

## **I. Pendahuluan**

### **A. Latar Belakang**

Menurut UU no 32 tahun 2009 tentang PPLH pasal 1 ayat(10), lingkungan hidup didefinisikan sebagai kesatuan ruang dengan semua benda, daya, keadaan, dan makhluk hidup, termasuk manusia dan perilakunya, yang mempengaruhi alam itu sendiri, kelangsungan perikehidupan, dan kesejahteraan manusia serta makhluk hidup lain. Masalah lingkungan hidup mulai banyak diperbincangkan di dunia sejak diadakannya Konferensi PBB tentang Lingkungan Hidup di Swedia pada 15 Juni 1972. Pemanasan global, ledakan jumlah penduduk, pembuangan limbah, dan perubahan iklim adalah empat diantara sekian banyak masalah lingkungan yang dihadapi oleh dunia maupun Indonesia.

Pembuangan limbah menjadi masalah lingkungan terutama karena tempat pembuangan limbah padat kota adalah sumber metana antropogenik terbesar ketiga (setelah pertanian dan fermentasi enterik) dan bertanggung jawab atas 11% emisi metana antropogenik global (Scheehle and Kruger, 2015; Du *et al.*, 2017). Limbah organik adalah penyumbang emisi metana terbesar dibanding jenis limbah lainnya. Menurut pasal 1 ayat 20 UU no 32 tahun 2009, limbah adalah sisa suatu usaha dan/atau kegiatan. Pertumbuhan penduduk, urbanisasi, kebiasaan masyarakat, dan pembangunan ekonomi menyebabkan semakin banyaknya limbah yang dihasilkan (Kementrian Kesehatan, 2010; AlQattan *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2019). Limbah dapat menurunkan kualitas air, tanah, udara, dan kesehatan manusia (Withgott and Brennan, 2011). Tingkat timbulan SPP yang diproduksi secara global pada tahun 2012 adalah sekitar 1,3 miliar ton, dan diperkirakan meningkat menjadi sekitar 2,2 miliar ton pada tahun 2025 (D Hoornweg and Bhada-Tata, 2012).

Di Indonesia, tahun 2017-2018, timbulan sampah yang diproduksi mencapai 77 juta ton, provinsi Jawa Tengah mencapai 5,57 juta ton, dan kota Semarang memproduksi setiap harinya sekitar 1.270 ton dengan asumsi per orang menghasilkan sampah 0,8 kg (Direktorat Pengelolaan Sampah, 2018). Jumlah penduduk Semarang 1.595.187 orang menurut sensus 2015 (Badan Pusat Statistik Kota Semarang, 2018). Sumber sampah adalah rumah tangga, produk sampingan industri, pertambangan, kota, pertanian dan kegiatan lainnya. Dengan peningkatan jumlah sampah yang dihasilkan dan anggaran rendah kota untuk negara berkembang seperti Indonesia, 43% sampah yang dihasilkan dibuang ke TPA *open dumping* (Directorate of Waste Management, 2017). TPA *open dumping* tidak hanya berdampak pada kehidupan manusia dalam masalah kesehatan dan sanitasi tapi juga mengkontaminasi sumber air tanah, memancarkan gas rumah kaca dan kehilangan daur ulang nutrisi serta bahan yang dapat digunakan kembali (Kumar and Sharma, 2014). Konsentrasi NMOC biasanya <1% sedangkan Konsentrasi CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub> bervariasi antara 40% dan 60% dan penyusun utama LFG. Selama periode 100 tahun, potensi pemanasan global yang disebabkan oleh CH<sub>4</sub> sekitar 25 kali CO<sub>2</sub> dan memiliki waktu tinggal di atmosfer  $12 \pm 3$  tahun (Chakraborty *et al.*, 2011). Gas metan dari sektor sampah di Indonesia pada tahun 2015 dihitung sangat besar yakni sekitar 504 Gg per tahun (Purwanta, 2009) dimana pada saat itu terdapat 47% TPA yang beroperasi secara *open dumping*, diperkirakan akan meningkat menjadi hampir 1.065 Gg per tahun pada tahun 2025. Tingginya potensi gas metan ini disebabkan karena sampah di TPA sebagian besar terdiri dari 57,68% sampah organik (Direktorat Pengelolaan Sampah, 2018) dan lembab karena iklim.

Banyaknya limbah menunjukkan ketidakefisienan, jadi mengurangi limbah dapat berpotensi menghemat uang dan sumber daya (Withgott and Brennan, 2011). Limbah secara

estetika juga mengganggu. Oleh karena limbah harus dikelola untuk melestarikan lingkungan hidup. Selain itu, untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, atau mengurangi potensi pemanasan global, sampah dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan. Oleh karena, Presiden Indonesia menerbitkan peraturan yaitu Peraturan Presiden Indonesia No. 97/2017 yang merupakan peta jalan menuju Indonesia Bersih Sampah 2025 dengan cara mengurangi 30% sampah rumah tangga dan sampah sejenis (dari sumber sumber limbah), memproses dan mengelola paling sedikit 70% Sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga untuk menghindarkannya terkumpul di TPA, diharapkan akan tercapai pada tahun 2025. Peraturan Presiden merupakan tatanan formal yang perlu dipenuhi dan dipatuhi oleh setiap wilayah yang ada. Setiap daerah di Indonesia diharapkan untuk membuat rencana model mereka sendiri (Jakstrada) untuk mencapai Tujuan Indonesia Bersih dari Sampah tahun 2025. Karena jika tidak ditangani dengan baik, sampah menimbulkan ancaman bagi kesehatan masyarakat dan lingkungan (Kementrian Kesehatan, 2010; United Nations Environment Programme, 2015; Dhar, Kumar and Kumar, 2017; Beyene, Werkneh and Ambaye, 2018).

Satu-satunya TPA sampah di Semarang hanyalah TPA Jatibarang. TPA Jatibarang telah beroperasi sejak Mei 1992, yang waktu pelayanan seharusnya selesai tahun 2008 (Edhisono, 2015). Karena kesulitan untuk menemukan lokasi baru, waktu pelayanan TPA diperpanjang dengan beberapa modifikasi yaitu dengan memanfaatkan sabuk hijau dan lahan penutup. Jika Pemerintah kota Semarang masih belum bisa menemukan lahan baru untuk lokasi TPA, pemerintah kota harus mencari metoda lain untuk mengolah sampah. Mengubah sampah menjadi energi WtE adalah metode yang layak untuk dipertimbangkan untuk mengurangi jumlah sampah yang dibuang ke TPA (Brunner and Rechberger, 2015). WtE

merupakan teknologi menjanjikan dan mendapatkan perhatian besar selama dua dekade terakhir karena meningkatnya permintaan untuk bahan bakar bersih dan bahan baku. Insinerasi adalah salah satu dari beberapa pilihan untuk pembuangan limbah sekaligus untuk pemungutan energi terutama di kota-kota dengan lahan terbatas. Teknologi ini merupakan metode yang efisien untuk mengurangi volume sampah padat dalam jumlah besar dan permintaan area TPA (Bunsan et al., 2013).

Pengelolaan sampah adalah salah satu layanan utilitas penting yang mendukung masyarakat pada abad ke-21, khususnya di daerah perkotaan (*United Nations Environment Programme*, 2015). Pengelolaan sampah adalah kebutuhan dasar manusia dan juga dapat dianggap sebagai 'hak asasi manusia' (*United Nations Environment Programme*, 2015). Penanganan sampah yang tidak memadai akan menimbulkan kerusakan lingkungan yang berbahaya bagi kesehatan (Dhar, Kumar and Kumar, 2017; Yi, Jang and An, 2018). Akan tetapi membuat keputusan tentang masalah pengelolaan sampah dapat menjadi tugas yang kompleks. Ada banyak pertanyaan yang perlu ditanyakan dan, sebenarnya, jawabannya sering menimbulkan lebih banyak pertanyaan. Sementara itu, limbah yang tidak diolah menumpuk dan masalahnya semakin memburuk. Keputusan pengelolaan sampah berlangsung dalam konteks sumber daya yang terbatas. Masalah sampah bukan satu-satunya masalah lingkungan, dan masalah lingkungan tentu bukan satu-satunya isu yang bersaing untuk mendapat perhatian dan dana. Di negara-negara berkembang, di mana sumber daya sangat terbatas, keputusan bahkan lebih sulit.

WtE adalah metode yang layak untuk dipertimbangkan untuk mengurangi jumlah sampah yang dibuang ke TPA (Brunner and Rechberger, 2015; Dong *et al.*, 2018). WtE merupakan teknologi menjanjikan dan mendapatkan perhatian besar selama dua dekade

terakhir karena meningkatnya permintaan untuk bahan bakar bersih dan bahan baku. Insinerasi adalah salah satu dari beberapa pilihan untuk pembuangan limbah sekaligus untuk pemungutan energi terutama di kota-kota dengan lahan terbatas. Teknologi ini merupakan metode yang efisien untuk mengurangi volume sampah padat dalam jumlah besar dan permintaan area TPA (Bunsan *et al.*, 2013). Pada tahun 2013, pasar global WtE mencatat pertumbuhan sebesar 5,5% dari tahun sebelumnya senilai US \$ 25,32 miliar (World Energy Council, 2016). Teknologi WtE berdasarkan konversi energi panas memimpin pasar, dan menyumbang 88,2% dari total pendapatan pasar pada tahun 2013 (World Energy Council, 2016). Pasar global diperkirakan akan mempertahankan pertumbuhannya yang stabil hingga 2023, ketika itu terjadi diperkirakan akan bernilai US \$ 40 miliar, tumbuh pada Laju Pertumbuhan Majemuk Tahunan (CAGR) lebih dari 5,5% dari tahun 2016 sampai 2023 (World Energy Council, 2016).

TPA berada pada urutan terakhir setelah WtE dalam hirarki pengelolaan sampah disebabkan terutama karena TPA membutuhkan lahan luas, berpotensi mencemari tiga faktor alam lingkungan yaitu tanah, udara, dan air, serta menjadi tempat berkembang biak berbagai vector penyakit. Sampah padat yang menumpuk di TPA berpotensi menghasilkan lindi (Aljaradin and Persson, 2012) dan gas TPA (Elwell *et al.*, 2017; Lima *et al.*, 2018). Lindi dihasilkan setelah perkolasi air (curah hujan, hujan lebat) dan kadar air limbah padat melalui TPA (Dia *et al.*, 2018). Jika lindi tidak dikumpulkan dan dibuang dengan aman akan berpotensi menjadi sumber polusi yang mengancam tanah, permukaan air dan air tanah (Fatta, Naoum and Loizidou, 2002; Butt, Lockley and Oduyemi, 2008). Metana dan karbon dioksida adalah gas TPA yang dominan, konsentrasinya bervariasi antara 40 % dan 60 % (Amini, Reinhart and Mackie, 2012; Barros, Filho and da Silva, 2014; Karanjekar *et al.*,

2015; Kormi *et al.*, 2017). Gas TPA berpotensi menyebabkan pemanasan global terutama gas metan (Kementrian Kesehatan, 2010; Weng *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2017). Gas TPA dengan konsentrasi tinggi berpotensi menimbulkan risiko ledakan (Silva *et al.*, 2017) dan bau yang tidak sedap (Lucernoni, Capelli and Sironi, 2017; Lim *et al.*, 2018).

Mengingat sejumlah dampak negatif yang dapat ditimbulkan dari keberadaan TPA, dapat mendaur ulang semua sampah yang dihasilkan menjadi produk yang berguna barangkali merupakan impian setiap kota. Jika daur ulang sulit dilakukan, pemungutan energi dari peningkatan jumlah sampah padat perkotaan akan sangat bermanfaat sebagai penyedia energi berkelanjutan (Byun *et al.*, 2011) dan merupakan pembuangan sampah yang ramah lingkungan (Shie *et al.*, 2014). Ramah lingkungan adalah segala sesuatu yang tidak memberi dampak buruk bagi lingkungan sekitar. Insinerasi atau pembakaran adalah satu metode konversi yang banyak ditemukan didunia (Lino and Ismail, 2017).

Insinerasi adalah pembakaran limbah terkendali pada suhu tinggi yang merupakan metode paling banyak digunakan dalam teknologi konversi termal (Shi *et al.*, 2016; Dong *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2019). Teknologi konversi termal lainnya (pirolisis dan gasifikasi) masih dalam tahap penelitian dan tidak layak digunakan untuk tujuan komersial dalam skala besar, boleh jadi karena kurangnya data karakterisasi sampah yang tepat, kualitas bahan baku yang buruk dan desain fasilitas yang tidak tepat (Appels *et al.*, 2011; Shi *et al.*, 2016). Keuntungan dari pembakaran terletak pada derajat pengurangan tinggi dan tidak ada dekomposisi lebih lanjut yang diperlukan. Selain itu, abu dapat digunakan sebagai penutup tanah. Pembakaran memerlukan tempat yang lebih kecil dibandingkan dengan TPA, pemilihan lokasi bisa lebih mudah (Liu, Liu and Li, 2006). Meskipun konversi termokimia dianggap sebagai proses destruktif yang mengkonsumsi banyak energi, teknologi ini masih

memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan konversi biokimia seperti mengurangi penggunaan air, siklus produksi pendek dan operasi berkelanjutan lebih mudah (Shi *et al.*, 2016). Namun, ada beberapa kekurangan seperti investasi proyek, biaya operasi tinggi dan sulitnya manajemen.

Pada awalnya insinerator hanya digunakan untuk mengurangi volum dan melindungi manusia dan lingkungan dari limbah berbahaya, tapi tidak untuk pemulihan energi (Brunner and Rechberger, 2015). Setelah kemajuan teknologi pengendalian pencemaran udara, insinerasi sekarang dianggap sebagai pilihan penanganan limbah yang menarik, terutama di negara-negara maju (Psomopoulos, Bourka and Themelis, 2009; Ouda *et al.*, 2016). Insinerasi adalah salah satu teknik pembuangan sampah yang paling umum di kembangkan negara Jepang, Inggris dan Amerika Serikat karena terkait peraturan ketat tentang pembuangan limbah yang menggunakan penimbunan akhir (Scarlat *et al.*, 2015). Emisi dari insinerator limbah telah dikurangi sedemikian rupa sehingga di 2003, Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (EPA) menyatakan insinerasi sampah sebagai sumber energi yang lebih bersih (Leme *et al.*, 2014). Insinerasi adalah teknik pengolahan limbah yang paling umum di mana, massa limbah dan volume bisa masing masing 70% dan 90% (Gohlke, 2007; Cheng and Hu, 2010a; Nixon, Dey, *et al.*, 2013; Nixon, Wright, *et al.*, 2013; Lombardi, Carnevale and Corti, 2015). Pada saat bersamaan, panas dan / atau listrik juga bisa diproduksi (Singh *et al.*, 2011). Dari insinerator, panas disuplai jika ada kebutuhan untuk pemanasan distrik (di negara-negara dingin), Terkadang dipasok ke industri seperti pabrik kertas, dan listrik diproduksi pada semua kasus lainnya (Brunner and Rechberger, 2015). Namun dalam beberapa studi baru-baru ini (Allegrini *et al.*, 2014; Meylan and Spoerri, 2014), para ilmuwan menyoroti beberapa keuntungan lainnya insinerasi selain pengurangan

volume dan listrik generasi seperti, pemanfaatan abu bawah dan abu terbang dari insinerasi tanaman untuk konstruksi jalan & produksi semen dan pemulihan zat besi dan non-ferrous. Dengan demikian, teknologi pengembangan lebih lanjut yaitu dalam pemulihan logam dari abu kering sisa insinerasi diharapkan meningkatkan penerimaan masyarakat terhadap fasilitas WtE (Morf *et al.*, 2013). Tapi di negara-negara berkembang, insinerasi itu dianggap paling andal dan ekonomis bila digunakan untuk pembakaran massal sampah tanpa pengolahan awal untuk pembangkitan listrik.

Sistem pembakaran adalah jantung insinerasi sampah (Lu *et al.*, 2017). Tungku pembakaran adalah bagian penting dari sistem dimana pembakaran berlangsung. Komponen-komponen dalam tungku pembakaran terdiri dari (a). Ruang refraktori yang dibuat dengan bahan tahan api untuk mengisolasi dan menahan pada suhu operasi yang tinggi (b). *Pembakar* yang berguna untuk memastikan suhu yang dibutuhkan tercapai (c). Terdapat pasokan udara yang bisa disesuaikan (d). Cerobong yang digunakan untuk membuang gas buang hasil pembakaran dari ruang bakar. (d). Pintu untuk memasukkan dan mengeluarkan bahan pakan.

Kinerja pembakar memiliki efek yang sangat besar pada operasi tungku dan efisiensi. Pada prinsipnya, pembakar adalah transduser karena mengubah satu bentuk energi ke bentuk lain energi. Pembakar mengubah energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi panas dalam tungku menggunakan reaksi kimia dalam api. Keefektifan *pembakar* dicapai ditunjukkan oleh ukuran kinerjanya. Terdapat dua jenis nyala api yang biasa terjadi dari *pembakar*. Pertama dioperasikan secara normal, dengan lubang udara terbuka, nyala api hampir *premix*, yaitu sebagian besar atau seluruh udara yang diperlukan untuk pembakaran dicampur dengan bahan bakar sebelum ke port pembakar. Bila lubang masuk udara di dasar

*pembakar* tertutup, semua udara untuk pembakaran harus berdifusi secara bertahap ke dalam api setelah *pembakar port* dan menghasilkan nyala difusi (Mullinger and Jenkins, 2013b). Nyala api *premix* pendek, biru, berisik dan reaksinya hampir sempurna. Sedangkan nyala difusi adalah panjang, kuning, lebih tenang dan reaksinya tidak sempurna. Pencampuran udara dan gas sebelum pembakaran menghasilkan polutan yang lebih sedikit dan pembakaran sempurna bisa diharapkan. Baik emisi NO<sub>x</sub> dan CO menurun seiring dengan meningkatnya laju alir gas dan suhu api (Panwar, Salvi and Reddy, 2011).

Pengendalian tungku sangat penting dalam pengoperasian sebuah insinerator. Sistem pengendalian tungku mempunyai dua fungsi dasar, pengendalian proses tungku dan memastikan operasi yang aman. Sistem pengendalian proses ini diperlukan untuk memenuhi satu atau beberapa tujuan berikut yaitu memaksimalkan kapasitas produksi tungku, memastikan kualitas produk yang memuaskan, meminimalkan konsumsi bahan bakar, meminimalkan emisi, dan mengendalikan pemanasan tungku.

Untuk memenuhi tujuan tersebut dapat dilakukan dengan mengendalikan satu/ beberapa parameter yaitu aliran bahan bakar atau masukan panas ke tungku, laju aliran udara bakar atau rasio udara / bahan bakar, suhu udara pembakaran, suhu tungku, komposisi gas keluar dari tungku, suhu gas keluar dari tungku, laju umpan bahan pakan ke tungku, dan komposisi fisik dan kimia dari bahan baku ke tungku .

Pembakaran sempurna memerlukan oksigen yang mencukupi. Oksigen paling mudah diambil dari udara. Udara stoikiometri (teoritis) adalah jumlah udara minimum (atau oksigen) yang dibutuhkan untuk menghasilkan pembakaran sempurna. Dalam proses pembakaran, pembakaran total tidak bisa dilakukan dengan hanya jumlah teoritis udara. Oleh karena itu sangat penting untuk memasok jumlah udara berlebih untuk pembakaran bahan bakar dengan

volume dua kali udara teoretis atau diputuskan berdasarkan sifat bahan bakar yang digunakan dan metode proses pembakaran. Udara berlebih adalah persentase oksigen dalam fraksi massa yang terkandung di dalam udara hasil pembakaran (gas buang). Jumlah udara berlebih dalam insinerator tidak hanya mempengaruhi suhu keluar dan efisiensi termal (Bahadori and Hari B. Vuthaluru, 2010), tetapi juga emisi organik seperti CO dan hidrokarbon (CH<sub>4</sub> dan NMHC). Udara berlebih juga mempengaruhi pembentukan NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, dan Cl<sub>2</sub> (Lou, Huang and Yang, 1999; Rogaume, Jabouille and Torero, 2009; Fu *et al.*, 2015). Pembentukan NO<sub>x</sub> turun sangat tajam ketika udara berlebih ditingkatkan (Lou, Huang and Yang, 1999; Menghini *et al.*, 2008; Caposciutti and Antonelli, 2018; Caposciutti *et al.*, 2018)

Analisis gas buang penting digunakan untuk mengendalikan dan memantau kelebihan udara dalam sistem pembakaran. Analisis gas buang terutama gas monoksida juga memberikan indikasi efisiensi pembakaran. Oleh karena itu analisa gas buang merupakan pengukuran yang sangat penting untuk tungku. Gas seperti NO, SO<sub>x</sub> dan CO<sub>2</sub> juga diukur untuk memastikan bahwa emisi berada dalam batas yang ditentukan oleh peraturan lingkungan hidup (Mullinger and Jenkins, 2013a). Oleh karena itu, penelitian dalam disertasi ini bertujuan merancang-bangun insinerator yang mampu mengurangi polusi udara yang dihasilkan selama proses insinerasi sampah sampai dibawah baku mutu yang ditetapkan oleh pemerintah yang mudah dalam pengoperasiannya melalui inovasi instrumentasi dan system monitoring kontinyu berbasis pengendali mikro arduino.

Pengukuran FG pembakaran membutuhkan berbagai sensor gas. Penggunaan teknologi sensor berbiaya rendah untuk memantau polusi udara telah membuat langkah luar biasa dalam dekade terakhir (Chojer *et al.*, 2020). Banyak jenis sensor gas murah yang tersedia di pasaran, salah satunya adalah MQ-series. MQ7, MQ131, dan MQ136 (Hanwei

Electronics Group Corporation, Zhengzhou, Cina; MQ-7 dan data teknis sensor MQ131, 2019) merupakan sensor murah sekitar \$ 1.13, \$ 12, dan \$ 16.2. Sensor-sensor ini merupakan heating semiconductor sensors. MQ7 dan MQ 136 masing-masing adalah sensor untuk CO dan Sulfur Dioxide. Sedangkan MQ131 adalah sensor yang sangat sensitif terhadap Ozon dan juga sensitif terhadap Klor dan Nitrogen Dioksida (NO<sub>2</sub>)(Abraham and Li, 2014).

Alat ukur tidak hanya membutuhkan sensor, tetapi juga membutuhkan perangkat lain untuk memproses sinyal output sensor. Arduino adalah perangkat keras yang mudah digunakan, open-source, murah (hanya sekitar \$10 untuk Arduino Mega clone), data dapat diandalkan (Ali *et al.*, 2016; Cao and Thompson, 2016; Karami, Mcmorrow and Wang, 2018; Areed, 2019). Situs web resmi [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc) menyediakan perangkat lunak Arduino untuk pengunduhan gratis.

Kemampuan nirkabel meningkatkan fleksibilitas perangkat saat pengukuran. Komunikasi nirkabel juga mengurangi kebutuhan kabel tambahan untuk menghubungkan prosesor ke computer untuk pengamatan terhadap data yang terekam. Transmisi data nirkabel telah digunakan dalam membangun sistem pemantauan untuk pemantauan kualitas udara dalam ruangan (Abraham and Li, 2014; Ali *et al.*, 2016; Karami, Mcmorrow and Wang, 2018; Salman *et al.*, 2019), luar ruangan (Ferdoush and Li, 2014).

## **B. Perumusan Masalah**

Menurut hasil riset SWI (*Sustainable Waste Indonesia*, 2017), Indonesia memproduksi sekitar 65 juta sampah pada tahun 2016, dimana 24 % ( lebih kurang 15 juta ton) tidak terkelola sehingga mengotori ekosistem (CNN Indonesia, 2018), hanya 7 persen didaur ulang, dan sisanya 69 persen sampah dibuang di TPA. Terjadi peningkatan 1 juta ton sampah dibandingkan dengan produksi tahun 2015 yang sebanyak 64 juta ton. Diperlukan upaya

untuk mengatasi masalah sampah ini. Teknologi insinerasi adalah salah satu pilihan. Pencernaan anaerobik adalah opsi WTE yang paling cocok untuk limbah makanan dan halaman, sedangkan gasifikasi adalah pilihan WTE terbaik untuk mengolah limbah plastik (Kumar and Samadder, 2017). Insinerasi tetap merupakan pilihan menarik di antara semua jenis limbah (Arafat, Jijakli and Ahsan, 2015), karena dapat digunakan untuk pemulihan energi dari semua jenis limbah.

Insinerasi mentransfer sekitar 80% dari semua materi menjadi gas buang dengan komponen utama adalah CO<sub>2</sub> dan air (Li *et al.*, 2015; Vehlow, 2015) dan gas-gas lain terutama SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> dalam prosentasi yang jauh lebih kecil namun berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan (Vehlow,2015). Gas buang juga mengandung abu terbang tinggi yang terdiri dari partikel *inert* yang ditiup keluar dari ruang bakar, tapi juga produk pembakaran yang tidak sempurna (seperti jelaga), logam berat, dan senyawa organik (Su *et al.*, 2015; Vehlow, 2015). NO<sub>x</sub> dan SO<sub>2</sub> berkontribusi pembentukan hujan asam, dan pengasaman yang dihasilkan dan fotokimia kabut asap berbahaya bagi kesehatan manusia dan merusak ekosistem. Umumnya peneliti percaya bahwa PCDDs and (PCDFs) atau dikenal sebagai dioksin dibentuk melalui dua mekanisme. Pertama, Abu dan jelaga menyerap senyawa mikroorganisme volatil rendah lainnya seperti dioksin di permukaannya (Huang and Buekens, 1995; Stanmore, 2004). Kedua adalah dari reaksi homogen pada kisaran suhu 500-800°C (Zhou *et al.*, 2015). PCDD / Fs juga bisa terbentuk dari reaksi heterogen pada kisaran suhu 200-400°C (Vehlow, 2012; Vermeulen, Caneghem and Vandecasteele, 2014). Mengingat sejumlah dampak dari TPA permasalahan dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Sekitar 700 ton/hari sampah setiap harinya masuk ke TPA Jatibarang di Semarang. Sebagai upaya untuk memanfaatkan sampah sebagai produk yang berguna, sampah perlu diidentifikasi.
2. Kelayakan sampah di TPA Jatibarang di Semarang sebagai bahan bakar
3. Ada banyak faktor yang mempengaruhi proses pembakaran di insinerator; salah satunya adalah cara mengontrol suhu pembakaran. Dalam karya ini, strategi kendali dua posisi diadopsi untuk menstabilkan pembakaran suhu
4. Monitoring  $O_2$  sangat penting pada sistem pembakaran karena emisi CO sangat bergantung pada konsentrasi  $O_2$  dalam gas buang (Dias, Costa and Azevedo, 2004). Kandungan  $O_2$  juga sangat mempengaruhi emisi  $NO_x$  dan efisiensi pembakaran (Rogaume, Jabouille and Torero, 2009; Caposciutti and Antonelli, 2018). Insinerasi sampah dapat menyebabkan polusi udara karena emisi  $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $CO_x$  (Kumar and Samadder, 2017). Emisi  $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $CO_x$  terbukti merusak kesehatan manusia dan lingkungan (Beyene, Werkneh and Ambaye, 2018; Flagiello *et al.*, 2018). Oleh karena itu untuk melindungi lingkungan dari emisi berbahaya, CO,  $SO_2$  dan  $NO_2$  perlu dimonitor secara kontinyu selama pembakaran berlangsung.
5. Sebuah insinerator kecil harus dilengkapi dengan piranti untuk mengukur dan memastikan suhu gas buang di ruang primer saat limbah dibakar pada suhu operasi setidaknya: (a)  $500^\circ C$  dalam pembakaran primer ruang; dan (b)  $850^\circ C$  di sekunder ruang pembakaran. Pemantauan suhu dalam tungku dapat digunakan untuk mempelajari proses pembakaran (Zhou *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2016a, 2016b). Pada insinerasi sampah, selama proses pembakaran terjadi proses pengeringan, pirolisa dan gasifikasi (Goh *et al.*, 2001; Van Caneghem *et al.*, 2012; Dong *et al.*, 2018; Makarichi, Jutidamrongphan and Techato,

2018). Pengetahuan distribusi suhu dapat digunakan untuk mempelajari proses pembakaran.

### **C. Pembatasan Masalah**

Beberapa pembatasan masalah dalam penelitian ini:

1. Insinerator yang digunakan adalah insinerator skala mini dengan sistem *batch*.
2. Tidak semua parameter gas buang seperti tercantum Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.70/Menlhk/Setjen/ Kum.1/8/2016 Tentang Baku Mutu Emisi Usaha Dan/Atau Kegiatan Pengolahan Sampah Secara Termal dimonitoring. Parameter yang dipantau adalah O<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, dan distribusi suhu. Parameter HCl, HF, PCDD/F tidak dipantau.
3. Jenis sampah yang dibakar dalam penelitian adalah jenis sampah kering yang tidak memiliki benefit.
4. Hasil emisi CO<sub>2</sub> adalah terhitung karena keterbatasan sensor yang ada di pasaran.
5. Laju aliran gas buang dalam penelitian ini juga laju terhitung.

### **D. Orisinalitas**

Banyak peneliti yang telah meneliti tentang potensi bahan bakar biomassa termasuk kayu, tanaman kayu rotasi pendek, limbah pertanian, spesies herba rotasi pendek, limbah kayu, ampas tebu, residu industri, limbah kertas, limbah padat kota, serbuk gergaji, bio-padatan, rumput, limbah dari pengolahan makanan, tanaman air dan limbah hewan alga, dan sejumlah bahan lainnya (Demirbas, 2004; Vamvuka and Sfakiotakis, 2011; Urbancl *et al.*, 2015; Sher *et al.*, 2017; Mustafa *et al.*, 2019). Mereka menggunakan berbagai bahan bakar biomassa dari wilayah Mediterania (prunnings zaitun, residu kapas, kernel zaitun dan persik, jarum pinus, kardus, dan lumpur pembuangan kotoran), satu lignit dan campuran lignit / biomasa

(Vamvuka and Sfakiotakis, 2011), biomasa kota dan jerami (Urbancl *et al.*, 2015), miskantus dan kacang tanah (Sher *et al.*, 2017), dan kayu pinus (Mustafa *et al.*, 2019).

. Limbah biomassa adalah organik pengganti minyak bumi yang terbarukan. Limbah biomassa menawarkan keuntungan penting sebagai pembakaran bahan baku karena volatilitas bahan bakar yang tinggi dan tingginya reaktivitas bahan bakar dan arang yang dihasilkan. Meskipun demikian bahwa dibandingkan dengan bahan bakar fosil padat, limbah biomassa mengandung jauh lebih sedikit karbon dan lebih banyak oksigen dan memiliki nilai kalor yang rendah (Demirbas, 2004).

Seiring dengan perkembangan dalam teknologi PPU, ISPP telah berkembang menjadi industri yang berkembang. ISPP mentransfer sekitar 80% dari semua material GB yang komponen utamanya adalah karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan air (H<sub>2</sub>O). Selain itu ISPP juga menghasilkan gas-gas lain sebagai produk sampingan, terutama gas karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), dan nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), dalam persentase yang jauh lebih kecil. Pembakaran tidak sempurna yang disebabkan oleh suhu bahan bakar yang rendah dan kurangnya oksigen (O<sub>2</sub>) yang menghasilkan CO selama tahap penguapan dan devolatilisasi (Choi *et al.*, 2017) dan konsentrasi CO menunjukkan besarnya efisiensi pembakaran. Emisi NO<sub>x</sub> dan SO<sub>2</sub> adalah salah satu penyebab hujan asam yang dihasilkan dari asap fotokimia dan pengasaman, yang berbahaya bagi kesehatan dan merusak ekosistem (Alassi *et al.*, 2014). Oleh karena itu, pengukuran tingkat emisi GB penting untuk memastikan bahwa emisi berada dalam batas yang ditentukan oleh peraturan lingkungan (Miskell *et al.*, 2019). Desain, implementasi yang memadai, dan evaluasi kebijakan pencegahan memerlukan pemahaman tentang proses pembakaran, konsentrasi dan faktor penentu paparan polusi dari pembakaran sampah.

Mengukur GB adalah cara terbaik untuk mengoptimalkan input bahan bakar dan udara. Banyak penganalisis GB tersedia di pasaran, seperti penganalisis GB dari NOVA, TESTO, dan MRU atau kromatografi gas. Kerugian dari instrumen ini adalah harganya mahal, membutuhkan sampel gas dalam jumlah besar, atau keduanya. MQ7 dan MQ131 (Hanwei Electronics Group Corporation, Zhengzhou, Cina; MQ-7 dan MQ131 sensor data teknis, 2019), dan MQ136 (Alassi *et al.*, 2014) adalah sensor berbiaya rendah, masing-masing biaya sekitar \$ 1,5, \$ 13, dan \$ 20. Secara umum, mereka banyak digunakan untuk pemantauan lingkungan (Mead *et al.*, 2013; Cao and Jonathan E Thompson, 2016; Cao and Jonathan E. Thompson, 2016) karena kemampuan sensor yang berkaitan dengan suhu, biasanya hanya hingga 60°C. Sensor berbiaya rendah memberikan hasil yang andal dalam spesifikasi yang diterima untuk indikasi pengukuran (Cao and Jonathan E. Thompson, 2016; Yang *et al.*, 2019). Konstruksi alat pengukur tidak hanya membutuhkan sensor, tetapi juga membutuhkan perangkat lain untuk memproses sinyal output sensor. Arduino Mega berharga murah (sekitar \$10 untuk Arduino kloningan), dapat diandalkan, dan pemroses data sumber terbuka (KEMEN-LHK, 2016; Nguyen and Dugenske, 2018). Untuk mengendalikan banyak perangkat/sensor, Arduino Mega sangat cocok karena memiliki 16 input analog.

Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.70/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 Tentang Baku Mutu Emisi Usaha Dan/Atau Kegiatan Pengolahan Sampah Secara Termal pasal 4 ayat 1, wajib melakukan pemantauan emisi untuk mengetahui pemenuhan ketentuan baku mutu emisi (Ministry of Environment and Forests, 2016). Pemantauan emisi sebagaimana dimaksud dilakukan dengan terus menerus (pasal 8 ayat 2) dan wajib menggunakan CEMS (pasal 9 ayat 2). CEMS adalah alat yang dipergunakan untuk mengukur kuantitas kadar suatu parameter emisi dan laju alir

melalui pengukuran secara terus menerus (pasal 1 ayat 9) (Ministry of Environment and Forests, 2016). Dari hal-hal tersebut, orisinalitas penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Identifikasi sampah terutama di TPA Jatibarang dan limbah biomasa di Indonesia berdasarkan karakteristik kimia sedikit sekali dilakukan dan penggunaan campuran limbah biomassa tertentu dari daerah tropis sebagai obyek pembakaran belum banyak diteliti oleh peneliti lain.
2. Beberapa peneliti menggunakan sensor-sensor murah ini untuk pemantauan lingkungan baik indoor maupun outdoor, namun tidak ada yang memanfaatkan untuk pengukuran emisi gas buang sebagai hasil pembakaran sebuah insinerator. Beberapa peneliti (Alassi *et al.*, 2014; Zakaria, Abidin and Harum, 2018; Wonohardjo and Putra, 2019; Mukherjee, 2020) menggunakan sensor MQ-7 secara real time untuk memantau tingkat polusi karbon monoksida baik didalam maupun diluar ruangan. Alassi(Alassi *et al.*, 2014) dan Widodo (Widodo, Amin and Supani, 2019) masing-masing menggunakan sensor untuk mendeteksi kadar SO<sub>2</sub> luar dan dalam ruang. Perbandingan harga sensor-sensor elektrokima yang ada dipasaran ditunjukkan Tabel I.1. (<https://id.aliexpress.com/>)

**Tabel I.1. Perbandingan harga-harga sensor-sensor yang tersedia di pasaran**

Nama Gas diukur	MQ - series		ME -series		CiTiceL-series	
	tipe	Harga (\$)	tipe	Harga (\$)	tipe	Harga (\$)
O <sub>2</sub>	ME2-O <sub>2</sub>	30,00	ME2-O <sub>2</sub>	30	2FO	70
CO	MQ7	1,18	ME3-CO	17	A5F NF	244
NO <sub>2</sub>	MQ131	10,00	ME3-NO <sub>2</sub>	80	A5F 5SF	244
SO <sub>2</sub>	MQ136	16,00	ME3-SO <sub>2</sub>	72	A5F 5ND	244
	Total	56,18		179		802

Tabel I.2. menunjukkan penelitian-penelitian terdahulu yang sudah di review yang berkaitan dengan penelitian yang penulis lakukan untuk menunjukkan keaslian penelitian ini.

**Tabel I.2 Review Temuan Penelitian Terdahulu yang Relevan**

PENULIS/ PENELITI, THN	JUDUL ARTIKEL	MASALAH DAN METODE- VARIABEL	HASIL/NOVELTIES & KESIMPULAN REKOMENDASI & SARAN
1	2	3	4
Bovea , Ibáñez-Forés, Gallardo, Colomer- Mendoza, 2010  (Bovea et al., 2010)	<i>Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study</i>	Sebagian besar sampah yang dihasilkan dipadatkan dalam bal dan dikirim untuk disimpan di tempat pembuangan akhir tanpa pemulihan energi.  24 skenario pengolahan sampah ditinjau dari perilaku lingkungannya dipelajari dengan menerapkan metodologi penilaian siklus hidup sesuai dengan standar ISO 14040-44 (2006),	Skenario dengan biogasifikasi dan pemulihan energi mencapai kinerja lingkungan lebih baik daripada skenario tanpa menggunakan teknologi-teknologi tersebut.
Yi, Jang, An, 2017(Yi, Jang and An, 2018)	<i>Potential for energy recovery and greenhouse gas reduction through waste-to-energy technologies</i>	Di Korea, pengelolaan limbah padat perkotaan telah menjadi tantangan karena ketersediaan lahannya yang terbatas (64% dari total luas lahan hutan) dan kepadatan penduduk relatif tinggi (519 orang per km persegi pada tahun 2017).	potensi teknologi konversi sampah ke energi menghasilkan penghematan energi dan pengurangan gas rumah kaca dari sampah
Rajaeifar, Ghanavati, Dashti, Heijungs, Aghbashlo, Tabatabaei, 2017(Rajaeifar et al., 2017)	<i>Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review</i>	Salah satu masalah paling kritis yang menantang otoritas Iran pada dekade saat ini adalah konsekuensi lingkungan yang merugikan dengan skenario pengelolaan sampah tradisional di Iran. Pada 2014, 55,5 juta warga Iran yang tinggal di daerah perkotaan menghasilkan lebih dari 15,6 juta ton sampah	ditemukan bahwa 5005,4-5545,8 GWh listrik per tahun bisa dihasilkan dari sampah di Iran yang bisa menghindarkan sekitar 3561-4844 ribu ton CO <sub>2</sub> eq.
Kumar, Samadder, 2017(Kumar	<i>A review on technological</i>	Meningkatnya kebutuhan energi, jadi ada kebutuhan untuk mencari alternatif sumber energi sebelum	Kajian ini menyimpulkan bahwa WTE sebagai sumber

and Samadder, 2017)	<i>options of waste to energy for effective management of municipal solid waste</i>	semua cadangan bahan bakar fosil habis, limbah untuk energi (WTE) dapat dianggap sebagai sumber energi potensial alternatif, yang layak secara ekonomi dan ramah lingkungan.	energi terbarukan yang potensial, yang sebagian akan memenuhi permintaan energi dan memastikan pengelolaan sampah yang efektif.
Mboowa, Quereshi, Bhattacharjee, Tonny, Dutta, 2017 (Mboowa et al., 2017)	<i>Qualitative determination of energy potential and methane generation from municipal solid waste (MSW) in Dhanbad (India)</i>	Produksi metana dari tempat pembuangan sampah merupakan salah satu kontributor terbesar pemanasan global  Sampel limbahnya dikumpulkan dan dianalisis komposisi, kandungan energi, dan konsentrasi metana	metana yang dihasilkan di lokasi dapat digunakan untuk pemulihan tenaga. Selain itu, kandungan energi sampah menunjukkan sebagai bahan baku sesuai yang bisa dimanfaatkan untuk pembangkit listrik melalui pembakaran
Islam, 2018 (Islam, 2018)	<i>Municipal solid waste to energy generation: An approach for enhancing climate co-benefits in the urban areas of Bangladesh</i>	kekurangan lahan yang tersedia untuk TPA dan meningkat permintaan energi mengharuskan pembangunan strategi WtE nasional Enam skenario alternatif untuk WtE dinilai	kebijakan pembangkit listrik terbarukan berdasarkan strategi WtE dengan menggunakan insinerasi sampah campuran memberikan manfaat iklim secara nasional dan global, dan akan menjamin iklim pengelolaan daerah perkotaan yang ramah di Bangladesh.
Ramachandra, Bharath, Kulkarni, Han, 2018 (Ramachandra et al., 2018)	<i>Municipal solid waste: Generation, composition and GHG emissions in Bangalore, India</i>	Meningkatnya produksi sampah padat kotadengan fraksi limbah organik yang tinggi dan pembuangannya yang tidak ilmiah menyebabkan emisi GRK (metana, CO <sub>2</sub> , dll) di atmosfer. Survei primer sampel rumah tangga dipilih secara acak melalui pretest dan divalidasi kuesioner terstruktur dan ii) kompilasi Produksi sampah lingkungan dan komposisi data dari instansi pemerintah	Strategi pengelolaan limbah padat terpadu disarankan untuk mengelola fraksi organik melalui intervensi teknologi dan kebijakan, yang membantu dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dengan potensi keuntungan ekonomi

Thunman, Leckner, 2003 (Thunman and Leckner, 2003)	<i>Co-current and counter current fixed bed combustion of biofuel, a comparison</i>	Konversi secara termal bahan bakar partikel kayu yang besar unggun tetap di atas parut. Sistem pembakaran digambarkan dengan konservasi massa, momentum, energi dan spesies di dalam fase gas dan padat, dianggap sebagai satu dimensi kontinu	Waktu sebelum pengapian agak pendek, dan waktu total konversi jauh lebih singkat dalam kasus <i>co-current</i> daripada <i>counter-current</i>
Sun, Ismail, Ren , El-Salam, 2015 (Sun, Tamer M. Ismail, et al., 2015)	<i>Numerical and experimental studies on effects of moisture content on combustion characteristics of simulated municipal solid wastes in a fixed bed</i>	proses pembakaran di unggun berpori dari insinerator limbah. Model keadaan tak tunak dua dimensi yang tidak stabil dan studi eksperimental digunakan untuk menyelidiki Proses pembakaran pada unggun tetap sampah padat perkotaan pada proses pembakaran di reaktor unggun tetap. Persamaan konservasi unggun limbah diimplementasikan untuk menggambarkan proses insinerasi	Sekitar 2/3 panas digunakan untuk penguapan dari keseluruhan proses pembakaran. Konsentrasi rata-rata CO dan konversi Rasio C terhadap CO berbanding terbalik dengan Tingkat kelembaban bahan bakar
Sun, Ismail, Ren , El-Salam, 2016 (Sun et al., 2016a)	<i>Effect of ash content on the combustion process of simulated MSW in the fixed bed</i>	pengaruh kadar abu pada proses pembakaran dari simulasi sampah. Model heterogen matematika dua dimensi tak tunak dikembangkan untuk mensimulasikan Proses pembakaran di unggun, termasuk model laju proses serta model produksi NOx.	Semakin tinggi kadar abu, semakin rendah efisiensi pembakaran dan semakin tinggi waktu pembakaran dari sampah .
Devaraju, Suhas., Mohana. Patil, 2015 (Devaraju et al., 2015)	<i>Wireless Portable Microcontroller based Weather Monitoring Station</i>	Mengukur cuaca dengan menggunakan Pemantau Cuaca konvensional atau yang dioperasikan secara manual, stasiun membutuhkan tenaga kerja terampil untuk operasi dan menuntut perawatan rutin	Mendapatkan Stasiun Pemantau Cuaca Nirkabel Portable menggunakan mikrokontroler PIC16F887 yang murah.
Lewis, Campbell , Stavroulakis , 2015 (Lewis, Campbell and Stavroulakis, 2016)	<i>Performance evaluation of a cheap, open source, digital environmental monitor based on the Raspberry Pi</i>	meminimalkan ketidakpastian karena kompensasi ekspansi termal dan kelembaban sering diperlukan untuk dikendalikan ke tingkat maksimum (biasanya 50% RH) untuk mencegah korosi pada permukaan yang terbuka pada artefak uji mis. blok pengukur, pengukur langkah, poligon.	desain, konstruksi dan evaluasi lingkungan digital berbiaya rendah sistem pemantauan berbasis pada papan komputer mikro yang populer dan sensor digital pasar massal.

Ji., Zheng, Gates, Green, 2016. (Ji <i>et al.</i> , 2016)	<i>Design and performance evaluation of the upgraded portable monitoring unit for air quality in animal housing</i>	Instrumen Pengukuran yang dibutuhkan harus akurat, portable, stabil dan terjangkau	iPMU layak untuk dapat membuat pengukuran banyak titik untuk kualitas udara dalam lumbung skala besar praktis.
Ali , Zanzinger , Debose , Stephens, 2016 (Ali <i>et al.</i> , 2016)	<i>Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection</i>	Karakterisasi parameter yang akurat yang mempengaruhi lingkungan dalam ruangan seringkali terbatas pada penggunaan perangkat keras dan perangkat lunak berpemilik, yang dapat mempengaruhi biaya, fleksibilitas, dan integrasi data secara negatif	Disain dan pengembangan perangkat murah dan open source berdasarkan platform Arduino untuk pengukuran dan merekam data lingkungan dalam ruangan dan operasional gedung dalam jangka panjang
Cao, Thompson, 2016 (Cao and Jonathan E. Thompson, 2016)	<i>Personal monitoring of ozone exposure: A fully portable device for under \$150 USD cost</i>	Pentingnya memantau dan mengendalikan paparan gas ozon. Bila konsentrasi ozon terlalu tinggi, efek negatif terhadap paru-paru dan sistem respirasi manusia mungkin terjadi	Mendapatkan Perangkat murah, mudah digunakan, dan portabel untuk memantau paparan ozon pribadi

## E. Tujuan Penelitian

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun alat pembakar sampah yang menghasilkan gas buang yang memenuhi standard baku mutu dengan system pengendalian proses pembakaran secara otomatis yang dilengkapi dengan system monitoring emisi gas buang secara kontinyu. Sedangkan secara khusus bertujuan untuk

1. Mengidentifikasi komposisi fisik, karakteristik fisika, kimia sampah padat perkotaan.
2. Mengadopsi Sampah sebagai bahan bakar
3. Mengendalikan proses pembakaran sampah dalam insinerator secara otomatis dengan
  - a. Mengendalikan debit aliran gas dan udara dengan menggabungkan sistem kendali *on off* menggunakan katub solenoida dengan katub bola listrik MEBV sehingga

pembakar dapat beroperasi secara pembakar *high-fire/low-fire*. MEBV adalah katub otomatis digunakan untuk mengontrol jumlah aliran gas.

- b. Mengendalikan suhu pembakaran dalam ruang bakar maupun dalam pembakar lanjut secara otomatis
  - c. Menentukan efisiensi pembakaran
4. Merancang bangun sebuah sistem monitoring gas buang hasil pembakaran yaitu gas CO, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, dan NO<sub>2</sub>, dengan mengaplikasikan sistem sensor elektrokimia portabel berbasis sensor gas komersial berbiaya rendah (MQ7, MG811, MQ136, MQ135, ME-O<sub>2</sub>, MQ131).
  5. Merancang bangun sistem akuisisi data suhu untuk pengukuran distribusi suhu dalam tungku pembakaran.

## **F. Manfaat Penelitian**

Hasil penelitian diharapkan dapat bermanfaat untuk

1. Merancang sebuah insinerator sampah yang efisien.
2. Menentukan sampah mana yang dapat digunakan sebagai bahan bakar insinerator guna pemulihan energi.
3. Monitoring gas buang dari proses pembakaran secara kontinyu dengan teknologi nirkabel.
4. Mengendalikan proses pembakaran dalam insinerator\_melalui pengendalian suhu dan aliran gas + udara.
5. Monitoring distribusi suhu dalam ruang bakar.