

PROTOTIPE SISTEM PENYARINGAN DAN PENGUKURAN ASAP PEMBAKARAN SAMPAH PADA MINI INSINERATOR

SKRIPSI

Disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T)



Disusun oleh:

ADHA ALDIYANSYAH

NPM.3332210034

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
2025**

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Dengan ini saya sebagai penulis skripsi berikut:

Judul : Prototipe Sistem Penyaringan dan Pengukuran Asap
Pembakaran Sampah Pada Mini Insinerator
Nama Mahasiswa : Adha Aldiyansyah
NPM : 3332210034
Fakultas/Jurusan : Teknik/Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi tersebut di atas adalah benar - benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruhnya karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 11 Juni 2025

Adha Aldiyansyah
NPM.3332210034

LEMBAR PENGESAHAN

Dengan ini ditetapkan bahwa skripsi berikut.

Judul : Prototipe Sistem Penyaringan dan Pengukuran Asap
Pembakaran Sampah Pada Mini Insinerator
Nama Mahasiswa : Adha Aldiyansyah
NPM : 3332210034
Fakultas/Jurusan : Teknik/Teknik Elektro

Telah diuji dan dipertahankan pada tanggal **JUNI 2025** melalui Sidang Skripsi di Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Cilegon dan dinyatakan **LULUS.**

Dewan Penguji

Tanda Tangan

Pembimbing I : Imamul Muttakin, S.T., M.Eng. Ph.D.

Pembimbing II : Masjudin, S.T., M.Eng.

Penguji I :

Penguji II :

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Dr. Eng. Rocky Alfanz, S.T., M.Sc.

NIP. 198103282010121001

PRAKATA

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah subhanahu wa ta'ala atas berkat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan penelitian dengan judul “Prototipe Sistem Penyaringan dan Pengukuran Asap Pembakaran Sampah Pada Mini Insinerator”. Penelitian ini dimaksudkan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T) pada tingkat Strata 1 (S1) di Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

Dalam proses pelaksanaan penelitian maupun proses penyusunan laporan, peneliti amat sangat menyadari bahwa pencapaian ini tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak yang telah memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung. Bantuan-bantuan tersebut berupa bimbingan akademis, motivasi, serta semangat yang sangat berarti bagi penulis. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih sebanyak-banyaknya kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam proses ini. Adapun pihak-pihak yang telah berkontribusi memberikan semangat, motivasi, dan bimbingannya yaitu:

1. Kedua orang tua dan kakak tercinta yang selalu memberikan dukungan, doa, dan pengertiannya selama penelitian dan proses penyusunan laporan.
2. Bapak Dr. Eng. Rocky Alfanz, S.T., M.Sc. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro yang memberikan motivasi penulis untuk menyelesaikan studi.
3. Bapak Imamul Muttakin, S.T., M.Eng., Ph.D selaku dosen pembimbing akademik sekaligus dosen pembimbing 1 yang selalu memberikan dukungan serta motivasi untuk segera menyelesaikan studi dan juga selalu membimbing dengan sabar.
4. Bapak Masjudin, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing 2 yang telah membimbing dalam penulisan laporan Prototipe Sistem Penyaringan dan Pengukuran Asap Pembakaran Sampah Pada Mini Insinerator dengan sabar.
5. Teman-teman Laboratorium *Applied Electromagnetics* yang memberikan motivasi serta membantu dalam penelitian maupun penyusunan laporan.

Penulis menyadari bahwasanya penelitian ini memiliki banyak kekurangan, baik dari segi isi, metode, serta cara penyajiannya. Hal ini tidak luput dari keterbatasan pengetahuan, pengalaman, serta waktu yang dimiliki penulis.

Meskipun demikian, penulis telah berupaya semaksimal mungkin untuk menyusun laporan ini sebaik-baiknya. Penulis berharap penelitian ini dapat bermanfaat bagi siapa pun yang membaca penelitian ini. Semoga penelitian ini dapat memotivasi pembaca untuk mengurangi segala kegiatan yang dapat mencemari lingkungan.

Cilegon, 11 Juni 2025

Adha Aldiyansyah

ABSTRAK

Adha Aldiyansyah
Teknik Elektro

Prototipe Sistem Penyaringan dan Pengukuran Asap Pembakaran Sampah Pada Mini Insinerator

Pengelolaan sampah dengan cara dibakar merupakan pengelolaan sampah yang paling banyak dilakukan masyarakat. Saat pembakaran sampah berlangsung, terdapat gas emisi serta residu yang berbentuk abu dihasilkan, selain itu asap yang dihasilkan dari pembakaran sampah berpotensi meningkatkan polusi udara. Polusi yang terkandung dalam asap pembakaran sampah berupa zat nitrogen oksida, karbon monoksida, serta partikel polusi. Jumlah polusi udara yang diakibatkan dari pembakaran sampah dapat dikurangi kadarnya dengan mengolah asap hasil pembakaran sebelum dibuang seutuhnya ke lingkungan sekitar dengan melakukan penyaringan asap dari pembakaran sampah. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji efektivitas alat penyaringan asap dalam menyaring zat polutan yang terkandung dalam asap pembakaran sampah serta mengevaluasi performa alat agar dapat menjadi solusi inovatif dalam mengurangi polusi udara yang dihasilkan dalam pembakaran sampah. Zat polutan yang terkandung dalam asap diukur kadarnya dengan menggunakan sensor MQ-7, sensor MQ-135, dan sensor GP2Y1010AU0F. Hasil yang ditunjukkan pada penyaringan asap pada filter ketiga mampu mengurangi zat polutan dengan baik dengan kadar gas karbon monoksida berada di bawah 10 PPM, gas karbon dioksida berada di bawah 400 PPM, dan kadar PM2.5 berada di bawah 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Kata Kunci:

Pembakaran sampah, Polusi udara, Penyaring asap

ABSTRACT

Adha Aldiyansyah
Electrical Engineering

Prototype of Waste Incineration Smoke Filtration and Measurement System on Mini Incinerator

Waste management by burning is the waste management that is most often carried out by the community. When waste burning takes place, there are emission gases and residues in the form of ash produced, in addition, the smoke produced from burning waste has the potential to increase air pollution. The pollution contained in the smoke from burning waste is in the form of nitrogen oxides, carbon monoxide, and pollution particles. The amount of air pollution caused by burning waste can be reduced by processing the smoke from burning before it is completely discharged into the surrounding environment by filtering the smoke from burning waste. The purpose of this study was to test the effectiveness of the smoke filtering device in filtering pollutants contained in the smoke from burning waste and to evaluate the performance of the device so that it can be an innovative solution in reducing air pollution produced in burning waste. The pollutant content in the smoke was measured using the MQ-7 sensor, the MQ-135 sensor, and the GP2Y1010AU0F sensor. The results shown in the smoke filtration on the third filter are able to reduce pollutants well with carbon monoxide gas levels below 10 PPM, carbon dioxide gas below 400 PPM, and PM2.5 levels below 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Keywords:

Waste incineration, Air pollution, Smoke filters

DAFTAR ISI

| | |
|---|-------------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI | ii |
| LEMBAR PENGESAHAN | iii |
| PRAKATA..... | iv |
| ABSTRAK | vi |
| <i>ABSTRACT</i>..... | vii |
| DAFTAR ISI..... | viii |
| DAFTAR GAMBAR..... | x |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Rumusan Masalah | 5 |
| 1.3. Tujuan Penelitian..... | 5 |
| 1.4. Manfaat Penelitian..... | 6 |
| 1.5. Batasan Masalah..... | 6 |
| 1.6. Sistematika Penulisan..... | 6 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... | 8 |
| 2.1. Pembakaran Terbuka | 8 |
| 2.2. Filter Udara..... | 8 |
| 2.3. Sensor MQ-135 | 11 |
| 2.4. Sensor MQ-7 | 11 |
| 2.5. Sensor GP2Y1010AU0F | 12 |
| 2.6. Sensor Api KY-026 | 14 |
| 2.7. Mikrokontroler | 15 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | 19 |
| 3.1. Metodologi Penelitian | 19 |
| 3.1.1. Rancangan Alat | 19 |
| 3.1.2. Diagram Alir Alat | 21 |
| 3.1.3. Diagram Blok Alat | 22 |
| 3.1.4. Diagram <i>Schematic</i> | 23 |
| 3.2. Komponen Penelitian | 24 |

| | |
|---|------------|
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | 25 |
| 4.1. Hasil Perancangan Alat | 25 |
| 4.1.1. Hasil Perancangan Kerangka Alat | 25 |
| 4.1.2. Hasil Perancangan Filter | 28 |
| 4.2. Kalibrasi Sensor | 30 |
| 4.2.1. Kalibrasi Sensor MQ-7 | 30 |
| 4.2.2. Kalibrasi Sensor MQ-135 | 32 |
| 4.2.3. Kalibrasi Sensor GP2Y1010AU0F | 34 |
| 4.3. Pengujian Alat | 37 |
| 4.3.1. Pengujian Sistem Pencatatan Pembakaran Sampah..... | 37 |
| 4.3.2. Pengujian Pertama..... | 40 |
| 4.3.3. Pengujian Kedua | 42 |
| 4.3.4. Pengujian Ketiga | 44 |
| 4.4. Pembahasan | 46 |
| BAB V PENUTUP | 52 |
| 5.1. Kesimpulan..... | 52 |
| 5.2. Saran | 52 |
| DAFTAR PUSTAKA | 53 |
| LAMPIRAN A KONFIGURASI PIN SENSOR | A-1 |
| LAMPIRAN B LISTING CODE..... | B-1 |
| LAMPIRAN C HASIL PENELITIAN..... | C-1 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1 Tingkat Sensitivitas Sensor MQ-135 | 11 |
| Gambar 2.2 Tingkat Sensitivitas Sensor MQ-7 | 12 |
| Gambar 2.3 Sistem Kerja Sensor GP2Y1010AU0F | 13 |
| Gambar 2.4 Sinyal Pulsa Cahaya IR..... | 14 |
| Gambar 2.5 Rangkaian Pengondisi Sinyal pada Sensor KY-026 | 14 |
| Gambar 3.1 Rancangan Alat | 20 |
| Gambar 3.2 Diagram Alir Alat..... | 21 |
| Gambar 3.3 Diagram Blok Alat | 23 |
| Gambar 3.4 Diagram Schematic | 23 |
| Gambar 4.1 Hasil Perancangan Alat: (a) Tungku pembakaran sampah; (b) Penggabungan tungku pembakaran sampah dengan kerangka alat. .. | 25 |
| Gambar 4.2 Lubang Pada Bagian Atas Kerangka..... | 26 |
| Gambar 4.3 Pipa yang Sudah Terpasang Pada Kerangka Alat | 26 |
| Gambar 4.4 Kotak Sistem Alat: (a) Keadaan tertutup; (b) Keadaan Terbuka | 27 |
| Gambar 4.5 Penempatan Kotak Sistem..... | 27 |
| Gambar 4.6 Urutan Penempatan Media Filter | 28 |
| Gambar 4.7 Tata Letak Penempatan Sensor MQ-7, Sensor MQ-135, dan Sensor GP2Y1010AU0F Pada Filter Pertama dan Kedua | 29 |
| Gambar 4.8 Filter Ketiga..... | 29 |
| Gambar 4.9. Bosen T-Z01 | 30 |
| Gambar 4.10 Data Kalibrasi Sensor MQ-7: (a) Kalibrasi hari pertama; (b) Kalibrasi hari kedua; (c) Kalibrasi hari ketiga | 31 |
| Gambar 4.11 Data Kalibrasi Sensor MQ-135: (a) Kalibrasi hari pertama; (b) Kalibrasi hari kedua; (c) Kalibrasi hari ketiga. | 33 |
| Gambar 4.12 Data Kalibrasi Sensor GP2Y1010AU0F: (a) Kalibrasi hari pertama; (b) Kalibrasi hari kedua; (c) Kalibrasi hari ketiga..... | 35 |
| Gambar 4.13 LED Indikator Merah Menyala..... | 37 |
| Gambar 4.14 LED Indikator Hijau Menyala..... | 38 |
| Gambar 4.15 LED Indikator Kuning Berkedip..... | 38 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.16 Penamaan File Data Pembakaran Sampah..... | 39 |
| Gambar 4.17 Tampilan Data Mentah dari Pembakaran dan Penyaringan Asap Pembakaran Sampah | 39 |
| Gambar 4.18 Data Pembakaran dan Penyaringan Asap Pembakaran Sampah yang Telah Diolah..... | 40 |
| Gambar 4.19 Data Hasil Pengujian Pertama: (a) Data gas karbon monoksida; (b) Data gas karbon dioksida; (c) Data PM2.5. | 41 |
| Gambar 4.20 Data Hasil Pengujian Kedua: (a) Data gas karbon monoksida; (b) Data gas karbon dioksida; (c) Data PM2.5. | 43 |
| Gambar 4.21 Data Hasil Pengujian Ketiga: (a) Data gas karbon monoksida; (b) Data gas karbon dioksida; (c) Data PM2.5 | 45 |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sampah merupakan permasalahan utama yang dihadapi oleh dunia, terutama sampah dengan jangka waktu yang cukup lama terurai. Setiap negara mengatasi permasalahan ini melalui sistem pengelolaan sampah yang dimilikinya. Ketika negara-negara dari tingkat penghasilan menengah sampai tingkat penghasilan tinggi, sistem pengelolaan sampah pada tiap negara dapat berkembang. Perkembangan ini dapat mengikuti pertumbuhan kemakmuran serta tingkat kepadatan penduduk pada wilayahnya masing-masing. Pertumbuhan penduduk yang cepat tentunya dapat menciptakan berbagai macam pusat perhatian pada berbagai wilayah dalam suatu negara. Hal ini tentunya dapat menciptakan peningkatan sampah yang dihasilkan pada negara tersebut [1].

Berdasarkan data yang diperoleh dari *World Bank*, dunia bisa menghasilkan sebanyak 2,01 miliar ton sampah setiap tahunnya, dengan 33% sampah tidak dikelola secara baik dan ramah lingkungan. Dalam satu keluarga di seluruh dunia, sampah yang dapat dihasilkan mencapai 0,74 kilogram sampah per harinya. Namun, tingkat sampah yang dihasilkan dalam satu keluarga bisa sangat bervariasi, mulai dari 0,11 sampai dengan 4,54 kilogram sampah per harinya. Volume sampah yang dihasilkan ini tentunya sangat berkaitan dengan tingkat pendapatan dan tingkat urbanisasi pada tiap-tiap wilayah [1].

Melihat data tersebut, dapat diperkirakan bahwa timbunan sampah dapat meningkat menjadi 3,40 miliar ton pada tahun 2050. Peningkatan ini tentunya berkaitan erat dengan tingkat pendapatan pada suatu negara. Produksi sampah harian di negara-negara berpenghasilan tinggi diperkirakan dapat meningkat sebanyak 19% pada tahun 2050, sedangkan pada negara yang memiliki tingkat penghasilan rendah dan menengah diperkirakan dapat meningkat sekitar 40% atau bahkan bisa melebihi 40% [1].

Pada tahun 2015 Indonesia menempatkan posisi kedua sebagai penyumbang sampah plastik ke laut. Beranjak ke tahun berikutnya, tepatnya tahun 2019 tercatat

bahwa Indonesia mampu menghasilkan sekitar 105 ribu ton sampah per harinya dengan perkiraan pada tahun 2025 dapat menghasilkan sampah sebesar 150 ribu ton sampah. Hal ini terjadi karena 40% dari 142 juta penduduk perkotaan di Indonesia masih belum memiliki akses ke layanan pengumpulan sampah dasar [2].

Dalam pengelolaan sampah, sistem yang digunakan di Indonesia masih belum optimal. Hal ini dikarenakan dari 514 kabupaten atau kota di Indonesia, rerata kapasitas pengelolaan sampah tidak mencapai 50%. Sedangkan, kota-kota besar di Indonesia sudah mencapai 70% sampai dengan 80%. Namun, pola dari pengelolaan sampah masih terpaku pada pola lama yaitu sampah dikumpulkan, diangkut, serta dibuang [3].

Sampah yang sudah dibuang seharusnya dikelola berdasarkan jenis-jenis sampah yang ada, namun pengelolaan sampah di Indonesia biasanya ditimbun pada Tempat Pembuangan Akhir (TPA), dikubur, di jadikan bahan daur ulang, dan dibakar [4]. Berdasarkan kajian yang dilakukan oleh kementerian koordinator bidang perekonomian Republik Indonesia deputi bidang koordinasi percepatan infrastruktur dan pengembangan wilayah asisten deputi telematika dan utilitas, pengelolaan sampah yang sering dilakukan oleh masyarakat Indonesia adalah dengan cara dibakar. Hal ini terjadi dikarenakan kurangnya penyediaan Tempat Pembuangan Sampah (TPS) dan alat pengumpul untuk sampah, jadwal pengumpulan sampah yang tidak rutin sesuai jadwal, serta kurangnya jumlah alat pengumpul sampah yang sesuai dengan kriteria teknis [5].

Proses pembakaran sampah yang berlangsung dapat menghasilkan gas emisi serta residu yang berbentuk abu, selain itu asap yang dihasilkan dari pembakaran sampah dapat meningkatkan polusi udara. Gas emisi hasil pembakaran sampah mengandung berbagai senyawa kimia yang berbahaya bagi lingkungan dan manusia, sedangkan residu yang dihasilkan dapat mengandung senyawa logam berbahaya dan beracun bagi tubuh manusia seperti senyawa merkuri, timbal, dan arsenik [6]. Hal ini juga diperkuat oleh lembaga EFA yang menyatakan bahwa sampah yang dibakar dapat melepaskan zat beracun ke udara seperti zat nitrogen oksida, karbon monoksida, serta partikel polusi. Zat-zat tersebut dapat mengakibatkan gangguan pada kesehatan manusia seperti iritasi, gangguan pernapasan, mengganggu sistem pereduksi, menyebabkan kanker, dan parahnya

dapat mengakibatkan kematian [7].

Penelitian terbaru menjelaskan bahwa limbah yang diproses dengan cara dibakar dapat berpengaruh terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat serta dapat berpengaruh dalam jangka panjang. Asap dari pembakaran limbah dapat mengeluarkan gas beracun dan bahan kimia lainnya ke udara termasuk partikel khusus, nitrogen oksida, dan karbon monoksida. Pembakaran limbah dengan material biomassa juga dapat melepaskan racun berat ke udara, tanah, maupun air seperti senyawa organik yang mudah menguap dan bahan kimia aromatik *polisiklik*. Senyawa polutan ini memungkinkan memiliki efek kritis pada manusia terutama pada orang tua, wanita hamil, dan anak-anak. Selain itu, asap yang dihasilkan dari pembakaran sampah dapat menyebabkan sakit kepala, iritasi pada mata, mual dan bahkan kematian yang diakibatkan oleh peningkatan risiko penyakit yang berhubungan dengan sistem pernapasan [8].

Jumlah polusi udara yang diakibatkan dari pembakaran sampah dapat dikurangi dengan berbagai cara, salah satunya adalah dengan mengolah asap hasil pembakaran sebelum dibuang seutuhnya ke lingkungan sekitar. Metode yang umum dilakukan untuk mengurangi polusi dari pembakaran sampah adalah dengan melakukan penyaringan asap dari pembakaran sampah dengan berbagai jenis bahan yang memiliki membran, berserat, serta memiliki pori-pori yang dipasang pada substrat padat [9][10].

Sebelumnya, bahan-bahan kimia seperti *polimida*, *poliakrilonitril*, *polietilen*, *polipropilena*, dan serat kaca digunakan sebagai bahan filter udara. Namun, bahan-bahan filter tersebut memiliki kendala yaitu kurangnya fungsi aktif, biaya yang lebih tinggi, tidak dapat terurai secara hayati, serta tidak ramah lingkungan. Hal ini menjadikan bahan-bahan tersebut kurang efektif jika digunakan secara terus menerus. Penelitian terus dilakukan untuk memperoleh bahan yang ramah lingkungan sebagai bahan filter udara, salah satu bahan filter udara yang ramah lingkungan adalah dengan menggunakan bahan *biodegradable*. Bahan ini berfungsi sebagai protein *nano*, serat *nano* sutra, dan *aerogel* berbasis polisakarida. Bahan ini dipilih karena mampu menjadi bahan penyaring udara yang baik dengan memiliki struktur jaringan tiga dimensi kontinu yang dibentuk oleh penggantian pelarut cair dalam gel melalui udara tanpa mengubah struktur jaringan badan gel secara

substansial [11][12].

Hal ini telah terbukti dengan penelitian yang melakukan pembuatan sistem *monitoring* untuk tingkat kebersihan udara dengan melakukan pengujian kadar asap beserta zat polutan yang terkandung sebelum dan setelah melakukan penyaringan. Penyaringan yang dilakukan menggunakan filter tipe *High Efficiency Particulate Air* (HEPA). Sistem pendeteksian menggunakan sensor MQ-2 dan MQ-135 sebagai pendeteksi asap, karbon monoksida, karbon dioksida, dan amonium. Sedangkan, untuk pendeteksian *particulate matter* (PM) menggunakan sensor PMSA003. Hasil yang diperoleh untuk penyaringan kadar asap, karbon monoksida, karbon dioksida, dan amonium mengalami pengurangan yang signifikan serta untuk penyaringan PM semua ukuran dari yang sangat kecil ($0,3\ \mu\text{m}$) hingga yang lebih besar ($10\ \mu\text{m}$) dapat disaring secara efektif [13].

Penelitian lainnya melakukan pengujian kadar karbon monoksida yang terkandung dalam asap rokok sebelum dan sesudah dilakukan penyaringan asap. Penelitian tersebut menggunakan tiga tahap penyaringan dengan masing-masing tahap menggunakan filter tipe ESP, HEPA, dan penyaring karbon aktif. Sebagai pendeteksian asap, penelitian ini menggunakan sensor gas MQ-7 sebagai piranti pendeteksi zat karbon monoksida pada asap. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah terdapat penurunan yang cukup signifikan dengan nilai kadar zat karbon monoksida sebelum melakukan penyaringan melebihi 20 ppm dan kadar zat karbon monoksida setelah melakukan penyaringan adalah 3,1 ppm [14].

Pada penelitian selanjutnya, dilakukan pendeteksian asap dari pembakaran dupa dan obat nyamuk bakar serta melakukan perbandingan dari sebelum dan setelah penyaringan asap dilakukan. Sistem pendeteksian asap yang dilakukan adalah dengan menggunakan sensor MQ-135 serta pendeteksian debu menggunakan sensor debu. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini adalah penurunan kadar zat polutan (karbon monoksida, karbon dioksida, dan alkohol) yang terkandung dalam asap yang signifikan serta debu yang dideteksi benar-benar kecil [15].

Berdasarkan permasalahan yang berlaku, untuk mengatasi pencemaran lingkungan yang dihasilkan dari asap hasil pembakaran sampah, diperlukan alat pembakaran sampah dengan minim asap polusi atau minim zat polusi yang

dikeluarkan. Oleh karena itu, penelitian yang dilakukan memfokuskan zat polutan yang terkandung dari asap pembakaran sampah agar asap yang dihasilkan menjadi lebih bersih dan mengurangi zat polutan yang terkandung dari asap pembakaran sampah.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, permasalahan yang sering terjadi pada sebagian besar negara di dunia adalah tingginya volume sampah serta pengolahan sampah yang kurang baik terutama di Indonesia. Sebagian besar masyarakat Indonesia melakukan pengolahan sampah dengan cara dibakar. Cara ini merupakan cara yang paling buruk dalam pengolahan sampah, dikarenakan asap yang dihasilkan dalam pembakaran sampah mengandung zat polutan seperti gas karbon monoksida, *polychlorinated biphenyls*, dan PM. Zat-zat tersebut sangat mempengaruhi lingkungan serta kesehatan masyarakat.

Upaya untuk mengurangi zat polutan yang terkandung dalam asap pembakaran sampah diperlukan teknologi dalam pengolahan asap hasil pembakaran sampah, salah satunya adalah dengan menggunakan penyaring asap. Oleh karena itu, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana merancang serta membangun sebuah penyaring dan pengukuran asap pembakaran sampah pada mini insinerator yang efektif dalam mengurangi kandungan zat polutan serta dapat mengurangi polusi udara yang dihasilkan dari pembakaran sampah.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang serta membangun penyaring dan pengukuran asap hasil pembakaran sampah pada mini insinerator yang efektif dalam mengurangi kandungan zat polutan serta dapat mengurangi polusi udara yang dihasilkan dari pembakaran sampah. Penelitian ini juga bertujuan untuk menguji efektivitas penyaringan asap dalam menyaring zat polutan yang terkandung dalam asap pembakaran sampah serta mengevaluasi performa alat agar dapat menjadi solusi inovatif dalam mengurangi polusi udara yang dihasilkan dalam pembakaran sampah.

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun beberapa manfaat dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Mengurangi penumpukan sampah yang berlebihan.
2. Mengurangi polusi yang dihasilkan dari pembakaran sampah.
3. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi solusi dalam pengelolaan sampah yang dilakukan dengan cara dibakar.

1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah dibuat untuk membatasi ruang lingkup penelitian serta membuat penelitian tidak keluar dalam objek penelitian yang diteliti. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut.

1. Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino Mega.
2. Filter yang digunakan adalah filter udara dan filter air. Filter udara menggunakan bahan karbon aktif, serabut kelapa, serta batu zeolit. Sedangkan, pada filter air menggunakan batu zeolit sebagai bahan filter.
3. Sensor kualitas gas karbon monoksida yang digunakan adalah sensor MQ-7.
4. Sensor kualitas gas karbon dioksida yang digunakan adalah sensor MQ-135.
5. Sensor pendeteksi PM sensor GP2Y1010AU0F

1.6. Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini dibagi menjadi lima pembahasan yang bertujuan untuk memperjelas pembahasan. Adapun lima pembahasan secara terperinci adalah sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang penjelasan mengenai latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi penjelasan tentang uraian landasan teori dan kajian pustaka. Landasan teori pada bab ini berisi tentang dasar-dasar teori yang berkaitan dengan penelitian ini seperti pembakaran sampah, filter udara, sensor MQ-135, sensor MQ-

7, sensor GP2Y1010AU0F, sensor api KY-026, dan mikrokontroler.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Bab ini berisi tentang penjelasan dari metode-metode dari penelitian yang digunakan serta mekanisme dari penelitian yang dilakukan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang hasil dari penelitian yang telah dilakukan berupa pembahasan cara kerja alat, pembahasan data dari hasil penelitian.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi uraian mengenai kesimpulan yang diperoleh dari penelitian serta saran-saran untuk penelitian berikutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembakaran Terbuka

Pembakaran terbuka merupakan sebuah praktik dalam pengelolaan sampah yang paling banyak dilakukan oleh masyarakat dunia, terutama negara-negara berkembang seperti Indonesia. Terdapat beberapa faktor yang menjadi tingginya tingkat pembakaran sampah secara terbuka yaitu banyaknya sampah yang diproduksi di tiap-tiap keluarga, kurangnya pengelolaan sampah yang baik, kesadaran masyarakat akan lingkungan bersih, serta penerapan peraturan yang kurang ketat [16], [17].

Pembakaran terbuka mengakibatkan pelepasan zat polusi dari sampah dan Gas Rumah Kaca (GRK). Ini merupakan suatu zat berbahaya 28 kali lebih kuat per kilogramnya dari yang dipancarkan oleh karbon dioksida dalam jangka waktu 100 tahun. Banyaknya pembakaran terbuka, menjadikan kegiatan tersebut menjadi penyumbang terpenting terhadap emisi partikel dan polusi udara dengan total 11% kontribusi terhadap emisi PM_{2,5} secara global serta 6% sampai 7% terhadap emisi karbon hitam. Selain itu, pembakaran terbuka juga menghasilkan sekiranya 2% sampai 10% emisi karbon dioksida secara global [18].

Pembakaran limbah secara terbuka juga menghasilkan emisi berupa asap. Asap ini mengandung berbagai senyawa berbahaya akibat bercampurnya bahan-bahan kimia seperti plastik, kayu yang diberi cat atau dipernis, dan lainnya. Asap emisi ini menyebar ke udara dan atmosfer. Hal ini kemudian menyebabkan terjadinya hujan asam. Fenomena hujan asam dapat merugikan manusia dengan merusak ekosistem, tanah, serta bangunan [8].

2.2. Filter Udara

Kata filter dapat merujuk dalam berbagai hal. Dalam konteks pemisahan partikel, filter dapat diartikan sebagai suatu alat yang dapat memisahkan suatu partikel. Sedangkan filtrasi merupakan proses yang dilakukan untuk memisahkan partikel [19][20]. Sedangkan filter udara merupakan sebuah alat yang dapat

melakukan proses penyaringan udara buruk menjadi udara bersih. Dalam konteks ini, udara buruk diartikan sebagai udara yang mengandung asap polusi [21].

Media yang digunakan untuk filter banyak ragam serta macamnya, namun media untuk filter udara yang paling banyak adalah media filter dengan membran dan media dengan sifat adsorben atau sifat menyerap suatu zat. Media membran dikembangkan sebagai embaran semi permeabel yang tipis dan fleksibel yang terbuat dari bahan selulosa yang diregenerasi. Hal ini bertujuan untuk memisahkan spesies pada skala kimia molekuler dan ionik. Sedangkan media adsorben digunakan karena sifatnya yang menghilangkan zat kimia terlarut dan tidak terlarut. Hal ini sangat cocok digunakan untuk menghilangkan bau dan asap dalam berbagai aplikasinya. Adapun contoh media membran adalah serabut kelapa, sedangkan contoh media adsorben adalah batu zeolit dan karbon aktif [19][20].

1. Serabut kelapa

Serabut kelapa merupakan bagian dari kelapa yang berperan sebagai lapisan terluar kelapa dengan serat tebal dan membungkus tempurung kelapa. Biasanya serabut kelapa memiliki warna coklat dengan panjang dan diameter yang bervariasi [22][23]. Hampir sebagian dari isi buah kelapa diisi oleh serabut kelapa, yaitu sekitar 35% dari keseluruhan berat buah kelapa [24]. Serabut kelapa kerap kali menjadi limbah yang paling umum ditemukan. Masyarakat biasanya mengolah limbah sabut kelapa menjadi kerajinan tangan, furnitur, dan dekorasi rumah [25]. Selain berguna untuk kerajinan, sabut kelapa juga berguna sebagai bahan penyaring. Hal ini terjadi karena serabut kelapa terbentuk dari bahan lignoselulosa yang sebagian besar terdiri dari selulosa sebesar 40% , lignin sebesar 30%, dan hemiselulosa sebesar 16% [26][27]. Selulosa memiliki kandungan asam karboksilat dan fenolik, kandungan ini merupakan gugus fungsi polar dan memiliki fungsi untuk menyerap polutan anorganik, sedangkan lignin berfungsi sebagai media penyimpanan utama polutan organik [27].

2. Batu zeolit

Batu zeolit merupakan suatu unsur molekuler aluminosilikat dan kation. Unsur ini berbentuk kerangka kristal berpori dengan pori-pori dimensi molekul yang seragam dan banyak digunakan dalam aplikasi industri seperti

katalis, adsorpsi, filter molekuler, pemisah membran, dan pertukaran ion [28][29]. Selain menjadi filter air, batu zeolit juga mampu menjadi filter udara. Batu zeolit memiliki mekanisme pintu perangkap. Akses dari setiap pori batu zeolit dapat diatur oleh kation yang bekerja sebagai ion penjaga pintu. Kation memungkinkan membuka akses pada molekul gas dengan polarisasi yang kuat seperti CO_2 , sehingga CO_2 akan menempati pori-pori yang kosong pada batu zeolit. Sedangkan molekul gas dengan polarisasi yang lemah tidak bisa memasuki pori-pori batu zeolit. Osilasi termal kation akan semakin kuat ketika suhu mengalami peningkatan. Hal ini menjadikan tingginya peluang suatu molekul masuk dalam pori-pori batu zeolit, sehingga ketika batu zeolit berada di ambang batas suhu, kapasitas adsorpsi molekul gas lemah dapat meningkat secara anomali [29].

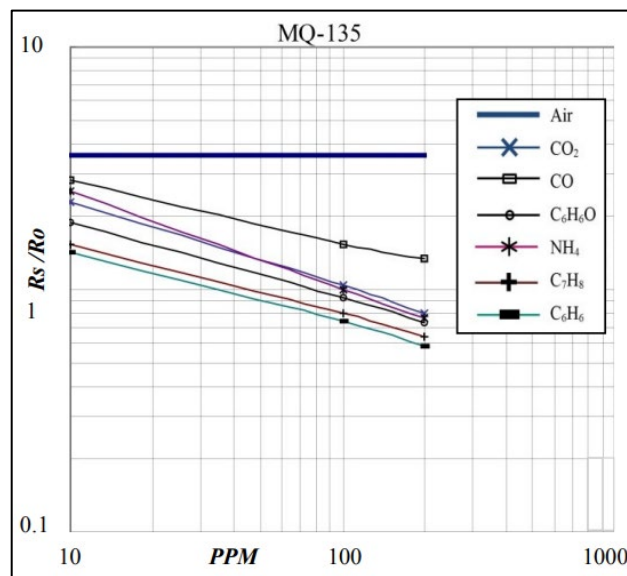
3. Karbon aktif

Karbon aktif merupakan media adsorben berwarna hitam dengan bentuk granula dan bulat. Karbon aktif memiliki sifat kimia maupun fisika yang mampu menyerap zat organik maupun anorganik, dapat berlaku sebagai penukar kation, serta sebagai katalis untuk berbagai reaksi [30]. Dalam pemasarannya, karbon aktif biasanya dipasarkan dalam dua bentuk yaitu dalam bentuk bubuk dan granula. Bubuk karbon aktif biasanya menunjukkan luas permukaan spesifik yang tinggi dan porositas mikro yang meningkatkan kapasitas adsorpsinya. Namun, dalam jenis bubuk cenderung terjadi pengendapan dan penghilangan yang lebih lambat dari pada granula. Bentuk ini juga tidak dapat diregenerasi karena kesulitan memisahkan dari larutan berair serta berpotensi meningkatkan polusi debu. Berbeda dalam bentuk granula, bentuk ini memiliki regenerasi yang baik. Hal ini dikarenakan kemampuannya yang dapat beradaptasi terhadap kontak terus-menerus tanpa perlu memisahkan karbon dari cairan. Bentuk granula biasanya menunjukkan kapasitas adsorpsi yang lebih rendah untuk menghilangkan polutan. Hal ini disebabkan adanya efek pengotoran serta berkurangnya perpindahan massa polutan [31].

2.3. Sensor MQ-135

Sensor MQ-135 merupakan sebuah sensor yang dapat mendeteksi keberadaan gas karbon dioksida (CO_2), nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (H_2S), amonia (NH_3), dan benzena (C_6H_6) yang kemudian mengubahnya menjadi sinyal listrik [32][33]. Pada bagian dalam sensor MQ-135 terdapat timah dioksida (SnO_2) sebagai elemen pengindraan. Ketika sensor diberikan suatu gas, maka molekul gas tertentu teradsorpsi ke permukaan elemen pengindraan. Akibatnya, hambatan listrik pada sensor mengalami perubahan. Perubahan ini kemudian diukur dan dianalisis untuk menentukan suatu konsentrasi suatu gas [34].

Sensor MQ-135 memiliki resistansi yang sangat tinggi. Ketika sensor mendeteksi udara bersih, nilai dari resistansi sensor cenderung tinggi. Nilai resistansi menurun seiring dengan pekatnya konsentrasi gas yang dideteksi. Semakin tinggi tingkat sensitivitas suatu gas yang dideteksi, maka semakin akurat sensor MQ-135 mendeteksi gas tertentu [35]. Adapun tingkat sensitivitas dari sensor MQ-135 untuk berbagai gas dapat dilihat pada Gambar 2.1.



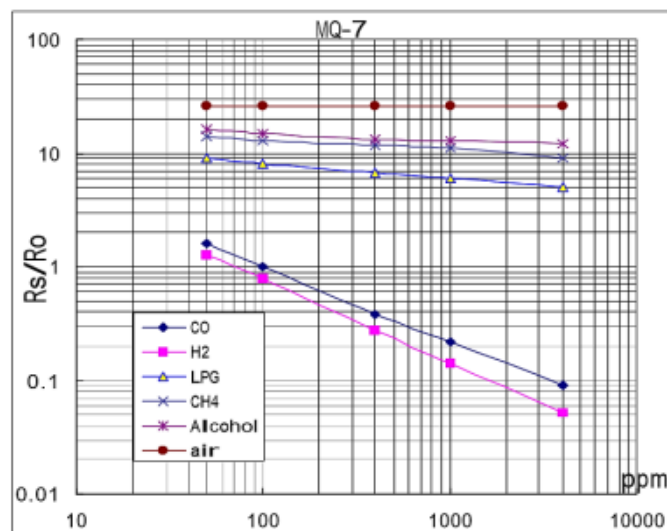
Gambar 2.1 Tingkat Sensitivitas Sensor MQ-135 [36]

2.4. Sensor MQ-7

Sensor MQ-7 merupakan salah satu sensor jenis *metaloxide-semiconductor* (MOS). Sensor ini terdiri dari tabung keramik mikro aluminium oksida (Al_2O_3),

lapisan sensitif timah dioksida (SnO_2), elektrode pengukur, dan koil pemanas nikel kromium (NiCr) yang dipasang pada wadah yang terbuat dari plastik dan jaring baja yang tahan karat [37].

Sensor MQ-7 memiliki pemanas yang digunakan sebagai pembersih ruangan sensor dari kontaminasi udara luar. Sensor ini bekerja dengan dua sumber tegangan, yaitu tegangan untuk pemanasan dan tegangan untuk rangkaian dengan masing-masing membutuhkan tegangan 5 volt DC. Tegangan pada pemanas digunakan untuk memanaskan pemanas, sedangkan tegangan sirkuit digunakan untuk mengukur tegangan keluaran sensor [38].



Gambar 2.2 Tingkat Sensitivitas Sensor MQ-7 [39]

Gambar 2.2 merupakan gambar tingkat sensitivitas dari sensor MQ-7. Sensor ini memiliki tingkat sensitivitas yang sangat tinggi terhadap gas karbon monoksida. Hal ini dapat dilihat pada grafik yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Sensor MQ-7 dapat merespons sekitar 1 detik sampai 2 detik [39]. Sensor ini dapat mendeteksi kadar gas karbon monoksida dari rentang 20 hingga 2000 dengan satuan *Parts Per Million* (PPM) [39][40].

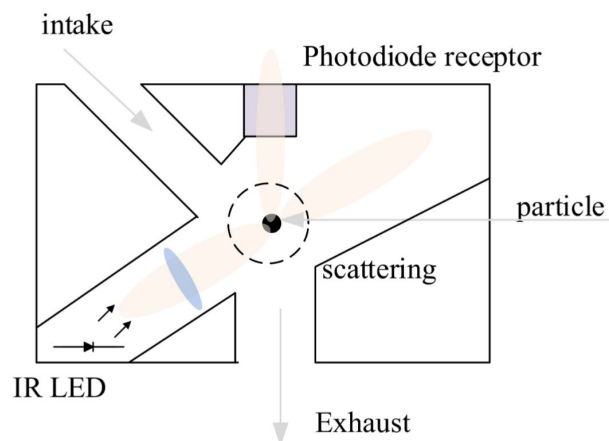
2.5. Sensor GP2Y1010AU0F

Sensor GP2Y1010AU0F merupakan sensor debu optik yang sangat efektif dalam pendeteksian partikulat udara yang sangat halus [41][42]. Secara sederhana,

sensor ini menggunakan dua diode yaitu LED IR dan fototransistor. Fungsi dari kedua diode ini adalah sebagai pendeteksi debu dari satu pulsa, sehingga dapat bekerja pada frekuensi yang jauh lebih tinggi mencapai 100Hz [42].

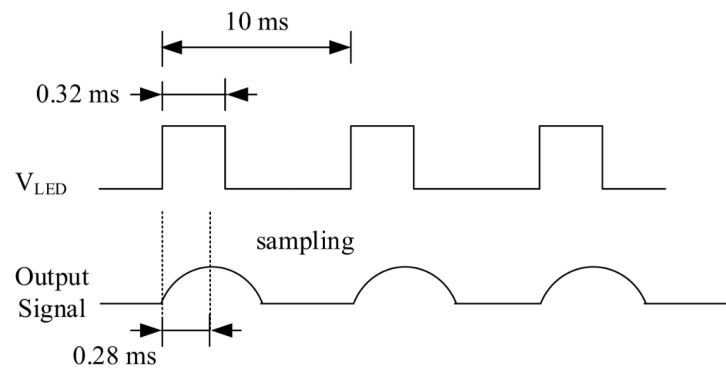
Sensor ini juga menggunakan rangkaian penguat yang dilengkapi dengan filter berjenis *band pass filter*. Filter jenis ini menyaring perubahan intensitas cahaya pada skala yang lebih lambat dari 1 ms. Hal ini bertujuan untuk menghindari sensitivitas terhadap variasi cahaya sekitar [43].

Sensor GP2Y1010AU0F menggunakan hamburan cahaya sebagai operasinya. Cahaya inframerah (IR) dipancarkan ke ruangan pengukuran. Ketika debu terdeteksi, cahaya dibiaskan oleh partikel dan jumlah cahaya yang tersebar terdeteksi oleh diode fototransistor [44]. Adapun ilustrasi dari sistem kerja sensor GP2Y1010AU0F dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sistem Kerja Sensor GP2Y1010AU0F [44]

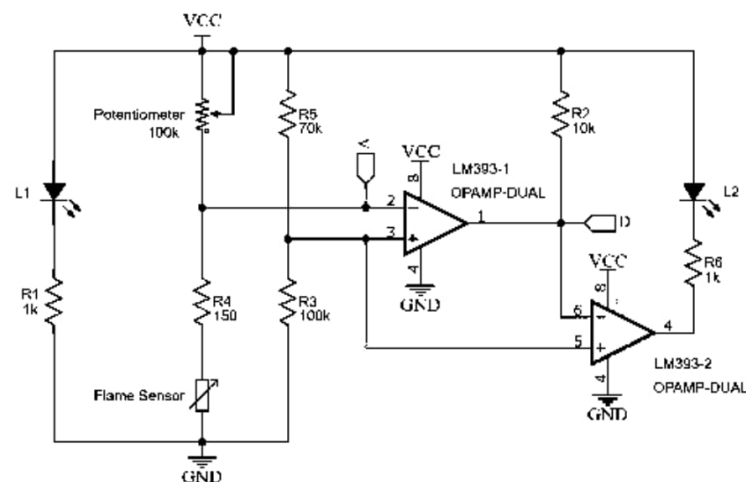
Cahaya IR dibangkitkan dengan sinyal pulsa agar dapat membaca sinyal keluaran dari sensor. Sinyal pulsa yang dibutuhkan untuk memancarkan cahaya IR sebesar 100Hz. Setiap sinyal pulsa memiliki sepasang tinggi dan rendah dengan sinyal tertinggi sebesar 0,32 ms dan sinyal terendah sebesar 9,68 ms. Sensor ini mampu menghasilkan sinyal keluaran tertinggi 0,28 ms setelah dimulainya sinyal tinggi dan mengubah sinyal keluaran menjadi tegangan dan konsentrasi partikel melalui nilai ADC [44]. Adapun ilustrasi sinyal pulsa yang dibangkitkan dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Sinyal Pulsa Cahaya IR [44]

2.6. Sensor Api KY-026

Sensor api KY-026 merupakan sensor yang dapat mendeteksi api dengan mendeteksi cahaya inframerah yang dihasilkan dari api. Sensor ini secara fisik mengukur luas area serta mengirimkan sinyal ke pengondisi sinyal. Sinyal analog kemudian dikirimkan ke *amplifier* yang bertujuan untuk menguatkan sinyal sesuai dengan nilai resistansi pada potensiometer. Sinyal yang telah diperkuat kemudian dikirimkan ke komparator. Sensor ini menggunakan modul LM393 sebagai IC *amplifier* [45][46]. Adapun rangkaian pengondisi sinyal pada sensor ini dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Rangkaian Pengondisi Sinyal pada Sensor KY-026 [45]

Sensor KY-026 bekerja dengan tegangan 3,3 V sampai dengan 5,5 V dan dapat mendeteksi panjang gelombang inframerah mulai dari 760 nm sampai dengan

1100 nm dengan sudut 60°. Sensor ini juga dapat diatur tingkat sensitivitasnya melalui potensiometer [46].

2.7. Mikrokontroler

Mikrokontroler merupakan suatu komputer kecil yang biasa disebut sebagai *special purpose computers* yang berada di dalam satu *Integrated Circuit* (IC) yang berisi *Central Processing Unit* (CPU), memori, *timer*, saluran komunikasi serial dan paralel, *port input/output*, serta *Analog To Digital Converter* (ADC). Mikrokontroler banyak digunakan untuk berbagai aplikasi seperti digunakan untuk pengendalian, akuisisi data, telekomunikasi, otomasi industri, dan masih banyak yang lainnya [47].

Berdasarkan arsitektur pembuatannya, mikrokontroler tersusun atas dua arsitektur yaitu, *Complex Instruction Set Computer* (CISC) dan *Reduce Instruction Set Computer* (RISC). CISC merupakan jenis mikrokontroler dengan jumlah instruksi yang kompleks, sedangkan RISC merupakan jenis mikrokontroler dengan instruksi yang terbatas namun memiliki banyak register dibandingkan CISC. Instruksi pada RISC sebagian besar memiliki instruksi dasar, sehingga ketika membuat program *assembly* pada mikrokontroler ini jauh lebih kompleks daripada mikrokontroler CISC. Instruksi dasar yang dijalankan mikrokontroler RISC hanya memerlukan satu siklus kerja mesin, sehingga untuk merealisasikan instruksi dasar RISC tidak memerlukan gerbang logika yang banyak. Oleh karena itu, dimensi dan konsumsi daya pada RISC lebih kecil dibandingkan dengan CISC [47].

Salah satu mikrokontroler RISC yang paling banyak digunakan adalah mikrokontroler *Advanced versatile RISC* atau *Atmega and AVR Risc processor* (AVR) 8 bit dengan arsitektur Harvard. AVR memiliki kecepatan eksekusi program yang lebih cepat daripada mikrokontroler lainnya. Selain itu, AVR memiliki fitur yang cukup lengkap sehingga program yang dijalankan akan lebih banyak [47].

Mikrokontroler AVR memiliki beberapa jenisnya seperti, TinyAVR, AT90S, ATmega, Xmega, dan AVR32 [47].

1. Mikrokontroler TinyAVR (ATTiny) merupakan mikrokontroler dengan 8 bit. Mikrokontroler ini merupakan mikrokontroler AVR dengan dimensi yang

kecil dan memiliki *peripheral* yang terbatas.

2. Mikrokontroler AT90S merupakan mikrokontroler 8 bit klasik dari AVR.
3. Mikrokontroler ATmega merupakan mikrokontroler 8 bit yang memiliki *peripheral* yang lebih banyak dibandingkan dengan ATTiny.
4. Mikrokontroler Xmega merupakan mikrokontroler 8 sampai dengan 16 bit yang memiliki *peripheral* versi baru dan canggih. Mikrokontroler ini memiliki sistem *monitoring event* dan *Direct Memory Acces* (DMA) yang ditingkatkan.
5. Mikrokontroler AVR32 merupakan mikrokontroler 32 bit yang pertama kali dibuat oleh Atmel pada tahun 2006. Mikrokontroler ini menggunakan arsitektur RISC 32 bit yang ditunjukkan untuk bersaing dengan mikrokontroler berbasis prosesor ARM mikrokontroler. AVR32 tidak memiliki *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory* (EEPROM) internal, namun mikrokontroler ini dapat menggunakan kartu *Secure Digital* (SD) sebagai penggantinya.

2.8. Kajian Pustaka

Kesehatan lingkungan merupakan suatu kunci untuk menciptakan kehidupan yang sehat. Isu terhadap kesehatan lingkungan mulai banyak dibicarakan mengingat tingginya tingkat polusi di dunia terutama negara-negara dengan tingkat konsumsi yang tinggi. Tingginya tingkat polusi dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti emisi kendaraan bermotor, asap rokok, serta emisi dari pembakaran limbah secara terbuka.

Sebagai suatu solusi dalam menghadapi isu lingkungan tersebut, banyak dari peneliti-peneliti melakukan penelitian untuk menjawab isu lingkungan tersebut dengan membuat alat pemantauan kualitas udara. Penelitian tentang *development of an iot-enabled air pollution monitoring and air purifier system*, berbagai objek diteliti seperti asap pembakaran, asap pembakaran dupa, serta udara normal untuk mendeteksi zat karbon dioksida, karbon monoksida, serta PM. Pendeteksian zat-zat tersebut dilakukan dengan menggunakan sensor partikulat PMSA003, sensor gas MQ-2 dan MQ-135 serta menggunakan sistem penyaringan udara yang menggunakan *filter* HEPA dan karbon aktif dalam penyaringan asap. Hasil yang

diperoleh pada penelitian ini yaitu terjadinya pengurangan zat polutan serta *filter* yang dirancang secara efektif dapat menyaring partikel di atas 0,3 μm . Namun, pada penelitian ini terdapat kelemahan pada sistemnya yaitu sistem penyaringan yang hanya terjadi satu kali, hal ini memungkinkannya beberapa zat polutan lolos dari penyaringan sehingga terdapat beberapa zat polutan setelah penyaringan tidak berkurang secara signifikan [13].

Penelitian tentang alat pendeteksi, penghisap dan penyaring asap rokok, menjadikan asap rokok sebagai objek penelitiannya yang mana asap rokok ini mengandung zat karbon monoksida. Penelitian ini menggunakan sensor MQ-7 sebagai pendeteksi zat karbon dioksida dengan menggunakan filter HEPA, filter ESP, dan karbon aktif dalam penyaringan asap. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini yaitu kadar karbon monoksida yang terdeteksi berkurang dari ≥ 20 ppm menjadi sekitar 3,1 ppm dalam waktu kurang dari satu menit. Namun pada penelitian ini memiliki kekurangan, yaitu keterbatasan sensor yang hanya mendeteksi gas karbon monoksida serta sistem penyaringan yang dirancang untuk menyaring karbon monoksida, sedangkan asap rokok memiliki zat membahayakan lainnya [13], [14], [15], [48], [49].

Penelitian tentang *arduino based air monitoring and filtration system*, menjadikan udara normal dan asap dupa sebagai objek yang diteliti dengan menggunakan sistem seperti *air purifier*. Penelitian ini menggunakan sensor MQ-135 sebagai sensor kualitas air serta menggunakan sistem penyaringan filter HEPA, filter ESP, dan karbon aktif dalam penyaringan asap. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini yaitu adanya pengurangan zat polutan setelah melalui proses penyaringan, namun pengurangan yang terjadi tidak terlalu tinggi. Hal lain yang menjadi kekurangan pada penelitian ini adalah tidak adanya data dalam pengujian efektivitas sinar UV yang digunakan dalam proses penyaringan [13], [14], [15], [48], [49].

Penelitian tentang *cigarette smoke detection and cleaner based on internet of things (IoT) using arduino microcontroller and mq-2 sensor*, menjadikan asap rokok sebagai objek penelitiannya serta MQ-2 digunakan sebagai pendeteksi terhadap asap rokok. Hasil pada penelitian ini adalah sistem yang mendeteksi asap rokok dengan nilai 300 menandakan suatu ruangan terdapat asap rokok, sehingga

kipas DC menyala untuk membuang asap rokok sampai sistem membaca asap rokok di bawah 300. Kekurangan dari penelitian ini yaitu tidak adanya sistem penyaringan asap dan asap langsung dibuang ke udara bebas, sehingga zat polutan yang terkandung pada asap rokok dapat membahayakan lingkungan sekitar [13], [14], [15], [48], [49].

Penelitian tentang *indoor air monitoring and filtration using arduino-based plasma technology*, menjadikan asap rokok sebagai objek penelitian dengan membersihkan asap tersebut menggunakan plasma listrik. Penelitian ini menggunakan sensor MQ-7 dan MQ-135 sebagai pendeteksian zat karbon monoksida dan karbon dioksida. Hasil pada penelitian ini yaitu terdapat pengurangan zat polutan setelah mengalami pembersihan udara melalui metode plasma. Namun kelemahan pada penelitian ini adalah hanya menampilkan indikator ruangan kotor dan bersih setelah mengalami pembersihan udara dan tidak adanya data yang menampilkan pengurangan kadar zat polutan, selain itu metode plasma menjadi satu-satunya metode yang dipakai pada penyaringan udara dan menetralisasi gas di udara [13], [14], [15], [48], [49].

Berdasarkan hasil dari penelitian-penelitian terdahulu, penelitian ini menggunakan asap pembakaran sampah sebagai objek yang diteliti dengan tiga kali proses penyaringan. *Filter* yang digunakan pada proses penyaringan adalah *filter* udara pada penyaringan pertama dan kedua serta *filter* air pada penyaringan ketiga. Pada setiap proses penyaringannya diberikan pengukuran untuk memantau kadar zat polutannya. Selain itu, penelitian ini menggunakan sensor MQ-7 sebagai pendeteksian karbon monoksida, sensor MQ-135 sebagai pendeteksian karbon dioksida, sensor debu GP2Y1010AU0F sebagai pendeteksian PM.

BAB III

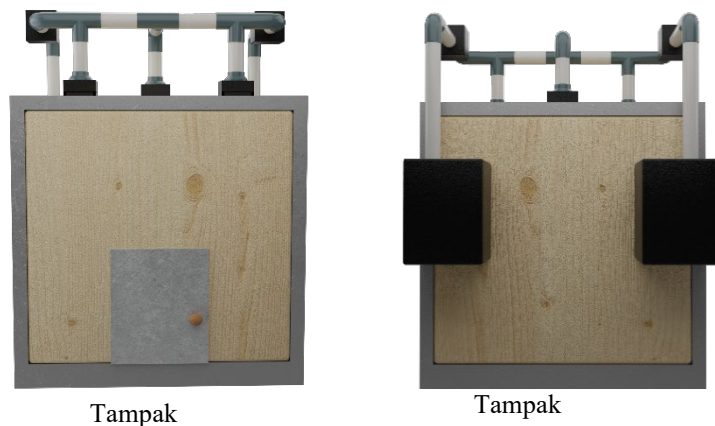
METODOLOGI PENELITIAN

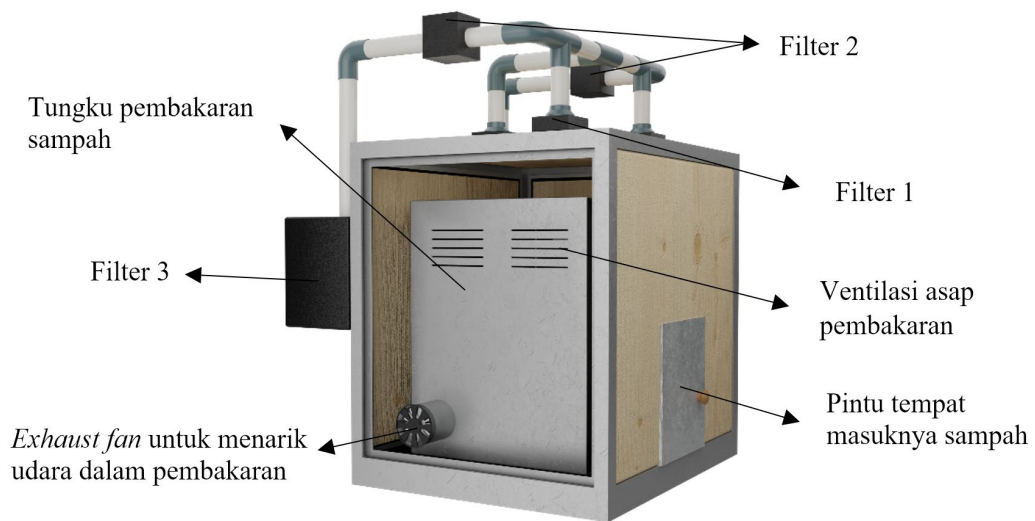
3.1. Metodologi Penelitian

Penelitian ini melakukan penyaringan dan pengukuran zat polutan sebanyak tiga kali, yaitu pada saat proses penyaringan pertama, penyaringan kedua, dan penyaringan ketiga. Ketiga penyaringan ini menggunakan filter yang berbeda, penyaringan pertama dan kedua menggunakan filter udara yang tersusun oleh batu zeolit, karbon aktif, dan serabut kelapa. Pada penyaringan ketiga, filter yang digunakan adalah filter air dengan batu zeolit sebagai media filternya. Data hasil zat polutan yang berhasil melalui penyaringan kemudian dideteksi oleh sensor MQ-7, sensor MQ-135, dan sensor debu GP2Y1010AU0F dengan data yang disimpan pada kartu SD.

3.1.1. Rancangan Alat

Alat pada penelitian ini memiliki bentuk kubus dengan panjang 50 cm, lebar 60 cm, dan tinggi 60 cm. Material yang digunakan adalah pelat besi untuk kerangka alat dan tripleks sebagai bagian luarnya. Adapun desain dari rancangan alat pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.





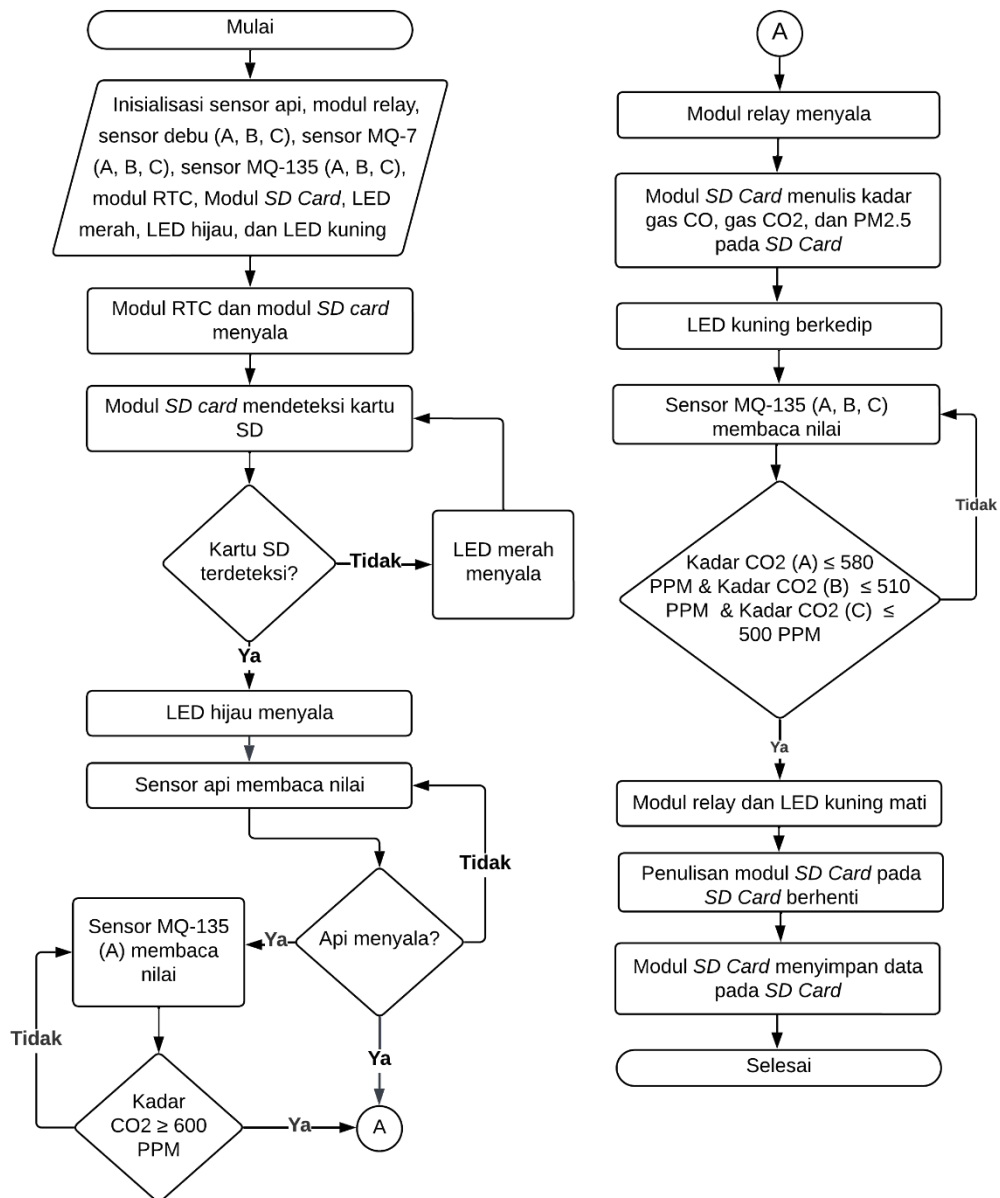
Gambar 3.1 Rancangan Alat

Proses pembakaran dimulai dari sampah yang dimasukkan pada tungku pembakaran, kemudian sampah dibakar dengan cara disulut oleh api secara manual. Ketika pembakaran terjadi, *exhaust fan* akan menyala untuk menarik oksigen yang berada di udara agar proses pembakaran dapat berlangsung. Pada saat proses pembakaran terjadi, asap kemudian dihasilkan. Asap yang dihasilkan ini kemudian keluar dari tungku pembakaran melalui ventilasi. Asap yang keluar dari tungku pembakaran kemudian masuk ke dalam filter 1. Pada filter 1 terdapat sensor gas MQ-7, sensor gas MQ-135, dan sensor debu GP2Y1010AU0F yang digunakan sebagai pendeteksian dan pengukuran zat polutan pada filter 1.

Setelah melalui filter 1, asap masuk kembali ke dalam filter 2. Pada filter 2 komponen yang digunakan masih sama seperti pada filter 1 yaitu sensor gas MQ-7, sensor gas MQ-135, dan sensor debu GP2Y1010AU0F. Komponen ini masih memiliki fungsi yang sama yaitu sebagai pendeteksian serta pengukuran zat polutan pada proses filter 2. Selanjutnya asap yang keluar dari filter 2 masuk ke dalam filter 3 sebagai proses terakhir. Pada filter 3 terdapat sensor gas MQ-7, sensor gas MQ-135, dan sensor debu GP2Y1010AU0F yang digunakan sebagai pendeteksian dan pengukuran zat polutan. Terdapat pompa air DC juga pada filter 3 yang digunakan untuk melarutkan zat polutan yang masih tersisa. Zat polutan yang terlarut dalam air kemudian disaring dengan media filter batu zeolit.

3.1.2. Diagram Alir Alat

Penelitian ini menggunakan sensor MQ-7, sensor MQ-135, dan sensor debu GP2Y1010AU0F sebagai pendeteksi zat polutan dengan masing-masing komponen diberikan tiga titik pengukuran zat polutan. Adapun cara kerja alat dapat dilihat pada Gambar 3.2.



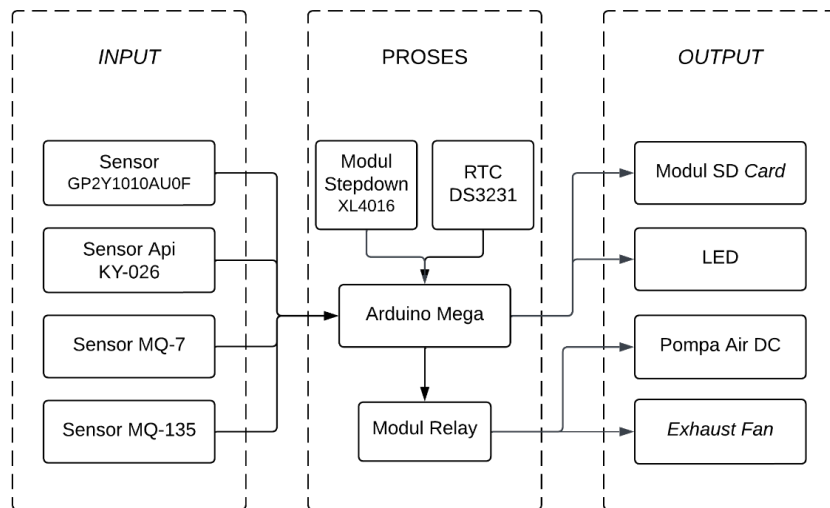
Gambar 3.2 Diagram Alir Alat

Proses penyaringan asap pembakaran sampah dapat bekerja dengan dua kondisi, yaitu ketika sensor api mendeteksi adanya api pada saat pembakaran sampah berlangsung serta ketika pembakaran berlangsung namun sensor api tidak mendeteksi api. Keadaan ini dapat terjadi ketika api pada tungku pembakaran sangat kecil, sehingga kondisi kedua agar proses penyaringan asap pembakaran sampah terjadi dapat terpenuhi ketika gas karbon dioksida mencapai 600 PPM atau lebih. Ketika salah satu dari dua kondisi tersebut terpenuhi, modul relay menyala dan mengalirkan tegangan menuju *exhaust fan* dan pompa air DC, sehingga proses penyaringan asap bekerja.

Pada tahap akhir penyaringan, kadar gas karbon monoksida, gas karbon dioksida, dan kadar PM2.5 mengalami penurunan kadar. Oleh karena itu, sistem penyaringan diatur ketika gas karbon dioksida yang terdeteksi oleh sensor MQ-135 A kurang dari sama dengan 580 PPM, lalu gas karbon dioksida yang terdeteksi oleh sensor MQ-135 B kurang dari sama dengan 510 PPM, dan gas karbon dioksida yang terdeteksi oleh sensor MQ-135 C kurang dari sama dengan 500 PPM, sistem penyaringan asap pembakaran sampah berhenti. Berhentinya sistem ini ditandai dengan modul relay yang mati dan proses pencatatan oleh modul *SD Card* berhenti. Proses pencatatan oleh modul *SD Card* berhenti melakukan pencatatan ditandai dengan LED indikator berwarna kuning yang mati. Kemudian pencatatan yang telah berlangsung sebelumnya tersimpan pada *SD Card*.

3.1.3. Diagram Blok Alat

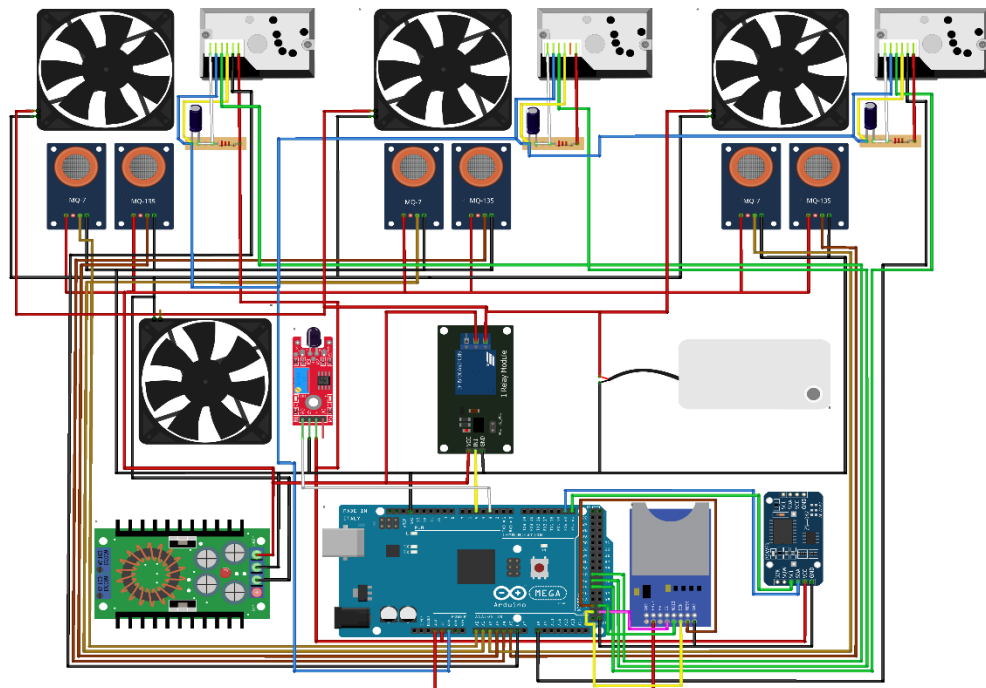
Pada penelitian ini, terdapat empat komponen *input*, empat komponen proses, dan empat komponen *output*. Komponen *input* yang digunakan meliputi sensor debu GP2Y1010AU0F, sensor api KY-026, sensor karbon monoksida MQ-7, dan sensor karbon dioksida MQ-135 dengan komponen proses menggunakan Arduino Mega dengan RTC D3231 sebagai pencatatan waktu, modul relay, dan modul *stepdown*. Pada komponen *output* yang digunakan meliputi pompa air, *exhaust fan*, modul kartu SD, dan LED. Arduino Mega memproses data yang diberikan oleh komponen *input* berdasarkan program-program yang ditentukan, sedangkan komponen *output* bekerja berdasarkan respons dari komponen *input*. Adapun diagram blok dari alat pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram Blok Alat

3.1.4. Diagram Schematic

Pada penelitian ini, sumber daya yang digunakan pada alat bersumber dari adaptor 9V 5A. Sumber daya ini menyuplai langsung pada Arduino Mega, komponen sensor MQ-135, sensor MQ-7, *exhaust fan*, serta modul relay. Adapun diagram *schematic* dari alat pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram Schematic

Sumber daya dari adaptor 9V 5A memiliki tegangan yang berlebihan untuk disuplai langsung ke komponen, sehingga pada pengaplikasiannya tegangan diturunkan menjadi 5V dengan menggunakan modul *stepdown* XL4016. Pada sensor GP2Y1010AU0F diperlukan resistor sebesar 150Ω dan kapasitor $220\mu\text{F}$ agar sensor dapat bekerja. Resistor dan kapasitor ini digunakan sebagai pembentuk sinyal pulsa pada sensor.

3.2. Komponen Penelitian

Terdapat dua jenis komponen penelitian yang digunakan pada penelitian ini, yaitu perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Adapun masing-masing jenis komponen yang digunakan adalah sebagai berikut.

1. Hardware

Adapun perangkat keras yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- 1) Arduino Mega
- 2) Sensor api KY-026
- 3) Sensor gas MQ-135
- 4) Sensor gas MQ-7
- 5) Sensor debu GP2Y1010AU0F
- 6) Modul kartu SD
- 7) Modul RTC DS3231
- 8) LED merah
- 9) LED hijau
- 10) LED kuning
- 11) *Exhaust fan*

2. Software

Adapun perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- 1) Arduino IDE
- 2) Fritzing
- 3) Blender 3D

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Perancangan Alat

Hasil perancangan alat meliputi dua bagian, yaitu hasil perancangan kerangka alat dan hasil perancangan filter. Hasil perancangan kerangka alat berisi uraian mengenai bagian-bagian dari kerangka alat yang berhasil dibuat. Sedangkan, hasil perancangan filter berisi uraian mengenai proses pembuatan filter yang berhasil dibuat.

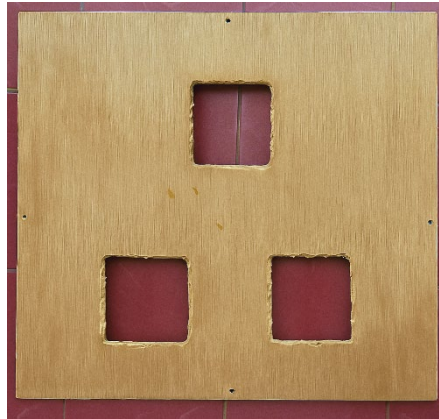
4.1.1. Hasil Perancangan Kerangka Alat

Mini insinerator dibuat dengan dua bagian yaitu tungku pembakaran sampah dan kerangka alat. Tungku pembakaran sampah dibuat dengan bahan dasar pelat besi dengan ukuran panjang 45 cm, lebar 35 cm, dan tinggi 44 cm. Kemudian pada kerangka alat dibuat dengan kombinasi pelat besi dan papan tripleks. Penggunaan papan tripleks pada kerangka bertujuan sebagai peredam panas pada saat pembakaran berlangsung. Tungku pembakaran sampah kemudian digabungkan dengan kerangka alat, sehingga hasil dari perancangan alat dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil Perancangan Alat: (a) Tungku pembakaran sampah; (b) Penggabungan tungku pembakaran sampah dengan kerangka alat.

Mini insinerator yang telah menjadi satu ini memiliki ukuran panjang 60 cm, lebar 50 cm. serta tinggi 60 cm. Pada bagian atas kerangka alat, papan tripleks dilubangi dengan ukuran panjang dan lebar 8 cm sebanyak 3 lubang seperti pada Gambar 4.2. Lubang ini digunakan sebagai tempat filter pertama.



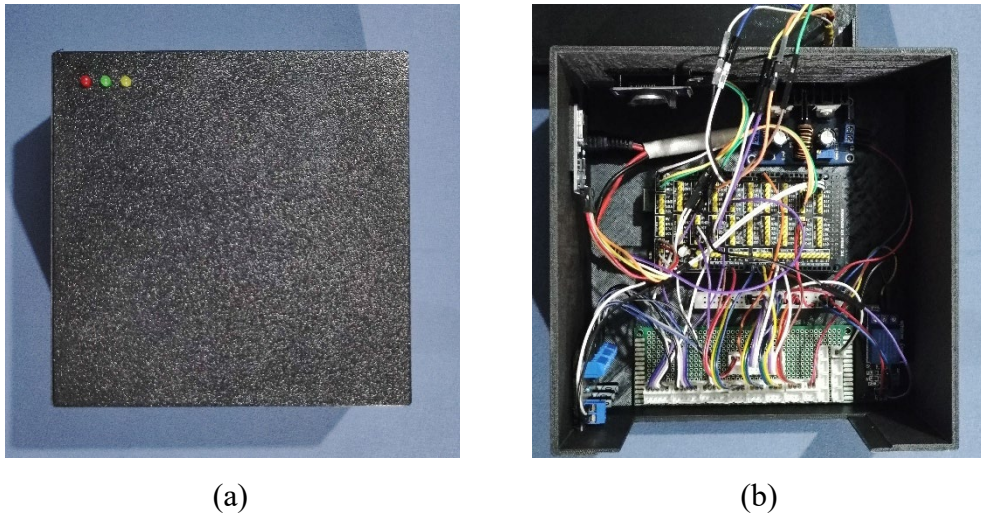
Gambar 4.2 Lubang Pada Bagian Atas Kerangka

Agar asap mengalir dari filter pertama sampai dengan filter ketiga, pipa *Polyvinyl Chloride* (PVC) digunakan sebagai jalur asap dari pembakaran sampah. Selain dipergunakan sebagai jalur asap, pipa ini juga digunakan sebagai jalur dari kabel-kabel komponen sensor dan *exhaust fan*. Jalur ini disambungkan dengan sambungan pipa. Setiap sambungan pipa, dipergunakan lem agar tidak ada asap yang bocor dari sambungan pipa. Adapun hasil pemasangan pipa pada kerangka alat dan filter dapat dilihat pada Gambar 4.3.



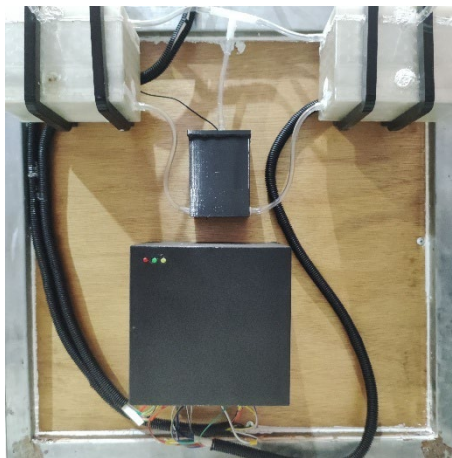
Gambar 4.3 Pipa yang Sudah Terpasang Pada Kerangka Alat

Kemudian pada bagian akhir, terdapat kotak sistem. Kotak sistem ini berisi Arduino Mega dan komponen lainnya yang bekerja bersama Arduino Mega. Semua komponen yang berada di dalam alat kemudian disambungkan pada kotak sistem tersebut. Sistem ini diletakkan dalam suatu kotak agar keamanannya terjaga dan terlihat rapi. Adapun isi dari kotak tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Kotak Sistem Alat: (a) Keadaan tertutup; (b) Keadaan Terbuka

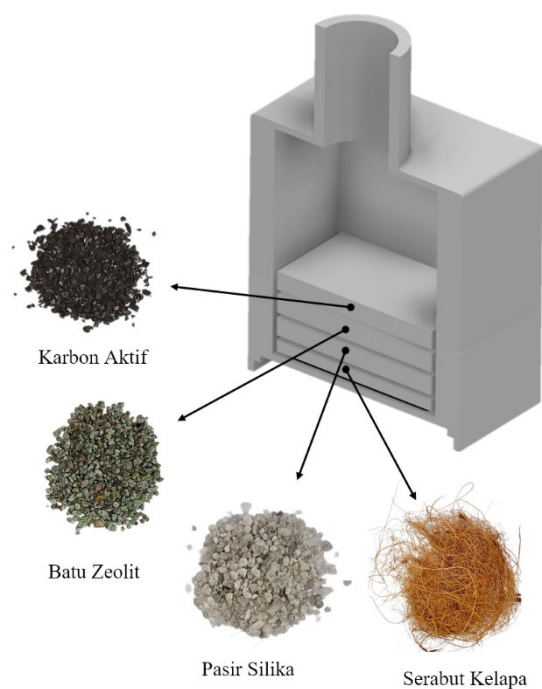
Kotak sistem kemudian diletakkan pada bagian belakang alat. Penempatan ini dipilih agar memudahkan jalur pemberian daya listrik pada sistem sekaligus mempersingkat jalur kabel sensor dan komponen lain yang berada di dalam alat. Adapun letak penempatan kotak sistem dapat dilihat pada Gambar 4.5



Gambar 4.5 Penempatan Kotak Sistem

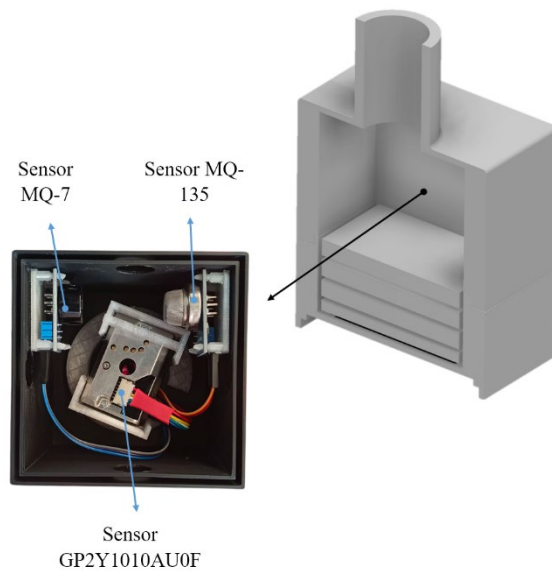
4.1.2. Hasil Perancangan Filter

Media filter yang digunakan berupa serabut kelapa, pasir silika, batu zeolit, dan arang aktif. Pada filter pertama dan filter kedua, media filter yang digunakan adalah sama yaitu serabut kelapa, pasir silika, batu zeolit, dan arang aktif. Pasir silika, batu zeolit, dan arang aktif dibungkus dengan sebuah kantong yang berbahan *non woven*. Pembungkusan ini bertujuan agar media filter tidak saling bercampur. Media filter ini kemudian diletakkan pada tempat filter dengan urutan seperti pada Gambar 4.6.



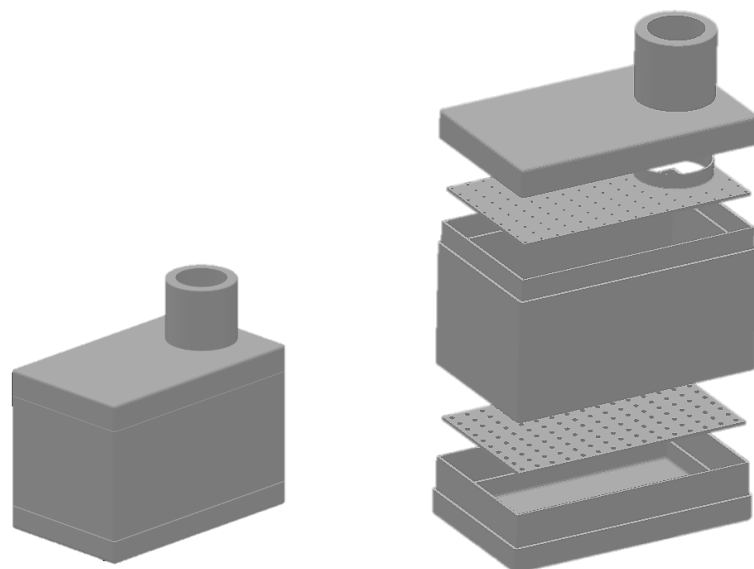
Gambar 4.6 Urutan Penempatan Media Filter

Filter pertama dan kedua menggunakan mekanisme penyaringan udara yang sama, sehingga peletakan komponen pengukuran pada kedua filter juga seragam seperti sensor MQ-7, sensor MQ-135 dan sensor GP2Y1010AU0F memiliki letak yang sama yaitu pada bagian paling atas media filter. Tujuan dari ketiga jenis sensor ini diletakkan pada bagian atas media filter adalah agar asap yang telah melalui penyaringan langsung dideteksi oleh ketiga jenis filter tersebut. Adapun tata letak dari penempatan ketiga jenis sensor ini dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Tata Letak Penempatan Sensor MQ-7, Sensor MQ-135, dan Sensor GP2Y1010AU0F Pada Filter Pertama dan Kedua

Filter ketiga menggunakan mekanisme yang berbeda yaitu dengan menggunakan kotak berisi batu zeolit yang kemudian di aliri oleh air. Pada bagian atas terdapat lubang-lubang kecil yang berfungsi sebagai tempat menetesnya air. Pada bagian bawah terdapat lubang yang berfungsi sebagai mengalirnya air menuju pompa air DC. Adapun bentuk dari filter ketiga dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Filter Ketiga

4.2. Kalibrasi Sensor

Kalibrasi sensor merupakan suatu proses yang bertujuan untuk memastikan suatu sensor yang dipakai dapat bekerja dengan baik dan nilai yang dihasilkan dari suatu sensor adalah nilai yang akurat. Kalibrasi sensor ini dilakukan dengan membandingkan hasil nilai sensor dengan alat yang beredar di pasaran. Adapun kalibrasi sensor pada penelitian ini menggunakan alat *air quality monitoring* Bosean T-Z01 seperti pada Gambar 4.9.

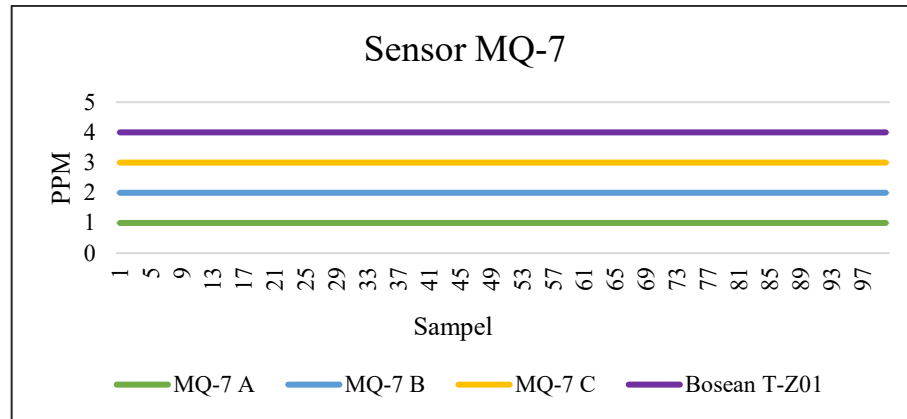


Gambar 4.9. Bosen T-Z01

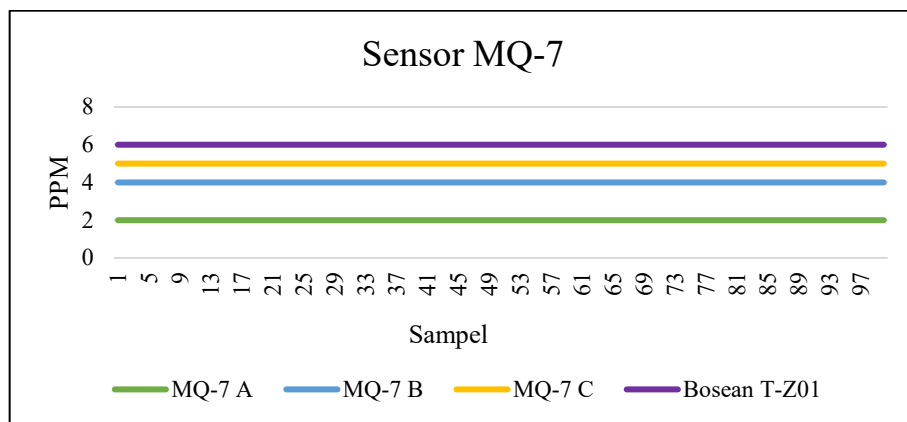
Kalibrasi sensor dilakukan dengan pengambilan data sampel sebanyak 100 sampel pada udara normal dalam suatu ruangan. Pengambilan sampel kalibrasi ini membiarkan sensor dan Bosen T-Z01 dalam ruangan yang sama selama 30 menit dan dilakukan selama tiga hari. Proses kalibrasi sensor ini berlaku untuk sensor MQ-7, sensor MQ-135, dan sensor GP2Y1010AU0F yang masing-masing sensor memiliki tiga buah sensor.

4.2.1. Kalibrasi Sensor MQ-7

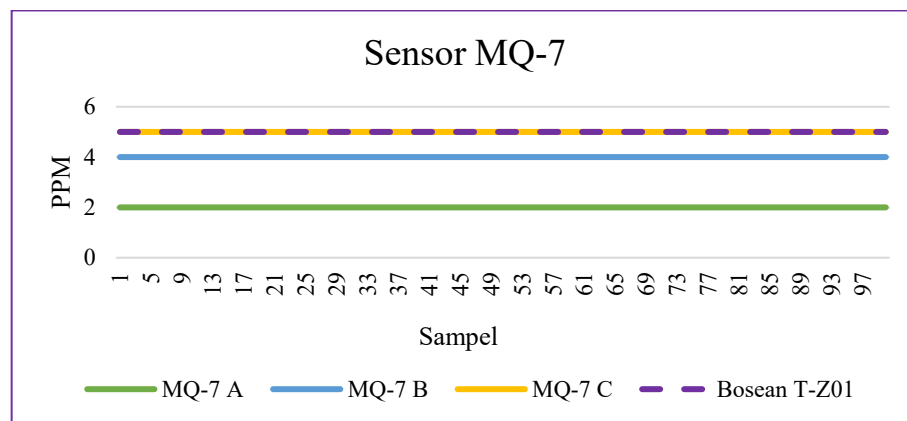
Tiga buah sensor MQ-7 disandingkan dengan Bosen T-Z01 dan dibiarkan dalam ruangan untuk melihat kenaikan dan penurunan konsentrasi gas karbon monoksida pada suatu ruangan. Adapun hasil data kalibrasi yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 4.10.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.10 Data Kalibrasi Sensor MQ-7: (a) Kalibrasi hari pertama; (b) Kalibrasi hari kedua; (c) Kalibrasi hari ketiga

Pada Gambar 4.10 (a) terlihat bahwa konsentrasi gas monoksida pada ketiga sensor MQ-7 menunjukkan nilai 1 berturut-turut dalam 100 sampel. Kemudian pada Bosean T-Z01, konsentrasi gas karbon monoksida yang terdeteksi adalah 1. Nilai

ini juga berturut-turut menunjukkan angka 1 dalam 100 sampel. Ketiga sensor MQ-7 memiliki nilai yang sama dengan Bosen T-Z01.

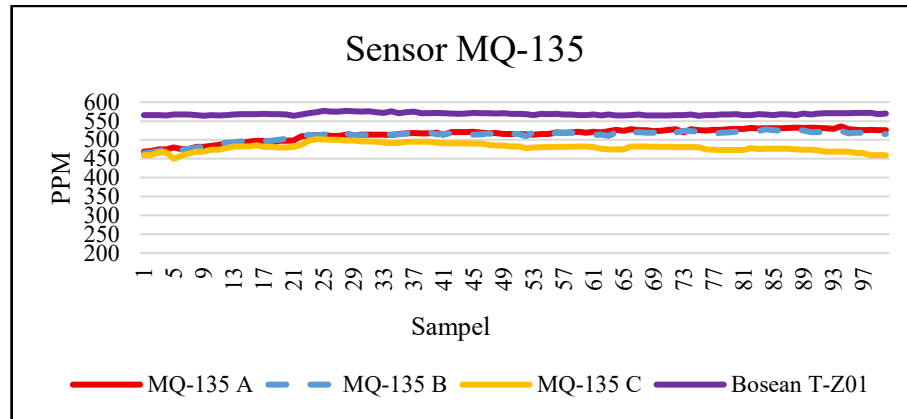
Pada Gambar 4.10 (b) terlihat bahwa konsentrasi gas karbon monoksida pada ketiga sensor MQ-7 mulai memiliki perbedaan. Pada sensor MQ-7 A dan B memiliki konsentrasi yang sama yaitu berada di angka 2, sedangkan sensor MQ-7 C dan Bosen T-Z01 juga memiliki konsentrasi yang sama yaitu berada di angka 1. Namun, ke tiga sensor MQ-7 memiliki nilai yang konstan dari awal sampel sampai akhir sampel tidak ada konsentrasi yang naik maupun turun. Hal ini juga terdeteksi oleh Bosen T-Z01 yang memiliki konsentrasi konstan.

Pada hari ketiga dengan hasil yang terlihat pada Gambar 4.10 (c) terlihat bahwa ketiga sensor memiliki nilai konsentrasi yang berbeda dari Bosen T-Z01. Pada sensor MQ-7 A dan B memiliki nilai konsentrasi yang sama. Hal ini sama dengan hasil kalibrasi pada hari kedua. Sedangkan pada sensor MQ-7 C memiliki nilai konsentrasi di angka 1. Pada Bosen T-Z01, gas karbon monoksida yang terdeteksi berada di angka 0. Namun, pada ketiga sensor MQ-7 dan Bosen T-Z01 menunjukkan nilai yang konstan tidak adanya kenaikan maupun penurunan nilai konsentrasi.

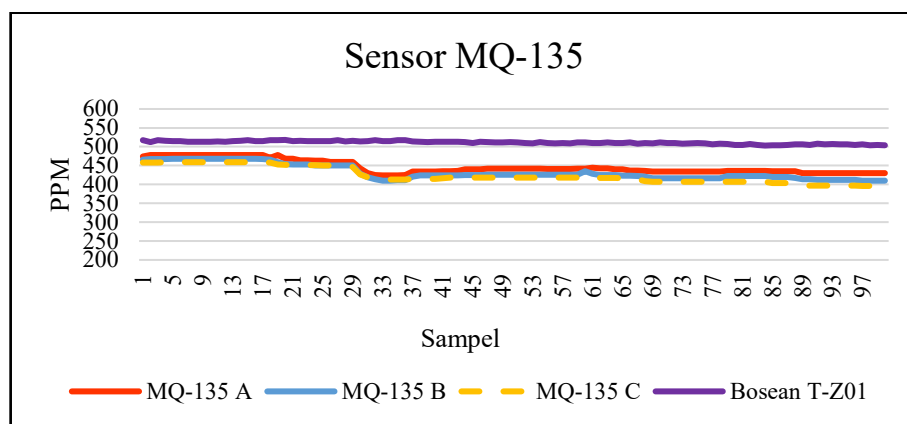
Dari ketiga data kalibrasi sensor MQ-7 yang dilakukan selama tiga hari dapat disimpulkan bahwa ketiga sensor MQ-7 dapat dipakai pada mini insinerator. Hal ini dipertimbangkan dengan melihat data kenaikan dan penurunan konsentrasi gas karbon dioksida yang sama dengan Bosen T-Z01. Walaupun nilai yang terukur dari ketiga sensor MQ-7 berbeda dengan Bosen T-Z01, namun kenaikan dan penurunan konsentrasi selama 30 menit adalah sama yaitu konstan.

4.2.2. Kalibrasi Sensor MQ-135

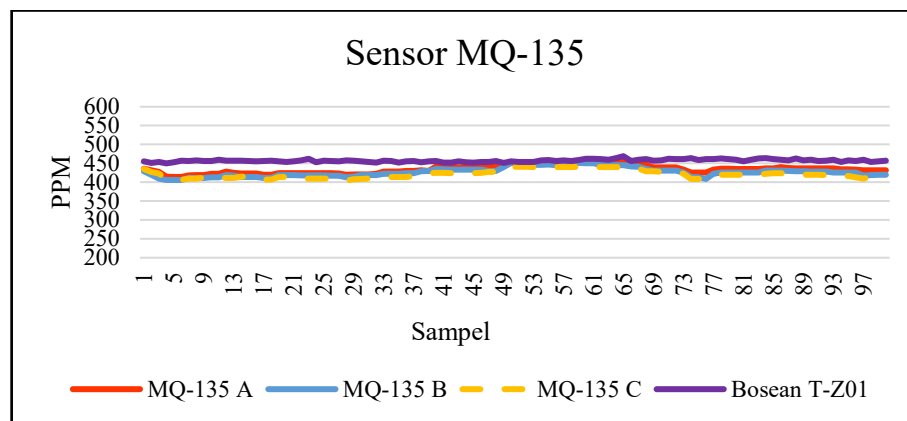
Kalibrasi sensor MQ-135 menggunakan skema yang sama seperti kalibrasi sensor MQ-7. Tiga buah sensor MQ-135 dibiarkan dalam ruangan bersama Bosen T-Z01. Tujuannya adalah untuk melihat kenaikan dan penurunan konsentrasi dari gas karbon dioksida dari sensor MQ-135 dan Bosen T-Z01. Adapun data hasil kalibrasi yang diperoleh dari ketiga sensor MQ-135 dan Bosen T-Z01 dapat dilihat pada Gambar 4.11.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.11 Data Kalibrasi Sensor MQ-135: (a) Kalibrasi hari pertama; (b) Kalibrasi hari kedua; (c) Kalibrasi hari ketiga.

Pada Gambar 4.11 (a) terlihat hasil kalibrasi pada hari pertama, ketiga sensor MQ-135 pada sampel pertama memiliki nilai yang mirip yaitu sekitar 460 PPM sampai dengan 469 PPM, sedangkan pada sampel pertama Bosean T-Z01 nilai yang

terdeteksi adalah 566 PPM. Ketiga sensor MQ-135 mulai menunjukkan kenaikan konsentrasi dari sampel ke-2 dan mencapai puncak pada sampel ke-24. Sedangkan pada Bosen T-Z01, konsentrasi menaik pada sampel ke-24 dan mencapai puncak pada sampel ke-30. Selanjutnya, pada kedua sensor MQ-135 terus menaik sampai sampel ke-100, sedangkan pada sensor MQ-135 C mengalami penurunan konsentrasi sampai sampel ke-100. Pada Bosen T-Z01, konsentrasi yang terdeteksi memiliki nilai yang mirip-mirip, sehingga grafik yang terlihat hampir konstan.

Pada kalibrasi di hari kedua, hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 4.11 (b). Pada Bosen T-Z01 di sampel pertama memiliki nilai 517 PPM. Pada sampel selanjutnya, nilai konsentrasi yang terdeteksi mulai menurun secara perlahan. Sedangkan, pada ketiga sensor MQ-135 memberikan grafik penurunan kadar yang sama. Bahkan pada sampel ke-30 ketiga sensor mengalami penurunan kadar yang sama, walaupun nilai pada setiap sensor berbeda. Ketiga sensor MQ-135 terus mengalami penurunan sampai sampel ke-100.

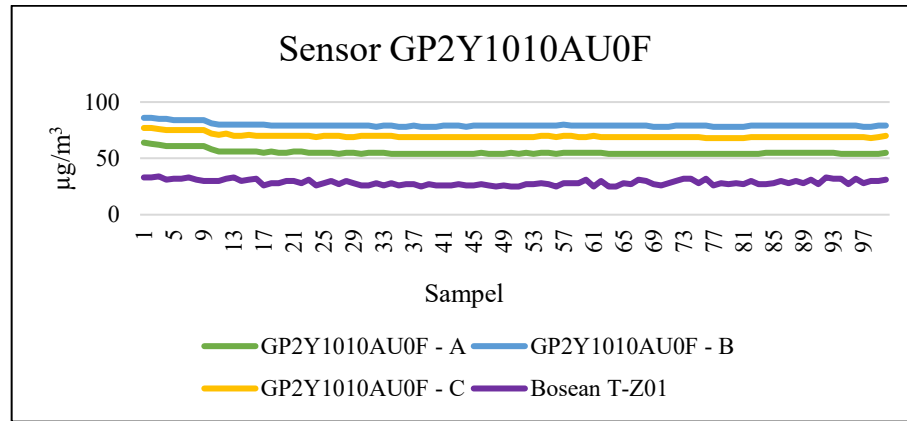
Pada hari ketiga, data dari hasil kalibrasi sensor MQ-135 dapat dilihat pada Gambar 4.11 (c). Pada Bosen T-Z01 grafik yang diperoleh adalah grafik yang hampir konstan. Terdapat perubahan nilai pada setiap sampel, namun nilai ini tidak berubah terlalu drastis. Sedangkan pada ketiga sensor MQ-135 grafik yang dihasilkan berbeda dari Bosen T-Z01. Grafik yang dihasilkan dari ketiga sensor memiliki grafik kenaikan dan penurunan kadar konsentrasi yang sama.

Dari ketiga data kalibrasi sensor MQ-135 dan Bosen T-Z01 yang dilakukan selama 3 hari, dapat disimpulkan bahwa ketiga sensor MQ-135 dapat dipakai pada mini insinerator. Hal ini dipertimbangkan dari ketiga sensor yang mengalami kenaikan dan penurunan kadar yang mirip-mirip, walaupun pada hari pertama sensor MQ-135 C mengalami penurunan dari kenaikan puncak, namun pada hari kedua dan hari ketiga sensor MQ-135 C memiliki grafik yang mirip-mirip dari kedua sensor MQ-135.

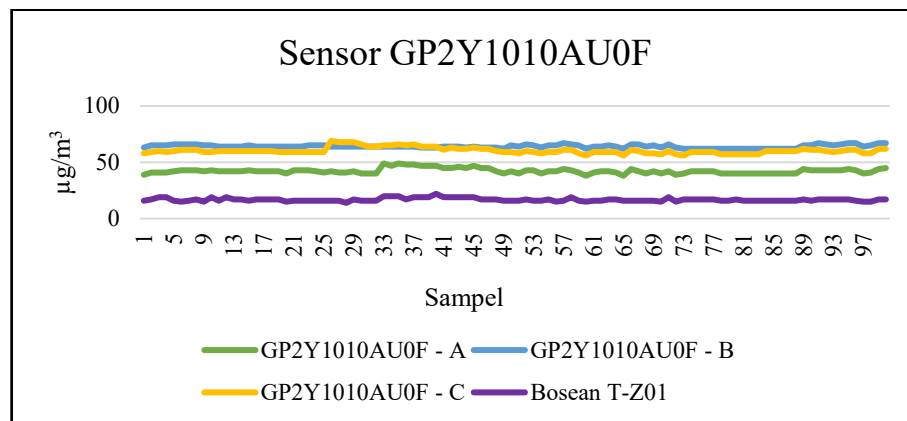
4.2.3. Kalibrasi Sensor GP2Y1010AU0F

Kalibrasi sensor GP2Y1010AU0F masih menggunakan skema yang sama seperti kalibrasi sensor MQ-7 dan kalibrasi sensor MQ-135. Tiga buah sensor GP2Y1010AU0F dibiarkan dalam suatu ruangan bersama dengan Bosen T-Z01. Tujuan dari proses kalibrasi ini yaitu melihat kenaikan dan penurunan zat PM_{2.5}

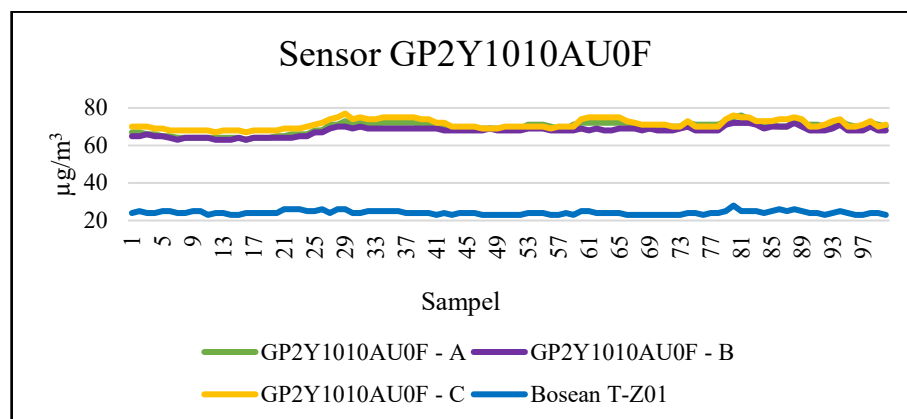
dari sensor GP2Y1010AU0F dan Bosen T-Z01. Adapun data hasil kalibrasi yang diperoleh dari ketiga sensor GP2Y1010AU0F dan Bosen T-Z01 dapat dilihat pada Gambar 4.12.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.12 Data Kalibrasi Sensor GP2Y1010AU0F: (a) Kalibrasi hari pertama; (b) Kalibrasi hari kedua; (c) Kalibrasi hari ketiga

Pada Gambar 4.12 (a) grafik Bosean T-Z01 pada sampel 1 PM2.5 yang terdeteksi adalah $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lalu pada data selanjutnya nilai ini turun. Sedangkan, pada ketiga sensor GP2Y1010AU0F pada sampel 1, grafik yang dihasilkan mirip seperti Bosean T-Z01. Selanjutnya grafik tersebut turun. Nilai yang terdeteksi pada ketiga sensor ini semuanya berbeda dengan Bosean T-Z01, namun grafik yang dihasilkan dari ketiga sensor ini adalah sama.

Pada hari kedua, hasil data kalibrasi yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 4.8 (b). Bosean T-Z01 memiliki grafik yang terbilang konstan, namun pada data sampel ke-40 mengalami kenaikan nilai yang selanjutnya menurun dan kembali konstan. Sedangkan, pada sensor GP2Y1010AU0F A dan C, grafik yang dihasilkan mirip seperti Bosean T-Z01 hanya saja kenaikan kadar PM2.5 lebih cepat dibanding Bosean T-Z01. Pada sensor GP2Y1010AU0F A kenaikan kadar PM2.5 berada di sampel 33 yang kemudian pada sampel selanjutnya kembali menurun. Pada sensor GP2Y1010AU0F C kenaikan kadar PM2.5 berada pada sampel 26 yang kemudian pada sampel selanjutnya menurun kembali. Pada sensor GP2Y1010AU0F B, grafik yang dihasilkan tidak terlalu sama dengan dua sensor yang lain dan Bosean T-Z01. Kenaikan pada sensor ini tidak ada namun pada sampel data ke-51 dan seterusnya, grafik yang dihasilkan sama dengan dua buah sensor lainnya.

Pada hari ketiga, hasil data yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 4.12 (c). Bosean T-Z01 menghasilkan grafik yang konstan dengan kenaikan kadar PM2.5 berada di sampel 80 yang kemudian pada sampel selanjutnya kembali menuju konstan. Pada ketiga sensor GP2Y1010AU0F grafik yang dihasilkan adalah sama untuk ketiga sensor ini, namun berbeda dengan Bosean T-Z01. Ketiga sensor ini mengalami kenaikan kadar PM2.5 di sampel 29 yang kemudian pada sampel selanjutnya mengalami penurunan. Pada sampel ke-74, ketiga sensor mengalami kenaikan kadar PM2.5 lagi dan pada sampel seterusnya sampai sampel ke-100 mengalami kenaikan dan penurunan kadar.

Dari ketiga data kalibrasi GP2Y1010AU0F dan Bosean T-Z01 yang dilakukan selama 3 hari, dapat disimpulkan bahwa ketiga sensor ini cukup untuk digunakan pada mini insinerator. Hal ini dipertimbangkan dengan melihat grafik yang dihasilkan. Grafik yang dihasilkan dari ketiga sensor ini cukup untuk dapat

digunakan pada alat karena ketiga sensor ini menunjukkan grafik yang sama, walaupun pada hari kedua sensor GP2Y1010AU0F B tidak memiliki titik kenaikan awal, namun pada data selanjutnya kenaikan dan penurunan kadar memiliki grafik yang sama dengan sensor yang lainnya.

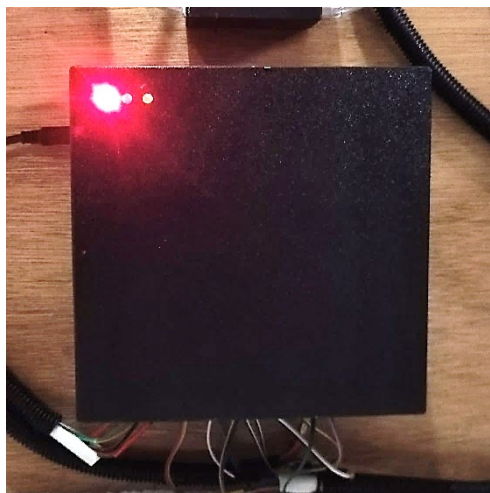
4.3. Pengujian Alat

Proses pengujian alat dilakukan sebanyak empat kali, satu kali pengujian sistem pencatatan pembakaran sampah dan tiga kali pengujian pembakaran menggunakan sampah. Ketiga pengujian pembakaran sampah dibedakan dari bahan sampah yang digunakan. Ketiga pengujian menggunakan sampah sebanyak 300 dengan jenis sampah yang berbeda.

4.3.1. Pengujian Sistem Pencatatan Pembakaran Sampah

Pengujian sistem pencatatan pembakaran sampah dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui sistem pencatatan berjalan sebagai mana mestinya atau tidak. Sistem pencatatan bekerja ditandai dengan LED kuning berkedip yang menandakan ketika pembakaran berlangsung, sistem mencatat kadar gas karbon monoksida, gas karbon dioksida, dan kadar PM2.5 dan disimpan melalui *SD card*.

Pada pengujian ini, dilakukan pencabutan *SD card* pada sistem, sehingga sistem merespons kartu *SD card* tidak ada. Hal ini ditandai dengan LED indikator berwarna merah yang menyala seperti pada Gambar 4.13.



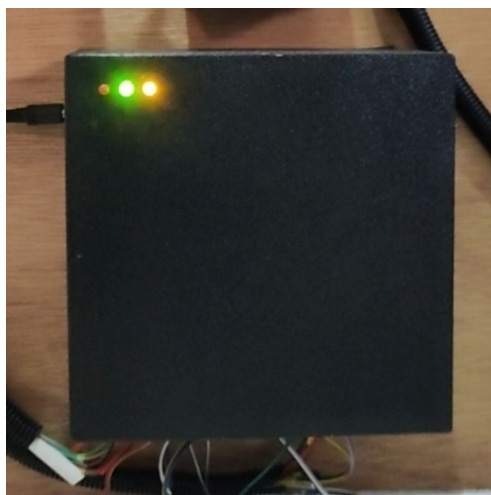
Gambar 4.13 LED Indikator Merah Menyala

Ketika *SD card* terpasang kembali, sistem merespons dengan LED indikator berwarna merah mati dan LED indikator berwarna hijau menyala seperti yang terlihat pada Gambar 4.14.





Gambar 4.14 LED Indikator Hijau Menyala

Selanjutnya, pengujian dilanjutkan dengan membakar lilin dan lilin yang terbakar dimasukkan dalam tungku pembakaran. Ketika lilin yang terbakar dimasukkan ke dalam tungku pembakaran, relay menyala yang ditandai adanya suara *switch* dari relay dan LED indikator kuning berkedip seperti pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 LED Indikator Kuning Berkedip

Sistem mencatat perubahan kadar gas karbon monoksida, gas karbon dioksida, dan kadar PM2.5 di dalam *file* dengan format CSV (*Comma Separated Values*). Pada sistem pencatatan, pembuatan setiap *file* dibuat dengan berdasarkan bulan dari pembakaran yang dilakukan. Jika pembakaran dilakukan dalam bulan Mei, maka pembakaran masuk dalam *file* bulan Mei. Sedangkan, jika pembakaran dilakukan pada bulan Juni, maka data tersimpan pada file bulan Juni seperti yang terlihat pada Gambar 4.16.

| Nama | Tanggal diubah | Jenis | Ukuran |
|---|------------------|--------------------------|----------|
|  Juni-2025.csv | 01/01/2025 00.00 | File CSV Microsoft Excel | 1.367 KB |
|  Mei-2025.csv | 01/01/2025 00.00 | File CSV Microsoft Excel | 120 KB |

Gambar 4.16 Penamaan *File* Data Pembakaran Sampah

Pada Gambar 4.16, jika *file* dibuka dalam terdapat *header* dengan isi tanggal, waktu, MQ-7 A, MQ-7 B, MQ-7 C, MQ-135 A, MQ-135 B, MQ-135 C, satuan, GP2Y1010AU0F-A, GP2Y1010AU0F-B, GP2Y1010AU0F-C, satuan, dan nilai. *Header* ini tertulis hanya sekali saja ketika *file* dibuat. Adapun tampilan dari data mentah yang diperoleh dari sistem dapat dilihat pada Gambar 4.17.

| Tanggal | Waktu | MQ-7 A | MQ-7 B | MQ-7 C | MQ-135 A | MQ-135 B | MQ-135 C | Satuan | GP2Y1010AU0F-A | GP2Y1010AU0F-B | GP2Y1010AU0F-C | Satuan | Nilai |
|------------|----------|--------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|--------|----------------|----------------|----------------|--------|-------|
| 03/06/2025 | 09.00.57 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 922.00.00 | 811.00.00 | 434.00.00 | ppm | 216.00.00 | 211.00.00 | 07.00 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 09.00.58 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 921.00.00 | 810.00.00 | 434.00.00 | ppm | 219.00.00 | 207.00.00 | 07.00 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 09.00.59 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 921.00.00 | 809.00.00 | 434.00.00 | ppm | 219.00.00 | 208.00.00 | 08.00 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 09.01.00 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 920.00.00 | 811.00.00 | 434.00.00 | ppm | 217.00.00 | 207.00.00 | 07.00 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 09.01.01 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 921.00.00 | 809.00.00 | 434.00.00 | ppm | 217.00.00 | 207.00.00 | 08.00 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 09.01.02 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 920.00.00 | 809.00.00 | 434.00.00 | ppm | 215.00.00 | 202.00.00 | 07.00 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 09.01.03 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 920.00.00 | 809.00.00 | 434.00.00 | ppm | 215.00.00 | 206.00.00 | 07.00 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 09.01.04 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 919.00.00 | 808.00.00 | 434.00.00 | ppm | 214.00.00 | 204.00.00 | 07.00 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 09.01.05 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 920.00.00 | 809.00.00 | 434.00.00 | ppm | 213.00.00 | 199.00.00 | 07.00 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 09.01.06 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 919.00.00 | 809.00.00 | 434.00.00 | ppm | 211.00.00 | 200.00.00 | 07.00 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 09.01.07 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 918.00.00 | 807.00.00 | 434.00.00 | ppm | 210.00.00 | 201.00.00 | 07.00 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 09.01.08 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 917.00.00 | 808.00.00 | 434.00.00 | ppm | 210.00.00 | 199.00.00 | 07.00 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 09.01.09 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 917.00.00 | 807.00.00 | 434.00.00 | ppm | 210.00.00 | 199.00.00 | 07.00 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 09.01.10 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 918.00.00 | 807.00.00 | 434.00.00 | ppm | 210.00.00 | 202.00.00 | 07.00 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 09.01.11 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 918.00.00 | 808.00.00 | 434.00.00 | ppm | 211.00.00 | 203.00.00 | 07.00 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 09.01.12 | 14.00 | 14.00 | 08.00 | 916.00.00 | 806.00.00 | 434.00.00 | ppm | 211.00.00 | 199.00.00 | 07.00 | ug/m3 | Aktif |

Gambar 4.17 Tampilan Data Mentah dari Pembakaran dan Penyingkapan Asap
Pembakaran Sampah

Pada Gambar 4.17 terlihat kolom nilai. Kolom ini berisikan status pembakaran dan sistem penyingkapan sedang aktif atau tidak. Status ini diperoleh dari relay yang menyala atau tidak. Jika relay menyala, status bertuliskan “Aktif”. Sebaliknya, jika relay tidak menyala, status bertuliskan “Nonaktif”. Penulisan

kolom status ini bertujuan untuk memudahkan membaca data ketika ingin melihat pembakaran dan penyaringan terakhir yang dilakukan. Namun, ketika percobaan dilakukan, sistem ini tidak bekerja. Hal ini menyebabkan kolom nilai selalu bertuliskan “Aktif” ketika relay menyala maupun tidak menyala.

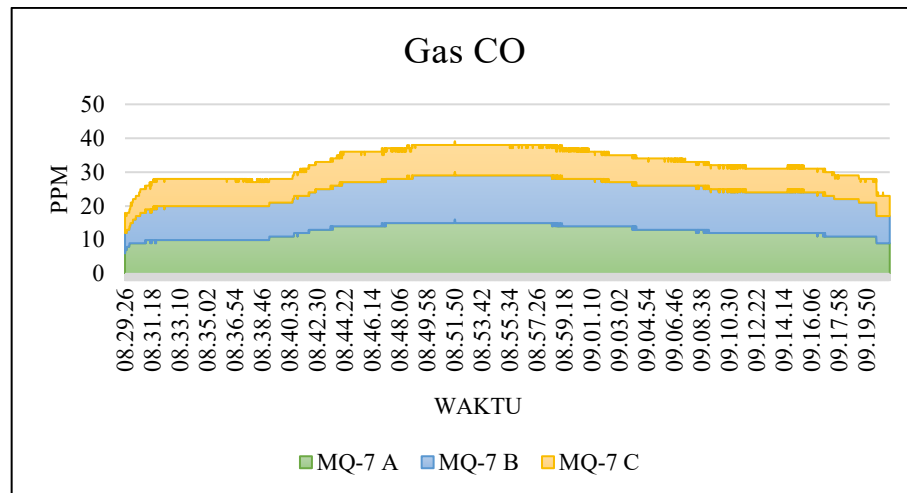
Data mentah seperti pada Gambar 4.17 sangat sulit terbaca yang dikarenakan banyaknya data. Sehingga pada pengujian ini, data diolah kembali agar mudah terbaca. Adapun data yang telah diolah dapat dilihat pada Gambar 4.18.

| Tanggal | Waktu | MQ-7 A | MQ-7 B | MQ-7 C | MQ-135 A | MQ-135 B | MQ-135 C | Satuan | GP2Y1010 AU0F-A | GP2Y1010 AU0F-B | GP2Y1010 AU0F-C | Satuan2 | Nilai |
|------------|----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|-------|
| 03/06/2025 | 08.29.26 | 6 | 6 | 6 | 806 | 402 | 339 | ppm | 31 | 21 | 8 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.27 | 7 | 5 | 5 | 803 | 402 | 335 | ppm | 31 | 21 | 8 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.28 | 7 | 5 | 5 | 802 | 392 | 332 | ppm | 31 | 22 | 8 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.29 | 7 | 5 | 5 | 802 | 390 | 330 | ppm | 31 | 21 | 8 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.30 | 7 | 5 | 5 | 805 | 379 | 329 | ppm | 31 | 21 | 8 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.31 | 7 | 5 | 5 | 818 | 374 | 328 | ppm | 30 | 19 | 8 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.32 | 7 | 5 | 5 | 823 | 370 | 327 | ppm | 30 | 19 | 8 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.33 | 7 | 5 | 5 | 826 | 368 | 327 | ppm | 29 | 20 | 8 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.34 | 8 | 5 | 5 | 839 | 366 | 327 | ppm | 29 | 18 | 8 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.35 | 8 | 5 | 5 | 854 | 365 | 327 | ppm | 29 | 18 | 7 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.36 | 8 | 5 | 5 | 866 | 353 | 327 | ppm | 28 | 17 | 7 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.37 | 8 | 5 | 5 | 870 | 349 | 327 | ppm | 27 | 17 | 8 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.38 | 8 | 5 | 5 | 872 | 349 | 327 | ppm | 28 | 21 | 7 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.39 | 8 | 5 | 5 | 899 | 349 | 327 | ppm | 30 | 23 | 7 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.40 | 8 | 5 | 5 | 922 | 349 | 327 | ppm | 35 | 30 | 8 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.41 | 8 | 5 | 5 | 934 | 349 | 327 | ppm | 41 | 41 | 8 | ug/m3 | Aktif |
| 03/06/2025 | 08.29.42 | 8 | 5 | 5 | 945 | 349 | 327 | ppm | 50 | 48 | 7 | ug/m3 | Aktif |

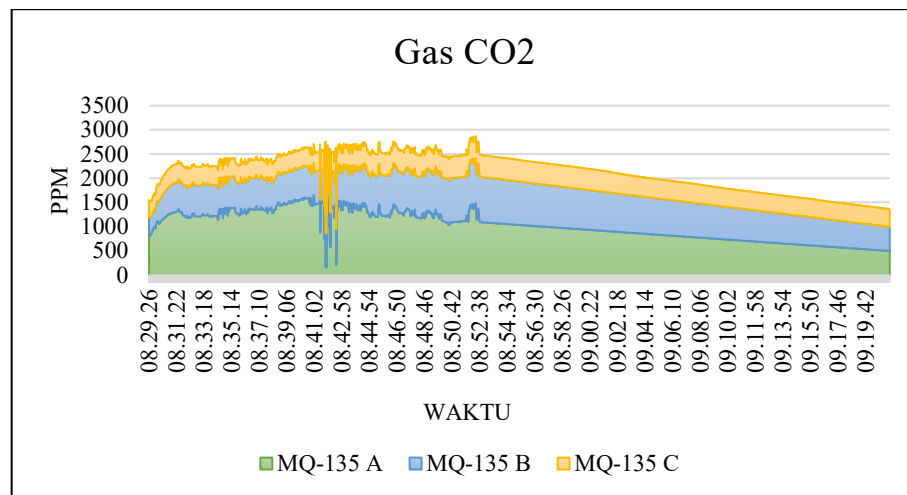
Gambar 4.18 Data Pembakaran dan Penyaringan Asap Pembakaran Sampah yang Telah Diolah

4.3.2. Pengujian Pertama

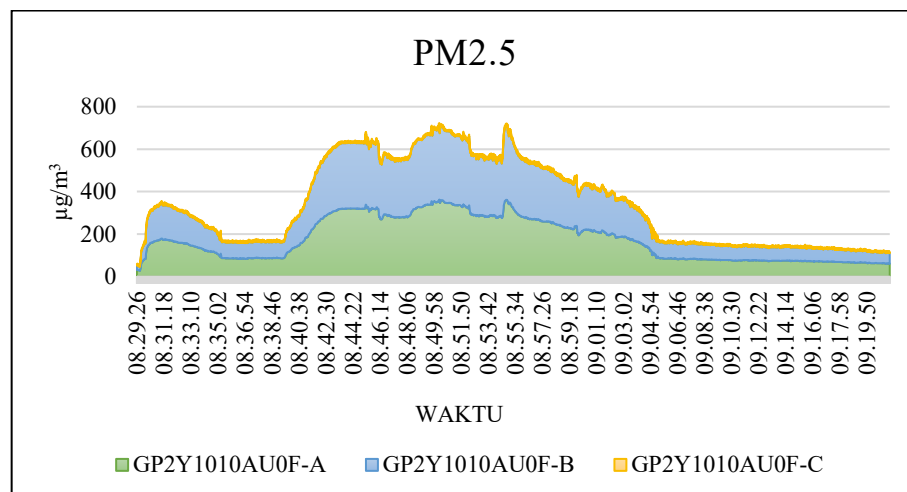
Pengujian pertama dilakukan dengan membakar sampah kertas sebanyak 300 gram. Sistem bekerja ketika api menyala dan terdeteksi oleh sensor api atau kadar gas karbon dioksida berada di atas 500 PPM. Proses pembakaran dan penyaringan asap dari pembakaran sampah berlangsung selama 51 menit 57 detik yang dimulai dari jam 08:29:26 WIB sampai jam 09:21:23 WIB dengan 3.119 data yang tersimpan. Adapun data hasil dari pengujian pertama memuat data konsentrasi gas karbon dioksida, gas karbon monoksida, dan PM2.5 yang disajikan dalam diagram area bertumpuk yang dapat dilihat pada Gambar 4.19.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.19 Data Hasil Pengujian Pertama: (a) Data gas karbon monoksida; (b) Data gas karbon dioksida; (c) Data PM_{2.5}.

Pada Gambar 4.19 (a) dan (b) terlihat data dari gas karbon monoksida dan gas karbon dioksida yang terdeteksi oleh ketiga sensor MQ-7 dan sensor MQ-135. Grafik yang dihasilkan dari data kedua jenis sensor ini menunjukkan perilaku yang sama. Ketika pada awal data, nilai dari gas karbon monoksida dan gas karbon dioksida tidak terlalu tinggi yaitu 5 PPM sampai PPM untuk gas karbon monoksida dan 340 PPM sampai 800 PPM untuk gas karbon dioksida. Namun, semakin lama proses pembakaran berlangsung, nilai konsentrasi gas karbon monoksida dan gas karbon dioksida mulai menaik drastis. Kemudian ketika proses pembakaran dan penyaringan asap pembakaran mendekati akhir proses, kadar gas yang terdeteksi mulai menurun.

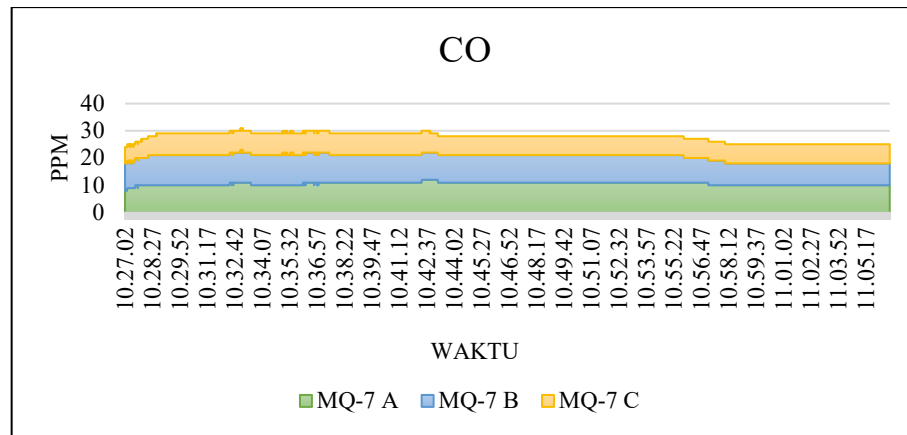
Sedangkan, pada PM2.5 yang terdeteksi oleh ketiga sensor GP2Y1010AU0F tidak menunjukkan perilaku yang sama dengan sensor MQ-7 dan sensor MQ-135. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.19 (c). Pada data awal, kadar PM2.5 tidak begitu tinggi. Kemudian semakin proses pembakaran berlangsung lama, kadar PM2.5 meningkat, tetapi peningkatan ini tidak berlangsung lama kemudian kadar PM2.5 menurun kembali dan kemudian meningkat drastis. Ketika proses pembakaran dan penyaringan asap mendekati proses akhir, kadar PM2.5 menunjukkan penurunan.

Pada pengujian pertama beberapa menit setelah pembakaran, terjadi asap bocor pada alat. Hal ini terjadi selama 10 menit berlangsung. Ketika pembakaran telah selesai, asap yang bocor ini tidak terlihat kembali dan proses penyaringan tetap berjalan sebagaimana mestinya. Setelah proses penyaringan telah selesai, tungku pembakaran diperiksa untuk melihat sisa dari pembakaran. Pada tungku pembakaran terdapat sisa sampah kertas yang tidak terbakar sempurna.

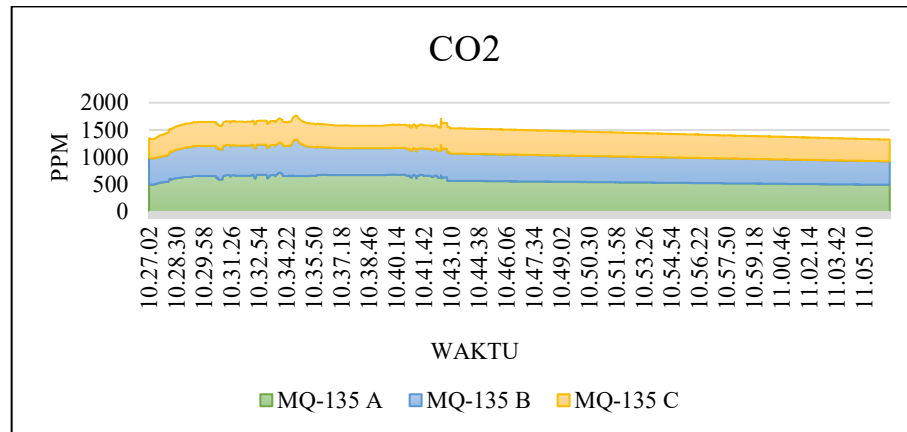
4.3.3. Pengujian Kedua

Pengujian kedua dilakukan dengan membakar sampah campuran yaitu sampah kertas sebanyak 150 gram dan sampah plastik sebanyak 150 gram. Sistem bekerja ketika api menyala dan terdeteksi oleh sensor api atau kadar gas karbon dioksida berada di atas 500 PPM. Proses pembakaran dan penyaringan asap dari pembakaran sampah berlangsung selama 39 menit 29 detik yang dimulai dari jam 10:27:02 WIB sampai jam 11:06:21 WIB dengan 2.371 data yang tersimpan. Adapun data hasil dari pengujian pertama memuat data konsentrasi gas karbon

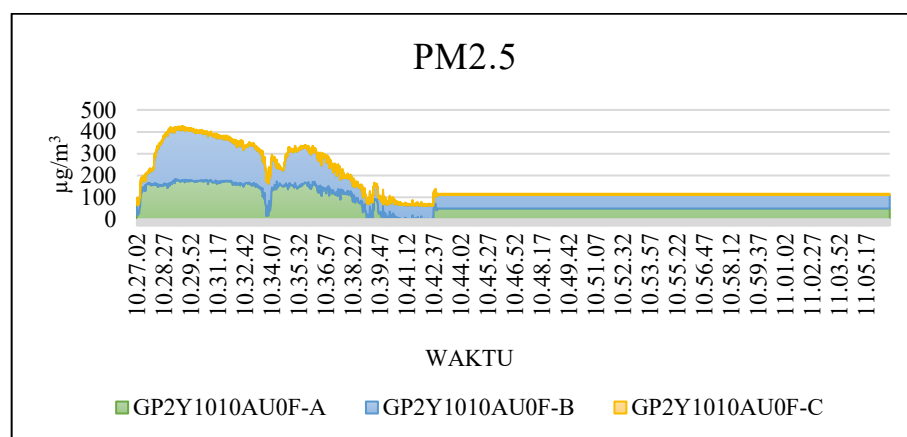
dioksida, gas karbon monoksida, dan PM2.5 yang disajikan dalam diagram area bertumpuk yang dapat dilihat pada Gambar 4.20.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.20 Data Hasil Pengujian Kedua: (a) Data gas karbon monoksida; (b) Data gas karbon dioksida; (c) Data PM2.5.

Pada Gambar 4.20 (a) dan (b) terlihat data dari gas karbon monoksida dan gas karbon dioksida yang terdeteksi oleh ketiga sensor MQ-7 dan sensor MQ-135. Grafik yang dihasilkan dari data kedua jenis sensor ini menunjukkan perilaku yang sama. Kenaikan kadar gas karbon monoksida dan gas karbon dioksida dari awal data. Hal ini menandakan proses pembakaran dan penyaringan sedang berlangsung. Pada data selanjutnya, kadar gas karbon monoksida dan gas karbon dioksida mengalami penurunan kadar yang menunjukkan proses pembakaran dan proses penyaringan asap berada pada tahap akhir proses.

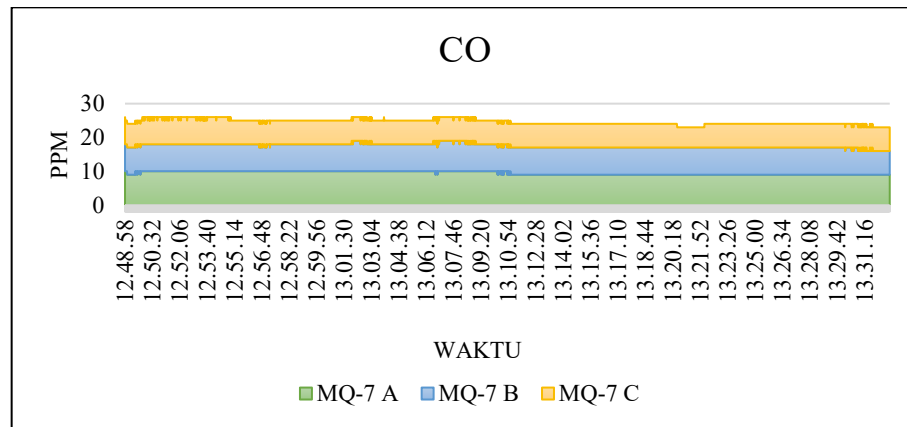
Sedangkan, pada PM2.5 kedua sensor GP2Y1010AU0F A dan B mendeteksi kadar PM2.5 yang tinggi ketika pembakaran sedang berlangsung, berbeda dengan sensor GP2Y1010AU0F C mendeteksi zat PM2.5 yang lebih kecil dari kedua sensor pada saat pembakaran sedang berlangsung. Namun, ketiga sensor ini menunjukkan perilaku yang sama yaitu tingkat kenaikan, penurunan, bahkan tingkat stabilnya kadar PM2.5 yang sama. Selain itu, grafik yang dihasilkan dari percobaan kedua ini sangat berbeda dari percobaan pertama. Terlihat pada Gambar 4.20 (c) grafik kenaikan dan penurunan kadar PM2.5 tidak stabil, berbeda dengan pengujian pertama yang memiliki grafik kenaikan dan penurunan kadar PM2.5 yang stabil.

Pada pengujian kedua, asap bocor yang terjadi pada pengujian pertama sudah tidak terjadi dari awal pembakaran sampai proses penyaringan asap selesai. Namun pada saat proses pembakaran dan proses penyaringan asap telah selesai, masih terdapat beberapa sampah plastik yang tidak sempurna. Berbeda dengan sampah kertas yang habis terbakar. Dapat diketahui bahwa pembakaran plastik dapat menyisakan ampas pembakaran berupa lelehan plastik. Hal ini juga berlaku pada pengujian kedua ini. Lelehan plastik dihasilkan dari proses pembakaran sampah plastik.

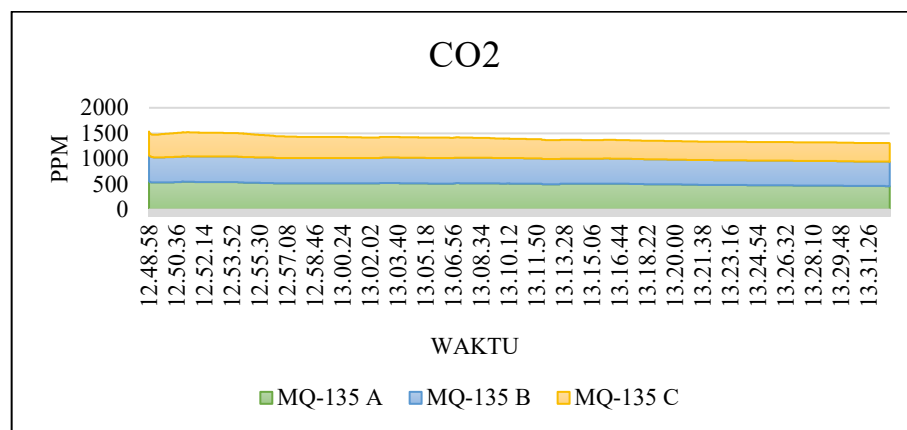
4.3.4. Pengujian Ketiga

Pengujian ketiga dilakukan dengan membakar sampah plastik sebanyak 300 gram. Sistem berjalan ketika api menyala dan terdeteksi oleh sensor api atau kadar gas karbon dioksida melebihi 500 PPM. Proses pembakaran dan penyaringan asap dari pembakaran sampah berlangsung selama 43 menit 43 detik yang dimulai dari jam 12:48:58 WIB sampai jam 13:32:41 WIB dengan 2.637 data yang tersimpan

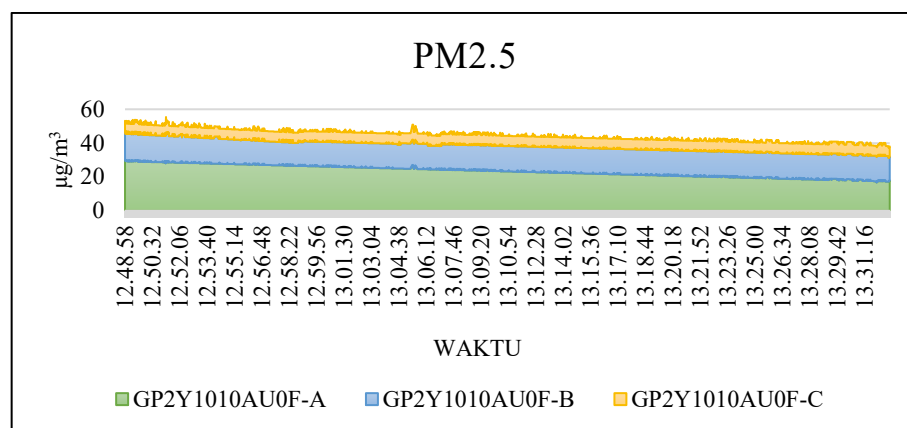
Adapun data hasil dari pengujian pertama memuat data konsentrasi gas karbon dioksida, gas karbon monoksida, dan PM2.5 yang disajikan dalam diagram area bertumpuk yang dapat dilihat pada Gambar 4.21/.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.21 Data Hasil Pengujian Ketiga: (a) Data gas karbon monoksida; (b) Data gas karbon dioksida; (c) Data PM2.5

Pada Gambar 4.21 (a) hasil data gas karbon monoksida, terlihat bahwa gas karbon monoksida yang terdeteksi oleh ketiga sensor MQ-7 menghasilkan grafik yang terlihat konstan. Namun, pada grafik tersebut tetap memiliki kenaikan kadar gas karbon monoksida. Kenaikan kadar gas karbon monoksida ini tidak berlangsung lama hanya beberapa data saja, kemudian grafiknya menjadi kembali konstan.

Berbeda dari gas karbon monoksida, gas karbon dioksida memiliki nilai yang tinggi ketika pembakaran awal terjadi, dan menurun seiring dengan proses pembakaran yang berhenti. Oleh karena itu, grafik yang dihasilkan adalah meninggi kemudian menurun kembali. Hal ini terlihat pada Gambar 4.21 (b).

Sedangkan, pada PM2.5 kedua sensor GP2Y1010AU0F A dan B mendeteksi kadar PM2.5 yang tinggi ketika pembakaran sedang berlangsung, berbeda dengan sensor GP2Y1010AU0F C mendeteksi zat PM2.5 yang lebih kecil dari kedua sensor pada saat pembakaran sedang berlangsung. Namun kenaikan dan penurunan kadar PM2.5 pada pengujian ketiga ini memiliki grafik yang sama.

Pengujian ketiga ini memiliki hasil yang sama dalam pemantauan asap bocor. Pada pengujian ketiga, asap bocor tidak terjadi. Sedangkan setelah proses penyaringan asap pembakaran telah selesai, hasil akhirnya adalah sama seperti pengujian pertama dan kedua. Terdapat sisa sampah plastik yang tidak terbakar habis, selain itu ampas dari pembakaran ini juga menghasilkan lelehan plastik.

4.4. Pembahasan

Pada pengujian sistem pencatatan pembakaran sampah, sistem ini dicatat dengan format *file* CSV. Format ini diterapkan agar pembacaan lebih mudah dan lebih cepat jika tidak ingin mengolah datanya. Berbeda dengan format *file text*, format ini lebih sulit untuk dibaca secara kasarnya. Penamaan *file* juga akan menyesuaikan nama bulan ketika pembakaran berlangsung. Penamaan *file* diterapkan ketika *SD card* terpasang pada modul.

Sistem pada alat ini dapat memberitahu penggunanya ketika *SD card* terpasang pada modul *SD card* atau tidak. Ketika *SD card* tidak terpasang pada modul *SD card* indikator dari LED berwarna merah menyala, sehingga pengguna dapat memasukkan *SD card* terlebih dahulu sebelum pembakaran berlangsung.

Ketika *SD card* terpasang pada modul *SD card*, indikator berupa LED berwarna hijau menyala, sehingga pengguna dapat melakukan pembakaran sampah kapan pun.

Ketika pembakaran berlangsung, sistem mulai mencatat kadar gas karbon monoksida, gas karbon dioksida, serta kadar PM2.5 pada *SD card*. Penulisan kadar gas karbon monoksida, gas karbon dioksida, dan kadar PM2.5 ditandai dengan indikator berupa LED berwarna kuning berkedip. Sistem menulis setiap 1 detik, sehingga perubahan kenaikan dan penurunan sekecil apa pun dapat tercatat pada *SD card*.

Di samping itu, sistem pencatatan kadar zat polutan ini memiliki kelemahan. Ketika pembakaran sampah berlangsung, namun *SD card* tidak berada pada modul *SD card*, sistem penyaringan asap tetap bekerja sebagaimana mestinya. Hal ini menyebabkan kadar gas karbon monoksida, gas karbon dioksida, dan kadar PM2.5 tidak dapat tercatat. Fenomena ini dapat merugikan pengguna yang tidak dapat mengetahui kadar gas karbon monoksida, gas karbon dioksida, serta kadar PM2.5 yang telah melalui penyaringan asap.

Pada pengujian pertama, ketika pembakaran berlangsung selama beberapa menit berlalu, asap hasil pembakaran sampah mulai mengepul. Hal ini terlihat pada Gambar 4.19 (b) yang memiliki nilai tinggi mencapai 1000 PPM, terutama pada sensor MQ-135 A yang mencapai 1300 PPM. Pada MQ-135 B terlihat area pada sensor ini lebih sedikit dari area sensor MQ-135 A dengan kadar yang terdeteksi adalah 650 PPM. Hal ini juga terlihat pada sensor MQ-135 C yang memiliki area paling sedikit dengan kadar yang terdeteksi mencapai 382 PPM.

Pada Gambar 4.19 (a) terlihat kenaikan kadar gas karbon monoksida pada sensor MQ-7 A mencapai 15 PPM, MQ-7 B mencapai 14 PPM, dan MQ-7 C mencapai 9 PPM. Kadar gas karbon monoksida yang terdeteksi oleh sensor MQ-7 A dan B memiliki kadar yang sangat tinggi dibandingkan dengan kadar gas karbon monoksida yang terdeteksi oleh MQ-7 C. Hal ini dapat terjadi dikarenakan penempatan kedua sensor MQ-7 A dan B serta penempatan kedua sensor MQ-135 A dan B terletak pada filter pertama dan kedua yang jaraknya dekat dengan tungku pembakaran. Selain itu, media filter yang digunakan juga sama yaitu serabut kelapa, pasir silika, batu zeolit, dan karbon aktif. Hal ini memungkinkan daya penyaringan

yang sama.

Pada sensor MQ-7 C dan sensor MQ-135 C kadar yang terdeteksi memiliki nilai yang lebih kecil dari kedua sensor MQ-7 dan MQ-135 lainnya. Hal ini terjadi karena penempatan sensor pada filter ketiga yang jauh dari tungku pembakaran. Selain itu, proses penyaringan pada filter ketiga ini memiliki media dan proses yang berbeda dari sebelumnya. Proses penyaringan pada filter ketiga ini dirancang dengan mekanisme yang sama seperti hujan, yaitu dengan mengalirkan air yang berisi batu zeolit dari bagian bawah filter menuju atas filter, sehingga air jatuh dari atas ke bawah. Oleh karena itu, gas karbon monoksida dan gas karbon dioksida terlarut dalam air. Hal ini diperjelas dengan kadar gas karbon monoksida dan karbon dioksida yang terdeteksi dengan 9 PPM untuk sensor MQ-7 A, 8 PPM untuk sensor MQ-7 B, dan 7 PPM untuk sensor MQ-7 C. Sedangkan untuk sensor MQ-135 diangka 499 PPM, 487 PPM untuk sensor MQ-135 B, dan 365 PPM untuk sensor MQ-135 B.

Selanjutnya kadar PM_{2.5} yang terdeteksi oleh sensor GP2Y1010AU0F A dan GP2Y1010AU0F B memiliki nilai yang tinggi dibandingkan dengan sensor GP2Y1010AU0F C dengan kadar PM_{2.5} diangka 361 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk sensor GP2Y1010AU0F A dan 351 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk sensor GP2Y1010AU0F B, sedangkan untuk sensor GP2Y1010AU0F C berada diangka 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Kadar yang tinggi ini dapat diakibatkan dari sisa residu pembakaran sampah kertas. Sampah kertas yang dibakar dapat menghasilkan residu abu. Hal ini juga didukung dari tekanan udara panas yang tinggi pada saat pembakaran sampah kertas yang menyebabkan residu abu beterbangan. Sedangkan, pada sensor GP2Y1010AU0F C, kadar yang terdeteksi sangat kecil dari kedua sensor. Hal ini terjadi karena sistem penyaringan pada filter ketiga yang menggunakan sistem hujan. Ketika residu abu yang lolos dari filter kedua dan terbawa ke dalam filter ketiga, residu abu kemudian terbawa oleh tetesan air. Oleh karena itu, kadar PM_{2.5} yang terdeteksi jauh lebih sedikit dibandingkan dengan kadar PM_{2.5} berkisar 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, berbeda pada filter pertama dengan kadar PM_{2.5} 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan filter kedua 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pada pengujian ini, terdapat beberapa asap bocor yang keluar dari alat. Asap bocor ini terjadi dikarenakan terdapat lubang yang tidak tertutup rapat, terutama lubang-lubang kecil yang tidak terlihat. Selain itu, asap bocor ini terjadi ketika

sampah yang terbakar terlalu banyak sehingga ketika pembakaran berlangsung, tekanan udara panas ini mendorong asap keluar dari berbagai lubang di segala arah yang tidak tertutup rapat.

Pengujian pertama menghabiskan durasi pembakaran selama 51 menit 57 detik. Dalam durasi ini api tidak selalu menyala, sehingga pada akhir proses pembakaran dan penyaringan asap terdapat sampah yang tidak terbakar seutuhnya. Sisa sampah yang tidak terbakar habis ini dapat terjadi karena ruang pembakaran yang kurang luas, sehingga ruang lebih banyak dihabiskan oleh volume sampah kertas. Oleh karena itu, oksigen yang masuk tidak cukup untuk pembakaran yang lebih lama dan api yang menyala tidak menyebar pada bagian yang lain.

Pada pengujian kedua, ketika pembakaran berlangsung sampah kertas terbakar terlebih dahulu kemudian dalam beberapa saat sampah plastik baru terbakar. Hal ini terlihat dari Gambar 4.20 (c) sensor GP2Y1010AU0F A dengan kadar PM_{2.5} yang tinggi yaitu 183 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan pada sensor GP2Y1010AU0F B kadar PM_{2.5} lebih tinggi yaitu 228 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan pada sensor GP2Y1010AU0F C adalah 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Kadar ini dapat didefinisikan sebagai residu dari sampah kertas. Kemudian kadar PM_{2.5} kembali turun ketika proses pembakaran dan penyaringan asap berada di tahap akhir yang mana pada tahap ini, sampah kertas sudah habis terbakar dan residu abu yang dihasilkan sudah mulai berkung dengan kadar PM_{2.5} yang terdeteksi oleh sensor GP2Y1010AU0F A sebesar 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sensor GP2Y1010AU0F B sebesar 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sensor GP2Y1010AU0F C sebesar 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pada gas karbon dioksida yang terdeteksi pada filter pertama mencapai 675 PPM, sedangkan pada filter kedua mencapai 552 PPM dan pada filter ketiga hanya mencapai 479 PPM. Kadar gas karbon monoksida lebih rendah ketika proses pembakaran dan penyaringan asap berada di tahap akhir dengan kadar gas karbon dioksida yang terdeteksi pada filter pertama adalah 495 PPM, pada filter kedua dengan kadar 430 PPM, dan pada filter ketiga dengan kadar 399 PPM.

Hal serupa terjadi pada gas karbon monoksida, di mana gas karbon monoksida yang terdeteksi di awal proses pada filter pertama mencapai 11 PPM, filter kedua 11 PPM, dan pada filter ketiga mencapai 8 PPM. Kemudian kadar gas karbon monoksida turun kembali ketika proses pembakaran dan penyaringan asap berada di tahap akhir dengan kadar gas karbon monoksida yang terdeteksi pada

filter pertama 10 PPM, pada filter kedua mencapai 8 PPM, dan pada filter ketiga mencapai 7 PPM.

Pada pengujian kedua ini, asap bocor yang terjadi pada pengujian pertama tidak terjadi. Keadaan ini bisa terjadi dikarenakan jumlah sampah kertas pada pengujian ini tidak sebanyak pada pengujian pertama, sehingga asap yang dikeluarkan dan tekanan udara panas pun lebih sedikit dihasilkan, sehingga tekanan udara panas tidak mendorong asap keluar dari tungku pembakaran sampah.

Durasi dari percobaan kedua ini berlangsung selama 39 menit 29 detik. Durasi ini lebih sedikit dibandingkan dari percobaan pertama. Durasi yang sedikit ini terjadi karena sampah kertas yang terbakar terlebih dahulu sehingga sampah kertas akan lebih dahulu habis terbakar. Akibatnya, sampah plastik yang terbakar hanya sedikit dan masih menyisakan sampah plastik yang belum terbakar.

Pada pengujian ketiga ketika pembakaran terjadi, gas karbon dioksida yang terdeteksi lebih kecil dibanding dari pengujian pertama dan pengujian kedua dengan kadar gas karbon dioksida pada filter pertama mencapai 548 PPM, kemudian pada filter kedua mencapai 506 PPM, dan pada filter ketiga mencapai 473 PPM. Kadar gas karbon monoksida pada pengujian ketiga ini terbilang konstan. Hal ini terlihat pada Gambar 4.21 (a) dengan grafik yang cukup konstan dengan kadar gas karbon monoksida pada filter pertama mencapai 10 PPM, kemudian pada filter kedua mencapai 8 PPM, dan pada filter ketiga mencapai 7 PPM. Kemudian, ketika proses pembakaran dan penyaringan asap berada di tahap akhir, gas karbon dioksida mulai menurun dengan kadar gas karbon dioksida pada filter pertama mencapai 460 PPM, pada filter kedua mencapai 477 PPM, dan pada filter ketiga 366 PPM. Sedangkan pada gas karbon monoksida terjadi penurunan namun penurunan kadarnya tidak terlalu tinggi dengan kadar gas karbon monoksida pada filter pertama mencapai 9 PPM, pada filter kedua 7 PPM, dan pada filter ketiga mencapai 7 PPM.

Kondisi gas karbon monoksida yang lebih kecil ini terjadi karena pembakaran yang terjadi di dalam tungku pembakaran adalah pembakaran sempurna, sehingga gas karbon monoksida lebih sedikit dihasilkan. Sebaliknya gas karbon dioksida lebih meningkat. Hal ini terjadi karena perubahan gas karbon monoksida menjadi gas karbon dioksida pada pembakaran sempurna

Pada kadar PM2.5 yang terdeteksi oleh sensor GP2Y1010AU0F, kadar PM2.5 tidak terlalu tinggi dan nilainya berada di bawah pengujian pertama dan pengujian kedua dengan kadar PM2.5 pada filter pertama mencapai $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pada filter kedua mencapai $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dan pada filter ketiga mencapai $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Kadar PM2.5 kembali turun ketika proses pembakaran dan penyaringan asap mulai berada di tahap akhir dengan kadar PM2.5 pada filter pertama mencapai $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pada filter kedua mencapai $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dan pada filter ketiga mencapai $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Kondisi ini dapat terjadi karena bahan plastik yang digunakan pada percobaan ketiga tidak menyisakan residu abu.

Durasi pada pengujian ketiga ini berlangsung selama 43 menit dan 43 detik. Pembakaran dengan durasi ini menjadikan sampah plastik terbakar dan melebur menjadi cairan plastik, walaupun tidak seluruh sampah plastik menjadi cair.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang diperoleh pada penelitian, didapat kesimpulan bahwa prototipe sistem penyaringan dan pengukuran asap pembakaran sampah pada mini insinerator berhasil dibuat. Asap yang dihasilkan pada mini insinerator ini sangat minim keluar dari alat, namun hal ini didasarkan pada jenis dan jumlah sampah yang terbakar. Kandungan zat polusi yang berada di asap hasil pembakaran sampah dapat tereduksi dengan baik melalui filter yang telah dibuat terutama pada filter ketiga. Hasil penyaringan pada tahap akhir menghasilkan gas karbon monoksida di bawah 10 PPM, gas karbon dioksida di bawah 400 PPM, dan PM2.5 di bawah 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sehingga proses penyaringan asap pembakaran pada mini insinerator sangat efektif untuk mengurangi polusi yang dihasilkan dari pembakaran sampah dan dapat dijadikan solusi inovatif dalam mengurangi polusi udara yang dihasilkan dari pembakaran sampah.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya diantaranya sebagai berikut.

1. Menggunakan ventilasi udara yang lebih besar, sehingga oksigen yang diperlukan dalam pembakaran dapat terpenuhi.
2. Memberikan penanda ketika pembakaran mulai berjalan dan proses penyaringan telah selesai pada penulisan *SD card* agar data mudah terbaca.
3. Menambahkan sistem IoT (*Internet of Things*) agar data dari pembakaran dan penyaringan asap pembakaran sampah langsung terbaca, sehingga tidak perlu mengolah data lagi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Kaza *et al.*, “What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050,” World Bank Group, Washington, D.C., Publication 132827, Apr. 2021. Accessed: Sep. 05, 2024. [Online]. Available: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/697271544470229584/What-a-Waste-2-0-A-Global-Snapshot-of-Solid-Waste-Management-to-2050>
- [2] Anonim, “Plastic Waste Discharges from Rivers and Coastlines in Indonesia,” World Bank, Washington, D.C., Publication, May 2021. Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.worldbank.org/en/country/indonesia/publication/plastic-waste-discharges-from-rivers-and-coastlines-in-indonesia>
- [3] Anonim, “Membenahi Tata Kelola Sampah Nasional,” Indonesia.go.id. Accessed: Sep. 28, 2024. [Online]. Available: <https://indonesia.go.id/kategori/indonesia-dalam-angka/2533/membenahi-tata-kelola-sampah-nasional>
- [4] U. Mustaghfiroh, L. K. Ni'mah, A. Sundusiyah, H. A. Addahlawi, and A. F. Hidayatullah, “Implementasi Prinsip Good Environmental Governance dalam Pengelolaan Sampah Di Indonesia,” *Bina Huk. Lingkung.*, vol. 4, no. 2, pp. 279–291, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.24970/bhl.v4i2.106>.
- [5] Anonim, “Kajian Kebijakan dan Strategi Nasional Percepatan Pengelolaan Persampahan,” Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian Republik Indonesia, PT. Arkonin Engineering Manggala Pratama, 2016. [Online]. Available: <https://www.ekon.go.id/source/publikasi/Kajian%20Kebijakan%20dan%20Strategi%20Nasional%20Percepatan%20Pengelolaan%20Persampahan.pdf>
- [6] Andreansyah and O. Sihite, “Potret Manusia dan Sampah Di Medan dalam Karya Fotografi Konseptual,” *Cendikia J. Pendidik. Dan Pengajaran*, vol. 2, no. 3, pp. 12–36, 2024, doi: <https://doi.org/10.572349/cendikia.v2i3.964>.

- [7] Rendi *et al.*, “Edukasi Pengelolaan Sampah dan Pendampingan Penggunaan Mesin Pembakaran Sampah Di Desa Semangat Dalam,” *J. Pengabd. Al-Ikhlas*, vol. 7, no. 1, pp. 139–144, 2021.
- [8] R. Jakhar, L. Samek, and K. Styszko, “A Comprehensive Study of the Impact of Waste Fires on the Environment and Health,” *Sustainability*, vol. 15, no. 19, p. 14241, Jan. 2023, doi: 10.3390/su151914241.
- [9] S. Han, J. Kim, and S. H. Ko, “Advances in air filtration technologies: structure-based and interaction-based approaches,” *Mater. Today Adv.*, vol. 9, p. 100134, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.mtadv.2021.100134.
- [10] D. S. de Almeida, L. D. Martins, and M. L. Aguiar, “Air pollution control for indoor environments using nanofiber filters: A brief review and post-pandemic perspectives,” *Chem. Eng. J. Adv.*, vol. 11, p. 100330, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.ceja.2022.100330.
- [11] A. K. Rana, E. Mostafavi, W. F. Alsanie, S. S. Siwal, and V. K. Thakur, “Cellulose-based materials for air purification: A review,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 194, p. 116331, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.indcrop.2023.116331.
- [12] H. Qian, Y. Fang, K. Wu, H. Wang, B. Li, and F. Jiang, “Air filtration improvement of konjac glucomannan-based aerogel air filters through physical structure design,” *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 867–872, Sep. 2021, doi: 10.1093/ijlct/ctab011.
- [13] M. Anitha and L. S. Kumar, “Development of an IoT-Enabled Air Pollution Monitoring and Air Purifier System,” *MAPAN*, vol. 38, no. 3, pp. 669–688, Sep. 2023, doi: 10.1007/s12647-023-00660-y.
- [14] M. O. Hananta, D. L. Antonia, Y. Yuliati, and L. Agustine, “Alat Pendeteksi, Penghisap dan Penyaring Asap Rokok,” *Widya Tek.*, vol. 21, no. 1, pp. 51–55, May 2022, doi: 10.33508/wt.v21i1.4204.
- [15] R. Mourya and V. Rathee, “Arduino based Air Monitoring and Filtration System,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 09, no. 04, pp. 3595–3600, 2022.
- [16] B. S. Ramadan, I. Rachman, N. Ikhlas, S. B. Kurniawan, M. F. Miftahadi, and T. Matsumoto, “A comprehensive review of domestic-open waste burning: recent trends, methodology comparison, and factors assessment,” *J. Mater.*

- Cycles Waste Manag.*, vol. 24, no. 5, pp. 1633–1647, Sep. 2022, doi: 10.1007/s10163-022-01430-9.
- [17] G. Pathak, M. Nichter, A. Hardon, and E. Moyer, “The Open Burning of Plastic Wastes is an Urgent Global Health Issue,” *Ann. Glob. Health*, vol. 90, no. 1, p. 3, doi: 10.5334/aogh.4232.
- [18] A. Gómez-Sanabria, G. Kiesewetter, Z. Klimont, W. Schoepp, and H. Haberl, “Potential for future reductions of global GHG and air pollutants from circular waste management systems,” *Nat. Commun.*, vol. 13, no. 1, p. 106, Jan. 2022, doi: 10.1038/s41467-021-27624-7.
- [19] K. S. Sutherland and G. Chase, *Filters and Filtration Handbook (Fifth edition)*, Fifth edition. Oxford: Elsevier, 2007.
- [20] T. Sparks and G. Chase, *Filters and Filtration Handbook (Sixth Edition)*, Sixth Edition. Oxford: Elsevier Science, 2015.
- [21] D. T. Wahyuningtyas, S. Sudarti, and Y. Yushardi, “Mekanisme Kinerja Air Purifier Dalam Upaya Pencegahan Polusi Udara,” *SAINTIFIK*, vol. 10, no. 1, Art. no. 1, Feb. 2024, doi: 10.31605/saintifik.v10i1.474.
- [22] J. Ahmad *et al.*, “Mechanical and Durability Performance of Coconut Fiber Reinforced Concrete: A State-of-the-Art Review,” *Materials*, vol. 15, no. 10, p. 3601, Jan. 2022, doi: 10.3390/ma15103601.
- [23] R. Ananda, “Pemanfaatan Serat Kelapa Sebagai Alternatif Pengganti Kemasan Berbahan Plastik,” *J. Seni Dan Reka Ranc. J. Ilm. Magister Desain*, vol. 2, no. 1, pp. 1–14, 2019, doi: 10.25105/jsrr.v2i1.10103.
- [24] A. A. Ariatma, A. Kadir, and F. Fahrudin, “Pemanfaatan Limbah Serabut Kelapa Di Desa Korleko Kecamatan Labuhan Haji Kabupaten Lombok Timur,” *J. War. Desa*, vol. 1, no. 3, 2019, doi: 10.29303/jwd.v1i3.81.
- [25] R. M. Sari, S. Gea, B. Wirjosentono, S. Hendrana, and F. G. Torres, “The effectiveness of coconut coir as tar adsorbent in liquid smoke integrated into the pyrolysis reactor,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 25, p. 100907, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.100907.
- [26] F. Vieira *et al.*, “Coconut Waste: Discovering Sustainable Approaches to Advance a Circular Economy,” *Sustainability*, vol. 16, no. 7, p. 3066, Jan. 2024, doi: 10.3390/su16073066.

- [27] N. Esfandiari, R. Suri, and E. R. McKenzie, "Simultaneous removal of multiple polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from urban stormwater using low-cost agricultural/industrial byproducts as sorbents," *Chemosphere*, vol. 274, p. 129812, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129812.
- [28] X. Li *et al.*, "Machine learning-assisted crystal engineering of a zeolite," *Nat. Commun.*, vol. 14, no. 1, p. 3152, May 2023, doi: 10.1038/s41467-023-38738-5.
- [29] K. Chen *et al.*, "Regulating adsorption performance of zeolites by pre-activation in electric fields," *Nat. Commun.*, vol. 14, no. 1, p. 5479, Sep. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-41227-4.
- [30] S. Sudarni and H. Haderiah, "Aktivasi Zeolit Dan Karbon Aktif Dalam Menurunkan Kepadatan Air Di Kampung Sapiriakota Makassar," *Sulolipu Media Komun. Sivitas Akad. Dan Masy.*, vol. 20, no. 1, pp. 19–23, Aug. 2020, doi: 10.32382/sulolipu.v20i1.1459.
- [31] J. Jjagwe, P. W. Olupot, E. Menya, and H. M. Kalibbala, "Synthesis and Application of Granular Activated Carbon from Biomass Waste Materials for Water Treatment: A Review," *J. Bioresour. Bioprod.*, vol. 6, no. 4, pp. 292–322, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jobab.2021.03.003.
- [32] A. R. Suharso, A. Hendartono, and S. Supriyadi, "Characteristics of the MQ-135 Sensor for Testing Medium Speed Ship Engine Exhaust Gases," *Adv. Sustain. Sci. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 3, pp. 0240310–0240310, Jun. 2024, doi: 10.26877/asset.v6i3.615.
- [33] I. A. Rombang, L. B. Setyawan, and G. Dewantoro, "Perancangan Prototipe Alat Deteksi Asap Rokok dengan Sistem Purifier Menggunakan Sensor MQ-135 dan MQ-2," *Techné J. Ilm. Elektrotek.*, vol. 21, no. 1, pp. 131–144, Apr. 2022, doi: 10.31358/techne.v21i1.312.
- [34] Y. A. Janitra, A. Aditya, H. N. Hadi, D. A. P, and S. Widodo, "The Development of Automatic Cigarette Smoke Detection System Using TA12-100 and MQ-135 Sensors," *J. Techno Nusa Mandiri*, vol. 21, no. 1, pp. 29–36, Apr. 2024, doi: 10.33480/techno.v21i1.5294.
- [35] A. B. S. Umbu, "Analisis Grafik Karakteristik Sensitivitas Sensor MQ-135 untuk Menentukan Persamaan Hubungan antara ppm dan Rs/Ro," *J. Teori*

- Dan Apl. Fis.*, vol. 11, no. 02, pp. 49–60, Jul. 2023, doi: 10.23960/2Fjtaf.v11i2.6656.
- [36] F. Neamah, M. Intisar, Z. Khyioon, and E. Abud, “Capable of Gas Sensor MQ-135 to Monitor the Air Quality with Arduino uno,” *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 13, pp. 2955–2959, Nov. 2020, doi: 10.37624/IJERT/13.10.2020.2955-2959.
- [37] N. Kobbekaduwa, P. Oruthota, and W. R. de Mel, “Calibration and Implementation of Heat Cycle Requirement of MQ-7 Semiconductor Sensor for Detection of Carbon Monoxide Concentrations,” *Adv. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 377–392, Sep. 2021, doi: 10.31357/ait.v1i2.5068.
- [38] K. Suryadi and B. Fazzry, “Detection and Analysis of CO, CO₂ Exhaust Emissions in Two-Wheeled Motorized Vehicles,” *Protek J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 3, pp. 132–136, Sep. 2023, doi: 10.33387/protk.v10i3.4497.
- [39] Y. I. Nurhasanah, M. M. Barmawi, and R. Prakarsa, “Implementation of Mean of Maximum on Cigarette Smoke Control in a Room,” *Electroteh. Electron. Autom.*, vol. 70, no. 3, pp. 59–68, Sep. 2022, doi: 10.46904/eea.22.70.3.1108006.
- [40] D. Rajasekar, A. Sekar, and M. Rajasekar, “Air Quality Monitoring and Disease Prediction Using IoT and Machine Learning,” *Int. J. Innov. Res. Comput. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 389–395, Nov. 2020.
- [41] W. S. U. Sari, G. Priyandoko, and D. U. Effendy, “Rancang Bangun Sistem Monitoring Kualitas Udara Pada Ruang Isolasi Covid-19 Berbasis Android Menggunakan Sensor Sharp Gp2y1010au0f,” *JASEE J. Appl. Sci. Electr. Eng.*, vol. 3, no. 02, pp. 1–11, Oct. 2022, doi: 10.31328/jasee.v3i02.204.
- [42] S. V. Gurudath, K. R. P. M, and S. K. G, “Framework and Method for Measurement of Particulate Matter Concentration using Low Cost Sensors,” *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl. IJACSA*, vol. 12, no. 12, pp. 854–859, 43/31 2021, doi: 10.14569/IJACSA.2021.01212103.
- [43] K. Bučar, J. Malet, L. Stabile, J. Pražnikar, S. Seeger, and M. Žitnik, “Statistics of a Sharp GP2Y Low-Cost Aerosol PM Sensor Output Signals,” *Sensors*, vol. 20, no. 23, p. 6707, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20236707.

- [44] H. Cho and Y. Baek, "Practical Particulate Matter Sensing and Accurate Calibration System Using Low-Cost Commercial Sensors," *Sensors*, vol. 21, no. 18, p. 6162, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21186162.
- [45] R. F. Siregar, A. Affandi, R. Rohana, A. R. Nasution, and I. Tanjung, "IoT Smart Control System: Smoke and Fire Detection Using SIM900A Module," *J. Electr. Technol. UMY*, vol. 7, no. 2, Art. no. 2, 2023, doi: 10.18196/jet.v7i2.19908.
- [46] J. M. S. Waworundeng, "Desain Sistem Deteksi Asap dan Api Berbasis Sensor, Mikrokontroler dan IoT," *CogITO Smart J.*, vol. 6, no. 1, Art. no. 1, Jul. 2020, doi: 10.31154/cogito.v6i1.239.117-127.
- [47] S. Suhaeb, Y. A. Djawad, H. Jaya, Ridwansyah, Sabran, and A. Risal, *Mikrokontroler dan Interface*. Makassar, 2017. Accessed: Oct. 13, 2024. [Online]. Available: <https://reader5.z-library.sk/?source=469d3dff179ced4522e1cdaddfc609a684c7c17a98ed378108510b6b9541f11d>
- [48] Y. Irawan, A. W. Novrianto, and H. Sallam, "Cigarette Smoke Detection And Cleaner Based On Internet Of Things (IoT) Using Arduino Microcontroller And MQ-2 Sensor," *J. Appl. Eng. Technol. Sci. JAETS*, vol. 2, no. 2, pp. 85–93, May 2021, doi: 10.37385/jaets.v2i2.218.
- [49] A. Sofyan and D. Kurniawan, "Indoor Air Monitoring and Filtration Using Arduino-Based Plasma Technology," *J. Technol. Inform. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 18–38, 2023, doi: 10.51903/jtie.v2i2.167.

LAMPIRAN A

KONFIGURASI PIN SENSOR

Tabel A.0.1 Konfigurasi Pin Sensor

| Komponen | Pin Komponen | Pin Arduino Mega | Pin Eksternal |
|----------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|
| Sensor MQ-7 A | VCC | - | 5V modul <i>stepdown</i> |
| | GND | GND | - |
| | A0 | A0 | - |
| | D0 | - | - |
| Sensor MQ-7 B | VCC | - | 5V modul <i>stepdown</i> |
| | GND | GND | - |
| | A0 | A1 | - |
| | D0 | - | - |
| Sensor MQ-7 C | VCC | - | 5V modul <i>stepdown</i> |
| | GND | GND | - |
| | A0 | A2 | - |
| | D0 | - | - |
| Sensor MQ-135 A | VCC | - | 5V modul <i>stepdown</i> |
| | GND | GND | - |
| | A0 | A3 | - |
| | D0 | - | - |
| Sensor MQ-135 B | VCC | - | 5V modul <i>stepdown</i> |
| | GND | GND | - |
| | A0 | A4 | - |
| | D0 | - | - |
| Sensor MQ-135 C | VCC | - | 5V modul <i>stepdown</i> |
| | GND | GND | - |
| | A0 | A5 | - |
| | D0 | - | - |
| Sensor GP2Y1010AU0F - A | VCC | 5V | - |
| | VO | A12 | - |
| | S-GND | GND | - |
| | LED | 38 | - |
| | LED-GND | GND | - |
| | V-LED | 5V (Resistor) | - |
| Sensor GP2Y1010AU0F - B | VCC | 5V | - |
| | VO | A13 | - |
| | S-GND | GND | - |
| | LED | 39 | - |
| | LED-GND | GND | - |
| | V-LED | 5V (Resistor) | - |
| Sensor GP2Y1010AU0F - C | VCC | 5V | - |
| | VO | A14 | - |

| Komponen | Pin Komponen | Pin Arduino Mega | Pin Eksternal |
|------------------------------|-----------------|---------------------|---------------|
| Sensor GP2Y1010AU0F - C | S-GND | GND | - |
| | LED | 40 | - |
| | LED-GND | GND | - |
| | V-LED | 5V (Resistor) | - |
| Sensor Api KY - 026 | VCC | 5V | - |
| | GND | GND | - |
| | A0 | 3 | - |
| | D0 | - | - |
| Modul Relay 1 <i>Channel</i> | VCC | 5V | - |
| | IN | 5 | - |
| | GND | GND | - |
| Modul <i>SD Card</i> | CS | 10 | - |
| | SCK | 13 | - |
| | MOSI | 11 | - |
| | MISO | 12 | - |
| | VCC | 5V | - |
| | GND | GND | - |
| LED Merah | GND | GND | - |
| | VCC | 7(Resistor) | - |
| LED Hijau | GND | GND | - |
| | VCC | 8(Resistor) | - |
| LED Kuning | GND | GND | - |
| | VCC | 6(Resistor) | - |
| Modul RTC DS3231 | 32K | - | - |
| | SQW | - | - |
| | SCL | 21 | - |
| | SDA | 20 | - |
| | VCC | 5V | - |
| | GND | GND | - |

LAMPIRAN B LISTING CODE

1. Kode untuk kalibrasi sensor MQ-135

```
#include <Wire.h>

// Kalibrasi CO2
#define waktukalibrasi 50
#define interval 1
#define sampel (waktukalibrasi / interval)

const int analogPins_CO2[3] = {A3, A4, A5};
const float Vcc = 5.0;
const float RL = 10000;

float Ro_CO2[3] = {0, 0, 0};

// menghitung resistansi sensor dari nilai ADC
float getSensorResistance(int sensorValue) {
    float v = (sensorValue / 1023.0) * Vcc;
    return ((Vcc - v) / v) * RL;
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    delay(1000);
    Serial.println("Mulai Kalibrasi Sensor CO2...");

    for (int sample = 0; sample < sampel; sample++) {
        for (int i = 0; i < 3; i++) {
            int sensorValue = analogRead(analogPins_CO2[i]);
            float Rs = getSensorResistance(sensorValue);
            Ro_CO2[i] += Rs / sampel;
        }

        // Tampilkan waktu tersisa di Serial
        int remainingTime = waktukalibrasi - (sample *
interval);
        int minutes = remainingTime / 60;
```



```

    int seconds = remainingTime % 60;
    Serial.print("Waktu tersisa: ");
    Serial.print(minutes);
    Serial.print("m ");
    Serial.print(seconds);
    Serial.println("s");

    delay(interval * 1000);
}

Serial.println("Kalibrasi Selesai.");
for (int i = 0; i < 3; i++) {
    Serial.print("Ro_CO2 Sensor ");
    Serial.print(i + 1);
    Serial.print(": ");
    Serial.println(Ro_CO2[i], 2);
}
}

void loop() {
}

```

2. Kode keseluruhan sistem

```

#include <Wire.h>
#include <RTClib.h>
#include <SdFat.h>

SdFat SD;
File data;
RTC_DS3231 rtc;

unsigned long previousMillis = 0;
const long interval = 1000;

// Konfigurasi pin dan variabel sensor
const int Pin_CO[3] = {A0, A1, A2};
const int Pin_CO2[3] = {A3, A4, A5};

```

```

const int Pin_PM[3] = {A12, A13, A14};
const int IR_PM[3] = {38, 39, 40};
const uint8_t chipSelect = 10;
int LED_HIJAU = 7;
int LED_MERAH = 8;
int LED_KUNING = 6;
int Flamesensor = 3;
int Relay = 5;
float Rs_CO2[3];
float Ro_CO2[3]= {83516.99, 25285.84, 108682.15};
float ratio_CO2[3];
float ppmCO2[3];
float Vout_CO[3];
float ratio_CO[3];
float ppmCO[3];
const float Vcc = 5.0;
const float RL = 10000;
int samplingTime = 280;
int deltaTime = 40;
int sleepTime = 9680;

// Array nama bulan untuk format nama file
const char* namaBulan[] = {
    "", "Januari", "Februari", "Maret", "April", "Mei",
    "Juni",
    "Juli", "Agustus", "September", "Oktober", "November",
    "Desember"
};

//Parameter untuk SD card
bool sdAvailable = false;
bool lastSDState = false;
bool lastRelayState = HIGH;
bool hasWrittenOffStatus = false;

unsigned long lastCheck = 0;
unsigned long lastWrite = 0;

const unsigned long checkInterval = 1000; // cek SD tiap

```

```

1 detik
const unsigned long writeInterval = 1000;  // tulis data
tiap 2 detik

// Parameter kurva untuk CO2
const float m_CO2 = -1.33;
const float b_CO2 = 2.6;
const float coefficientA = 20.44083;
const float coefficientB = -0.656363;

// Fungsi untuk menghitung resistansi sensor
float getSensorResistance(int sensorValue) {
    float v = (sensorValue / 1023.0) * Vcc;
    return ((Vcc - v) / v) * RL;
}

// Fungsi untuk menghitung PPM CO2 dari rasio R_s/R_o
float calculateCO2PPM(float ratio) {
    return pow(10, (m_CO2 * log10(ratio) + b_CO2));
}

// Parameter untuk filter pembacaan data sensor
#define NUM_READINGS_CO2 20
int readings_CO2[3][NUM_READINGS_CO2];
int readIndex_CO2[3] = {0, 0, 0};
int total_CO2[3] = {0, 0, 0};
float average_CO2[3] = {0, 0, 0};
float lastFiltered_CO2[3] = {0, 0, 0};
const float alpha = 0.1;
const float noiseThreshold = 1.0;

#define NUM_READINGS_CO 10
int readings_CO[3][NUM_READINGS_CO];
int readIndex_CO[3] = {0, 0, 0};
float total_CO[3] = {0, 0, 0};
float average_CO[3] = {0, 0, 0};

// Tambahan untuk stabilisasi PM2.5
const int FILTER_SIZE = 15;

```

```

float filterBuffers[3][FILTER_SIZE];
float smoothedPM25[3] = {0, 0, 0}; // Untuk menyimpan
nilai rata-rata

const float ALPHA_PM25 = 1.0; // Faktor smoothing untuk
EMA

// Fungsi sorting untuk median filter
void sortBuffer(float* buffer, int size) {
    for (int i = 0; i < size - 1; i++) {
        for (int j = 0; j < size - i - 1; j++) {
            if (buffer[j] > buffer[j + 1]) {
                float temp = buffer[j];
                buffer[j] = buffer[j + 1];
                buffer[j + 1] = temp;
            }
        }
    }
}

// Fungsi median filter
float applyMedianFilter(float* buffer, float newValue) {
    // Geser nilai lama ke belakang
    for (int i = FILTER_SIZE - 1; i > 0; i--) {
        buffer[i] = buffer[i - 1];
    }
    buffer[0] = newValue;

    // Salin data untuk disortir
    float sortedBuffer[FILTER_SIZE];
    for (int i = 0; i < FILTER_SIZE; i++) {
        sortedBuffer[i] = buffer[i];
    }

    // Urutkan data
    sortBuffer(sortedBuffer, FILTER_SIZE);

    // Ambil nilai median
    return sortedBuffer[FILTER_SIZE / 2];
}

```

```

}

// Fungsi untuk mendeteksi keberadaan SD card
void checkSDCardStatus(unsigned long currentTime) {
    if (currentTime - lastCheck >= checkInterval) {
        lastCheck = currentTime;

        sdAvailable = SD.begin(chipSelect);

        if (sdAvailable != lastSDState) {
            lastSDState = sdAvailable;

            if (sdAvailable) {
                Serial.println("SD card tersedia.");
            } else {
                Serial.println("SD card tidak terdeteksi.");
            }
        }

        // Atur LED status
        digitalWrite(LED_HIJAU, sdAvailable ? HIGH : LOW);
        digitalWrite(LED_MERAH, sdAvailable ? LOW : HIGH);
    }
}

void writeToSDCard(float co[3], float co2[3], float
pm25[3]) {
    if (!sdAvailable) return;

    digitalWrite(LED_KUNING, HIGH); // Indikator menulis

    DateTime now = rtc.now(); // Ambil waktu dari RTC

    // Format nama file: "Mei-2025.csv"
    String filename = String(namaBulan[now.month()]) + "-" +
String(now.year()) + ".csv";
    filename.replace(" ", ""); // Hilangkan spasi jika ada
    filename = filename + '\\0';
}

```

```

char fileChar[20];
filename.toCharArray(fileChar, sizeof(fileChar));

bool fileExists = SD.exists(fileChar); // Cek apakah
file sudah ada
data = SD.open(fileChar, FILE_WRITE);

if (data) {
    // Jika file baru, tulis header
    if (!fileExists) {
        data.println("Tanggal;Waktu;MQ-7 A;MQ-7 B;MQ-7 C;MQ-
135 A;MQ-135 B;MQ-135 C;Satuan;GP2Y1010AU0F-
A;GP2Y1010AU0F-B;GP2Y1010AU0F-C;Satuan;Nilai");
    }

    // Format tanggal dan waktu
    char tanggal[11]; // HH/BB/TTTT
    sprintf(tanggal, "%02d/%02d/%04d", now.day(),
now.month(), now.year());

    char waktu[9]; // JJ:MM:DD
    sprintf(waktu, "%02d:%02d:%02d", now.hour(),
now.minute(), now.second());

    // Tulis semua data sensor
    // CO dan CO2
    data.print(tanggal);
    data.print(';');
    data.print(waktu);
    data.print(';');
    data.print(co[0], 1);
    data.print(';');
    data.print(co[1], 1);
    data.print(';');
    data.print(co[2], 1);
    data.print(';');
    data.print(co2[0], 1);
    data.print(';');
    data.print(co2[1], 1);

```

```

    data.print(';');
    data.print(co2[2], 1);
    data.print(';');
    data.print(" ppm");
    data.print(';');
    // PM2.5
    data.print(pm25[0], 1);
    data.print(';');
    data.print(pm25[1], 1);
    data.print(';');
    data.print(pm25[2], 1);
    data.print(';');
    data.print(" ug/m3");
    data.print(';');
    // Status Relay
    if (hasWrittenOffStatus == false) {
        data.println("Aktif");
    } else if (hasWrittenOffStatus == true){
        data.println("Nonaktif");
        hasWrittenOffStatus = false;
    }
    data.close();
    Serial.print("Data ditulis ke: ");
    Serial.println(fileChar);
} else {
    Serial.println("Gagal membuka file CSV.");
}

digitalWrite(LED_KUNING, LOW);
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    if (!rtc.begin()) {
        Serial.println("RTC tidak terdeteksi!");
        while (1);
    }
    if (rtc.lostPower()) {
        Serial.println("RTC kehilangan daya. Waktu perlu

```

```

        diatur ulang.");
    }
    for (int i = 0; i < 3; i++) {
        pinMode(IR_PM[i], OUTPUT);
    }

    pinMode(Flamesensor, INPUT);
    pinMode(Relay, OUTPUT);
    pinMode(LED_HIJAU, OUTPUT);
    pinMode(LED_MERAH, OUTPUT);
    pinMode(LED_KUNING, OUTPUT);

    pinMode(chipSelect, OUTPUT);
    digitalWrite(chipSelect, HIGH);
    digitalWrite(Relay, HIGH); // Aktif LOW
}

void loop() {
    unsigned long currentMillis = millis();
    float filteredDensities[3];
    checkSDCardStatus(currentMillis);

    for (int i = 0; i < 3; i++) {
        //CO2
        int sensorValue_CO2 = analogRead(Pin_CO2[i]);
        Rs_CO2[i] = getSensorResistance(sensorValue_CO2);
        ratio_CO2[i] = Rs_CO2[i] / Ro_CO2[i];
        float ppmCO2 = calculateCO2PPM(ratio_CO2[i]);

        total_CO2[i] = total_CO2[i] -
readings_CO2[i][readIndex_CO2[i]];
        readings_CO2[i][readIndex_CO2[i]] = ppmCO2;
        total_CO2[i] = total_CO2[i] +
readings_CO2[i][readIndex_CO2[i]];
        readIndex_CO2[i] = (readIndex_CO2[i] + 1) %
NUM_READINGS_CO2;
        float movingAvgCO2 = total_CO2[i] /
NUM_READINGS_CO2;

```



```

        float smoothedCO2 = (alpha * movingAvgCO2) + ((1 -
alpha) * lastFiltered_CO2[i]);

        if (abs(smoothedCO2 - lastFiltered_CO2[i]) >
noiseThreshold) {
            lastFiltered_CO2[i] = smoothedCO2;
        }

        average_CO2[i] = lastFiltered_CO2[i] + 65;

//CO
int sensorValue_CO = analogRead(Pin_CO[i]);
Vout_CO[i] = (sensorValue_CO / 1023.0) * Vcc;
ratio_CO[i] = (Vcc - Vout_CO[i]) / Vout_CO[i];
ppmCO[i] = coefficientA * pow(ratio_CO[i],
coefficientB);

        total_CO[i] = total_CO[i] -
readings_CO[i][readIndex_CO[i]];
        readings_CO[i][readIndex_CO[i]] = ppmCO[i];
        total_CO[i] = total_CO[i] +
readings_CO[i][readIndex_CO[i]];
        readIndex_CO[i] = (readIndex_CO[i] + 1) %
NUM_READINGS_CO;
        average_CO[i] = total_CO[i] / NUM_READINGS_CO;

//PM2.5
digitalWrite(IR_PM[i], LOW);
        delayMicroseconds(samplingTime);

        long totalReading = 0;
        const int NUM_SAMPLES = 50;

        for (int j = 0; j < NUM_SAMPLES; j++) {
            totalReading += analogRead(Pin_PM[i]);
            delayMicroseconds(10);
        }

```

```

        float voMeasured = (float)totalReading /
NUM_SAMPLES;

        delayMicroseconds(deltaTime);
        digitalWrite(IR_PM[i], HIGH);
        delayMicroseconds(sleepTime);

        float calcVoltage = voMeasured * (5.0 / 1024.0);
        float dustDensity = 170 * calcVoltage - 0.1;

        // Terapkan median filter
        float medianFilteredPM25 =
applyMedianFilter(filterBuffers[i], dustDensity);

        // Terapkan Exponential Moving Average (EMA)
        smoothedPM25[i] = (ALPHA_PM25 *
medianFilteredPM25) + ((1 - ALPHA_PM25) *
smoothedPM25[i]);

        filteredDensities[i] = smoothedPM25[i];

        if (i == 0) {
            filteredDensities[i] -= 610;//134;//44;
            if (filteredDensities[i] < 0) filteredDensities[i]
= 0;
        }
        if (i == 1) {
            filteredDensities[i] -= 55;//53.4;
            if (filteredDensities[i] < 0) filteredDensities[i]
= 0;
        }
        if (i == 0) {
            average_CO[i] -= 4;
            if (average_CO[i] < 0) average_CO[i] = 0;
        }
        if (i == 1) {
            average_CO[i] -= 4;
            if (average_CO[i] < 0) average_CO[i] = 0;
        }
        if (i == 2) {

```

```

        average_CO[i] -= 4;
        if (average_CO[i] < 0) average_CO[i] = 0;
    }
}

if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
    previousMillis = currentMillis;
    Serial.println("FILTER 1");
    Serial.print("CO      :");
    Serial.println(average_CO[0],0);
    Serial.print("CO2      :");
    Serial.println(average_CO2[0],0);
    Serial.print("PM2.5  :");
    Serial.println(filteredDensities[0],0);
    Serial.println("");

    Serial.println("FILTER 2");
    Serial.print("CO      :");
    Serial.println(average_CO[1],0);
    Serial.print("CO2      :");
    Serial.println(average_CO2[1],0);
    Serial.print("PM2.5  :");
    Serial.println(filteredDensities[1],0);

    Serial.println("FILTER 3");
    Serial.print("CO      :");
    Serial.println(average_CO[2],0);
    Serial.print("CO2      :");
    Serial.println(average_CO2[2],0);
    Serial.print("PM2.5  :");
    Serial.println(filteredDensities[2],0);

    Serial.println("=====
=====");
}

// Kontrol relay
int flamevalue = digitalRead(Flamesensor);

```

```

if (flamevalue == 0 || average_CO2[0] >= 600 ) {
    digitalWrite(Relay, LOW); // Relay AKTIF (active low)
} else if (average_CO2[0] <= 580 && average_CO2[1] <=
510 && average_CO2[1] <= 500) {
    digitalWrite(Relay, HIGH); // Relay MATI
}

// Ambil status relay saat ini
bool currentRelayState = digitalRead(Relay);

// Logika penulisan status ke SD card:
if (currentRelayState == LOW) {
    if (currentMillis - lastWrite >= writeInterval) {
        writeToSDCard(average_CO, average_CO2,
filteredDensities);
        lastWrite = currentMillis;
        hasWrittenOffStatus = false;
    }
}
else {
    if (!hasWrittenOffStatus) {
        writeToSDCard(average_CO, average_CO2,
filteredDensities);
        hasWrittenOffStatus = true;
        lastWrite = currentMillis;
    }
}

lastRelayState = currentRelayState;
}

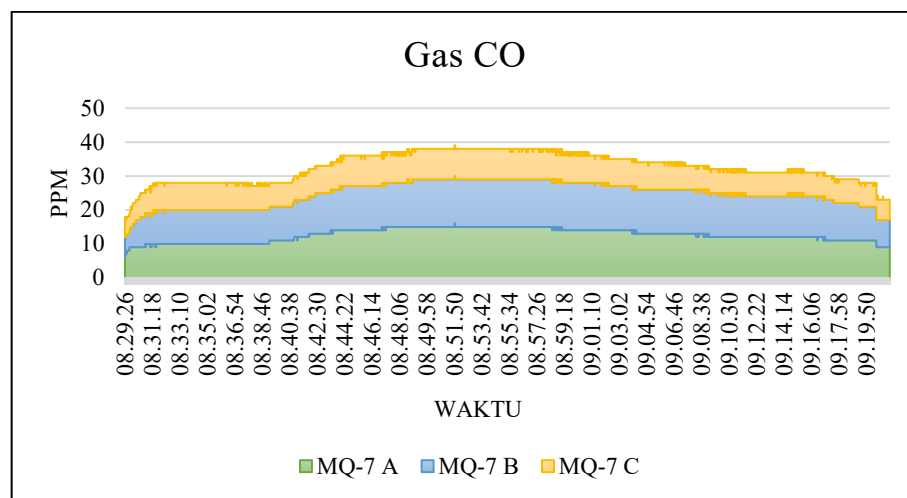
```

LAMPIRAN C

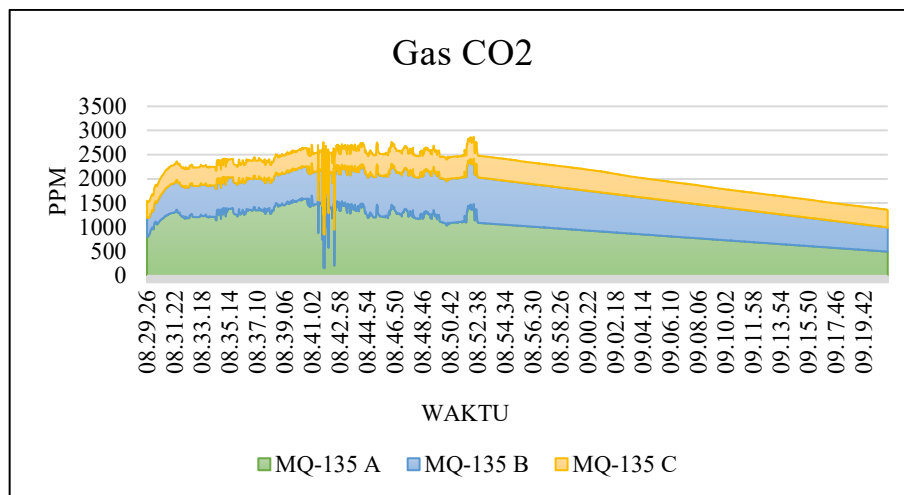
HASIL PENELITIAN

Tabel C.1 Data Pengujian Pertama

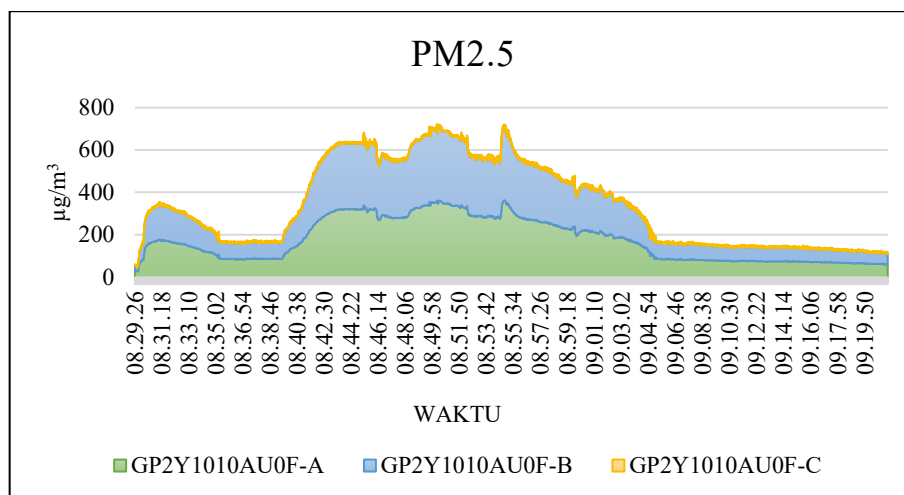
| Sensor | Kondisi Awal | Kenaikan Kadar Zat Polutan | Penurunan Kadar Zat Polutan |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Gas karbon monoksida | | | |
| MQ-7 A | 6 PPM | 15 PPM | 9 PPM |
| MQ-7 B | 6 PPM | 14 PPM | 8 PPM |
| MQ-7 C | 6 PPM | 9 PPM | 6 PPM |
| Gas karbon dioksida | | | |
| MQ-135 A | 806 PPM | 1440 PPM | 499 PPM |
| MQ-135 B | 402 PPM | 937 PPM | 487 PPM |
| MQ-135 C | 339 PPM | 450 PPM | 365 PPM |
| PM2.5 | | | |
| GP2Y1010AU0F A | 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 347 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| GP2Y1010AU0F B | 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| GP2Y1010AU0F C | 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |



(a)



(b)



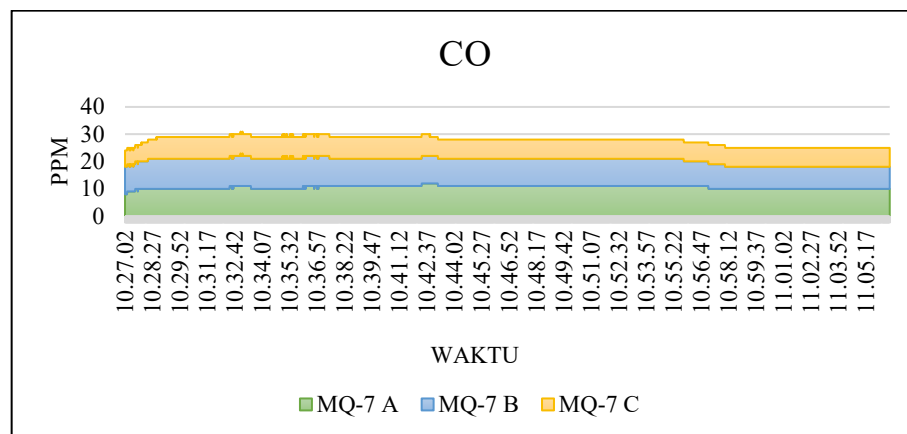
(c)

Gambar C.0.1 Data Hasil Pengujian Pertama: (a) Data gas karbon monoksida; (b) Data gas karbon dioksida; (c) Data PM2.5.

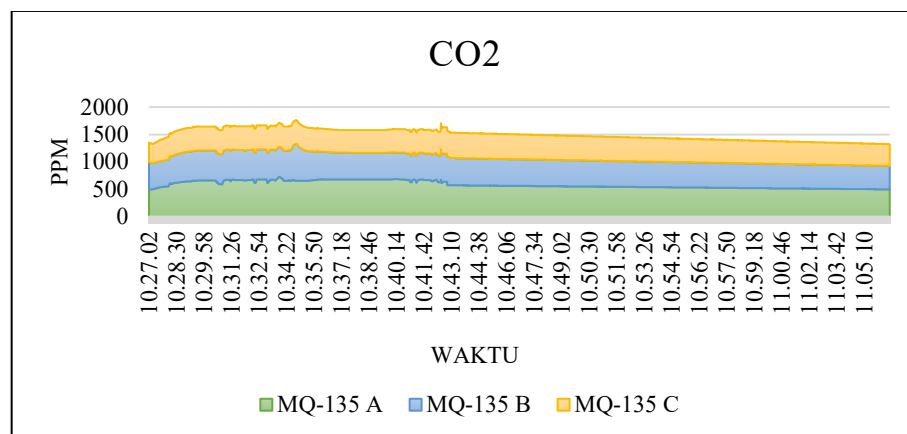
Tabel C.2 Data Pengujian Kedua

| Sensor | Kondisi Awal | Kenaikan Kadar Zat Polutan | Penurunan Kadar Zat Polutan |
|-----------------------------|--------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Gas karbon monoksida | | | |
| MQ-7 A | 8 PPM | 12 PPM | 10 PPM |
| MQ-7 B | 10 PPM | 11 PPM | 8 PPM |
| MQ-7 C | 6 PPM | 8 PPM | 7 PPM |

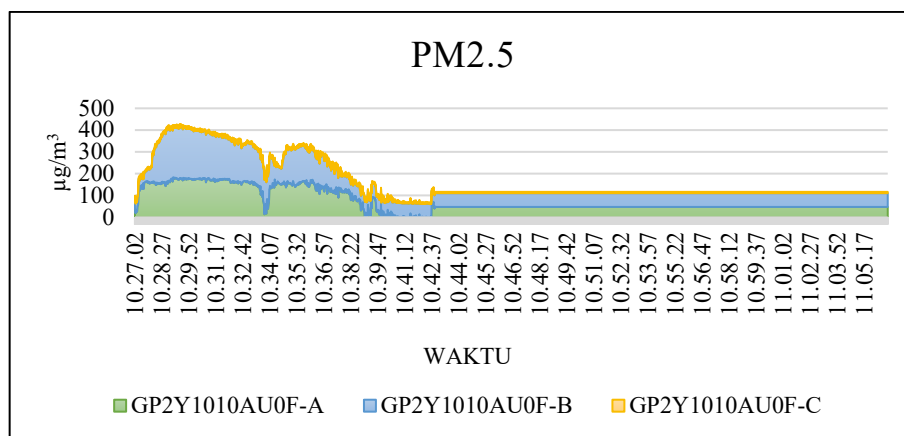
| Sensor | Kondisi Awal | Kenaikan Kadar Zat Polutan | Penurunan Kadar Zat Polutan |
|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Gas karbon dioksida | | | |
| MQ-135 A | 498 PPM | 677 PPM | 495 PPM |
| MQ-135 B | 498 PPM | 671 PPM | 430 PPM |
| MQ-135 C | 355 PPM | 456 PPM | 399 PPM |
| PM2.5 | | | |
| GP2Y1010AU0F A | 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 179 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| GP2Y1010AU0F B | 43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 239 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| GP2Y1010AU0F C | 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |



(a)



(b)

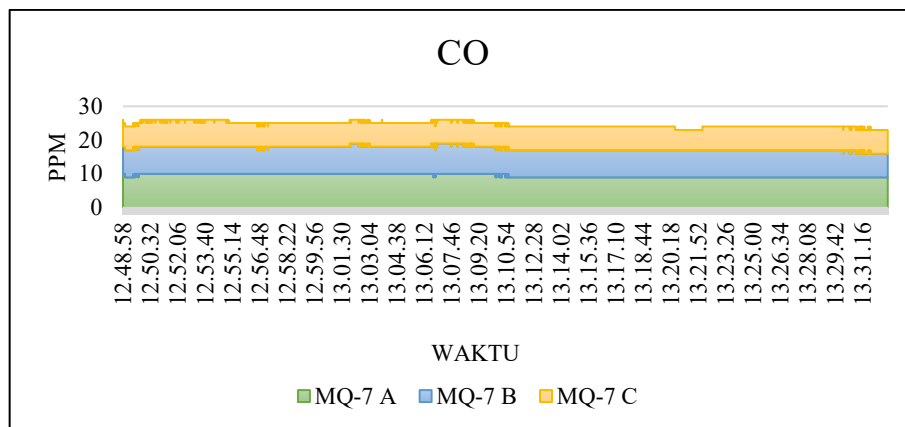


(c)

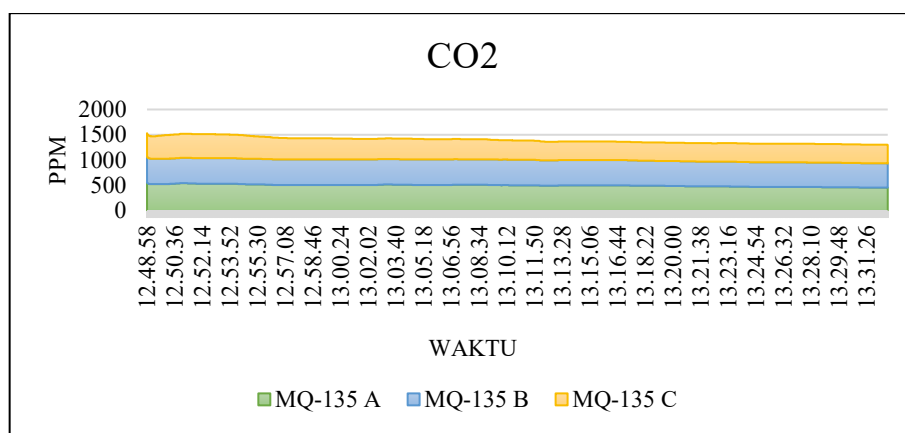
Gambar C.0.2 Data Hasil Pengujian Kedua: (a) Data gas karbon monoksida; (b) Data gas karbon dioksida; (c) Data PM2.5.

Tabel C.3 Data Pengujian Ketiga

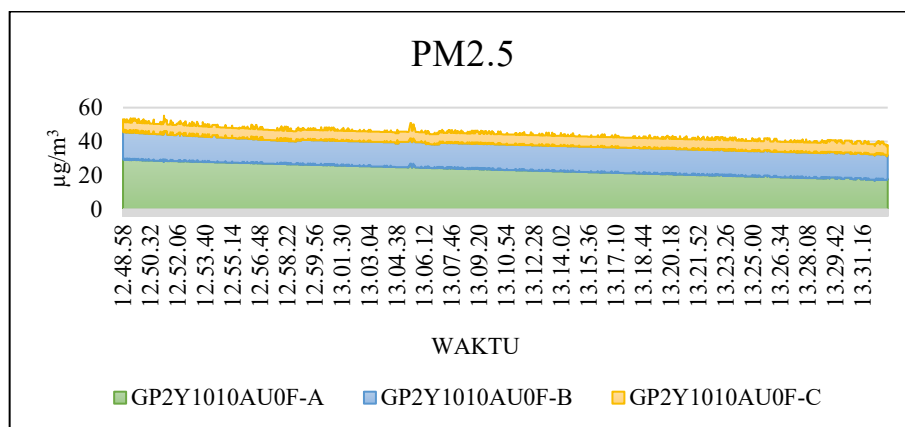
| Sensor | Kondisi Awal | Kenaikan Kadar Zat Polutan | Penurunan Kadar Zat Polutan |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Gas karbon monoksida | | | |
| MQ-7 A | 10 PPM | 10 PPM | 9 PPM |
| MQ-7 B | 8 PPM | 8 PPM | 7 PPM |
| MQ-7 C | 8 PPM | 8 PPM | 7 PPM |
| Gas karbon dioksida | | | |
| MQ-135 A | 558 PPM | 538 PPM | 460 PPM |
| MQ-135 B | 506 PPM | 503 PPM | 477 PPM |
| MQ-135 C | 471 PPM | 473 PPM | 366 PPM |
| PM2.5 | | | |
| GP2Y1010AU0F A | 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| GP2Y1010AU0F B | 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| GP2Y1010AU0F C | 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |



(a)



(b)



(c)

Gambar C.3 Data Hasil Pengujian Ketiga: (a) Data gas karbon monoksida; (b) Data gas karbon dioksida; (c) Data PM2.5