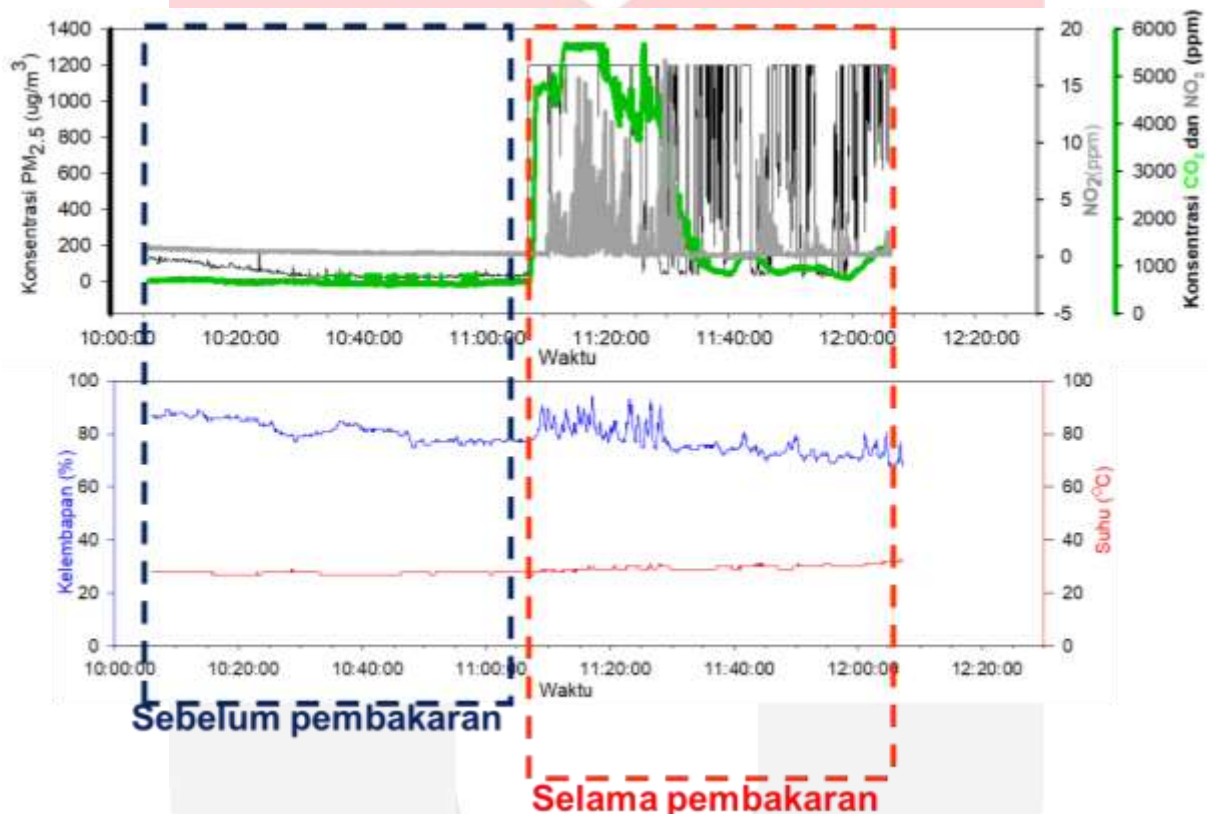


Gambar 3. Hasil pengukuran emisi CO₂ dengan alat ukur pada posisi 30 cm dari cerobong pada pembakaran (a) sampah organik, (b) anorganik, dan (c) campuran (komposisi 1:1 antara organik dan anorganik).

Dari hasil pengukuran diperoleh bahwa terdapat perbedaan temperatur dan konsentrasi CO₂ antara percobaan dengan pengukuran tanpa jarak dan dengan jarak 30 cm dari cerobong asap. Temperatur pada percobaan tanpa jarak lebih tinggi dari pada percobaan dengan jarak 30 cm, yaitu dapat mencapai 40-50 °C pada saat operasi pembakaran sampah. Hal ini melebihi temperatur kerja dari masing-masing sensor pada alat ukur. Kelembapan relatif pada perbedaan kedua jarak relatif sama yaitu mencapai >90% karena insinerator yang digunakan memiliki

sistem reduksi menggunakan air yang menyebabkan emisi yang dikeluarkan dari cerobong asap memiliki RH >90%.

Lebih lanjut, pada pengamatan dengan jarak 30 cm, dilakukan pengukuran pembakaran sampah campuran untuk mengetahui perubahan konsentrasi gas sebelum dan selama pembakaran. Pada konsentrasi CO₂ sebelum pembakaran ~600 ppm dan selama pembakaran mencapai 5000 ppm (**Gambar 4**). Konsentrasi NO₂ sebelum pembakaran ~1 ppm dan meningkat mencapai 17 ppm selama proses pembakaran. Konsentrasi massa PM_{2.5} sebelum pembakaran terukur 36-122 µg/m³ dan mencapai level 1200 µg/m³ selama proses pembakaran. Pada PM_{2.5} terindikasi bahwa pengukuran rata-rata di titik maksimal ini dipengaruhi oleh asap yang masuk ke alat ukur PM_{2.5} sehingga sensor selalu mendeteksi nilai tersebut. Sensor PM_{2.5} tidak dapat mengukur konsentrasi yang sebenarnya (*overestimate*) karena sensor optik pada saat pembakaran terhalang oleh asap pekat yang masuk ke dalamnya sehingga terbaca saturasi pada nilai batas maksimum pengukuran.

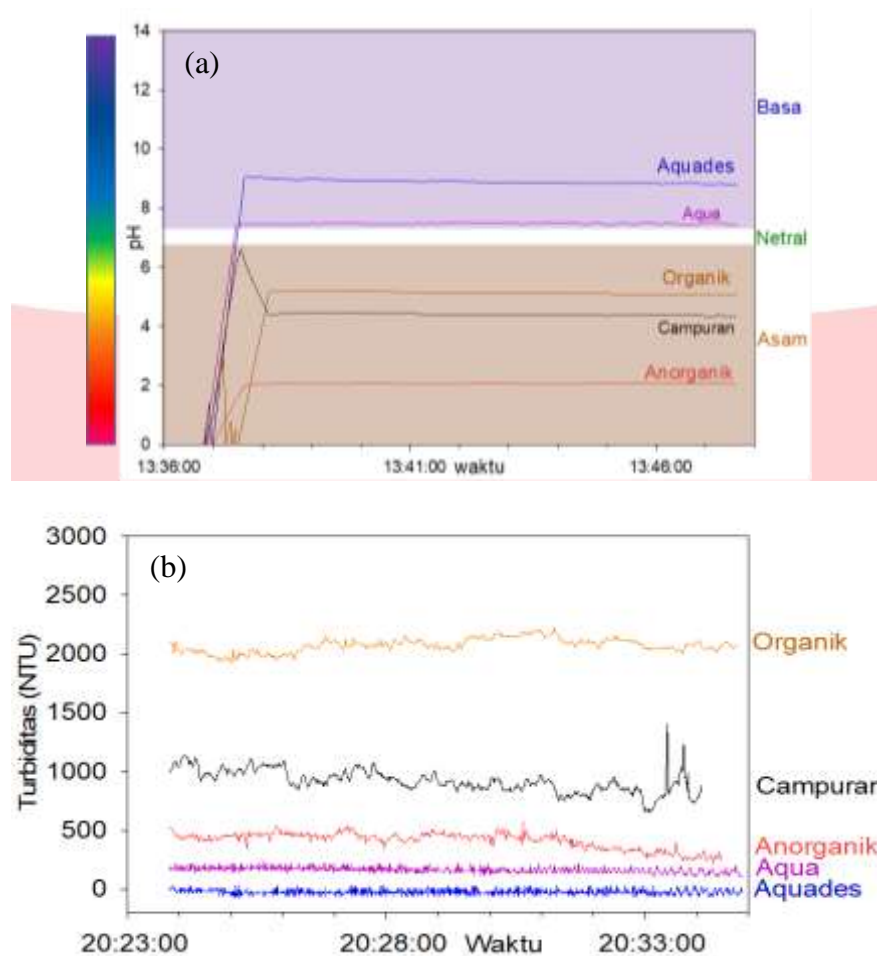


Gambar 4. Pengukuran konsentrasi CO₂, NO₂, dan PM_{2.5} serta temperatur (T) dan kelembapan relatif (RH) sebelum dan selama proses pembakaran.

3.2 Hasil Sampel Cairan

Teknik pengambilan sampel cairan yang dilakukan menghasilkan cairan yang berbeda pada setiap jenis sampah yang dibakar. Pada pengujian ini dilakukan dengan tiga tahap pembakaran, sama seperti pengukuran sebelumnya. Setelah didapatkan hasil cairan dari pembakaran organik, anorganik dan campuran, maka ketiga sampel tersebut diukur sifat fisiknya dengan alat ukur pH dan turbiditas. Ketiga sampel tersebut dibandingkan dengan air akuades dan air minum komersial. Hasil yang didapatkan dari perbandingan lima sampel tersebut diperoleh derajat keasaman ~8,8 untuk akuades, ~7,5 untuk air minum komersial, ~5 untuk cairan organik, ~4,4 untuk cairan campuran, dan ~2 untuk cairan anorganik (**Gambar 5** (a)). Tampak bahwa sampah plastik memberikan pengaruh derajat keasaman yang tinggi dibandingkan dengan jenis sampah lainnya. Nilai derajat keasaman yang dihasilkan cairan kondensasi organik lebih netral dari pada anorganik. Hal ini disebabkan konsentrasi kation dan anion yang sama besar pada cairan organik, sedangkan cairan anorganik lebih asam karena mengandung asam sianida.^(6,7)

Sementara itu, hasil turbiditas air akuades ~0 NTU, air minum komersial mencapai ~100 NTU, cairan anorganik mencapai ~400 NTU, cairan campuran ~1000 NTU dan organik mencapai ~2000 NTU (**Gambar 5** (b)). Tingkat kekeruhan dari hasil cairan organik dikarenakan selama proses pembakaran daun, banyak sekali didapati partikulat sehingga warna yang dihasilkan lebih pekat.⁶ Sedangkan cairan anorganik teridentifikasi warna yang lebih terang dari cairan pembakaran organik. Hal ini disebabkan karena hampir keseluruhan bahan anorganik berubah bentuk menjadi gas saat dibakar yang menyebabkan konsentrasi CO₂ lebih tinggi dari pada organik.⁷



Gambar 5. Hasil pengukuran (a) pH dan (b) turbiditas dari cairan kondensat hasil pembakaran sampah organik, anorganik, dan campuran.

4. Kesimpulan

Telah dilakukan pengukuran gas (CO_2 dan NO_2) dan partikulat ($\text{PM}_{2.5}$) dari pembakaran sampah daun kering (organik), botol plastik (anorganik), dan campuran (komposisi 1:1 dari organik dan anorganik) menggunakan alat pembakar sampah yang dapat menyaring emisi asap pembakarannya. Insinerator berlokasi di Universitas Telkom, Bandung. Alat ukur yang digunakan adalah sensor $\text{PM}_{2.5}$ (SKU:SEN0177, DFRobot, Corp.) yang sudah dikalibrasi dengan membandingkan data pengukuran dengan alat utama *optical particle counter* (OPC), sensor CO_2 (model SKU:SEN0219, DFRobot, Corp.), dan sensor NO_2 (model DGS-RESPIRR 968-041, SPEC Sensor LLC). Teknik pengukuran yang dilakukan dengan mengukur emisi dimana posisi alat ukur langsung di outlet dan jarak 30 cm dari cerobong asap. Pengambilan sampel cairan dari hasil pembakaran sampah menggunakan sistem kondensasi.

Setelah melakukan pengukuran emisi dari alat insinerator dapat disimpulkan bahwa pada pengukuran emisi dengan fungsi tanpa jarak dari cerobong asap terindikasi konsentrasi CO_2 mendapatkan hasil yang sama dengan nilai konsentrasi 5000 ppm pada ketiga pengukuran pembakaran sampah. Sementara itu, pada pengukuran 30 cm dari jarak cerobong asap, perbandingan titik maksimal konsentrasi CO_2 dari ketiga pembakaran yaitu organik (mencapai 1248 ppm), anorganik (3112 ppm) dan campuran (5000 ppm). Tampak bahwa pengukuran dengan jarak 30 cm lebih optimal mengidentifikasi emisi gas karena masing-masing sensor bekerja pada temperatur optimalnya. Hasil konsentrasi CO_2 dari pembakaran sampah organik lebih rendah daripada anorganik disebabkan proses gasifikasi organik lebih rendah dari anorganik. Hal tersebut dapat dilihat lebih lanjut dari tingkat kekeruhan hasil cairan kondensasi. Pengukuran $\text{PM}_{2.5}$ pada saat dilakukan mengalami kenaikan mencapai $1200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hal ini disebabkan karena optik terhalang oleh asap pekat yang masuk ke sensor sehingga terbaca saturasi pada nilai batas maksimum pengukuran.

Perbandingan derajat keasaman yang dikandung dalam cairan hasil kondensasi pembakaran anorganik disebabkan salah satunya kandungan asam sianida dalam kandungan plastik pada saat dibakar sedangkan organik lebih netral dari anorganik disebabkan oleh kandungan kalium klorida dan kalium sulfat yang bersifat netral karena memiliki asam kuat dan basa kuat. Kekeruhan cairan yang dihasilkan dari ketiga pembakaran dengan urutan tingkat kekeruhan tertinggi yaitu organik (~2000 NTU), campuran (~1000 NTU) dan anorganik (~400 NTU). Kekeruhan pada cairan organik disebabkan oleh partikel yang terbawa pada saat pembakaran. Hal ini menunjukkan

bahwa gasifikasi pada pembakaran organik dan anorganik menghasilkan korelasi, semakin tinggi konsentrasi CO₂ maka akan semakin rendah turbiditas cairan.

Daftar Pustaka

- [1] Hutton, G. (2011). *Air Pollution: global damage costs of air pollution from 1900-2050 (assessment paper)*, pp. 4. Copenhagen Consensus on Human Challenges.
- [2] Lewat Biodigester, TPST Babakansari Manfaatkan Sampah untuk Memasak (<http://www.jurnalbandung.com/lewat-biodigester-tpst-babakansari-manfaatkan-sampah-untuk-memasak/>) (diakses pada 19 Juli 2019).
- [3] Peraturan Daerah Kota Bandung Nomor 9 Tahun 2018 Tentang Pengelolaan Sampah (<https://ppid.bandung.go.id/knowledgebase/peraturan-daerah-kota-bandung-nomor-09-tahun-2018-tentang-pengelolaan-sampah>) (diakses pada 21 Juli 2019).
- [4] Damanhuri, E. dan Padi, T. (2010). *Pengelolaan Sampah* (Diktat Kuliah), hal. 17. Bandung: Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, ITB.
- [5] Wielgosiński, G. (2012). *Pollutant formation in combustion processes*. *Advances in Chemical Engineering*, Chapter-12, 295-324. Doi: 10.5772/36258.
- [6] Nussbaumer, T. (2017). *Characterisation of particles from wood combustion with respect to health relevance and electrostatic precipitation*.
- [7] McKenna, S. T. and Hull, T. R. (2016). The fire toxicity of polyurethane foams. *Fire Science Reviews*, 5 (3). Doi: 10.1186/s40038-016-0012-3.
- [8] Abdurrachman, A., Chandra, I., dan Salam, R.A., (2019). Rancang Bangun Alat Ukur Konsentrasi Gas Co₂ Dan No₂ Untuk Pengamatan Emisi Dari Pembakaran Sampah Rumah Tangga. *eProceedings of Engineering (In Press)*.
- [9] Chow, J. C., Watson, J. G., Lowenthal, D. H., and Richards, L. W. (2002). Comparability between PM_{2.5} and particle light scattering measurements. *Environmental Monitoring and Assessment*, 79 (1), pp. 29-45. Doi: 10.1023/A:1020047307117.
- [10] Vaicdan, F., Chandra, I., dan Suhendi, A., (2019). Pengamatan konsentrasi massa PM_{2.5} di cekungan udara Bandung Raya. *eProceedings of Engineering*, 6 (1).
- [11] 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, pp. 580-588. Doi: 10.1016/j.snb.2013.06.006.
- [12] Majder-Lopatka, M. (2018). *Effects of interfering gases in electrochemical sensors NH₃ and NO₂*. *MATEC Web of Conferences*, 247, 00023, FESE 2018. Doi: 10.1051/mateconf/201824700023.
- [13] DGS-RESPIRR-968-041 (<https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2017/01/DGS-RESPIRR-968-041.pdf>) (diakses pada 20 Juli 2019).
- [14] SKU:SEN0177 (http://dfrobot.com/wiki/index.php/PM2.5_laser_dust_sensor_SKU:SEN0177) (diakses pada 20 Juli 2019).
- [15] Gravity Analog Infrared CO₂ Sensor for Arduino SKU SEN0219 (http://wiki.dfrobot.com/Gravity_Analog_Infrared_CO2_Sensor_For_Arduino_SKU_SEN0219) (diakses pada 20 Juli 2019).
- [16] DHT22 (<http://sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>) (diakses pada 20 Juli 2019).
- [17] SKU:SEN0189 (https://wiki.dfrobot.com/Turbidity_sensor_SKU_SEN0189) (diakses pada 20 Juli 2019).
- [18] SKU : SEN0161 (https://wiki.dfrobot.com/Analog_pH_Meter_Pro_SKU_SEN0169) (diakses 20 Juli 2019)
- [19] Jensen, K. R., Fojan, P., Jensen, R. L., and Gurevich, L. (2013). Water condensation: a multiscale phenomenon. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 14 (2), pp. 1859-1871 (13). Doi: 10.1166/jnn.2014.9108.