

Penentuan Temperatur Optimal Pembakaran *Boiler* untuk Karbonisasi Hidrotermal Sampah Organik Melalui Model Semi-Analitik Perpindahan Panas

Determination of Optimal *Boiler* Combustion Temperature for Hydrothermal Carbonization of Organic Waste Through A Semi-Analytic Heat Transfer Model

DIAN P. DEWANTI¹⁾, ALBERT SULAIMAN²⁾

Pusat Teknologi Lingkungan, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT)
Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Wilayah (PTPSW), Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT)
Gedung 820 Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan,
Email: dian.purwitasari@bppt.go.id

ABSTRACT

A boiler is one of the most important equipment in the hydrothermal carbonization process. Steam produced from the boiler is used to breakdown organic waste in the reactor in the hydrothermal carbonization process. This steam is produced from heat transfer resulting from fuel combustion. The effectiveness of heat transfer affects the amount of the fuel consumed and the air emissions produced by the combustion process. The study of the heat transfer in a water tube typed boiler through Rayleigh-Benard convection semi-analytic modeling was carried out in this study. The boiler is modeled as a cylinder of two-dimensions with degrees of freedom of radius and height of the cylinder. Semi-analytic solutions are obtained by applying the Galerkin method where ordinary nonlinear differential equation systems are solved using the 4th order Runge-Kutta method. The results show the amplitude that is a function of the stream and thermal dispersion will oscillate sharply at the start of the heating process and then periodically oscillate with small variability as quasi patterns. The simulation shows that the rolling condition starts with a large rolling radius and then shrinks that is followed by uniformly distributed rolling and thermal spread throughout the boiler. The simulation results show the optimal temperature is around 300 oC. At this temperature, steam meets the conditions needed during the hydrothermal carbonization process of organic waste and fuel consumption can be adjusted to reduce air emissions resulting from combustion.

Key words: boiler, convective, heat transfer, hydrothermal carbonization, Rayleigh-Benard.

ABSTRAK

Boiler atau ketel uap merupakan salah satu peralatan utama yang sangat penting pada proses karbonisasi hidrotermal. Uap air (*steam*) yang dihasilkan dari *boiler* dibutuhkan untuk proses karbonisasi hidrotermal sampah organik dalam reaktor. Produksi uap disebabkan oleh perpindahan panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar. Efektifitas perpindahan panas mempengaruhi jumlah bahan bakar yang dibutuhkan dan emisi udara yang dihasilkan oleh proses pembakaran tersebut. Kajian perpindahan panas dalam *boiler* bertipe *water tube* melalui pemodelan semi analitik konveksi Rayleigh-Benard dilakukan dalam penelitian ini. *Boiler* dimodelkan sebagai silinder dua dimensi dengan derajat kebebasan jari jari dan tinggi silinder. Solusi semi analitik diperoleh dengan menerapkan metode Galerkin dimana sistem persamaan diferensial biasa *nonlinier* model dipecahkan menggunakan metode Runge-Kutta orde 4. Hasilnya menunjukkan bahwa amplitude yang merupakan fungsi aliran (*stream*) dan dispersi panas akan berosilasi secara tajam pada awal waktu proses pemanasan dan kemudian secara periodik berosilasi dengan variabilitas yang kecil mengikuti pola kuasi. Simulasi menunjukkan bahwa kondisi rolling dimulai dengan jari jari rolling yang besar dan kemudian mengempis yang diikuti dengan tersebar meratanya rolling dan panas secara seragam di seluruh *boiler*. Hasil simulasi menunjukkan suhu optimal adalah sekitar 300°C. Pada suhu tersebut, *steam* memenuhi kondisi yang dibutuhkan selama proses karbonisasi hidrotermal sampah organik dan konsumsi bahan bakar bisa diatur untuk mengurangi emisi udara yang dihasilkan dari pembakaran.

Kata kunci: boiler, karbonisasi hidrotermal, konvektif, perpindahan panas, Rayleigh-Benard.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Boiler atau ketel uap merupakan mesin pembakaran luar yang berfungsi merebus air untuk menghasilkan uap jenuh yang masih mengandung air⁽¹⁾. *Boiler* menjadi peralatan yang sangat penting dalam proses karbonisasi hidrotermal terhadap sampah organik. Uap jenuh yang dihasilkan dari *boiler* berfungsi sebagai pelarut dalam proses karbonisasi sampah organik di dalam reaktor hidrotermal. Uap ini dibutuhkan dalam proses karbonisasi yang berlangsung selama 0,5 – 3 jam pada suhu berkisar 180 – 300°C dengan tekanan 10 - 40 bar⁽²⁾. Proses karbonisasi sampah organik oleh *steam* pada suhu dan tekanan tersebut dapat mempersingkat waktu pengolahan sampah organik.

Tekanan uap jenuh yang diperlukan untuk proses karbonisasi hidrotermal tergolong sedang mendekati tinggi sehingga jenis *boiler* yang dipilih adalah *boiler* pipa air (*water tube boiler*)⁽³⁾. Hal ini karena *water tube boiler* menghasilkan tekanan lebih besar dari *boiler* pipa api (*fire tube boiler*)⁽⁴⁾.

Dengan alasan lingkungan, *boiler* didesain menggunakan bahan bakar berupa gas LPG. Gas LPG adalah bahan bakar yang ramah lingkungan dengan emisi CO₂ terendah dibandingkan bahan bakar fosil yang lain. Gas LPG merupakan bahan bakar yang bersih, tidak mengandung sulfur, partikulat, dan klorin yang dapat mencemari udara⁽⁵⁾.

Selain dari faktor jenis bahan bakar yang digunakan, suatu *boiler* akan disebut ramah lingkungan ketika perpindahan panas pada fluida berjalan dengan optimal. Semakin baik perpindahan panasnya, maka semakin besar efisiensinya.

Efisiensi pada akhirnya menjadi faktor yang sangat penting untuk diperhatikan dalam perancangan *boiler* karena akan menentukan kebutuhan bahan bakar dan mempengaruhi emisi udara yang akan dihasilkan. Dengan demikian maka suatu *boiler* harus memiliki efisiensi setinggi mungkin. Salah satu faktor yang mempengaruhi efisiensi *boiler* adalah perpindahan panas. Perpindahan panas tersebut terdiri dari radiasi, konduksi, dan konveksi. Radiasi tergantung dari komposisi gas dan suhu pembakaran. Untuk gas diatomik seperti hidrogen, nitrogen, dan oksigen, perpindahan panasnya hanya bisa terjadi secara radiasi^(6,8). Perpindahan panas pada konduksi terjadi melalui dinding pipa. Konduktifitas pipa pada *boiler* akan menjadi kecil ketika terjadi *scale* pada dinding pipa. Sedangkan, konveksi merupakan perpindahan panas yang paling dominan terjadi dalam *boiler* karena melibatkan sirkulasi fluida dalam pipa.

Pada umumnya studi terkait panas boiler dilakukan dalam kerangka kekekalan panas dengan tidak melihat dinamika dan dispersi termal yang terjadi dalam *boiler*. Makalah ini lebih ditujukan untuk melihat dinamika dan dispersi termal yang terjadi dalam fluida di suatu *boiler*. Perpindahan termal fluida dalam sebuah *boiler* bertipe *water tube boiler* pada dasarnya adalah perpindahan termal secara konveksi karena melibatkan perpindahan panas dengan media air atau fluida⁽⁶⁾. Perpindahan panas disuatu fluida mempunyai implikasi praktis yang sangat luas terutama dalam bidang rekayasa⁽⁷⁾.

Pada pipa *boiler* terjadi aliran fluida dan perubahan fase fluida dari cair menjadi uap karena peningkatan suhu. Yang membedakan pembentukan uap pada *boiler* dengan pembentukan uap biasa adalah terjadinya aliran dengan kecepatan debit tertentu atau lebih dikenal dengan istilah *forced convective boiling*⁽⁹⁾. Proses *forced convective boiling* lebih kompleks dari proses perpindahan panas lainnya karena melibatkan aliran fluida dua fase, gaya gravitasi, fenomena material, serta mekanisme dinamika molekular dari material yang bersangkutan. Dalam makalah ini mekanisme aliran konveksi dan dispersi termal yang terkait dengan *forced convective boiling* akan diselidiki melalui mode model semi-analitik. Lebih lanjut, berdasarkan model ini akan ditentukan temperatur optimal untuk pembakaran pada *boiler*.



Gambar 1. *Boiler* dengan bentuk silinder

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji perpindahan termal fluida dalam *boiler* bertipe

water tube boiler melalui pemodelan semi analitik, yaitu suatu model yang dibangun dari gabungan antara model analitik dan numerik. Hasil dari pemodelan ini akan digunakan untuk menentukan temperatur pemanasan optimal dari suatu *boiler* sehingga dapat digunakan sebagai dasar untuk analisis kebutuhan bahan bakar dan emisi udara yang ditimbulkan dari proses pembakaran.

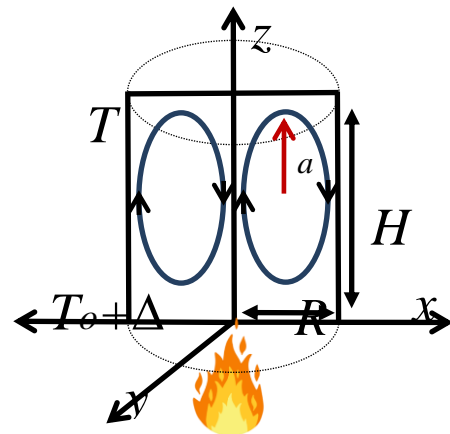
2. METODOLOGI

2.1 Model

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah semi-analitik yaitu mencari solusi dari suatu persamaan model dalam bentuk fungsi-fungsi khusus dan metode numerik (beda hingga). Dalam metode ini persamaan model yang dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial parsial akan diubah menjadi persamaan diferensial biasa melalui suatu ansatz (fungsi analitik). Persamaan diferensial biasa yang dihasilkan akan dipisahkan secara numerik. Persamaan model yang dicari solusinya adalah perpindahan panas suatu fluida dalam sebuah boiler bertipe pipa air (*water tube*). Perpindahan panas dalam suatu fluida (cair dan gas) akan melibatkan dua hukum dasar yaitu hukum kekekalan massa dan hukum kekekalan momentum serta memenuhi persamaan incompressibilitas fluida. Hukum kekekalan massa dinyatakan dalam bentuk persamaan adveksi difusi. Sedangkan hukum kekekalan momentum akan memenuhi persamaan Navier-Stokes.

Untuk menyelesaikan persamaan difusi termal dan persamaan Navier-Stokes maka Boiler dimodelkan sebagai silinder vertikal berisi air yang dipanaskan (flame) dari bawah dengan jari jari silinder R dan ketinggian silinder H . Adanya gaya gravitasi dan gradien tekanan akibat hadirnya gradien termal menyebabkan fluida tak stabil yang dinamakan Rayleigh-Bernard instability^(8,10)

Geometri dan syarat batas model dinyatakan dalam gambar 2.



Gambar 2. Geometri perpindahan panas fluida dalam penampang silinder vertikal. Tinggi silinder H , jari jari silinder R , diameter rolling a , temperatur dasar T_0 dan perbedaan temperatur antara atas dan bawah silinder ΔT .

Syarat batas dinyatakan sebagai berikut:

1. Pada bagian atas silinder diasumsikan tidak ada panas yang keluar sehingga $\partial T / \partial z = 0$ pada $z = H$.
2. Asumsikan dinding horisontal adiabatik dan dinding lateral adalah isothermal dan generasi panas dari bawah yaitu pada $z = 0$.
3. Pada semua dinding maka kecepatan fluida nol.
4. Ketinggian silinder lebih panjang dibandingkan jari jari silinder sehingga dalam arah rotasional (θ) dianggap seragam. Asumsi ini menyebabkan kita boleh melihat variasi termal dalam arah jari jari (sumbu- x) dan arah vertikal (sumbu- z).

Secara matematik maka syarat batas dari persamaan ini adalah,

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad T(z=0) = T_0 + \Delta T_0; \quad T(z=H) = T_0$$

.....(1)

Parameter yang berperan dalam pemodelan ini adalah kecepatan fluida dalam arah lateral U , kecepatan vertikal W dan temperatur T . Persamaan terakit dengan kecepatan fluida dinyatakan oleh persamaan Navier-Stokes dan persamaan terkait temperatur dinyatakan oleh persamaan difusi termal.

Kondisi inkompresibel menyebabkan kita bisa bekerja dalam besaran skalar yang dinamakan fungsi *stream* (ψ) yaitu $U = \partial \psi / \partial z$ dan $W = -\partial \psi / \partial x$. Dengan menggunakan aproksimasi Boussinesq (variasi densitas hanya signifikan pada gaya gravitasi $\rho = \rho_0(1 - \beta \Delta T)$) dan nondimensional variabel sebagai berikut⁽⁴⁾,

$$x' = \frac{x}{H}; \quad z' = \frac{z}{H}; \quad t' = \frac{t\kappa}{H}; \quad \psi' = \frac{\psi}{\kappa}$$

$$\Theta' = \frac{\Theta\beta gH^3}{\kappa\nu}; \quad \nabla' = \frac{\nabla}{H} \quad (2)$$

dimana ρ_0 densitas fluida, β koefisien ekspansi termal, κ koefisien difusi termal, ν viskositas fluida, P tekanan, H ketinggian silinder dan g adalah percepatan gravitasi. Temperatur akan dinyatakan dalam bentuk $T=T_0-(\Delta T/H)z+\Theta$, maka persamaan Navier-Stokes dan difusi termal dinyatakan berturut turut sebagai berikut, Persamaan Navier-Stokes,

$$\frac{\partial \nabla_h^2 \psi}{\partial t} + \frac{\partial(\psi, \nabla_h^2 \psi)}{\partial(x, z)} - P_r \nabla_h^4 \psi - R_a \frac{\partial \Theta}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Persamaan difusi termal,

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + \frac{\partial(\psi, \Theta)}{\partial(x, z)} - R_a \frac{\partial \psi}{\partial x} - \kappa \nabla_h^2 \Theta = 0 \quad (4)$$

dengan

$$\frac{\partial(A, B)}{\partial(x, z)} = \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial B}{\partial z} - \frac{\partial A}{\partial z} \frac{\partial B}{\partial x}; \quad \nabla_h^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

dimana (A, B) adalah (ψ, Θ) dan $R_a = \beta g \Delta T H^3 / \kappa \nu$ bilangan Rayleigh, $Pr = \nu / \kappa$ bilangan Prandtl.

2.2 Solusi semi-analitik

Solusi analitik akan dicari dengan menggunakan metode Galerkin dimana dalam metode ini solusi dinyatakan dalam bentuk mode Fourier atau mode Norma⁽⁹⁾.

Solusi yg paling sederhana adalah solusi dalam kondisi tunak (tak bergantung waktu) . Solusi ini akan menghasilkan suatu bilangan yang dinamakan bilangan Rayleigh kritis $R_c = \pi^2(1+a^2)^3/a^2$ dimana a adalah jari jari dari konveksi yang dinamakan konveksi Rayleigh-Benard. Dalam penelitian ini kita akan mencari solusi bergantung waktu (non tunak) dimana solusi akan dinyatakan dalam suatu ansatz dalam bentuk⁽⁸⁾,

$$\Theta = \frac{\pi R_a}{R_c \Delta T} = Y(t) \cos\left(\frac{a\pi}{H} x\right) \sin\left(\frac{\pi}{H} z\right) - Z(t) \sin\left(\frac{2\pi}{H} z\right) \quad (5)$$

$$\psi = \frac{\sqrt{2}\kappa(1+a^2)}{a} X(t) \sin\left(\frac{a\pi}{H} x\right) \sin\left(\frac{\pi}{H} z\right) \dots (6)$$

Jika kita substitusikan pers-5 dan pers-6 ke pers-3 dan pers-4 serta menggunakan sifat ortogonalitas fungsi trigonometri ($\int \phi_i \phi_j dx = \delta_{ij}$) maka kita dapatkan persamaan dalam koordinat- t sebagai berikut,

$$\frac{dX}{d\tau} = -P_r X + P_r Y$$

$$\frac{dY}{d\tau} = -XZ + rX - Y \quad (7)$$

$$\frac{dZ}{d\tau} = XY - bZ$$

dimana $\tau = \pi^2 H^2 (1+a^2) \kappa t$, $b = 4(1+a^2)^{-1}$ dan $r = Ra/Rc$ yang sering disebut parameter kontrol. Pers-7 dinamakan persamaan Lorenz. Setelah pers-7 diselesaikan maka solusi lengkap diperoleh dengan substitusi penyelesaian ini ke pers-5 dan pers-6.

Pada dasarnya pers-7 adalah sistem persamaan diferensial nonlinier dimana tidak ada solusi analitik untuk persamaan diferensial nonlinier secara umum. Sebagai gantinya digunakan pendekatan numerik yaitu menguraikan suatu operator diferensial dalam bentuk diskrit. Untuk makalah ini akan digunakan pendekatan Runge-Kutta dimana pendekatan ini menuliskan operator diferensial dalam bentuk diskrit sampai orde-4 yang dikenal dengan nama Runge-Kutta orde-4 atau ode45. Perhitungan pers-7 berdasarkan ode45 dan simulasi dilakukan dengan perangkat lunak **Matlab R2017a**. Dalam Matlab coding untuk penyelesaian pers-15 dinyatakan dalam function sebagai berikut,

```
function yprime=nonlinear2(t,y);
Pr=1.316; r=79.25; bb=0.0396;
yprime=[ -Pr*y(1)+Pr*y(2)
        -y(1).*y(3)+r*y(1)-y(2)
        y(1).*y(2)-bb*y(3)];
```

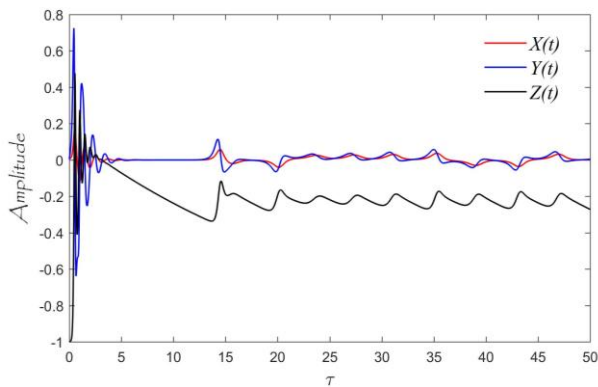
Jika function tersebut dinamakan perst7a maka solusi dengan metode Runge-Kutta dilakukan dengan perintah, $[t, y]=ode45('pers15a', tspan, y0)$; Hasil yang diperoleh dari subprogram ini akan digunakan untuk mensimulasi dispersi termal boiler berdasarkan pers-3 dan pers-4.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

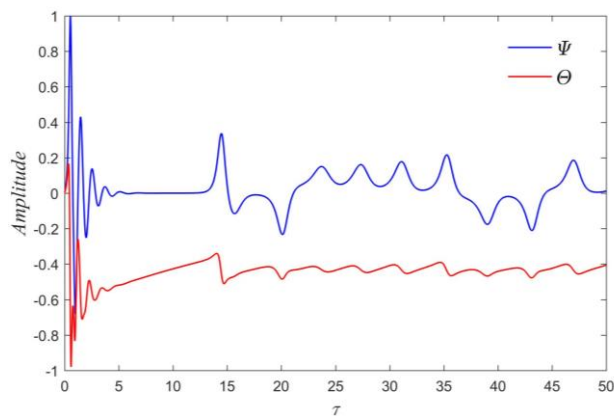
3.1 Analisis transfer panas boiler

Simulasi dilakukan dengan parameter model sebagai berikut, konduktivitas termal air $\kappa =$

0.6089 W/(mK), koefisien ekspansi termal air $\beta=0.0007 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ viskositas air $\nu=0.801 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, densitas air $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ dimana konstanta tersebut diukur pada suhu lingkungan 30°C [9]. Dengan koefisien diatas dan syarat awal $X_0=0.5$, $Y_0=0.5$ dan $Z_0=0.5$ maka pers15 akan mempunyai solusi dinyatakan dalam Gambar-3. Amplitude bergantung waktu dari proses konveksi telah dilakukan normalisasi. Hasil menunjukkan bahwa amplitude akan berosilasi secara tajam pada awal waktu proses pemanasan kemudian cenderung kontan dan akhirnya akan berosilasi dengan amplitude kecil dan pola yang kuasi-periodik⁽¹¹⁾. Hasil dengan pola yang mirip juga diperoleh untuk amplitude fungsi stream ψ dan dispersi termal θ seperti yang dapat dilihat pada Gambar-4. Perilaku acak hanya muncul pada awal proses pembakaran tetapi setelah 20 satuan waktu maka baik arus konveksi maupun dispersi termal menuju kondisi stabil dinamis.



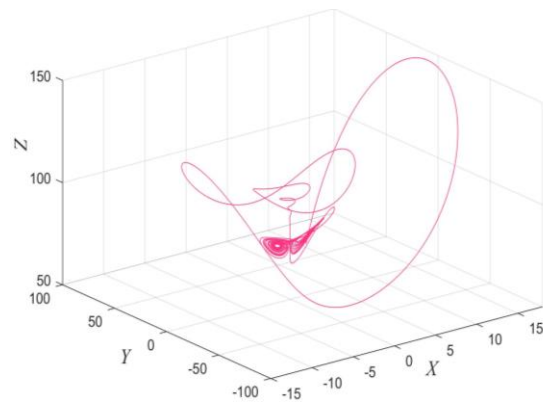
Gambar 3. Solusi pers-15 dengan metode Runge-Kutta dimana amplitude telah di normalisasikan.



Gambar 4. Solusi amplitudo bergantung waktu dari pers-5 dan pers-6 dimana amplitude telah di normalisasikan.

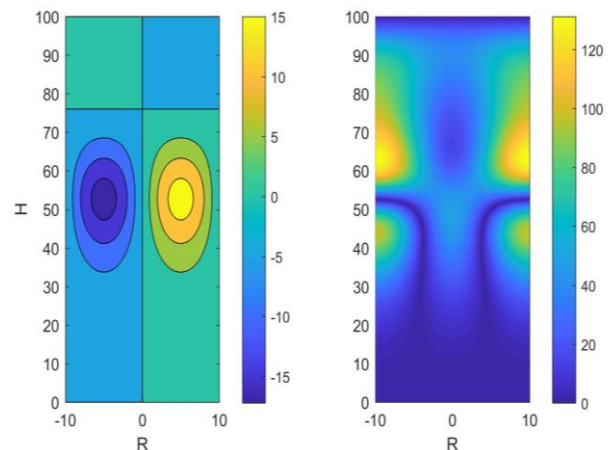
Hal lain yang menarik adalah melihat perilaku kuantitatif dari konveksi water tube boiler dinyatakan Gambar 5. Gambar ini menyatakan plot tiga dimensi antara evolusi amplitude $X(t)$,

$Y(t)$ dan $Z(t)$ yang dinamakan geometri ruang fase⁽¹¹⁾. Pada saat proses pembakaran dimulai maka trayektori (XYZ) di ruang fase akan mempunyai pola yang tidak teratur yang menyatakan kondisi acak dengan tidak ada pola. Tetapi kondisi berubah setelah waktu simulasi sekitar 20 satuan waktu dimana bentuk trayektori dalam ruang fase mempunyai pola yang stabil. Pada saat kondisi stabil mempunyai pola yang dikenal dengan nama Atraktor Lorenz atau kupu kupu Lorenz. Pada awalnya model ini digunakan Lorenz untuk menjelaskan perilaku atmosfer jangka panjang yang sulit diprediksi. Meskipun sulit diprediksi tetapi mempunyai pola pola yang mirip sehingga prediksi jangka panjang tidak lagi dilihat sebagai prediksi numerik tetapi lebih pada perilaku atau pola yang melatar belakangnya.

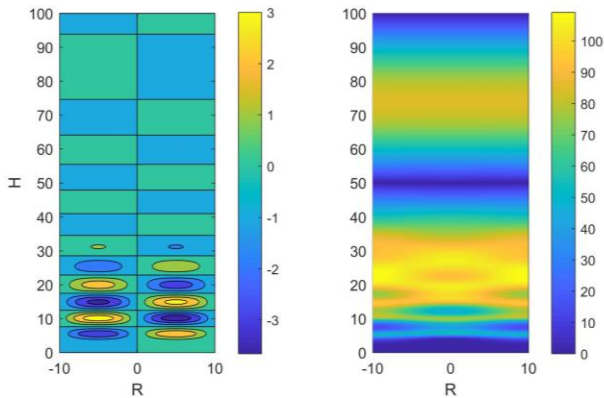


Gambar 5. Solusi pers 7 dalam bentuk geometri ruang fase (X,Y,Z).

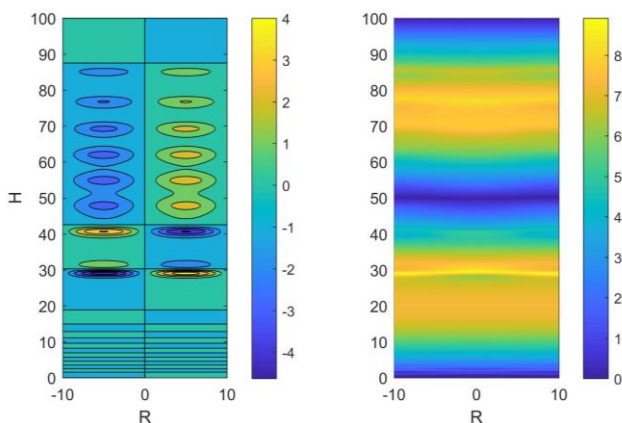
Simulasi aliran konveksi dan dispersi termal yang ada di boiler dinyatakan dalam Gambar-6, Gambar-7, Gambar-8 dan Gambar-9.



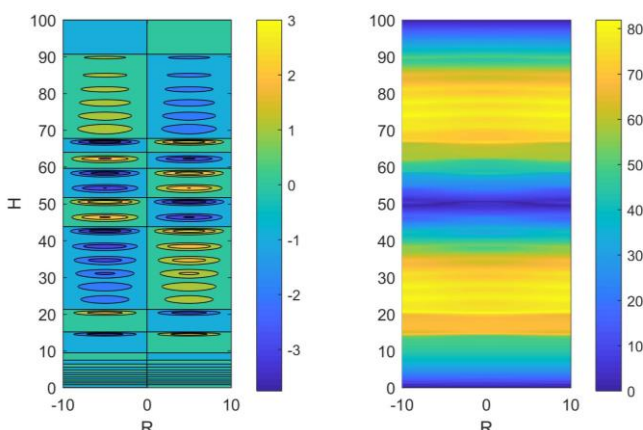
Gambar 6. Simulasi pada t=1 satuan waktu dari streamline (cm/s) dan dispersi termal ($^{\circ}\text{C}$) di Boiler 2D dimana H adalah tinggi dan R adalah jari jari boiler.



Gambar 7. Simulasi pada $t=10$ satuan waktu dari streamline (cm/s) dan dispersi termal ($^{\circ}\text{C}$) di *Boiler* 2D dimana H adalah tinggi dan R adalah jari jari *boiler*.



Gambar 8. Simulasi pada $t=50$ satuan waktu dari streamline (cm/s) dan dispersi termal ($^{\circ}\text{C}$) di *Boiler* 2D dimana H adalah tinggi dan R adalah jari jari *boiler*.



Gambar 9. Simulasi pada $t=100$ satuan waktu dari streamline (cm/s) dan dispersi termal ($^{\circ}\text{C}$) di *Boiler* 2D dimana H adalah tinggi dan R adalah jari jari *boiler*.

Simulasi pada saat kondisi awal pembakaran diperkirakan pada Gambar 6. Hasil menunjukkan

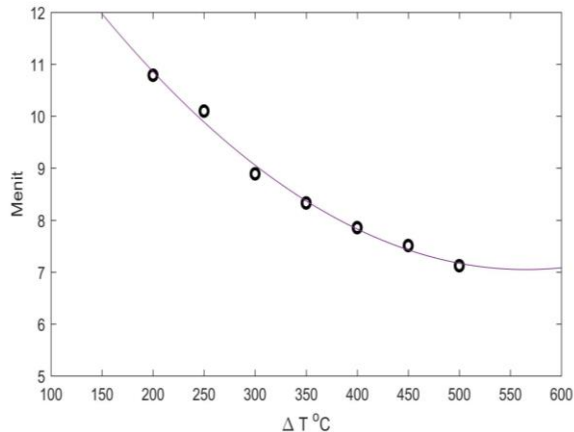
mulai terjadi proses konveksi (*rolling*) di tengah *boiler*. Dengan bertambahnya waktu maka pada dasar *boiler* mulai terbentuk banyak *rolling* dengan temperatur mulai panas di sekitar *boiler* bagian bawah. Pada saat waktu mencapai 50 satuan waktu maka *rolling* mulai mencapai bagian tengah *boiler* dengan distribusi temperatur mulai seragam. Akhirnya pada saat 100 satuan waktu *rolling* boleh dikatakan sudah tersebar secara merata di dalam *boiler* dan temperatur sudah mulai seragam.

Jika satuan waktu dinyatakan dalam menit, maka pada menit pertama (Gambar 6) baru terjadi pemanasan terhadap fluida dalam pipa (tube) dan belum terjadi perubahan fase. Pada menit ke-10, sudah mulai terjadi penyebaran panas pada bagian bawah *boiler*, dan pada menit ke-100, sudah terjadi pemanasan secara merata dan suhu mulai seragam. Dalam hal ini, suhu *steam* yang digunakan dalam proses hidrotermal di atas suhu didih air. Pada menit ke-100 ini, burner pada *boiler* dapat dikecilkan untuk mengurangi pembakaran dan menghemat bahan bakar. Hal ini karena peningkatan suhu air hingga merata ke semua fluida membutuhkan energi yang jauh lebih besar daripada peningkatan suhu diatas titik didih air dan perubahan fasanya.

Panas dialirkan secara konveksi dari fluida panas ke dinding pipa, kemudian panas dikonduksikan melalui dinding pipa dan dikonveksikan kembali dari dinding pipa ke fluida dingin pada sisi dalam pipa. Perpindahan panas ini terjadi dikarenakan adanya perbedaan temperatur antara aliran fluida panas dan fluida dingin. Terjadinya beberapa peristiwa perpindahan panas tersebut yang menyebabkan kebutuhan energinya lebih besar⁽¹²⁾. Jadi, pada saat pertama kali burner menyala hingga suhu air mencapai titik didihnya akan memakan waktu lebih lama dan konsumsi bahan bakar yang lebih besar dibandingkan untuk merubah fase⁽¹³⁾. Dengan, mengetahui perilaku ini, dapat dilakukan penghematan terhadap pemakaian bahan bakar pada *boiler*, sehingga emisi udara dari hasil pembakaran bahan bakar *boiler* dapat dikurangi.

3.2 Temperatur Pembakaran Optimal

Dalam penelitian ini akan dicari temperatur pembakaran yang optimal sehingga efisiensi pembakaran dapat diketahui. Untuk itu maka dilakukan simulasi pengaruh perubahan temperatur pemanasan (*flame*) dan waktu yang diperlukan dari air di dalam *boiler* untuk mendidih secara seragam. Hasil ini diperikan dalam Gambar 10.



Gambar 10. Grafik antara temperatur dengan waktu yang diperlukan fluida mendidih secara seragam dan akan berubah fase menjadi uap.

Profil pencocokan kurva antara temperatur pembakaran dengan waktu didih air menunjukkan bentuk kuadratik dengan R^2 sekitar 90%, dimana fungsi kuadratik tersebut dinyatakan sebagai berikut

$$y = 4.59x^2 - 0.032x + 16 \quad (8)$$

Kondisi optimal dicapai pada saat $\partial y/\partial x=0$ dimana ini tercapai pada $x=287$ dan $y=11.9$ menit. Dengan pembulatan maka temperatur optimal tercapai sekitar 300°C. Kondisi asimtotik terjadi pada temperatur diatas 500°C dengan waktu sekitar 7 menit. Munculnya kondisi asimtotik terkait dengan resistensi pemanasan akibat sifat termodinamika sistem. Serunit apapun mesin panas (*heat engine*) maka mesin akan mencapai titik jenuh atau kondisi asimtotik⁽¹⁴⁾. Dengan kata lain hasil simulasi ini menunjukkan suhu optimal adalah sekitar 300°C. Kondisi *steam* pada suhu 300°C merupakan kondisi yang optimal dari sebuah *boiler*⁽¹⁵⁾. Pada suhu tersebut, *steam* yang dihasilkan sudah memenuhi kondisi operasi pada proses karbonisasi hidrotermal sampah organik.

Dengan demikian, ketika suhu optimal *boiler* sudah tercapai, maka nyala api burner bisa dikecilkan dan suhu pembakaran akan terjaga. Ketika udara pembakaran sedikit, maka konsumsi bahan bakar bisa dikurangi dan emisi udara yang dihasilkan dari proses pembakaran akan berkurang.

4 KESIMPULAN

Pemodelan semi-analitik dispersi termal di dalam *boiler* karbonisasi hidrotermal telah

dilakukan melalui solusi persamaan konveksi Rayleigh-Benard. Dengan menerapkan suatu *ansatz* maka solusi persamaan diferensial parsial direduksi menjadi sistem persamaan diferensial biasa nonlinier dimana solusi diperoleh menggunakan Runge-Kutta order 4. Amplitude fungsi stream dan dispersi termal akan berosilasi secara tajam pada awal waktu proses pemanasan, cenderung kontan dan berosilasi dengan variabilitas kecil dengan menunjukkan pola yang kuasi-periodik. Simulasi menunjukkan kondisi *rolling* mulai dengan amplitude besar dan kemudian jari jari *rolling* mengecil yang diikuti dengan tersebar merata *rolling* dan termal telah terdispersi secara seragam di seluruh *boiler*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa temperatur optimal didih air adalah 300°C dengan waktu didih 9 menit. Berdasarkan informasi ini, *steam* yang dibutuhkan untuk proses karbonisasi hidrotermal sudah dapat terpenuhi. Nyala burner dapat diatur untuk menentukan konsumsi bahan bakar yang berdampak terhadap emisi udara dari hasil pembakaran.

PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Teknologi Lingkungan-BPPT..atas kesempatan memodelkan peristiwa perpindahan panas pada boiler yang merupakan bagian Pilot Plant Teknologi Hidrotermal untuk pengolahan sampah organik. Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada Dr. Muhammad Hanif. Sebagai Kepala Program PPTL tahun anggaran 2018

DAFTAR PUSTAKA

- Hakim, L. & Subekti, P. (2015). Rancang bangun ketel uap mini dengan pendekatan standar SNI berbahan bakar cangkakng sawit untuk kebutuhan pabrik tahu kapasitas 200 kg kedelai/hari. Jurnal APTEK Vol. 7 No. 1 Januari 2015. P.2
- Basso, D., Weiss-Hortala, E., Patuzzi, F., Castello, D., Baratieri, M., & Fiori, L. (2015). Hydrothermal carbonization of off-specification compost: A byproduct of the organic municipal solid waste treatment. Bioresource technology, 182, 217-224.
- Winanti, W. S., & Prayudi, T. (2006). Perhitungan Efisiensi Boiler pada Industri Industri Tepung Terigu. Jurnal Teknik Lingkungan, ISSN, 58-65.

4. Soedjono, D. M., Sasetiyanto, J., Noor, D. Z., & Hapsari, H. R. F. (2017). Analisis Perhitungan Dan Perencanaan Water Tube Boiler Berbahan Bakar LPG Pada Industri Kecil Tahu Di Mojokerto. *Prosiding SENATEK 2015*, 1(A), 68-76.
5. Bindar, Y., Abdulkadir, M., (2014). Kriteria Boiler Ramah Lingkungan. Kementerian Lingkungan Hidup.
6. Aliyah, F. D. (2010). Perhitungan Perpindahan Panas Final Superheater pada Boiler dalam Sistem Pembangkit Daya 200 MW di PLTU PT. PJB UP Gresik.
7. Tosun, I. (2002). *Modeling in Transport Phenomena*. Elsevier, Amsterdam. 606pp.
8. Menon, R. (2002). Heat Transfer in Boiler. *Palm Oil Engineering Bulletin*. Kuala Lumpur. pp.21-22
9. Chen, J.C. (1966). Correlation for Boiling heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 5(3), pp 322-329.
10. Chandrasekhar, S.A. (1961). *Hydrodynamics and Hydromagnetic Instability*. Dover Publication, New York, 652 pp.
11. Gu, G., C. An., & J. Su. (2017). Integral Transform solution of Natural Convection in a Cylinder Cavity with Uniform Internal Heat Generation. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 28, 0961-0986.
12. Qomaruddin & Sikki, M.I. (2016). Analisis Kebutuhan Bahan Bakar Terhadap Perubahan Tekanan Uap. *Jurnal Imiah Teknik Mesin*, Vol. 4, No.2 Agustus 2016 Universitas Islam 45 Bekasi.
13. Bimantoro, E.P. (2016). Pengaturan Konsumsi Bahan Bakar Pada Virtual Plant Boiler PLTU Menggunakan Kontroler Linear Quadratic Regulator. *Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)*.
14. Jin, L. Xu., Y. Zheng ., Y. Wang., X. Yang., C. Yu., X Xie., Z. Zao. (2017). An actual thermal efficiency expression for heat engines: Effect of heat transfer roadmaps, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 113, 556-568.
15. Zhai, Y., Peng, C., Xu, B., Wang, T., Li, C., Zeng, G., & Zhu, Y. (2017). Hydrothermal carbonisation of sewage sludge for char production with different waste biomass: Effects of reaction temperature and energy recycling. *Energy*, 127, 167-174.