



ANALISIS PERPINDAHAN PANAS *BOILER* PADA INSINERATOR UNIVERSITAS PAMULANG DENGAN VARIASI SUHU PIPA

Nailul Atifah^{1*}, Heppi Familiana², Budi Kaliwanto³, Rifal Mahardika⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang

E-mail : dosen00410@unpam.ac.id

Masuk : 20 Februari 2026

Direvisi : 16 Maret 2026

Disetujui : 15 April 2026

Abstrak: Pembakaran sampah menggunakan insinerator dapat memanaskan air sehingga menghasilkan uap yang mampu memutar turbin. Turbin dikopel dengan generator untuk menghasilkan energi listrik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu pipa boiler terhadap suhu air dan kenaikan entalpi di sepanjang pipa, serta perubahan fraksi uap di sepanjang pipa setelah mencapai titik didih. Penelitian ini menggunakan metode simulasi Euler berdasarkan data hasil pengukuran. Pipa boiler sepanjang 18 m dipasang di dalam ruang pembakaran insinerator agar dapat menyerap panas secara maksimal. Pipa dihubungkan ke tangki air yang dilengkapi keran dan *flow meter*, sedangkan ujung lainnya dihubungkan ke bak penampung. Suhu pipa dan suhu air di dalam pipa diukur selama proses pembakaran dengan laju alir fluida air diatur sebesar 7 L/menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu pipa boiler, semakin tinggi pula suhu air di dalam pipa. Pada suhu pipa boiler 200 °C, air mencapai titik didih pada panjang pipa 1,82 m. Pada suhu pipa 210 °C, air mencapai titik didih pada panjang pipa 1,72 m, sedangkan pada suhu pipa 220 °C, titik didih dicapai pada panjang pipa 1,61 m. Selain itu, semakin tinggi suhu pipa boiler, kenaikan entalpi air di dalam pipa juga semakin besar. Pada panjang pipa 18 m dengan variasi suhu pipa boiler 200 °C, 210 °C, dan 220 °C, nilai entalpi air yang keluar dari pipa berturut-turut adalah 551,55 kJ/kg, 565,01 kJ/kg, dan 583,76 kJ/kg. Semakin tinggi suhu pipa, fraksi uap air yang terbentuk setelah pendidihan juga semakin besar. Pada panjang pipa 18 m, fraksi uap yang terbentuk pada suhu pipa 200 °C adalah 0,0595 (5,95%), pada suhu pipa 210 °C sebesar 0,0655 (6,55%), dan pada suhu pipa 220 °C sebesar 0,0726 (7,26%). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa peningkatan suhu pipa boiler menyebabkan kenaikan suhu air, entalpi air, serta fraksi uap yang terbentuk setelah pendidihan.

Kata kunci: Insinerator, Boiler, Suhu, Entalpi, Fraksi Uap.

Abstract: Incinerating waste can heat water to produce steam, which drives a turbine. The turbine is coupled with a generator to produce electricity. This study aims to determine the effect of varying boiler pipe temperatures on water temperature and enthalpy rise along the pipe, as well as the effect of pipe temperature variations on the change in vapor fraction along the pipe after the boiling point is reached. The study employs a simulation using the Euler method based on measured data. An 18 m long boiler pipe is installed inside the incinerator's combustion chamber to maximize heat absorption. One end of the pipe is connected to a water tank equipped with a valve and a flow meter, while the other end connects to a collection reservoir. Pipe temperatures and internal water temperatures are measured during combustion with the water flow rate set at 7 L/min. The results indicate that higher boiler pipe temperatures lead to higher water temperatures within the pipe. At a boiler pipe temperature of 200 °C, the water reaches its boiling point at a pipe length of 1.82 m; at 210 °C, it reaches the boiling point at 1.72 m; and at 220 °C, it reaches the boiling point at 1.61 m. Higher boiler pipe temperatures result in a greater rise in water enthalpy. At a

pipe length of 18 m, the enthalpy values of the water exiting the pipe are 551.55 kJ/kg, 565.01 kJ/kg, and 583.76 kJ/kg for boiler pipe temperatures of 200 °C, 210 °C, and 220 °C, respectively. Furthermore, higher pipe temperatures result in a larger vapor fraction forming after boiling occurs. At a pipe length of 18 m, the vapor fraction formed at a pipe temperature of 200 °C is 0.0595 (5.95%); at 210 °C, it is 0.0655 (6.55%); and at 220 °C, it is 0.0726 (7.26%). Thus, it can be concluded that the higher the boiler pipe temperature, the higher the temperature of the water inside the pipe, the greater the enthalpy rise, and the larger the fraction of water vapor formed after boiling.

Keywords: Incinerator, Boiler, Temperature, Enthalpy, Steam Fraction.

PENDAHULUAN

Sampah merupakan produk sampingan dari aktivitas manusia dalam memenuhi kebutuhan sehari-hari. Berdasarkan sifatnya, sampah dibedakan menjadi sampah organik dan sampah anorganik. Sampah organik berasal dari bahan yang berbeda dengan sampah anorganik. Sampah hasil aktivitas manusia perlu dikelola dengan baik agar tidak menimbulkan pencemaran lingkungan. Sampah organik yang tertimbun atau bercampur dengan sampah anorganik dapat menyebabkan pencemaran lingkungan. Selain itu, pembuangan penumpukan sampah dalam waktu lama tanpa adanya pengolahan berpotensi mengganggu warga di sekitar lokasi [1].

Volume sampah terus meningkat seiring bertambahnya aktivitas manusia, sementara luas area tempat pemrosesan akhir sampah sangat terbatas. Oleh karena itu, diperlukan solusi pengelolaan sampah yang efektif untuk meminimalisasi kebutuhan lahan dan mengurangi dampak buruk terhadap lingkungan. Pengolahan sampah secara termal melalui pembakaran dinilai cukup efektif karena mampu mengurangi volume sampah hingga 90% dalam waktu singkat, sedangkan metode pengomposan, *landfill*, dan *open dumping* hanya mampu mengurangi volume sebesar 40% dari volume awal [2].

Selain mengurangi volume, pengolahan sampah dengan sistem termal dapat menghasilkan energi panas yang dapat dimanfaatkan kembali. Namun di sisi lain, proses ini membutuhkan energi awal yang cukup besar untuk memantik pembakaran. Kadar air yang tinggi pada sampah juga menjadi kendala karena menyebabkan sampah sulit terbakar. Secara umum, kinerja pengolahan sampah secara termal dipengaruhi oleh tiga parameter utama, yaitu kecepatan pembakaran, suhu, dan komposisi gas buang [3].

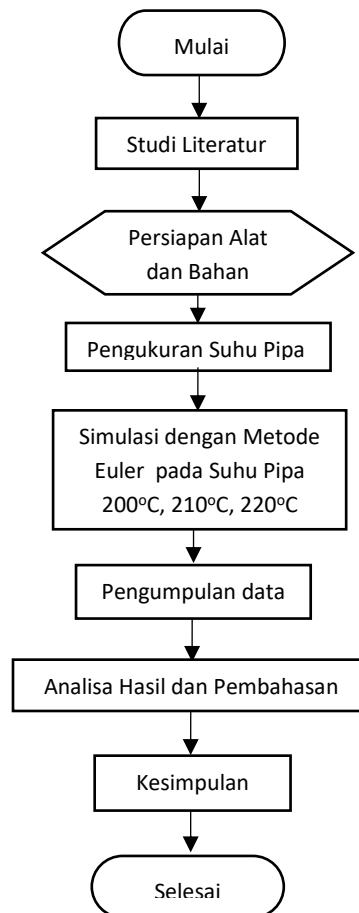
Dua contoh sampah yang banyak dihasilkan oleh aktivitas manusia adalah plastik dan kertas. Plastik berperan penting dalam kehidupan sehari-hari karena sebagian besar peralatan di lingkungan manusia terbuat dari bahan tersebut, antara lain perlengkapan mandi, wadah telur, tempat sabun, alat makan, alat minum, dan alat tulis [4]. Selain plastik, kertas juga banyak digunakan masyarakat, seperti untuk pembungkus makanan atau minuman, bahan pembuatan kardus, serta media tulis bagi mahasiswa dan pekerja kantor [5]. Di sisi lain, pertambahan jumlah penduduk dan peningkatan aktivitas masyarakat Indonesia dari hari ke hari berbanding lurus dengan peningkatan volume sampah. Indonesia bahkan termasuk salah satu negara penyumbang sampah terbesar di dunia yang masih menghadapi kendala dalam pengelolaan sampahnya [6].

Salah satu teknik pengolahan sampah adalah dengan memanfaatkannya sebagai bahan bakar pada pembangkit listrik. Sampah dibakar di dalam insinerator sehingga terurai menjadi gas dan abu (*bottom ash* dan *fly ash*) dengan volume yang jauh lebih kecil serta menghasilkan energi panas yang dapat dimanfaatkan. Proses insinerasi ini dipengaruhi oleh suhu dan waktu pembakaran [7], [8]. Energi listrik dapat dihasilkan dengan menempatkan *boiler* di dalam ruang pembakaran insinerator. *Boiler* berfungsi untuk memanaskan air menggunakan panas hasil pembakaran, sehingga air yang dipanaskan tersebut bertransformasi menjadi *steam* (uap air bersuhu tinggi) [9].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu pipa *boiler* terhadap suhu air di dalam pipa, kenaikan entalpi, dan perubahan fraksi uap di sepanjang pipa. Data suhu pipa *boiler* dan suhu air di dalam pipa diperoleh dari hasil eksperimen. Selanjutnya, perubahan suhu air, entalpi air, serta fraksi uap di dalam pipa *boiler*

METODOLOGI

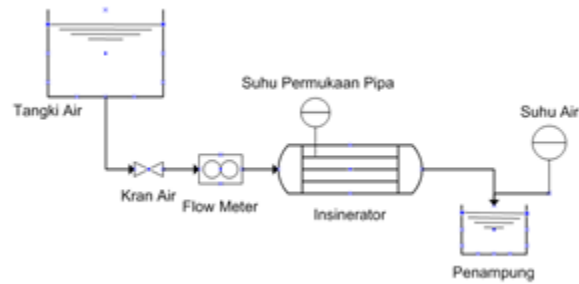
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dan simulasi perhitungan. Tahapan penelitian secara rinci disajikan pada diagram alir Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi insinerator, *thermograph*, termokopel, pipa *boiler*, *stopwatch*, *flow meter*, selang air, dan perangkat lunak *CoolPack*. Sementara itu, bahan yang digunakan adalah sampah domestik dan gas LPG.

Eksperimen yang dilakukan pada penelitian ini berupa pengukuran suhu pipa dan suhu air yang mengalir di dalam pipa yang menyerap panas dari pembakaran sampah domestik menggunakan insinerator. Susunan (*setup*) eksperimen ditunjukkan pada Gambar 2. Adapun parameter yang digunakan dalam pengukuran suhu pipa dan suhu air yang mengalir di dalam pipa disajikan pada Tabel 1. Sebelum pengambilan data dilakukan, beberapa pengujian pendahuluan telah dilaksanakan, yaitu pengujian aliran air dari tangki air menuju sisi masukan (*input*) pipa *boiler* hingga sisi keluaran (*output*) pipa *boiler*, pengujian *thermograph* untuk pengukuran suhu permukaan pipa *boiler*, serta pengujian termokopel untuk pengukuran suhu air pada sisi keluaran pipa *boiler*.



Gambar 2. Skematik Pengukuran Suhu Permukaan Pipa Boiler

Tabel 1. Parameter yang Digunakan dalam Pengukuran

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1	Bahan Pipa	Baja	-
2	Panjang Pipa	18	m
3	Konduktivitas Termal (k)	43	W/m · °C
4	Diameter Dalam (D_i)	0,00922	m
5	Diameter Luar (D_o)	0,0137	m
6	Debit Air	7	L/menit
7	Tekanan Udara	1	atm

Langkah selanjutnya adalah mengoperasikan insinerator dengan cara memutar sakelar kontrol dan menekan tombol kontrol utama ke posisi *ON*. Sampah kemudian dimasukkan ke dalam ruang pembakaran setelah insinerator dinyalakan menggunakan gas LPG sebagai bahan bakar. Setelah pembakaran berlangsung, *blower* dihidupkan untuk menyerap gas hasil pembakaran dari ruang bakar guna menjaga tekanan ruang pembakaran tetap negatif. Selanjutnya, termokopel dihidupkan untuk mengukur suhu ruang bakar sekaligus memberi sinyal alarm. Keran dibuka untuk mengalirkan air ke dalam pipa *boiler* dengan debit 7 L/menit, kemudian suhu rata-rata permukaan pipa *boiler* dan suhu air dicatat. Apabila proses pembakaran telah selesai, insinerator dimatikan.

Persamaan yang digunakan dalam perhitungan perpindahan panas disajikan sebagai berikut [10], [11].

2.1 Perpindahan Panas secara Konduksi

Persamaan dasar konduksi disajikan pada Persamaan (1).

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

dengan q menyatakan laju perpindahan panas (watt), k adalah konduktivitas termal (W/m · °C), A merupakan luas penampang perpindahan panas (m²), T adalah suhu (°C), dan x menggambarkan arah perpindahan panas (m). Setelah diintegrasikan, persamaan tersebut menjadi Persamaan (2).

$$\frac{q}{A} = k \cdot \frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1} \quad (2)$$

di mana $\Delta T = T_1 - T_2$ menyatakan selisih temperatur yang melintasi bahan (°C) dan $\Delta x = x_2 - x_1$ adalah tebal bahan (m). Sementara itu, persamaan untuk sistem radial silinder ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dr} \quad (3)$$

2.2 Perpindahan Panas secara Konveksi

Persamaan dasar konveksi disajikan pada Persamaan (4).

$$h_{\text{conv}} = \frac{k}{D} \cdot Nu \quad (4)$$

dengan h_{conv} menyatakan koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$), D adalah diameter dalam (m), dan Nu merupakan bilangan Nusselt. Panas yang dipindahkan pada peristiwa konveksi dapat berupa panas laten dan panas sensibel.

2.3 Perpindahan Panas secara Radiasi

Persamaan dasar radiasi disajikan pada Persamaan (5).

$$q = \varepsilon \cdot \alpha \cdot A \cdot T^4 \quad (5)$$

dengan ε menyatakan emisivitas dan α adalah tetapan Stefan-Boltzmann ($5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$).

2.4 Bilangan Nusselt

Bilangan Nusselt adalah bilangan tak berdimensi yang menyatakan perbandingan antara koefisien perpindahan panas konveksi terhadap konduktivitas termal fluida. Persamaannya disajikan pada Persamaan (6).

$$Nu_D = 0,023 \cdot Re_D^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (6)$$

dengan Pr menyatakan bilangan Prandtl dan Re adalah bilangan Reynolds.

2.5 Bilangan Prandtl

Bilangan Prandtl adalah perbandingan momen difusi atau viskositas kinematik terhadap difusi termal. Bilangan Prandtl dapat dinyatakan sebagai ukuran efisiensi perpindahan momentum dan energi dari suatu fluida yang mengalir dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah dengan kecepatan dan lapisan batas termal. Persamaannya ditunjukkan pada Persamaan (7).

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{k/\rho \cdot c_p} = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (7)$$

dengan c_p menyatakan kalor jenis air ($\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$) dan μ adalah viskositas dinamik ($\text{kg/m} \cdot \text{s}$).

2.6 Debit Air

Debit air adalah kecepatan volume aliran fluida pada jarak horizontal dalam satuan waktu. Debit air menggunakan satuan m^3/s . Persamaan yang digunakan disajikan pada Persamaan (8) hingga (10).

$$A_D = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (8)$$

$$\dot{V} = v \cdot A \quad (9)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad (10)$$

dengan A menyatakan luas penampang (m^2), D adalah diameter (m), $\dot{V}$ merupakan debit (m^3/s), v adalah laju aliran air (m/s), $\dot{m}$ menyatakan laju massa air (kg/s), dan ρ adalah massa jenis air (kg/m^3).

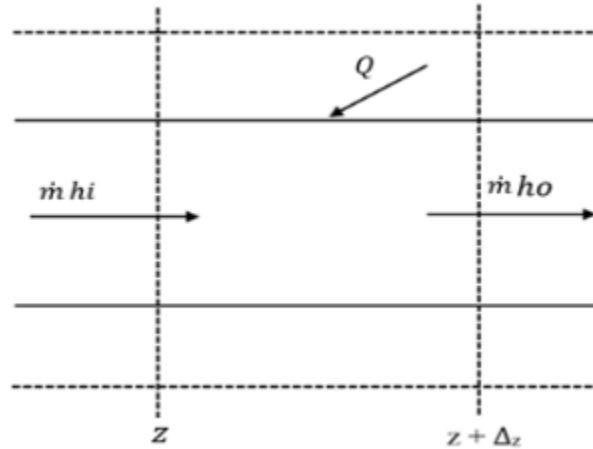
2.7 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds adalah rasio antara gaya inersia dan gaya kental dalam fluida (air) yang mengalami gerakan internal relatif karena kecepatan fluida yang berbeda. Bila nilai Reynolds kurang dari 2300 ($Re < 2300$), maka aliran dalam pipa adalah aliran laminar. Kemudian $2300 < Re < 4000$ merupakan aliran transisi, dan $Re > 4000$ adalah aliran turbulen. Persamaannya ditunjukkan pada Persamaan (11).

$$Re = \frac{\rho \cdot v}{\mu} \quad (11)$$

dengan ρ menyatakan massa jenis air (kg/m^3), v adalah kecepatan (m/s), dan μ adalah viskositas cairan ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$). Metode Euler merupakan teknik numerik yang digunakan untuk menentukan nilai fungsi baru berdasarkan nilai

lama ditambah hasil kali kemiringan (*slope*) dan ukuran langkah (*step size*). Skema analisis perpindahan panas pada pipa boiler menggunakan metode Euler disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema Perpindahan Panas pada Pipa Boiler

2.8 Neraca Energi dan Analisis Perpindahan Panas

Analisis perpindahan panas dilakukan pada kondisi *steady state*. Persamaan neraca energi umum disajikan pada Persamaan (12).

$$\frac{dE}{dt} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \quad (12)$$

dengan $\frac{dE}{dt}$ menyatakan laju akumulasi energi pada sistem (J/s), $\dot{E}_{in}$ adalah laju aliran energi yang masuk sistem (J/s), dan $\dot{E}_{out}$ merupakan laju aliran energi yang keluar sistem (J/s). Karena berada pada kondisi *steady state*, nilai $\frac{dE}{dt} = 0$, sehingga menghasilkan Persamaan (13).

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad (13)$$

Persamaan neraca energi tersebut dikembangkan lebih lanjut melalui Persamaan (14) hingga (20).

$$\dot{m} \cdot h_z + Q = \dot{m} \cdot h_{z+\Delta z} \quad (14)$$

$$h_z = C_p \cdot T_{air} \quad (15)$$

$$h_{z+\Delta z} = h_z + \Delta z \cdot \frac{dh}{dz} \quad (16)$$

$$\frac{dh}{dz} = \frac{U \cdot \pi \cdot D \cdot (T_{pipa} - T_{air})}{\dot{m}} \quad (17)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h} + R_2} \quad (18)$$

$$R_2 = \frac{r \cdot \ln(r_o/r_i)}{k} \quad (19)$$

$$T_{z+\Delta z} = \frac{h_{z+\Delta z}}{C_p} \quad (20)$$

dengan $\dot{m}$ menyatakan laju aliran massa air (kg/s), h_z adalah entalpi air pada koordinat z (kJ/kg), $h_{z+\Delta z}$ merupakan entalpi air di koordinat $z + \Delta z$ (kJ/kg), Q adalah panas yang berpindah dari pipa ke air (KWatt), U menyatakan koefisien perpindahan panas total ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), R_2 adalah resistansi thermal pipa ($^\circ C/W$), $\frac{dh}{dz}$ merupakan gradien entalpi terhadap arah aliran air (J/kg $\cdot$ m), dan $T_{z+\Delta z}$ menyatakan suhu air pada iterasi setelah z ($^\circ C$).

2.9 Fraksi Uap

Fraksi uap menggambarkan sistem kesetimbangan uap cair dalam distribusi campuran kimia antara fase gas serta fase cair. Komponen mol fase uap disebut fraksi uap, dengan persamaan Persamaan (21) dan (22).

$$h_x = h_f + x \cdot h_{fg} \quad (21)$$

$$x = \frac{h_x - h_f}{h_g - h_f} \quad (22)$$

dengan h_x menyatakan enthalpi fraksi uap (kJ/kg), x adalah fraksi uap, h_f merupakan enthalpi air jenuh (kJ/kg), dan h_g adalah enthalpi uap jenuh (kJ/kg).

HASIL DAN PEMBAHASAN

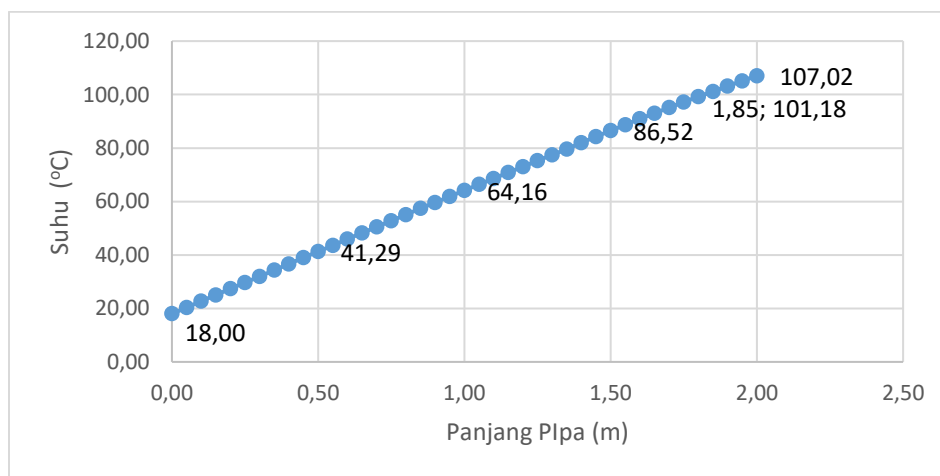
Berdasarkan eksperimen yang dilakukan, data hasil pengukuran disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengukuran

No.	Suhu Pipa Boiler (°C)	Suhu Air Keluar Pipa Boiler (°C)
1	200	100
2	210	100
3	220	100

3.1 Hasil Simulasi Pipa Boiler dengan Suhu Pipa 200 °C

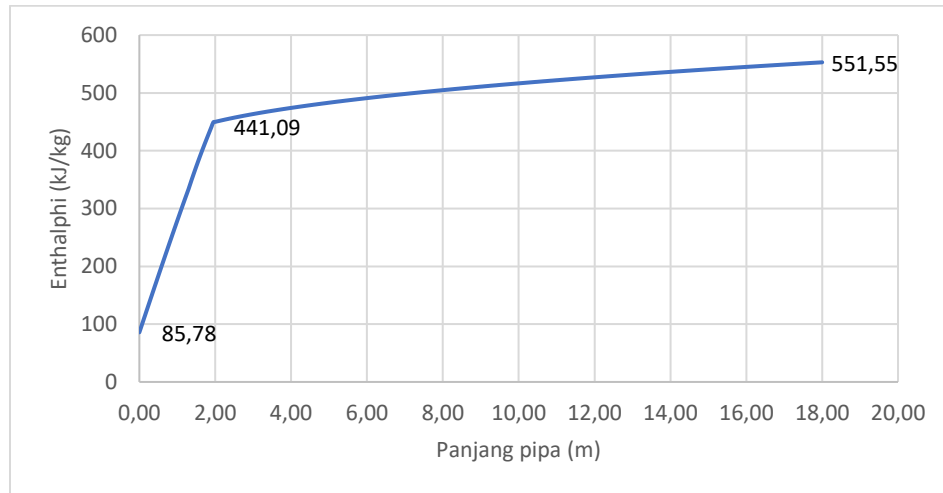
Berdasarkan data sifat termofisika (*thermophysical properties*) dan perangkat lunak *CoolPack*, air pada suhu 50,544 °C dan panjang pipa 0,85 m memiliki nilai viskositas dinamik $\mu = 5,622 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, konduktivitas termal $k = 0,638 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, serta kapasitas kalor spesifik $c_p = 4,206 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. Selanjutnya, untuk menganalisis perpindahan panas dari pipa boiler yang bersuhu 200 °C ke air di dalamnya, simulasi dilakukan menggunakan metode Euler pada setiap interval 5 cm pipa boiler. Dengan menerapkan Persamaan (6) hingga Persamaan (20), suhu air di dalam pipa boiler mengalami kenaikan menjadi 52,835 °C pada segmen tersebut. Perubahan suhu air di dalam pipa boiler hingga mencapai titik didih disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Perubahan Suhu Air di dalam Pipa pada Suhu Pipa 200 °C

Berdasarkan Gambar 4, terlihat bahwa suhu air di dalam pipa mengalami kenaikan secara linear. Air masuk ke dalam pipa boiler pada suhu awal 18 °C. Air tersebut menerima kalor dari dinding pipa boiler yang memiliki suhu permukaan luar rata-rata 200 °C. Setelah mengalir sejauh 5 cm, air menerima panas sehingga suhunya meningkat sebesar 2,33 °C. Dengan laju kenaikan suhu linear sebesar 2,33 °C per 5 cm, air mencapai titik didih pada suhu 100 °C setelah melintasi pipa boiler sepanjang 1,82 m. Pada tekanan 1 atm, air tersebut mulai mengalami pendidihan.

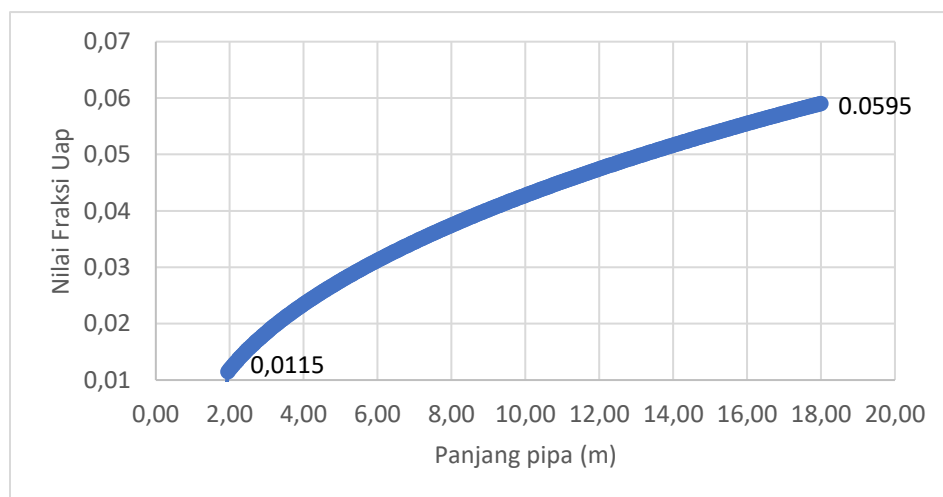
Perubahan entalpi air dari saat masuk ke pipa *boiler*, mengalami pendidihan, hingga mencapai panjang pipa 18 m disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Perubahan Entalpi Air di dalam Pipa pada Suhu Pipa 200 °C

Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa entalpi air di dalam pipa mengalami kenaikan yang sangat signifikan sebelum mencapai titik didih. Pada panjang pipa 1,80 m, nilai entalpi air mencapai 424,709 kJ/kg dengan kenaikan rata-rata sebesar 1,646 kJ/kg setiap 1 cm panjang pipa. Setelah mengalami pendidihan, kenaikan entalpi melambat menjadi sebesar 0,097 kJ/kg setiap 1 cm panjang pipa. Fenomena ini terjadi karena sebelum mencapai titik didih, kalor yang diserap digunakan sepenuhnya untuk menaikkan suhu air (kalor sensibel), sehingga entalpi meningkat seiring peningkatan suhu. Sebaliknya, saat air telah mencapai titik didih, kalor yang diserap dialokasikan untuk proses perubahan fasa dari cair menjadi uap (kalor laten), sehingga kenaikan entalpi spesifik fluida menjadi relatif lebih kecil.

Setelah air mengalami perubahan fasa dari cair menjadi uap, fasa uap air mulai terbentuk. Perubahan fraksi uap dari awal terjadinya pendidihan hingga ujung pipa sepanjang 18 m disajikan pada Gambar 6.



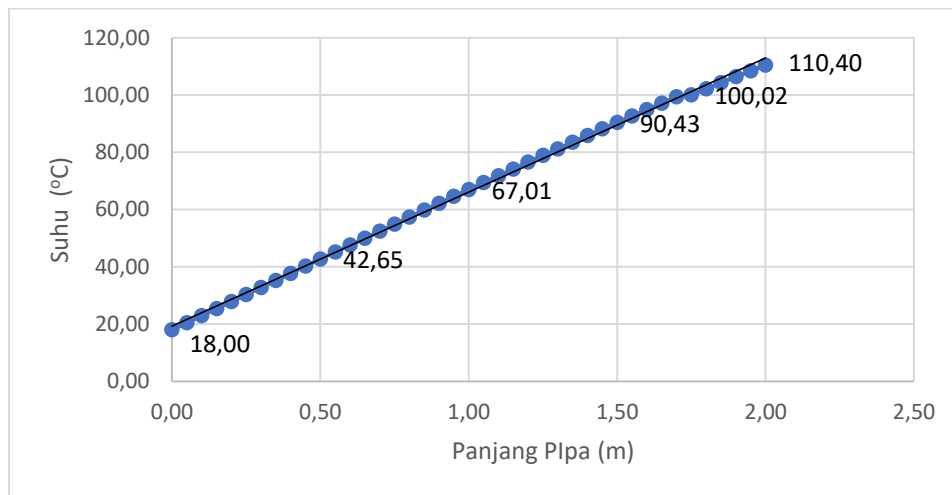
Gambar 6. Grafik Perubahan Fraksi Uap Air pada Suhu Pipa 200 °C

Gambar 6 menyajikan perkembangan fraksi uap di sepanjang pipa saat air mencapai titik didih dan mengalami transisi fasa dari cair ke gas. Fraksi uap yang terbentuk setelah air mengalir sejauh 5 cm dari titik didih awal adalah sebesar 0,0101 (1,01%). Pada panjang pipa 10 m, fraksi uap yang terbentuk meningkat menjadi 0,0435 (4,35%).

Selanjutnya, pada titik akhir pipa sepanjang 18 m, nilai fraksi uap mencapai 0,0595 (5,95%). Laju perubahan fraksi uap air tercatat sebesar 0,36% per meter panjang pipa *boiler*.

3.2 Hasil Simulasi Pipa Boiler dengan Suhu Pipa 210 °C

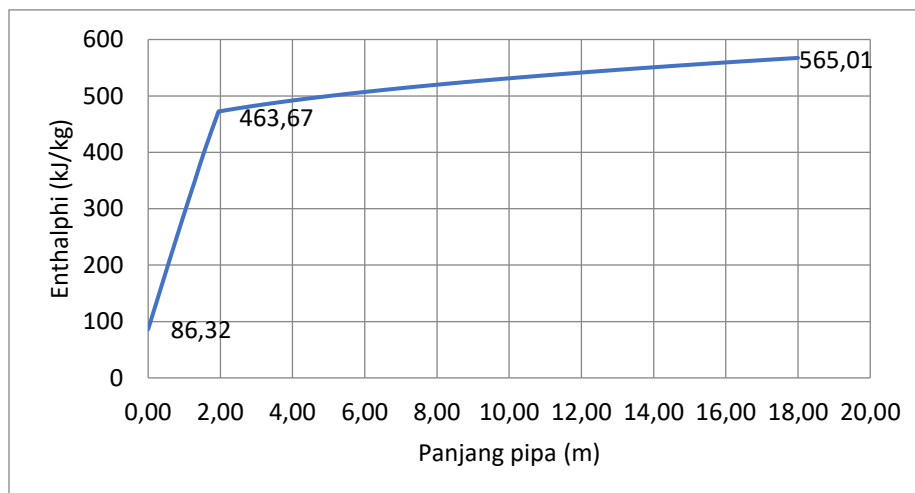
Berdasarkan data sifat termofisika (*thermophysical properties*) dan perangkat lunak *CoolPack*, air pada suhu 51,96 °C dan panjang pipa 0,85 m memiliki nilai viskositas dinamik $\mu = 5,50 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, konduktivitas termal $k = 0,6397 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, serta kapasitas kalor spesifik $c_p = 4,206 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. Dengan menerapkan Persamaan (6) hingga Persamaan (20), suhu air di dalam pipa *boiler* mengalami kenaikan menjadi 54,225 °C pada segmen tersebut. Perubahan suhu air di dalam pipa *boiler* hingga mencapai titik didih disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Perubahan Suhu Air di dalam Pipa pada Suhu Pipa 210 °C

Berdasarkan Gambar 7, terlihat bahwa suhu air di dalam pipa mengalami kenaikan secara linear. Air masuk ke dalam pipa *boiler* pada suhu awal 18 °C. Air tersebut menerima kalor dari dinding pipa *boiler* yang memiliki suhu permukaan luar rata-rata 210 °C. Setelah mengalir sejauh 5 cm, air menerima panas sehingga suhunya meningkat sebesar 2,47 °C. Dengan laju kenaikan suhu linear sebesar 2,47 °C per 5 cm, air mencapai titik didih pada suhu 100 °C setelah melintasi pipa *boiler* sepanjang 1,72 m. Pada tekanan 1 atm, air tersebut mulai mengalami pendidihan.

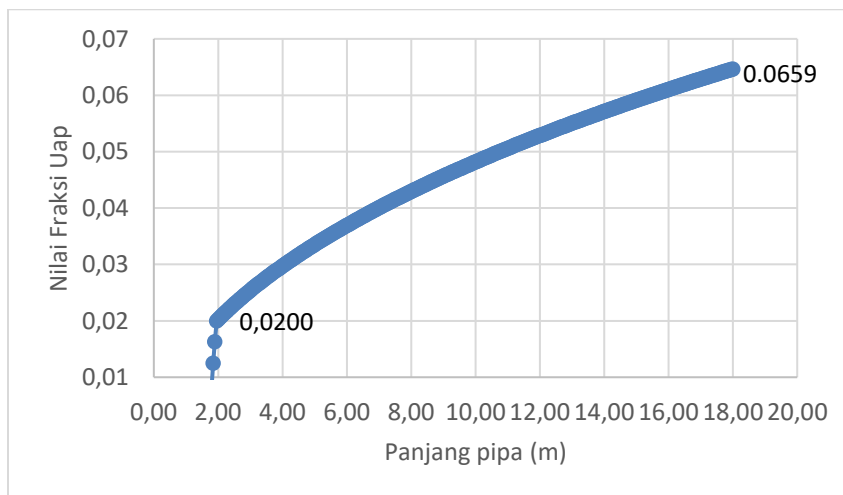
Perubahan entalpi air di dalam pipa dari saat masuk, mencapai pendidihan, hingga melintasi pipa sepanjang 18 m disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Perubahan Entalpi Air di dalam Pipa pada Suhu Pipa 210 °C

Berdasarkan Gambar 8, terlihat bahwa entalpi air di dalam pipa mengalami kenaikan yang sangat signifikan sebelum mencapai titik didih. Pada panjang pipa 1,80 m, nilai entalpi air mencapai 466,024 kJ/kg dengan kenaikan rata-rata sebesar 1,773 kJ/kg setiap 1 cm panjang pipa. Setelah mengalami pendidihan, kenaikan entalpi melambat menjadi sebesar 0,086 kJ/kg setiap 1 cm panjang pipa. Fenomena ini terjadi karena sebelum mencapai titik didih, kalor yang diserap digunakan sepenuhnya untuk menaikkan suhu air (kalor sensibel), sehingga entalpi meningkat seiring peningkatan suhu. Sebaliknya, saat air telah mencapai titik didih, kalor yang diserap dialokasikan untuk proses perubahan fasa dari cair menjadi uap (kalor laten), sehingga kenaikan entalpi spesifik fluida menjadi relatif lebih kecil.

Setelah air mengalami perubahan fasa dari cair menjadi uap, fasa uap air mulai terbentuk. Perubahan fraksi uap dari awal terjadinya pendidihan hingga ujung pipa sepanjang 18 m disajikan pada Gambar 9.

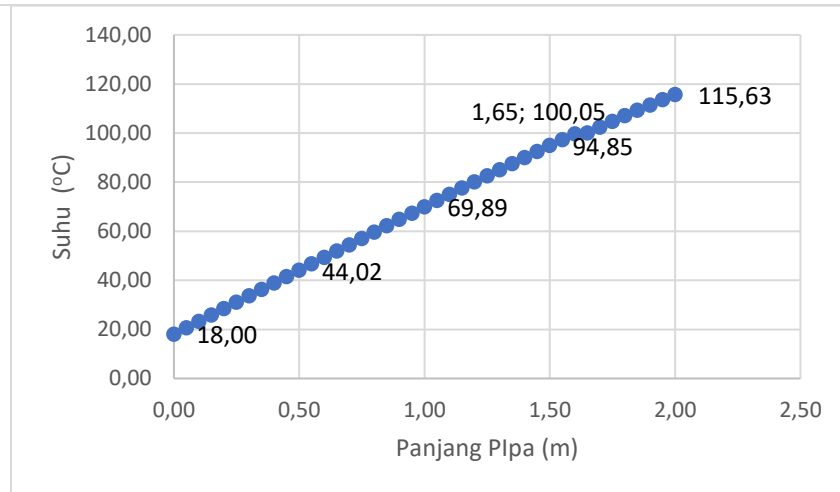


Gambar 9. Grafik Perubahan Fraksi Uap Air pada Suhu Pipa 210 °C

Gambar 9 menyajikan perkembangan fraksi uap di sepanjang pipa saat air mencapai titik didih dan mengalami transisi fasa dari cair ke gas. Setelah mengalami pendidihan, fraksi uap yang terbentuk setelah air mengalir sejauh 5 cm dari titik didih awal adalah sebesar 0,0114 (1,14%). Pada panjang pipa 10 m, fraksi uap yang terbentuk meningkat menjadi 0,0493 (4,93%). Selanjutnya, pada titik akhir pipa sepanjang 18 m, nilai fraksi uap mencapai 0,0655 (6,55%). Laju perubahan fraksi uap air tercatat sebesar 0,40% per meter panjang pipa *boiler*.

3.3 Hasil Simulasi Pipa *Boiler* dengan Suhu Pipa 220 °C

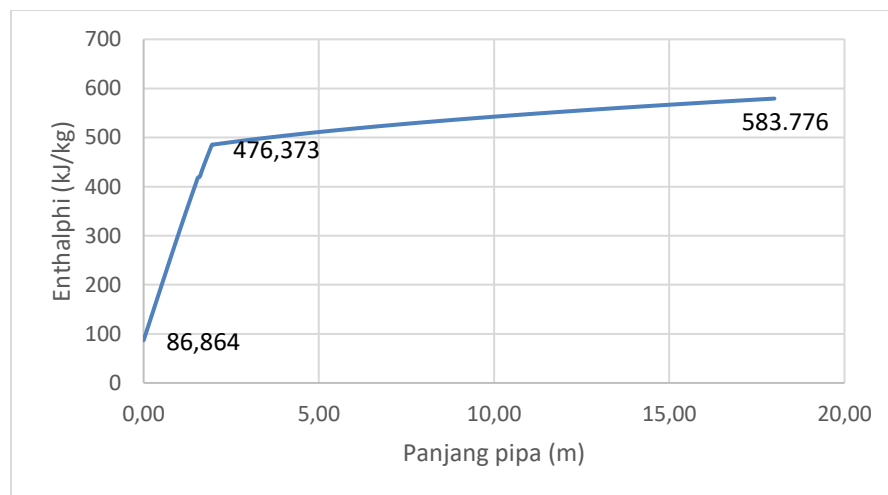
Berdasarkan data sifat termofisika (*thermophysical properties*) dan perangkat lunak *CoolPack*, air pada suhu 53,40 °C dan panjang pipa 0,85 m memiliki nilai viskositas dinamik $\mu = 5,386 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, konduktivitas termal $k = 0,64108 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, serta kapasitas kalor spesifik $c_p = 4,2053 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. Dengan menerapkan Persamaan (6) hingga Persamaan (20), suhu air di dalam pipa *boiler* mengalami kenaikan menjadi 55,994 °C pada segmen tersebut. Perubahan suhu air di dalam pipa *boiler* hingga mencapai titik didih disajikan pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik Perubahan Suhu Air di dalam Pipa pada Suhu Pipa 220 °C

Berdasarkan Gambar 10, terlihat bahwa suhu air di dalam pipa mengalami kenaikan secara linear. Air masuk ke dalam pipa *boiler* pada suhu awal 18 °C. Air tersebut menerima kalor dari dinding pipa *boiler* yang memiliki suhu permukaan luar rata-rata 220 °C. Setelah mengalir sejauh 5 cm, air menerima panas sehingga suhunya meningkat sebesar 2,59 °C. Dengan laju kenaikan suhu linear sebesar 2,59 °C per 5 cm, air mencapai titik didih pada suhu 100 °C setelah melintasi pipa *boiler* sepanjang 1,61 m. Pada tekanan 1 atm, air tersebut mulai mengalami pendidihan.

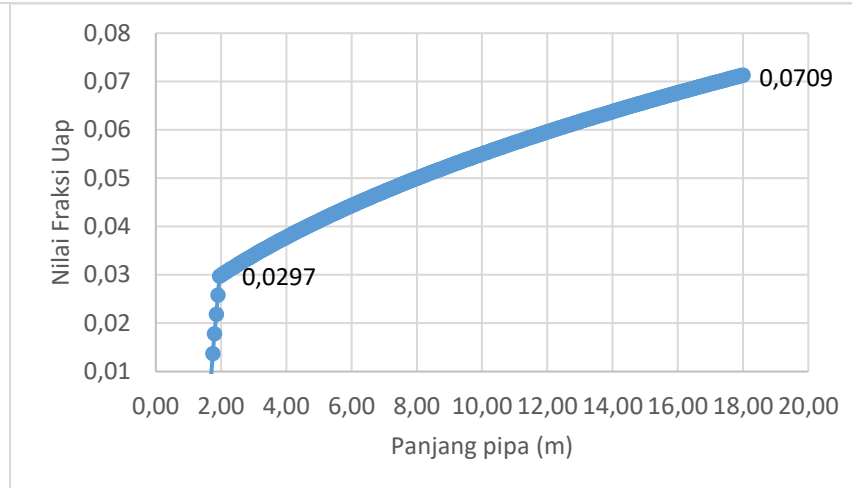
Perubahan entalpi air di dalam pipa dari saat masuk, mencapai pendidihan, hingga melintasi pipa sepanjang 18 m disajikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Grafik Perubahan Entalpi Air di dalam Pipa pada Suhu Pipa 220 °C

Berdasarkan Gambar 11, terlihat bahwa entalpi air di dalam pipa mengalami kenaikan yang sangat signifikan sebelum mencapai titik didih. Pada panjang pipa 1,80 m, nilai entalpi air mencapai 458,009 kJ/kg dengan kenaikan rata-rata sebesar 1,938 kJ/kg setiap 1 cm panjang pipa. Setelah mengalami pendidihan, kenaikan entalpi melambat menjadi sebesar 0,075 kJ/kg setiap 1 cm panjang pipa. Fenomena ini terjadi karena sebelum mencapai titik didih, kalor yang diserap digunakan sepenuhnya untuk menaikkan suhu air (kalor sensibel), sehingga entalpi meningkat seiring peningkatan suhu. Sebaliknya, saat air telah mencapai titik didih, kalor yang diserap dialokasikan untuk proses perubahan fasa dari cair menjadi uap (kalor laten), sehingga kenaikan entalpi spesifik fluida menjadi relatif lebih kecil.

Setelah air mengalami perubahan fasa dari cair menjadi uap, fasa uap air mulai terbentuk. Perubahan fraksi uap dari awal terjadinya pendidihan hingga ujung pipa sepanjang 18 m disajikan pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik Perubahan Fraksi Uap Air pada Suhu Pipa 220 °C

Gambar 12 menyajikan perkembangan fraksi uap di sepanjang pipa saat air mencapai titik didih dan mengalami transisi fasa dari cair ke gas. Setelah mengalami pendidihan, fraksi uap yang terbentuk setelah air mengalir sejauh 5 cm dari titik didih awal adalah sebesar 0,0130 (1,30%). Pada panjang pipa 10 m, fraksi uap yang terbentuk meningkat menjadi 0,0568 (5,68%). Selanjutnya, pada titik akhir pipa sepanjang 18 m, nilai fraksi uap mencapai 0,0726 (7,26%). Laju perubahan fraksi uap air tercatat sebesar 0,44% per meter panjang pipa *boiler*.

Perbedaan suhu pipa *boiler* menyebabkan perbedaan fraksi uap yang terbentuk di dalam pipa *boiler*. Pada suhu pipa 200 °C, laju kenaikan fraksi uap adalah sebesar 0,36% per meter. Pada suhu pipa 210 °C, laju kenaikan fraksi uap meningkat menjadi 0,40% per meter. Sementara itu, pada suhu pipa 220 °C, laju kenaikan fraksi uap mencapai 0,44% per meter. Kenaikan suhu pipa dari 200 °C ke 210 °C menyebabkan peningkatan fraksi uap sebesar 0,60%, sedangkan kenaikan suhu pipa dari 210 °C ke 220 °C menyebabkan peningkatan fraksi uap sebesar 0,71%. Hal ini menunjukkan bahwa suhu di dalam ruang bakar insinerator sangat menentukan nilai fraksi uap yang terbentuk pada pipa *boiler*.

Simulasi dengan tiga variasi suhu pipa *boiler* ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu pipa, semakin tinggi pula suhu air di dalam pipa serta gradien kenaikan suhu airnya. Semakin tinggi suhu pipa *boiler*, nilai entalpi air di dalam pipa semakin tinggi, demikian pula gradien kenaikan entalpi airnya. Selain itu, semakin tinggi suhu pipa, fraksi uap air yang terbentuk setelah pendidihan menjadi semakin besar, begitu pula gradien kenaikan fraksi uap air di dalam pipa.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Semakin tinggi suhu pipa *boiler*, semakin tinggi pula suhu air di dalam pipa. Pada suhu pipa *boiler* 200 °C, air mencapai titik didih pada panjang pipa 1,82 m. Pada suhu pipa 210 °C, air mencapai titik didih pada panjang pipa 1,72 m, sedangkan pada suhu pipa 220 °C, air mencapai titik didih pada panjang pipa 1,61 m.
2. Semakin tinggi suhu pipa *boiler*, kenaikan entalpi air di dalam pipa menjadi semakin besar. Pada panjang pipa 18 m dengan variasi suhu pipa *boiler* 200 °C, 210 °C, dan 220 °C, nilai entalpi air yang keluar dari pipa berturut-turut adalah 551,55 kJ/kg, 565,01 kJ/kg, dan 583,76 kJ/kg.

3. Semakin tinggi suhu pipa *boiler*, fraksi uap air yang terbentuk setelah pendidihan menjadi semakin besar. Pada panjang pipa 18 m, fraksi uap yang terbentuk pada variasi suhu pipa 200 °C adalah sebesar 0,0595 (5,95%), pada variasi suhu pipa 210 °C sebesar 0,0655 (6,55%), dan pada variasi suhu pipa 220 °C sebesar 0,0726 (7,26%).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Martana, S. Sulasminingsih, and M. Lukmana, "Perencanaan dan Uji Performa Alat Pembakar Sampah Organik," *Bina Tek.*, vol. 13, no. 1, pp. 65–71, Aug. 2017.
- [2] Sukamta, A. Winata, and Thoharuddin, "Pembuatan Alat Incinerator Limbah Padat Medis Skala Kecil," *Semesta Tek.*, vol. 20, no. 2, pp. 147–153, Nov. 2017.
- [3] A. J. Rudend and J. Hermana, "Kajian Pembakaran Sampah Plastik Jenis Polipropilena (PP) Menggunakan Insinerator," *J. Tek. ITS*, vol. 9, no. 2, pp. 124–130, 2020.
- [4] N. Restu, "Jenis-Jenis Plastik dan Bahaya yang Terkandung di Dalamnya." Gramedia Literasi, Jun. 2023. [Online]. Available: <https://www.gramedia.com/literasi/jenis-jenis-plastik/>
- [5] A. Sudaryatno, "Pengertian Kertas." Mar. 08, 2010. [Online]. Available: <https://arisudaryatno.blogspot.com/2010/03/pengertian-kertas.html>
- [6] H. BRIN, "11,3 Juta Ton Sampah di Indonesia Tidak Terkelola dengan Baik." Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jul. 26, 2024. [Online]. Available: <https://brin.go.id/drid/posts/kabar/113-juta-ton-sampah-di-indonesia-tidak-terkelola-dengan-baik>
- [7] J. M. Smith, H. C. Van Ness, and M. M. Abbott, *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, 7th ed. Boston: McGraw-Hill Education, 2005.
- [8] D. H. Kim *et al.*, "Risk perceptions of a population living near a municipal waste incinerator and associated factors with the prevalence of environmental disease," *Ann Occup Env. Med*, vol. 34, p. e38, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.35371/aoem.2022.34.e38>.
- [9] G. Bennett and C. Elwell, "Effect of boiler oversizing on efficiency: a dynamic simulation study," *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, vol. 41, no. 6, pp. 709–726, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/0143624420927352>.
- [10] J. P. Holman, *Perpindahan Kalor*. Jakarta: Penerbit Erlangga, 1977.
- [11] A. Bejan and A. D. Kraus, *Heat Transfer Handbook*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.