

1

USULAN GAGASAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Aktifitas alam merupakan salah satu sumber emisi alami yang ikut menyumbang dalam pencemaran udara wilayah urban. Sumber emisi alami dapat menghasilkan polutan yang dilepaskan secara langsung dari sumbernya, polutan tersebut diantaranya adalah NO, SO₂, CH₄, CO₂ dan biogenik (debu, serbuk sari, spora, kotoran hewan). Selain aktifitas alam, kegiatan antropogenik menghasilkan polutan berupa NO, SO₂, CO₂. Kegiatan antropogenik berasal dari emisi pembakaran fosil, pembakaran sampah, serta kegiatan industri. Polusi udara yang tersebar di daerah perkotaan salah satunya disebabkan oleh penyebaran partikulat PM_{2.5}, CO₂, dan Gas Rumah Kaca (CH₄ dan O₃).

PM_{2.5} merupakan salah satu emisi polutan akibat kegiatan antropogenik yang memiliki ukuran diameternya kurang dari 2.5 mikrometer [1]. Parameter lainnya yang menjadi indikator adanya polusi udara adalah Karbon Dioksida (CO₂). Gas ini memiliki sifat fisis tak berwarna dan berdampak pada efek rumah kaca. Hasil emisi pembakaran bahan bakar fosil, pembakaran sampah, dan pembangkit listrik yang membuat adanya polusi dengan kandungan PM_{2.5} dan CO₂.

Adanya Gas Rumah Kaca yang mencemari udara mengakibatkan terjadinya efek rumah kaca yang membawa dampak negatif pada kesehatan manusia dan lingkungan. Gas Rumah Kaca (GRK) yaitu gas yang terkandung dalam atmosfer, baik alami maupun antropogenik, yang menyerap dan memancarkan kembali radiasi inframerah. Gas penyumbang terbesar dalam Gas Rumah Kaca yaitu CO₂, CH₄, O₃, dan NO_x. CO₂ merupakan penyumbang pertama GRK karena dapat bertahan di atmosfer hingga ribuan tahun [2].

CH₄ menjadi GRK terpenting kedua setelah CO₂, terus meningkat dengan laju sebesar 8 ppb per tahun selama lima tahun terakhir [3] dan rata-rata masa hidup di atmosfer yaitu 11,8 tahun. Gas Metana (CH₄) adalah gas hidrokarbon paling sederhana yang merupakan salah satu gas rumah kaca dan dihasilkan dari sektor industri, agrikultur, serta aktivitas pengelolaan sampah. Sedangkan, gas Ozone (O₃) adalah salah satu molekul gas rumah kaca juga yang tersusun dari tiga atom oksigen yang secara alami terdapat di atmosfer bumi dan menyerap radiasi sinar ultraviolet pada panjang gelombang tertentu. CH₄ dapat berasal dari sumber alami seperti lahan basah, laut, persawahan, proses fermentasi oleh bakteri dan ternak, dan sumber

antropogenik seperti pemakaian bahan bakar fosil, pembakaran lahan dan biomassa, serta pengeboran gas alam. Metana menyebabkan pemanasan yang jauh lebih besar daripada karbon dioksida per satuan massa tetapi memiliki masa pakai yang jauh lebih pendek [4].

Penyebaran gas-gas tersebut dapat mempengaruhi lingkungan serta kesehatan makhluk hidup. Salah satunya adalah perubahan iklim yang terjadi akibat terjebakannya panas di atmosfer. Selain itu, gas-gas tersebut berkontribusi sebagai penyebab penyakit pernapasan yang dirasakan oleh manusia, diakibatkan oleh kabut asap dan polusi udara yang tersebar di lingkungan aktifitas manusia.

Studi sebelumnya oleh Andre Suwardana Adiwidya dengan judul “Analisis Distribusi Vertikal Konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ Secara Diurnal dan Musiman Berbasis IoT di Wilayah Bandung Raya” telah dilakukan pengukuran polusi udara dengan parameter PM_{2.5} dan CO₂ serta menambahkan stasiun ukur di Telkom University Landmark Tower (TULT). Terdapat lima stasiun ukur yang berada di Bandung Raya saat ini, yaitu di Gedung Kuliah Umum (GKU), gedung Deli, TULT, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Tamansari, dan BRIN Pasteur [5]. Namun, parameter yang telah diukur hanya PM_{2.5} dan CO₂. Selain itu, data yang diambil dari stasiun ukur masih dilakukan secara manual dan belum tervalidasi (*rawdata*). Pada pengujian yang dilakukan oleh Yusril Sinrang Sjamsu Djohan dengan judul “Validasi Kualitas Udara Berbasis Metode *Fault Detection*”, validasi data masih memakai bahasa *programming* Python dan harus *running* satu per satu sehingga memakan waktu yang lama. Pada sistem sebelumnya, telah dilakukan optimasi pada sistem prediksi konsentrasi PM_{2.5} di Cekungan Bandung Raya menggunakan metode *Artificial Neural Network Backpropagation* dengan pembentukan model jaringan backpropagation terbaik, performansi RMSE dan MAPE yang dihasilkan model jaringan terbaik GKU dan DELI yaitu 8,32 µg/m³ dan 37%, serta 12,49 µg/m³ dan 15% [6].

Melalui proyek *capstone design* ini, akan dilakukan penambahan parameter ukur untuk GRK yaitu O₃ dan CH₄ karena gas CH₄ merupakan penyumbang polusi udara terbesar kedua setelah CO₂. Data hasil pengukuran akan dikirim ke platform *Internet of Thing* (IoT) yaitu Thingspeak sehingga pengambilan data akan lebih mudah. Kemudian metode automasi menggunakan RPA untuk sistem validasi akan dikembangkan dalam sistem ini. Sehingga nantinya proses validasi akan lebih cepat dan tidak memakan waktu yang lama. Setelah itu data yang sudah tervalidasi akan diprediksi menggunakan metode *deep learning*. Untuk mempermudah kegiatan *maintenance* dan SOP maka disediakan sebuah *dashboard* yang berfungsi untuk memonitoring keadaan masing-masing stasiun alat ukur. Data yang sudah

divalidasi dan diprediksi kemudian akan divisualisasikan ke dalam sebuah *website* agar data hasil pengukuran dapat dimonitoring dengan mudah. Sistem yang akan kami kembangkan ini nantinya akan digunakan oleh *start-up* Biru Langit sebagai salah satu *start-up* yang bergerak di bidang pemantauan polusi udara. Oleh karena itu, diharapkan dengan dikembangkannya sistem ini dan adanya beberapa tambahan inovasi baru terhadap sistem, bisa membantu pemantauan kualitas udara di wilayah Bandung.

1.2 Informasi Pendukung Masalah

1.2.1 Baku Mutu Polutan

Baku mutu yang diperbolehkan dalam udara menurut Peraturan Pemerintah No. 22 tahun 2021 masing-masing dalam waktu pengukuran 24 jam dapat dilihat pada **Tabel 1.1** [7]. Dari data baku mutu, terlihat bahwa PM_{2.5} dianggap lebih berbahaya daripada beberapa polutan lain. Hal ini disebabkan oleh kenyataan bahwa semakin rendah batas nilai baku mutu yang ditetapkan, semakin ketat pula pembatasan konsentrasi PM_{2.5} yang harus diikuti [5]. Berdasarkan informasi pada Indeks Kualitas Udara IQAir, Indonesia menduduki peringkat ke-14 sebagai negara dengan kualitas buruk di dunia pada tahun 2023 [8]. Pencemaran udara merupakan salah satu akibat yang disebabkan oleh berbagai aktivitas antropogenik. Fenomena ini menjadi semakin menonjol di Indonesia karena negara ini memiliki tingkat kepadatan penduduk yang cukup tinggi. Akibatnya, terjadi peningkatan aktivitas manusia yang berkontribusi signifikan terhadap perburukan kualitas udara melalui emisi polutan.

Tabel 1. 1 Baku Mutu Konsentrasi Polutan (Sumber: PP Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 dan ISPU)

Parameter	Baku Mutu Konsentrasi Polutan dalam pengukuran ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Waktu Pengukuran (jam)
PM _{2.5}	50	24
SO ₂	75	24
NO ₂	65	24
Partikulat debu < 100 μm (TSP)	230	24
PM ₁₀	75	24
Timbal (Pb)	2	24

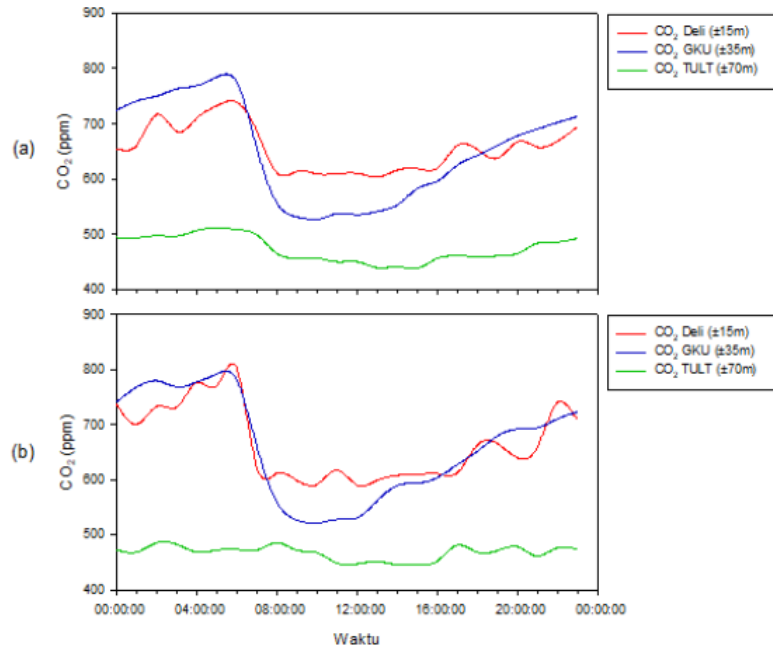
CH ₄	1,600	1 Tahun
O ₃	137	8
CO ₂	10 ⁶	8

Standar baku mutu untuk konsentrasi CO₂ di udara luar (outdoor) di Indonesia dapat berbeda-beda tergantung pada peraturan yang ditetapkan oleh otoritas lingkungan setempat. Secara umum, konsentrasi CO₂ di udara luar dianggap rendah dan tidak menyebabkan masalah kesehatan pada tingkat normal.

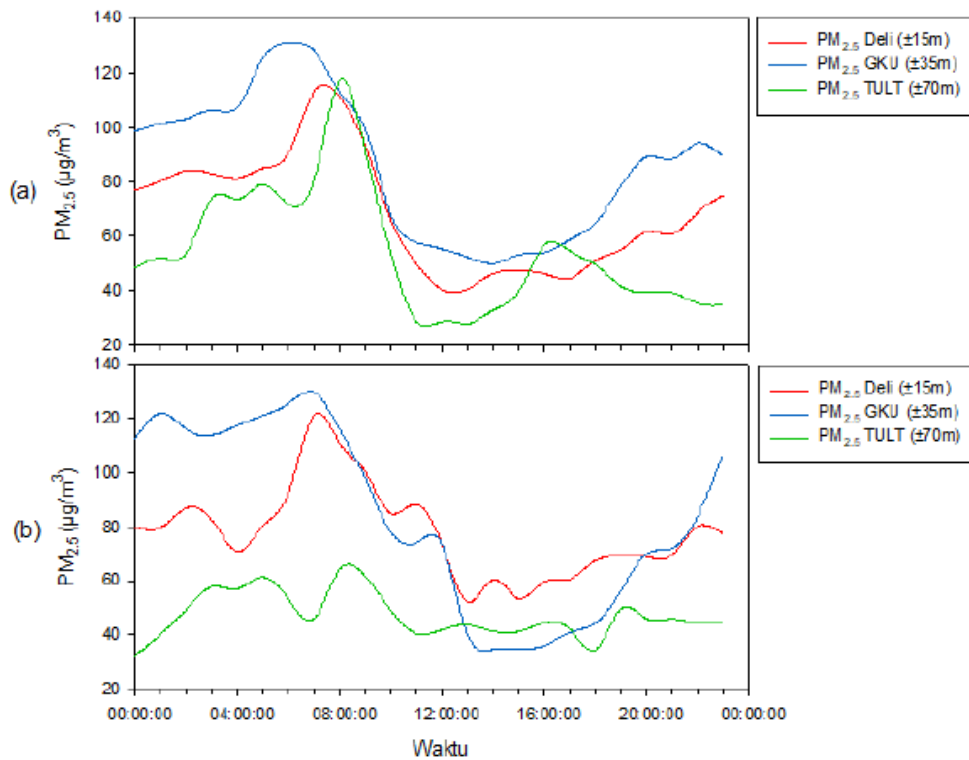
Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) merekomendasikan bahwa konsentrasi rata-rata harian CO₂ di udara luar sebaiknya berada di bawah 1000 ppm (parts per million) untuk menjaga kualitas udara yang baik. Hal ini bertujuan untuk memastikan lingkungan udara yang sehat dan aman bagi masyarakat.

1.2.2 Topografi Wilayah dan *Planetary Boundary Layer*

Wilayah perkotaan Bandung memiliki topologi wilayah berbentuk cekungan yang mempersulit distribusi bagi polusi udara. Hal ini dikarenakan dataran tinggi membuat angin yang berhembus berbalik kearah yang berlawanan, sehingga, polusi akan terperangkap di cekungan karena perputaran angin tersebut [9]. Distribusi polusi secara vertikal dapat juga terjadi karena ada perubahan ketinggian *Planetary Boundary Layer* (PBL) dan adanya lapisan inversi di daerah cekungan Bandung [10]. Distribusi pencemaran udara dapat berdampak bagi kebersihan dan kesehatan masyarakat, serta lingkungan wilayah *urban*.



Gambar 1. 1 Karakteristik Konsentrasi Rata-Rata CO₂ Diurnal pada Stasiun Ukur saat (a) Weekday dan (b) Weekend selama Waktu Pengukuran (Sumber: Analisis Distribusi Vertikal Konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ Diurnal dan Musiman Berbasis IoT di Wilayah Bandung Raya)



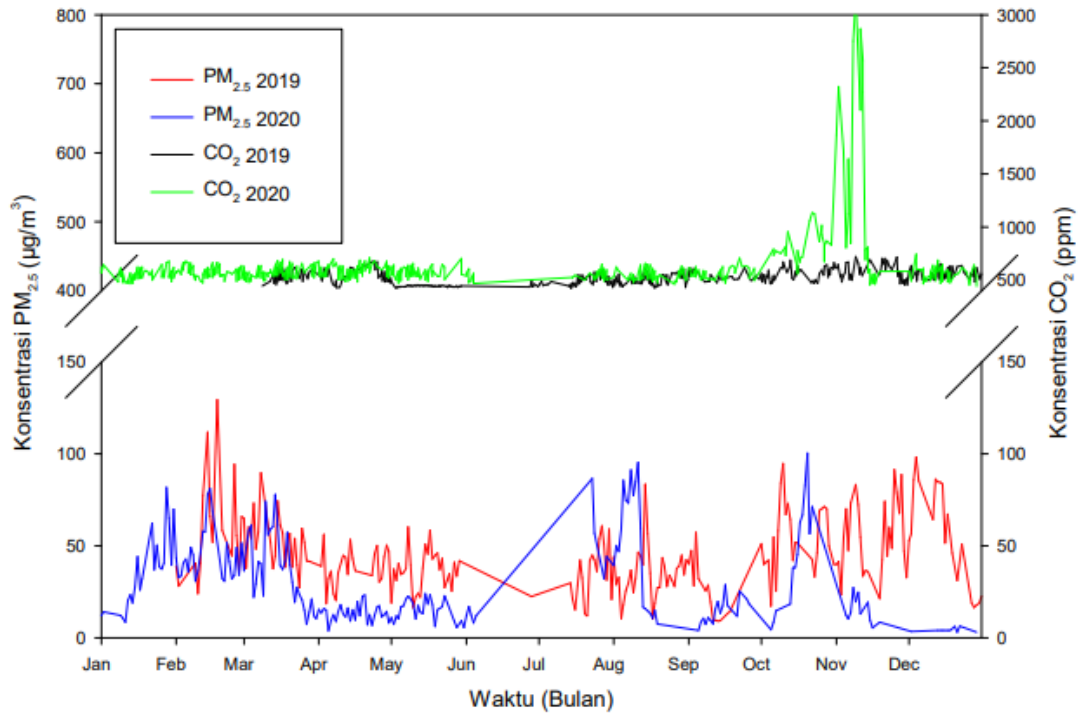
Gambar 1. 2 Karakteristik Konsentrasi Rata-Rata PM_{2.5} Diurnal pada Stasiun Ukur saat (a) Weekday dan (b) Weekend selama Waktu Pengukuran (Sumber: Analisis Distribusi Vertikal Konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ Diurnal dan Musiman Berbasis IoT di Wilayah Bandung Raya)

Stasiun ukur CO₂ dan PM_{2.5} ditempatkan diketinggian yang berbeda, yaitu pada Gedung Deli dengan ketinggian kurang lebih 15 meter, GKU dengan ketinggian ± 35 meter, dan TULT dengan ketinggian ± 70 meter. Pengukuran pada **Gambar 1.1** dan **Gambar 1.2** merupakan sampel data diurnal di *weekday* dan di *weekend* yang karakteristiknya dilihat dari setiap jam. **Gambar 1.1** menunjukkan pengukuran konsentrasi CO₂ pada stasiun ukur TULT, Deli, dan GKU. Pada **Gambar 1.1** stasiun ukur TULT mempunyai tren data yang relatif lebih stabil dengan konsentrasi terdapat pada rentang 450 hingga 500 ppm. Hal ini dapat disebabkan oleh ketinggian dari TULT menyebabkan paparan emisi CO₂ lebih rendah dibandingkan Gedung Deli dan GKU yang mempunyai ketinggian jauh lebih rendah dengan TULT, sehingga TULT terhindar dari paparan emisi CO₂ secara langsung yang disebabkan pergantian aktifitas lokal siang dan malam.

Konsentrasi PM_{2.5} saat *weekday* dan *weekend* pada **Gambar 1.2** terlihat bahwa pada saat *weekend* konsentrasi PM_{2.5} pada stasiun ukur Deli dan GKU cenderung lebih tinggi dari pada *weekday* [5]. Pada stasiun ukur TULT sumber polutan PM_{2.5} pada hari kerja menunjukkan konsentrasi yang tinggi. Hal ini dapat disebabkan oleh aktifitas pulang dan pergi kerja masyarakat ataupun aktifitas pembakaran sampah rutin. Selain itu, konsentrasi PM_{2.5} pada stasiun ukur TULT kurang dipengaruhi oleh penurunan PBL pada malam hari, berbeda dengan kedua stasiun lain yang menunjukkan peningkatan konsentrasi PM_{2.5} pada malam hari akibat penurunan PBL [5].

1.2.3 Hasil Sistem Pengukuran CO₂ dan PM_{2.5} Eksisting

Setelah mendapatkan data hasil pengukuran dari sensor, data harus divalidasi terlebih dahulu sehingga menghasilkan data yang valid. **Gambar 1.3** merupakan contoh pengukuran data yang sudah divalidasi. Data CO₂ yang sudah divalidasi meliputi data dengan *value NaN* yang sudah dibersihkan, *outlier* yang tidak berhasil lolos, data sesuai dengan rentang kemampuan sensor melakukan pengukuran dan data yang telah dirata-ratakan sehingga nilai data tidak terlalu bervariasi yang dapat menyebabkan lolosnya *outlier*.



Gambar 1. 3 Hasil Validasi Dataset PM_{2.5} dan CO₂ 2019 dan 2020 (Sumber : Validasi Data Kualitas Udara Berbasis Metode Fault Detection Pada Pengukuran Jangka Panjang)

Sistem validasi telah dirancang dengan Python di Google Colab, untuk memvalidasi raw data pengukuran mikrosensor PM_{2.5} SKU SEN:0177 dan CO₂ SKU SEN:0219, dan output-nya berupa dataset yang tervalidasi juga representatif dan memenuhi tujuan kelengkapan standar EPA [11]. Pada Dataset stasiun GKU rata-rata jumlah data PM_{2.5} dan CO₂ pada tahun 2019 yang valid adalah 89.9% dan 86.7%. Sedangkan pada tahun 2020 rata-rata persentase data PM_{2.5} dan CO₂ yang valid adalah 81% dan 86.8% [11].

Selain sistem validasi data, chamber ukur perlu dioptimalkan agar tidak terpengaruh oleh faktor eksternal. Lalu, *maintenance* merupakan salah satu upaya *preventif* agar alat dapat bekerja secara optimal. Data pada penelitian sebelumnya, diharapkan adanya *back-up data* sebagai upaya *preventive data loss*. Data cadangan dapat dijadikan data pengganti sementara jika pengukuran secara *real time* bermasalah.

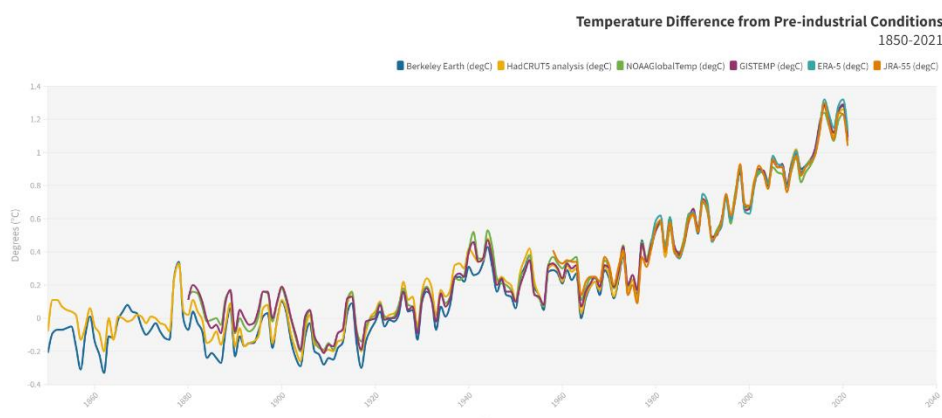
1.2.4 Sumber Emisi Gas Rumah Kaca

World Meteorological Organization (WMO) menyatakan, konsentrasi Gas Rumah Kaca terus meningkat dan emisi bahan bakar fosil sekarang berada di atas level *pre-pandemic* setelah mengalami penurunan sementara yang dikarenakan *lockdown* Covid-19 pada tahun 2020 dan 2021. Total emisi karbon dioksida antropogenik (CO₂) diperkirakan sebesar 38,0

gigaton CO₂ per tahun (GtCO₂ yr⁻¹) pada tahun 2020, dengan perkiraan awal 39,3 GtCO₂ yr⁻¹ pada tahun 2021 [12]. Data awal menunjukkan bahwa emisi CO₂ global pada tahun 2022 (Januari hingga Mei) adalah 1,2% di atas tingkat yang tercatat selama periode yang sama pada tahun 2019 (sebelum pandemi). Seperempat dari emisi Gas Rumah Kaca berasal dari perubahan penggunaan lahan terkait dengan perdagangan makanan antar negara, di mana lebih dari tiga perempatnya disebabkan oleh pembukaan lahan untuk pertanian, termasuk penggembalaan [13].



Gambar 1. 4 Key Messages GHGs dari WMO (Sumber : World Meteorological Organization United in Science 2022)



Gambar 1. 5 Grafik Perbedaan Temperatur dari Kondisi Pre-industrial (Sumber: World Meteorological Organization United in Science 2022)



Gambar 1. 6 Tujuan SDGs 2030 (Sumber : World Meteorological Organization United in Science 2022)

Sustainable Development Goals (SDGs) merupakan suatu rencana aksi global yang disepakati oleh para pemimpin dunia, termasuk Indonesia, guna mengakhiri kemiskinan dan kesenjangan, serta melindungi lingkungan. Pada **Gambar 1.6** SDGs berisi 17 tujuan dan 169 target yang diharapkan dapat dicapai pada tahun 2030 [12].

Gambar 1.4 menunjukkan dampak – dampak yang telah terjadi di dunia akibat emisi polutan terutama olah gas rumah kaca. Hasil emisi CO₂ lebih tinggi pada awal 2022 daripada saat awal tahun 2019 saat terjadinya *pre-pandemic*. Gas rumah kaca dari tahun ke tahun mengalami kenaikan secara kontinu, kenaikan gas rumah kaca menyebabkan terperangkapnya panas di bumi oleh polusi udara yang terjadi akibat aktifitas industri yang tertera pada **Gambar 1.5**.

Capstone design ini akan membantu mencapai tujuan ke-13 SDGs 2030 yaitu penanganan perubahan iklim. Dalam tujuan ini akan diambil aksi segera untuk memerangi perubahan iklim dan dampaknya salah satunya dengan memantau konsentrasi gas rumah kaca di daerah lokal. Sehingga dapat meningkatkan kesadaran masyarakat dalam pentingnya menjaga lingkungan agar terhindari dari polusi, salah satunya polusi udara.

1.3 Analisis Umum

1.3.1 Aspek Ekonomi

Permasalahan yang harus dihadapi ketika kualitas udara sangat buruk pada suatu wilayah adalah dampak negatifnya terhadap ekonomi dari masyarakat tersebut. Hal ini disebabkan ketika individu terjangkit penyakit yang disebabkan oleh polusi udara, maka individu tersebut akan dibatasi kegiatannya untuk bekerja dan aktivitas produktif lainnya. Tentu saja hal ini tidak hanya merugikan individu tersebut dalam hal pendapatannya, perusahaan dimana individu tersebut bekerja juga mengalami kerugian karena karyawannya harus beristirahat untuk pemulihan [14]. Kerugian ekonomi akibat polusi udara juga berdampak pada material bahan dan bangunan di lingkungan daerah dengan polusi udara yang tinggi. Polusi udara mengakibatkan terkikisnya detail ukiran pada bangunan sejarah seperti candi, prasasti, dan bangunan bersejarah lainnya, memudarnya warna sebuah bangunan, mengikis lapisan pelindung cat pada bangunan, dan lain sebagainya. Penyebabnya adalah pengendapan asam dan oksidasi dari polutan seperti ozon (O_3) [14]. Sehingga pemerintah atau komunitas yang mengurus gedung atau bangunan tersebut harus mengeluarkan biaya tambahan untuk perawatan gedung.

Permasalahan selanjutnya dalam aspek ekonomi adalah kurangnya fasilitas atau sarana untuk memantau kualitas udara yang ada di Indonesia. Tidak hanya di Indonesia, banyak negara dengan jumlah penduduk yang padat dan udara yang tercemar tidak memiliki infrastruktur yang memadai untuk memantau kualitas udara di daerah tersebut. Bahkan di negara berpenghasilan tinggi seperti Amerika Serikat, pemantauan kualitas udara masih relatif jarang untuk dilakukan [15]. Sehingga masyarakat sangat minim akses untuk mengetahui keadaan udara di tempat mereka tinggal. Penyebabnya adalah instrumen utama yang canggih dan tinggi dalam hal akurasi relatif mahal sekitar 1,000 – 10,000 USD [16].

Dalam menentukan kualitas udara pada daerah urban, diperlukan banyak titik yang menjadi tempat pengukuran untuk mengamati kandungan udara pada wilayah tersebut. Jika menggunakan instrumen utama pada setiap titik yang ditentukan, tentu saja membutuhkan biaya yang sangat besar. Penggunaan mikrosensor menjadi salah satu alternatif yang bisa dilakukan. Dengan menggunakan mikrosensor, kita dapat menekan biaya dalam memantau kualitas udara, serta tren data yang dihasilkan selaras dengan margin error.

1.3.2 Aspek Manufakturabilitas

Berdasarkan produk yang telah dibuat sebelumnya yaitu *chamber* ukur dengan rangkaian sensor-sensor kualitas udara didalamnya (CO₂ dan PM_{2.5}), pembuatan alat ini telah mengalami uji coba dan dinilai efisien dalam segi produksi. Rangkaian sensor yang menggunakan teknologi microsensor telah terbukti memberikan kualitas pengukuran yang handal dengan harga komponen yang terjangkau. Dalam pengembangan proyek, kami berencana untuk menambahkan komponen sensor baru, yakni sensor gas CH₄ dan O₃, serta mengganti kipas dengan pompa udara untuk meningkatkan keakuratan dan performa alat. Proses pengadaan komponen tambahan tersebut dapat dilakukan dengan mengimpor dari platform belanja online di luar negeri.

Selain itu, kami juga akan menggunakan tools untuk visualisasi data dengan menggunakan library *open source* untuk pembuatan dashboard dan website. Penggunaan tools *open source* ini memungkinkan kami untuk mengakses fitur terbaru yang akan membantu mengoptimalkan tampilan dan fungsionalitas dashboard dan website kami.

Dengan sistem validasi otomatis menggunakan robot dan metode prediksi data menggunakan deep learning juga, kami percaya bahwa alat ini dapat diproduksi dalam jumlah yang banyak dan bisa di tingkatkan untuk aplikasi di wilayah urban yang lebih luas. Fleksibilitas dalam penggunaan microsensor dan komponen yang mudah didapatkan juga merupakan nilai tambah dalam pengembangan manufaktur alat ini.

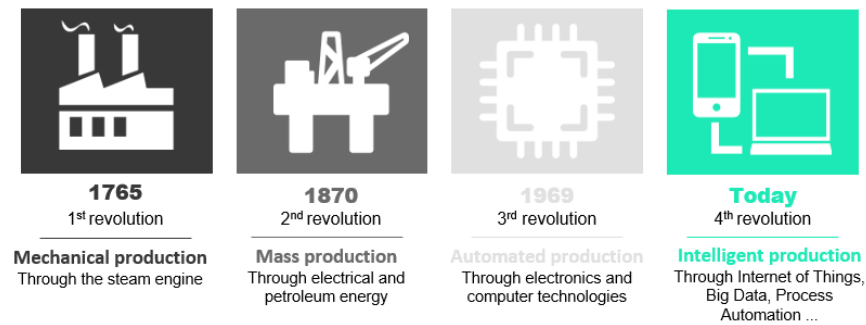
Dengan mempertimbangkan semua aspek ini, harapan bahwa produk kami memiliki potensi untuk dianggap *manufacturable* dan dapat dikembangkan dalam skala yang lebih besar untuk pemantauan kualitas udara yang lebih luas dan efektif di wilayah urban.

1.3.3 Aspek Keberlanjutan

Dalam perkembangan terkait *Internet of Things* (IoT) salah satu cara untuk memvalidasi sebuah data adalah dengan menggunakan bahasa pemrograman. Bahasa pemrograman yang terus berkembang akan mempengaruhi proses validasi data. Hal ini bertujuan agar proses dari validasi data bisa lebih efisien, akurat, dan efektif. Desain sebelumnya terkait validasi PM_{2.5} dan CO₂ menggunakan bahasa *python Google Collab* dinilai memakan waktu yang lama karena *user* melakukan tahap validasi secara berulang-ulang.

Revolusi Industri 4.0 atau *cyber physical system* pada **Gambar 1.7** merupakan era terjadinya kolaborasi antara teknologi siber dengan teknologi otomatisasi. Di mana tenaga kerja

manusia dapat digantikan oleh penggunaan mesin teknologi. Salah satu teknologi utama dalam revolusi industri 4.0 adalah *Internet of Things* [17].



Gambar 1. 7 Perkembangan Revolusi Industri

Internet of Things dan *Robotic Process Automation* dianggap sebagai pengungkit penting dalam modernisasi. IoT berfungsi untuk mengumpulkan berbagai informasi dan kemampuannya untuk berinteraksi secara fisik dengan *user*. Sementara, RPA memudahkan untuk mengotomatisasi proses berdasarkan data dan perintah dari sistem yang berbeda. Ketika kedua teknologi ini digabungkan, *user* akan semakin mudah untuk berinteraksi antara dunia fisik dan dunia digital [18].

RPA merupakan inovasi terbaru dari perkembangan sains dan teknologi, sehingga *output* yang dikeluarkan akan membantu *user* menjadi lebih efisien, efektif, akurat, dan tidak memakan waktu yang lama. Pada *capstone design* ini akan dibuat sebuah program dimana robot dapat memvalidasi data yang didapatkan dari *ThingSpeak*. Tentunya dengan adanya RPA dalam melakukan proses validasi data *user* tidak perlu melakukan pekerjaan yang *repetitive*.

Artificial Intelligence atau kecerdasan buatan merupakan bidang ilmu komputer yang dikhususkan untuk memecahkan masalah kognitif yang umumnya terkait dengan kecerdasan manusia, seperti pembelajaran, pemecahan masalah, dan pengenalan pola [19]. *Machine learning* dan *deep learning* merupakan hasil dari perkembangan AI. *Machine Learning* adalah kumpulan algoritma yang dapat mempelajari dari dan membuat prediksi berdasarkan data yang direkam, mengoptimalkan fungsi utilitas yang diberikan dalam ketidakpastian, mengekstrak struktur data yang tersembunyi, dan menggolongkan data menjadi deskripsi singkat [19]. *Machine learning* semakin banyak digunakan di banyak bidang salah satunya untuk prediksi konsentrasi gas [20].

Deep learning merupakan bagian dari *machine learning* yang proses pembelajarannya dilakukan oleh mesin untuk meniru kerja jaringan otak manusia (*neural network*). Namun,

teknik yang digunakan berbeda dari teknik *machine learning* tradisional karena *deep learning* secara otomatis melakukan representasi dari data seperti gambar, video atau teks tanpa memperkenalkan aturan kode atau pengetahuan domain manusia [21]. Pada dasarnya, ada tiga jenis *neural network* yang membentuk sebagian besar model *deep learning* yaitu *Artificial Neural Networks (ANN)*, *Convolutional Neural Networks (CNN)*, dan *Recurrent Neural Networks (RNN)* [22]. *Neural network* ini mencoba untuk menyimulasikan perilaku otak manusia untuk belajar dari sejumlah data yang besar. Walaupun *neural network* dengan satu *layer* masih bisa membuat perkiraan-perkiraan, *layer* tambahan bisa membantu mengoptimasi dan menyempurnakan akurasi [23]. Algoritma *Long Short Term Memory (LSTM)* dan *Gated Recurrent Unit (GRU)* merupakan salah satu jenis arsitektur dari *Recurrent Neural Network (RNN)* yang biasa digunakan pada masalah-masalah yang berkaitan dengan *deep learning* [24], terutama dalam prediksi deret waktu seperti yang dilakukan oleh Zhang T, dkk dengan judul “*Research on Gas Concentration Prediction Models Based on LSTM Multidimensional Time Series*” dan Meng X, dkk dengan judul “*Methane Concentration Prediction Method Based on Deep Learning and Classical Time Series Analysis*” menunjukkan bahwa nilai rata-rata MSE dapat dikurangi [25] [26].

Data yang divalidasi dapat berupa beragam format dengan laju pertumbuhan yang cepat dan dinamis. Oleh karena itu, diperlukan algoritma atau model yang mumpuni untuk memahami dan menggali pengetahuan pada set data yang besar tersebut beserta rancangan modelnya yang secara otomatis mempunyai kemampuan memprediksi atau mendeteksi. *Deep Learning* dengan kapasitasnya yang besar serta hubungan korelasi antar neuron yang sangat banyak diharapkan mampu menjawab tantangan tersebut terutama dalam kasus ini yaitu memprediksi konsentrasi CO₂, CH₄, dan O₃ berdasarkan deret waktu. Dalam aspek keberlanjutan, sebagai kelebihan dari *deep learning*, akurasi akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah *raw data*. Sebaliknya, kelemahan dari *Deep Learning* yaitu jika hanya ada sedikit data yang diuji, maka akan sulit untuk menyelaraskan hasil identifikasi. Sehingga, sistem yang dikembangkan pada *capstone design* dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama.

1.3.4 Aspek Lingkungan dan Kesehatan

Kualitas udara yang buruk di kota-kota terpadat di Indonesia semakin membahayakan penduduk. Parameter seperti PM_{2.5}, CO₂, CH₄, O₃, dan NO_x dapat menyebabkan efek samping jangka pendek dan panjang pada kesehatan manusia, yang bahkan lebih berbahaya bagi anak-

anak. Baku mutu yang diperbolehkan dalam udara menurut Peraturan Pemerintah No. 22 tahun 2021 masing-masing dalam waktu pengukuran 24 jam dapat dilihat pada **Tabel 1.1**. Jika konsentrasi polutan di atas nilai baku mutu, maka termasuk kategori berbahaya atau tidak aman sehingga nilai konsentrasi harus dibatasi. Bandung menjadi salah satu kota paling berpolusi di Indonesia tahun 2021 dengan tingkat konsentrasi rata-rata PM_{2.5} sebesar 33,4 µg/m³ versi IQAir 2021. Risiko jangka pendek akibat pencemaran udara pada manusia yaitu iritasi mata dan tenggorokan. Sedangkan, risiko jangka panjang yang ditimbulkan dari paparan polusi udara dikaitkan dengan berbagai efek kesehatan manusia seperti gangguan fungsi paru, penyakit pernafasan, kanker, kardiovaskular, aterosklerosis, bahkan kematian dini [27]. Pencemaran udara juga berbahaya bagi tumbuhan seperti menyebabkan kerusakan pada lilin kutikula, kemudian masuk ke daun melalui stomata yang dapat menyebabkan terganggunya keseimbangan air daun atau seluruh tanaman sehingga berdampak pada keberlangsungan hidup tanaman itu sendiri [28]. Selain itu, polusi udara juga berdampak buruk bagi hewan seperti menyebabkan penyakit kardiovaskular dan gangguan neurologis [29], dan ekosistem yang akhirnya dapat menyebabkan perubahan iklim [30]. Kondisi ini dapat menghambat pencapaian SDGs 2030. Oleh karena itu, prediksi konsentrasi polutan udara di wilayah urban perlu dilakukan karena dampak polusi yang ditimbulkan oleh manusia, ekologi, dan ekonomi merupakan investasi yang berguna di tingkat individu dan masyarakat.

1.3.5 Aspek Sosial dan Budaya

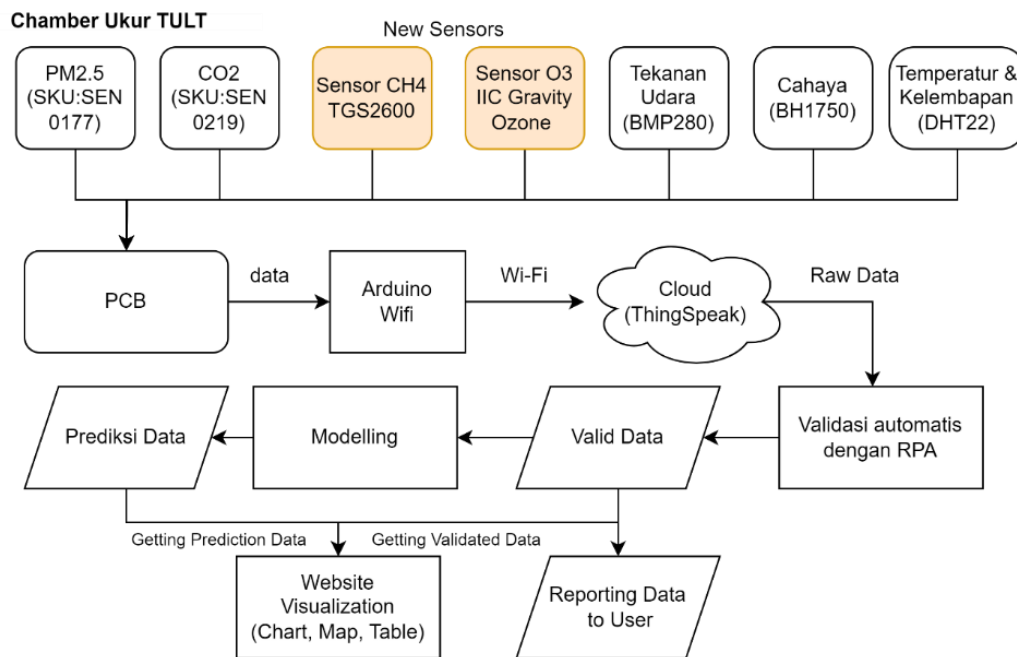
Berdasarkan data dari IQAir, konsentrasi polutan udara terus meningkat per 29 Oktober 2022 dengan konsentrasi rata-rata PM_{2.5} di Bandung sebesar 72 µg/m³ [31]. Dengan adanya pemantauan kualitas udara dan prediksi konsentrasi gas rumah kaca seperti CO₂, CH₄, O₃ yang divisualisasikan melalui *website*, diharapkan mampu memberikan dorongan bagi masyarakat untuk menerapkan gaya hidup yang lebih sehat. Misalnya, masyarakat dapat mengurangi penggunaan kendaraan bermotor dan beralih ke transportasi publik, mengambil tindakan perlindungan dari paparan polusi udara, dan bahkan pindah ke kota dengan kualitas udara yang lebih baik [32]. Selain itu, masyarakat juga diharapkan lebih peduli untuk tidak melakukan kegiatan yang dapat menyumbang peningkatan produksi zat-zat penyebab polusi udara, seperti pembakaran bahan bakar yang digunakan pada transportasi, industri, pembangkit listrik dan lain-lain.

1.4 Kebutuhan yang Harus Dipenuhi

Tabel 1. 2 Tabel Kebutuhan

No	Komponen dan Aplikasi	Fungsi	Jenis	Jumlah
1.	Aplikasi RPA	Validasi data	<i>Software</i>	1
2.	Google Collaboratory	Membuat program untuk prediksi	<i>Software</i>	1
3.	Pompa udara	Mengatur udara yang masuk ke dalam chamber ukur	<i>Hardware</i>	1
4.	Sensor O ₃	Mengukur konsentrasi ozon	<i>Hardware</i>	1
5.	Sensor CH ₄	Mengukur konsentrasi metana	<i>Hardware</i>	1
6.	Mikrokontroler	Pengendali sistem	<i>Hardware</i>	5
7.	PCB	Menghubungkan komponen	<i>Hardware</i>	5
8.	Wi-Fi <i>portable</i>	Transmitter	<i>Hardware</i>	5
9.	Dokumen SOP	Pedoman dalam menggunakan sistem	Dokumen	1
10.	Dashboard Outdoor Air Quality	Menampilkan kinerja sensor dan sistem produk	<i>Software</i>	1
11.	Website Biru Langit	Memvisualisasikan data hasil pengukuran yang telah tervalidasi.	Software	1
12.	<i>Chamber</i> Ukur	Sebagai ruang pengukuran kualitas udara yang didalamnya telah terdapat gabungan sensor-sensor.	<i>Hardware</i>	5

1.5 Solusi Sistem yang Diusulkan



Gambar 1. 8 Diagram Blok Solusi Chamber Ukur TULT

Pada **Gambar 1.8** diatas merupakan rancangan bagaimana solusi sistem yang diusulkan akan bekerja. Data yang sudah dibaca oleh sensor akan diproses melalui mikrokontroler. Mikrokontroler akan membantu data tersebut agar dapat tersimpan dalam *cloud ThingSpeak*. Data yang tersimpan dalam *cloud* merupakan *raw data* yang harus tervalidasi. Robot akan mengambil *raw data* untuk divalidasi secara otomatis dan dikirimkan ke *user*. Setelah *user* mendapatkan *validated data*, proses selanjutnya adalah *modelling* dan *prediction* menggunakan *deep learning*. Data pengukuran dan data hasil prediksi kemudian akan divisualisasikan dalam bentuk *chart*, *map*, dan *table* melalui website yang *responsive*, dinamis, dan ramah pengguna sehingga dapat diamati oleh masyarakat luas. *Maintenance* akan dilakukan pada bagian sensor, PCB, serta komponen yang ada pada chamber dan stasiun ukur dengan cara *breakdown maintenance*, *preventive maintenance*, atau *corrective maintenance* sesuai keadaan yang dibutuhkan *chamber*. Kemudian seluruh komponen sistem akan dipantau kinerjanya melalui dashboard. Pengadaan *Standard Operational Procedure* untuk penggunaan alat dimulai dari preparasi, kalibrasi, pengukuran polusi udara sebelum dan sesudah pada stasiun dituliskan secara runtut agar alat ukur dapat digunakan secara baik dan benar oleh pemangku kepentingan kedepannya. Sebagai salah satu solusi yang ditawarkan oleh *capstone design* ini, pihak BRIN Pasteur dan BRIN Taman Sari bersedia untuk bekerja sama sebagai penyedia tempat salah satu stasiun ukur.

1.5.1 Karakteristik Produk

1.5.1.1 Optimalisasi Chamber Ukur

Chamber ukur merupakan sebuah kotak berupa ruang pengukuran kualitas udara yang didalamnya telah terdapat gabungan sensor-sensor untuk mengukur kualitas udara. Udara di dalam *chamber* bercampur dengan udara yang berasal dari luar stasiun yang dikendalikan melalui pompa udara yang dapat diatur *flow-ratenya*. Suhu dan RH dalam *chamber* juga harus dapat dikontrol karena dapat memengaruhi kinerja sensor di dalam *chamber* dalam mengukur kualitas udara, seperti pada sensor PM_{2.5} yang membutuhkan RH di sekitar 40-60% agar hasil yang diperoleh sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Dengan begitu dibutuhkan sensor suhu dan kelembapan serta pemanas untuk mengontrol suhu dan RH di dalam *chamber*. Sensor suhu yang digunakan adalah sensor DHT22 dan pemanasnya diaplikasikan dengan resistor. Pengontrolan temperatur yang diinginkan diatur pada $25 \pm 1^\circ\text{C}$ sesuai dengan kondisi standar. Pada produk sebelumnya *chamber* telah terdapat sensor PM_{2.5} dan CO₂. Sensor PM_{2.5} yang digunakan adalah SKU:SEN0177, sedangkan sensor CO₂ yang digunakan adalah Sensor SKU: SEN0219. Selanjutnya *chamber* akan dilengkapi dengan sensor CH₄ dan O₃ seperti yang telah dijelaskan pada poin sebelumnya. Pengendalian pompa udara dan sensor-sensor tersebut dihubungkan dengan mikrokontroler.

1.5.1.2 Penambahan Sensor Gas CH₄ dan O₃

Pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Andre Suwardana Adiwidya dengan judul “Analisis Distribusi Vertikal Konsentrasi PM_{2.5} dan CO₂ Secara Diurnal dan Musiman Berbasis IoT di Wilayah Bandung Raya” telah dilakukan pengukuran polusi udara dengan parameter PM_{2.5} dan CO₂ [5]. Dalam penelitian ini, kami menambahkan beberapa opsi sensor gas CH₄ dan O₃ sebagai parameter tambahan gas rumah kaca. Sebagai dasar pemilihan sensor CH₄, digunakan referensi baku mutu udara gas CH₄ dari *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) dan *World Meteorological Organization* (WMO) yaitu 1.8 ppm. Dari referensi tersebut, ada empat opsi pilihan sensor CH₄ yang bisa digunakan, sebagai berikut.

1. TGS2600 adalah produk dari Figaro. Produk ini memiliki rentang pengukuran konsentrasi dari 1-30 ppm, pada temperatur $20 \pm 2^\circ\text{C}$, dan kelembapan relatif antara $65 \pm 5\%$ RH. Harga dari TGS2600 ini adalah \$9.80.

2. MQ4 adalah produk dari DFRobot. MQ4 memiliki rentang pengukuran konsentrasi dari 200-10000ppm dengan temperatur 10KΩ- 60KΩ dan seharga \$6.90.
3. MH-440D NDIR Infrared CH₄ adalah produk dari Winsen. Produk ini memiliki rentang pengukuran konsentrasi gasnya berada di 0-5% vol, 0-100% vol pada temperatur -40°C to 70°C dan seharga \$130.
4. *Microelectromechanical system* (MEMS) adalah produk dari NevadaNano. Produk ini memiliki rentang temperatur -40°C hingga 75°C dan kelembapan relatif dari 0% hingga 99% dan rentang harga dari \$95 - \$200.

Terkait dengan sensor O₃, baku mutu udara yang dijadikan referensi dalam penelitian ini adalah standar dari *United States Environmental Protection Agency* (EPA) adalah 71 ppb serta Peraturan Pemerintah Republik Indonesia nomor 22 tahun 2021 tentang penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup menjelaskan bahwa baku mutu gas O₃ selama 8 jam rata-rata adalah 100 µg/m³. Selain itu, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika juga menjelaskan standar baku mutu konsentrasi ozon permukaan di bulan Agustus 2022 adalah sebesar 120 ppb. Berdasarkan referensi tersebut, ada dua opsi sensor gas O₃ sebagai berikut.

1. Sensor Gravity: IIC Ozone

Sensor ini memiliki rentang konsentrasi antar 0-10ppm dengan temperature -20-50 °C dan kelembapan relatif antara 15-95%. Resolusi sensor inipun bisa mencapai 10ppb dan dapat kompatibel dengan Arduino WiFi sehingga dapat tersambung ke platform IoT (*Internet of Things*). Harga sensor ini senilai \$50 atau setara dengan Rp 780.000.

2. Produk kedua berasal dari Winsen, yakni MQ-131. Sensor MQ131 ini memiliki rentang konsentrasi dari 0-1000ppm dengan temperatur 20°C±2°C dan kelembapan relatif dari 55%±5%. Sensor ini banyak digunakan pada alarm konsentrasi ozon domestic, alarm konsentrasi ozon industri dan detektor konsentrasi *ozone portable*.

1.5.1.1 *Robotic Process Automation* (RPA)

Robotic Process Automation (RPA) adalah teknologi yang memungkinkan perangkat lunak computer meniru tindakan yang biasa dilakukan manusia yang berinteraksi dengan sistem digital untuk melakukan tugas atau proses yang berulang. Pada *Capstone Design* ini, RPA digunakan agar *rawdata* dapat divalidasi secara otomatis, sehingga tidak memakan waktu yang lama dan dapat mengurangi *human error*. Pembuatan robot perangkat lunak memerlukan sebuah aplikasi yang mendukung automasi [33]. **Tabel 1.3** adalah beberapa aplikasi yang mendukung pembuatan proses *robot automation*.

Tabel 1.3 Top 10 Software RPA berdasarkan Company Size (Sumber : <https://www.gartner.com/reviews/market/robotic-process-automation-software>)

No	Name	Deskripsi	Berbayar	Rating (x/5)	Reviewers
1.	UiPath Platform	UiPath adalah platform otomatisasi proses robot untuk otomatisasi skala tinggi <i>end-to-end</i> . Perangkat lunak UiPath menawarkan solusi bagi perusahaan untuk mengotomatiskan tugas kantor yang berulang untuk transformasi bisnis yang cepat. Ini mengubah tugas membosankan menjadi proses otomatisasi menggunakan beberapa alat.	Gratis untuk komunitas	4.5	1919
2.	Automation 360	Automation 360 adalah platform otomatisasi cerdas berbasis web murni berbasis cloud yang memungkinkan perusahaan untuk mengotomatiskan proses bisnis <i>front office</i> dan <i>back office</i>	Berbayar	4.5	1443
3.	Blue Prism Intelligent Automation Platform	Otomatisasi cerdas yang menggabungkan AI dan <i>machine learning</i> (ML) untuk memperkerjakan pekerja digital (robot).	Berbayar	4.4	633
4.	Datamatic TruBot	Perangkat lunak Datamatics TruBot RPA adalah produk tenaga kerja digital yang memungkinkan otomatisasi tanpa pengawasan dan dihadiri untuk berbagai tugas dan proses. Dengan integrasi kemampuan kognitif, seperti kecerdasan buatan, pembelajaran mesin, dan pemrosesan bahasa alami, tenaga kerja digital memperoleh	Berbayar	4.4	203

		kemampuan penalaran untuk menangani transaksi yang kompleks dan memberikan otomatisasi cerdas.			
5.	Automation Edge	AutomationEdge berisi desainer alur kerja <i>drag-and-drop</i> yang memungkinkan untuk mengotomatisasi proses dengan mudah	Gratis untuk <i>starter pack</i> dengan akun organisasi	4.3	132
6.	Power Automate by Microsoft	Power Automate adalah layanan yang membantu membuat alur kerja otomatis antara aplikasi dan Layanan favorit untuk menyinkronkan file, mendapatkan notifikasi, mengumpulkan data, dan banyak lagi.	Berbayar	4.3	124
7.	Appian RPA	Teknologi cloud-native untuk otomatisasi tugas robot yang meningkatkan efisiensi, mengurangi kesalahan, dan menurunkan biaya. Appian RPA adalah bagian dari otomatisasi <i>full-stack</i> Appian, yang menggabungkan RPA, alur kerja, aturan keputusan, AI, dan manajemen kasus	Gratis untuk edisi komunitas	4.5	101
8.	WorkFusion Intelligent Automation Cloud	<i>Intelligent Automation Cloud</i> dari WorkFusion adalah alat yang memungkinkan individu dan kegiatan bisnis untuk mengotomatiskan proses yang membosankan, meningkatkan produktivitas, dan menghemat waktu	Gratis	4.2	79
9.	IBM Robotic Process Automation	IBM Robotic Process Automation adalah teknologi otomatisasi proses bisnis yang menggunakan <i>bot</i> perangkat lunak yang hadir atau tidak	<i>Berbayar</i>	4.4	77

		dijaga untuk mengotomatiskan tugas-tugas kantor <i>back-end</i> yang berulang.			
10.	Kofax RPA	Kofax RPA memungkinkan untuk menyebarkan, dan mengelola robot perangkat lunak otomatis yang berkomunikasi dua arah di seluruh sistem internal perusahaan, situs web, portal web, aplikasi desktop, dan sumber data lainnya, tanpa memerlukan API dan pengkodean integrasi yang rumit.	<i>Berbayar</i>	4.4	68

Berdasarkan *list tools* RPA yang telah disebutkan, *tools* yang cocok dalam proses validasi dan *reporting data* adalah *tools* yang dapat diintegrasikan dengan *Microsoft Office* dan *browser*.

1.5.1.2 Prediksi Konsentrasi Polutan Menggunakan *Deep Learning*

Deep learning dapat dikatakan sebagai pembelajaran umum yang dapat menyelesaikan hampir berbagai macam masalah di berbagai bidang, salah satunya yaitu untuk prediksi data berbasis deret waktu. Berdasarkan pola data, deret waktu dibedakan menjadi dua, yaitu deret waktu linier dan deret waktu nonlinier. Salah satu metode yang sangat fleksibel dalam peramalan data deret waktu yang mengandung pola linier maupun nonlinier adalah *neural network*.

Neural network bekerja dengan mengadopsi cara kerja syaraf biologis yang terdiri dari neuron sebagai pemrosesan *input*, kemudian nilai *input* yang ada akan dijumlahkan oleh suatu fungsi perambatan (*summing function*), dan memberikan *output* berdasarkan bobot yang ada. Suatu *neural network* memerlukan arsitektur yang tepat untuk mendapatkan ramalan yang menghasilkan kesalahan minimum. Arsitektur di dalam *neural network* meliputi jumlah *input* dan variabel apa saja yang digunakan, jumlah *hidden layer*, jumlah neuron pada setiap *hidden layer*, dan fungsi aktivasi.

Ada banyak model *neural network*, salah satunya adalah *Recurrent Neural Network*. *Recurrent Neural Network* (RNN) merupakan salah satu metode *deep learning* dengan bentuk arsitektur *Artificial Neural Networks* (ANN) yang dirancang khusus untuk memproses data

yang bersambung berurutan (*sequential data*). Perbedaan RNN dengan ANN yaitu, RNN tidak membuang informasi dari masa lalu dalam proses pembelajarannya. RNN mampu menyimpan memori (*feedback loop*) yang memungkinkan untuk mengenali pola data dengan baik, kemudian menggunakannya untuk membuat prediksi yang akurat. Cara yang dilakukan RNN untuk dapat menyimpan informasi dari masa lalu adalah dengan melakukan *looping* di dalam arsitekturnya, yang secara otomatis membuat informasi dari masa lalu tetap tersimpan. *Recurrent Neural Network* (RNN) biasanya digunakan untuk menyelesaikan tugas yang terkait dengan data *time series*. Metode *time series* adalah metode peramalan dengan menggunakan analisa pola hubungan antara variabel yang akan dipekirakan dengan variabel waktu, misalnya ramalan cuaca.

Namun, pada penerapannya RNN sering mengalami *vanishing gradient*. Pada pengembangan RNN, model prediksi berbasis *time series* dan *long-term memory* yang paling populer dan dapat digunakan sebagai solusi adalah LSTM dan GRU. Kelebihan GRU adalah proses komputasi yang lebih sederhana daripada LSTM, tetapi mempunyai akurasi yang setara dan cukup efektif dalam hal mengurangi permasalahan gradien yang hilang yang sering terjadi pada RNN.

1.5.1.3 Monitoring dan Visualisasi Data Berbasis Website

Website didefinisikan sebagai sebuah halaman yang memuat berbagai informasi yang dapat diakses oleh siapapun dan dimanapun selama terkoneksi dengan jaringan internet. Umumnya *website* di visualisasikan dengan berbagai komponen yang tidak hanya terdiri atas text, melainkan gambar, animasi, suara, bahkan video sehingga membuat sebuah *website* menarik untuk dikunjungi. Hal tersebut menjadikan website sebagai sarana yang tepat untuk melakukan monitoring dan visualisasi data hasil pengukuran serta prediksi berbagai polutan di udara untuk dapat diamati oleh masyarakat luas. Dengan adanya *website* yang memiliki tampilan menarik, dinamis, responsif, serta mudah untuk digunakan oleh *user* tanpa mengurangi esensi informasi yang akan diberikan, dapat menjadi sebuah keunggulan dalam mengedukasi dan mendorong masyarakat mengenai kondisi kualitas udara sekitar. Dengan menggunakan media *website*, masyarakat dapat memperoleh informasi mengenai data hasil pengukuran berbagai parameter polutan udara yang telah tervalidasi serta hasil prediksi yang divisualisasikan menggunakan *chart*, *table*, dan *map* yang memudahkan pengguna untuk memperoleh intisari dari informasi yang disediakan. Pemilihan warna yang padu, bentuk yang unik, serta tampilan yang minimalis akan memastikan website mampu memikat dan memberikan informasi yang mudah dipahami oleh masyarakat.

Dalam mengembangkan website terdapat tiga bahasa pemrograman yang menjadi dasar pembuatan website yaitu *HyperText Markup Language* (HTML), *Cascading Style Sheets* (CSS), dan Javascript. Selain bahasa tersebut, digunakan juga berbagai *framework* yang dapat membantu proses pembangunan website. *Framework* merupakan sebuah kerangka kerja yang umum digunakan untuk mempermudah pengembangan website. Dengan adanya penggunaan *framework*, kode dari program yang dibuat akan menjadi lebih rapih dan terstruktur sehingga dapat mempercepat pembuatan website serta memudahkan pemeliharaan dan perawatan website. *Framework* yang digunakan untuk mengembangkan *website* ini adalah React Js, Material UI, Chart Js, dan Leaflet Js.

1.5.1.4 Maintenance Alat Ukur Serta Pengadaan Standard Operating Procedure

Maintenance atau pemeliharaan adalah suatu kegiatan untuk menjaga peralatan dan fasilitas lainnya dengan mengadakan perbaikan dan penggantian yang diperlukan agar sistem dapat berjalan lancar. Tujuan dari *maintenance* adalah agar sistem alat ukur bisa bekerja sesuai dengan kondisi yang dibutuhkan. *Maintenance* pada sistem ini akan dilakukan dengan tiga cara sesuai dengan kondisi yang dibutuhkan oleh alat ukur yaitu *breakdown maintenance*, *corrective maintenance*, dan *preventive maintenance*. *Breakdown* dan *corrective maintenance* termasuk kedalam pemeliharaan perbaikan atau dilakukan setelah terjadi kerusakan pada sistem. Sementara *preventive maintenance* tergolong kepada pemeliharaan pencegahan yang akan dijadwalkan dengan cara pemantauan atau monitoring terhadap sistem. Untuk memonitoring kegiatan *maintenance*, maka diperlukan sebuah *dashboard* agar mempermudah dalam mengetahui tindakan *maintenance* yang akan diambil dikarenakan letak stasiun ukur yang terpisah-pisah. Terdapat berbagai macam aplikasi yang bisa digunakan untuk merancang dashboard sistem ini, diantaranya Google Analytics, Google Data Studio, Tableau, Power BI, Plotly, dan masih banyak lagi.

Selanjutnya semua proses kegiatan dalam membuat sistem ini dimulai dari preparasi alat sampai dengan proses validasi data, prediksi data, visualisasi data dan *maintenance* sistem maka diperlukan serangkaian prosedur atau yang dikenal dengan istilah *Standard Operating Procedure* (SOP). SOP dibutuhkan oleh pemangku kepentingan yang akan menggunakan alat ukur ini kedepannya agar pengoperasian alat dapat dilaksanakan sesuai tahap-tahap yang sudah disusun dalam SOP.

1.5.2 Skenario Penggunaan

1.5.2.1 Rancang Bangun Alat Pengukuran Kualitas Udara

Sebagaimana dijelaskan pada gambar 3.1 Diagram Blok Solusi Chamber Ukur TULT, perancangan alat pengukuran kualitas udara dilakukan dengan penambahan sensor pada sistem eksisting, sebagai berikut:

- 1) Penambahan sensor CH₄ sebanyak 3 unit.
- 2) Penambahan sensor O₃ sebanyak 3 unit
- 3) Penambahan 1 unit *microcontroller* baru.

Alat pengukuran kualitas udara ini dirancang terintegrasi dengan sistem eksisting, karenanya proses pembuatannya dilakukan melalui tahapan sebagai berikut:

- 1) Pengadaan sensor CH₄ dan O₃.
- 2) Pengadaan *microcontroller*.
- 3) Pembuatan program agar sensor dapat mendeteksi konsentrasi CH₄ dan O₃.
- 4) Pembuatan PCB baru untuk mendukung sensor CH₄ dan O₃.
- 5) Modifikasi program baru sesuai dengan parameter tambahan.
- 6) Uji coba alat di lab.
- 7) Integrasi dengan sistem eksisting.
- 8) Pemasangan alat di stasiun ukur.

Mekanisme kerja alat dijelaskan sebagai berikut;

- 1) *Microcontroller* yang telah dipasangkan *multi sensor* akan dipasang di stasiun ukur TULT (Telkom University Landmark Tower);
- 2) Sensor-sensor akan mendeteksi sesuai dengan parameter gas dan meteorologinya.
- 3) Data yang telah didapat dari sensor akan dikirim dan di simpan via platform IoT (*Internet of Things*).
- 4) Data yang telah disimpan dalam platform IoT berupa *cloud* dapat diambil untuk diproses dan divalidasi nantinya.

1.5.2.2 Validasi Data Menggunakan RPA

Hal pertama yang akan dilakukan robot adalah mengambil *rawdata* PM_{2.5}, CO₂, CH₄, dan O₃ dari *platform IoT*. Setelah *rawdata* berhasil diambil, robot akan melakukan *running program google colab* agar *raw data* dapat di validasi oleh sistem validasi. Sistem validasi untuk parameter O₃ dan CH₄ akan menggunakan *python* karena proses validasi RPA tidak seunggul validasi menggunakan *python*. Parameter tersebut dapat divalidasi sesuai dengan *fault-fault*

memungkinkan. RPA hanya membantu untuk mengotomatiskan sistem validasi yang sudah dibuat yaitu sistem validasi PM_{2.5}, CO₂, CH₄, dan O₃.

Data yang sudah tervalidasi akan di-*report* ke *user* melalui *platform IoT* atau dapat melalui *driveS*. Data yang di-*report* adalah data yang sudah disortir berdasarkan rata – rata (*average data*) setiap parameter dan dibagi secara *daily*, *weekly*, *monthly*, dan *annual*.

1.5.2.3 Prediksi Konsentrasi Polutan Menggunakan *Deep Learning*

Setelah data divalidasi menggunakan RPA, langkah selanjutnya yaitu data konsentrasi CO₂, CH₄, dan O₃ pengukuran akan dicek kembali apakah ada nilai yang hilang pada setiap kolom terutama kolom tanggal konsentrasi gas terukur. Hal ini karena prediksi yang nantinya dilakukan berbasis *time series*, yang artinya akan dicari pola hubungan antar variabel terhadap waktu. Data pengukuran kemudian akan dinormalisasi dengan teknik *scaling*. Selanjutnya, dilakukan *split data* menjadi *training dataset* dan *testing dataset*. Pada *training*, dibangun model prediksi konsentrasi polutan menggunakan metode yang dipilih, kemudian menghitung nilai *loss model* dan errornya. Hasil yang didapat akan disesuaikan dengan *weight* dan *bias* dari *layer* ke *layer*. Jika nilai keluaran tidak sesuai dengan kriteria, maka akan dihitung Kembali dengan melakukan *hyperparameter* atau tuning. Namun, jika keluaran sesuai dengan kriteria, langkah selanjutnya yaitu menentukan model yang optimal untuk dilakukan *testing dataset*. Pada proses *testing dataset*, prediksi dilakukan dengan model optimal, kemudian menghitung *prediction model evaluation criteria* sehingga didapatkan keluaran berupa nilai MAE, MSE, RMSE, dan R² untuk konsentrasi gas rumah kaca yang diukur yaitu CO₂, CH₄, dan O₃. Model ini nantinya dapat digunakan untuk menghitung nilai estimasi beberapa waktu ke depan untuk mengetahui prediksi konsentrasi terukur untuk selanjutnya ditampilkan pada *website* sebagai *early warning system*.

1.5.2.4 Monitoring dan Visualisasi Data Berbasis Website

Data hasil pengukuran yang telah tervalidasi serta hasil prediksi berbagai parameter pencemar udara dari setiap stasiun pengukuran kemudian akan diambil dan divisualisasikan melalui sebuah website yang bernama Biru Langit. Website tersebut merupakan situs penyedia informasi pemantauan berbagai parameter pencemar udara yang dinamis, responsif, dan ramah pengguna sehingga masyarakat dapat mengakses untuk mengamati kualitas udara pada daerah terkait. Website ini akan memvisualisasikan data hasil pengukuran berbagai parameter polutan dengan menggunakan beberapa metode validasi yang diimplementasikan dengan menggunakan berbagai warna dan tampilan yang menarik serta simple dan mudah dipahami

sehingga masyarakat yang mengakses website dapat memperoleh informasi dengan baik. Visualisasi data pengukuran dan prediksi pada website Biru Langit akan dilakukan melalui chart, map, dan table. Tipe chart yang akan digunakan untuk memvisualisasikan data hasil pengukuran dari berbagai parameter adalah barchart. Sedangkan visualisasi menggunakan map digunakan untuk melihat distribusi polutan udara di beberapa daerah yang memiliki stasiun pengukuran. Terdapat 2 opsi yang dapat diimplementasikan untuk melakukan visualisasi data dengan menggunakan map yaitu Heat Map dan Choropleth Map. Sedangkan table akan digunakan untuk menampilkan data hasil prediksi dari berbagai parameter.

1.5.2.5 Maintenance Alat Ukur dan Standard Operating Procedure

Ketika dashboard menunjukkan adanya kerusakan pada alat atau adanya fault pada data yang dihasilkan ditunjukkan dengan hasil data yang sudah divalidasi kurang dari 75%, hal ini bisa terjadi karena adanya permasalahan pada bagian alat ukur seperti pada sensor, power supply, atau transmitter. Sebelum alat ukur beroperasi, akan dicatat dahulu keadaan masing-masing sensor dan komponen lainnya seperti trasnmmitter dan power supply yang kemudian akan di-*input*-kan pada *dashboard* agar dapat dimonitoring dengan mudah. Selanjutnya jika ada permasalahan terhadap kinerja stasiun maka akan dilakukan *maintenance*. *Breakdown maintenance* akan dilakukan ketika terjadi kerusakan pada komponen alat ukur yang menyebabkan kinerja stasiun tidak optimal. Solusinya bisa jadi mengganti komponen yang rusak tersebut. *Preventive maintenance* dilakukan dengan mencari *Mean Time Between Failure* (MTBF) dan *Mean Time to Repair* (MTTR) dari masing-masing komponen sehingga bisa didapatkan *availability* dari alat ukur dan penjadwalan *maintenance* yang akan dilakukan. Untuk menghindari kerusakan pada sistem dimulai dari persiapan merangkai alat ukur, kalibrasi masing-masing komponen, pemasangan alat ukur, proses validasi, prediksi hingga visualisasi data, maka SOP dijadikan sebagai panduan dalam menggunakan sistem yang akan dikembangkan ini. Hal ini diharapkan agar sistem pada masing-masing stasiun mampu bekerja dengan optimal.

1.6 Kesimpulan dan Ringkasan CD-1

Polusi udara menjadi salah satu permasalahan yang harus diselesaikan oleh wilayah dengan penduduk yang padat atau dikenal dengan istilah wilayah urban. Polusi udara tidak hanya mengancam kesehatan manusia, tetapi juga merusak lingkungan dan makhluk hidup yang ada di wilayah tersebut. Salah satu kota di Indonesia yang termasuk wilayah urban adalah

Bandung. Studi yang sudah dikerjakan sebelumnya mengenai pemantauan kualitas udara di Bandung dari tahun 2018-2022 pada Laboratorium *Atmospheric Environment* Telkom University, masih memiliki beberapa kekurangan dalam sistem yang dikembangkan seperti belum tersedia parameter untuk gas rumah kaca, sistem masih mengalami kendala teknis akibat tidak ada *maintenance*, data yang sudah divalidasi belum ada prediksi dan visualisasi, dan kondisi chamber yang belum optimal. Oleh karena itu, pada proyek ini akan ditambahkan beberapa solusi untuk melengkapi kekurangan dari sistem yang sudah ada sebelumnya seperti penambahan sensor untuk mengukur konsentrasi CH₄ dan O₃ sebagai parameter yang menyumbangkan gas rumah kaca. Selain 2 parameter polutan tersebut, terdapat parameter meteorologi untuk mengetahui kondisi udara di stasiun ukur seperti temperatur (T), kelembapan relatif (RH), intensitas cahaya (I), tekanan (P) dan curah hujan. Untuk bisa lebih memahami pendistribusian polusi, dibutuhkan tambahan sensor kecepatan angin (WS) dan arah angin (WD). *Chamber* ukur yang digunakan pada setiap stasiun ukur masih belum bisa dikontrol temperatur, kelembapan relatif, dan *flowrate* udara input serta output-nya sehingga akan ditambahkan pompa udara serta pengkondisian terhadap temperatur dan kelembapan relatif pada chamber. Selanjutnya data akan divalidasi secara otomatis oleh RPA. Data yang sudah divalidasi kemudian dimodelkan untuk dapat memprediksi konsentrasi CO₂, CH₄, dan O₃ dengan menggunakan *deep learning*. Hasil pengukuran yang telah divalidasi serta data hasil prediksi kemudian akan ditampilkan melalui *website* yang dinamis, responsif, dan ramah pengguna sehingga dapat diamati secara mudah oleh masyarakat luas. Selanjutnya kinerja sensor akan ditampilkan pada *dashboard* yang memuat keadaan masing-masing stasiun ukur. Berdasarkan data masing-masing stasiun ukur pada *dashboard*, maka dapat dilakukan *maintenance* dan *troubleshooting* ketika stasiun tidak bekerja secara optimal. SOP untuk alat ukur akan disertakan yang mana dimulai dari preparasi alat, kalibrasi sensor, serta tindakan sebelum dan sesudah pengukuran.