

Pengaruh Laju Umpan Bahan Bakar dan Laju Aliran Udara terhadap Kinerja Pembakaran Tungku *Fixed Bed*

The Effect of Fuel Feed Rate and Air Flow Rate on Combustion Performance Fixed Bed Furnace

Tamaria Panggabean^{1*}, Tineke Mandang², Leopold Oscar Nelwan², Wawan Hermawan²

¹Ilmu Keteknikan Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Dramaga, Bogor, 16680, Indonesia

²Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Dramaga, Bogor, 16680, Indonesia

*Penulis korespondensi: Tamaria Panggabean, Email: tamariapanggabean@fp.unsri.ac.id

Submisi: 17 November 2021; Revisi: 10 Februari 2022, 23 Februari 2022; Diterima: 7 Maret 2022; Dipublikasi: 28 Februari 2023

ABSTRAK

Penelitian ini dilatarbelakangi kelemahan pembakaran tungku yang menghasilkan pembakaran yang tidak sempurna dikarenakan kurang optimalnya rasio bahan bakar dan udara serta waktu tinggal pembakaran yang singkat. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh laju umpan bahan bakar dan laju aliran udara yang menghasilkan pembakaran sempurna. Makalah ini menjelaskan pengaruh laju umpan bahan bakar dan laju aliran udara terhadap kinerja pembakaran tungku *fixed bed* sebagai sumber energi panas pengering. Pengukuran efisiensi tungku dilakukan pada berbagai laju umpan sekam dan laju aliran udara. Penelitian ini dilakukan pada 3 laju umpan sekam yaitu 12, 15, dan 18 kg/jam, dan pada 5 laju aliran udara yaitu 86,4; 120,96; 114,84; 108 dan 154,8 kg/jam. Perlakuan optimum diperoleh pada laju umpan sekam 15 kg/jam dan laju aliran udara 114,84 kg/jam dengan efisiensi tungku sebesar 73,99%, panas yang dihasilkan 41,55 kW dan % abu/arang yang diproduksi 17,89%. Suhu gas buang bervariasi dari 99,78-474,23°C pada berbagai laju umpan sekam dan laju aliran udara. Analisis gas buang menunjukkan pelepasan panas maksimum terjadi ketika tungku diberi kelebihan udara berlebih 100% yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna.

Kata kunci: laju aliran udara; tungku *fixed bed*; suhu gas buang; efisiensi tungku; laju umpan sekam

ABSTRACT

This research is motivated by the weakness of furnace combustion, resulting in incomplete combustion due to a non-optimal fuel-air ratio and short residence time. Therefore, this research aims to obtain the fuel feed and airflow rate that results from incomplete combustion. The investigation describes the effect of the fuel feed and airflow rates on the combustion performance of a fixed bed furnace as a drying heat energy source. Furnace efficiency measurements were carried out at various husk feed and airflow rates. Additionally, this research was conducted at three speeds of husk feed rate, namely 12, 15, and 18 kg/hour, and five airflow rates, namely 86.4, 120.96, 114.84, 108, and 154.8 kg/hour. The optimum treatment was obtained at a feed rate of husk 15 kg/hour

and an airflow rate of 114.84 kg/hour with furnace efficiency of 73.99%; the heat generated is 41.55 kW, and % ash/char produced is 17.89%. Subsequently, the flue gas temperature varied from 99.78 to 474.23 °C at various husk feed and airflow rates. The exhaust gas analysis shows maximum heat release occurs when the furnace is supplied with 100% of the excess air required for complete combustion.

Keywords: Air flow rate; fixed bed furnace; flue gas temperature; furnace efficiency; husk feed rate

PENDAHULUAN

Udara merupakan unsur penting pada proses pembakaran. Menurut Liu dkk. (2020) laju aliran udara yang memadai merupakan indikator penting dari kinerja sistem kontrol pembakaran boiler, studi mendalam tentang strategi kontrol laju aliran udara sangat dibutuhkan. Tujuan dari pengendalian laju aliran udara adalah untuk mempertahankan laju aliran udara total pada tingkat yang memastikan pembakaran bahan bakar yang sempurna. Udara dapat dibedakan menjadi dua yaitu udara primer dan udara sekunder. Udara primer berfungsi untuk pembakaran bahan bakar padat dan udara sekunder berfungsi untuk mereaksikan bahan yang mudah menguap.

Menurut Cepic & Smaragdakis (2017) bahwa peningkatan efisiensi pembakaran dapat dicapai dengan menghantarkan udara menjadi dua cara: sebagai laju aliran udara primer (melalui *grate*) dan sebagai laju aliran udara sekunder (di bagian atas dari tumpukan). Di sisi lain, pengumpulan bahan bakar yang konsisten dan seragam sangat penting untuk menghindari pemasukan bahan bakar yang meningkatkan potensi emisi (Mehrabian dkk., 2015).

Pembakaran langsung dari biomassa adalah teknologi yang paling maju untuk konversi panas biomassa. Namun pembakaran langsung merupakan proses rumit yang melibatkan pindah panas dan massa, dinamika fluida, reaksi homogen serta heterogen. Tiga jenis tungku utama untuk pembakaran langsung biomassa yang ada: *fluidized bed combustion* (FB), pembakaran *pulverized* dan pembakaran *fixed bed*. Teknologi pembakaran *grate* memiliki keuntungan yang mampu untuk membakar bahan bakar dengan kadar air yang tinggi (hingga 60%), ukuran partikel yang berbeda (0,005 - > 0,1 m), kandungan abu yang tinggi dan bahan bakar campuran (Mehrabian dkk., 2015).

Beberapa penelitian tentang laju aliran udara telah dilakukan oleh beberapa peneliti, diantaranya Laryae & No (2005) melakukan penelitian efek kecepatan udara pada karakteristik pembakaran dalam pembakar skala kecil. Hasil penelitian menunjukkan suhu gas buang dan efisiensi pembakaran menurun dengan peningkatan kecepatan udara. Li dkk. (2015) melakukan penelitian efek laju aliran massa udara

sekunder dan karakteristik pengeringan pembentuk NO_x terhadap penurunan volatil pembakar *swirl burner* batubara, hasil penelitian menunjukkan bahwa ketika laju aliran massa udara sekunder menurun, diameter/panjang zona resikulasi pusat (CRZ) maksimum dan sudut divergensi berkurang. Liu dkk. (2020) melakukan penelitian strategi pengendalian laju aliran udara boiler utilitas berbahan bakar batubara berdasarkan permintaan beban, hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan strategi pengendalian laju aliran udara untuk optimasi pembakaran meningkatkan stabilitas tekanan uap utama dan mengurangi fluktuasi aliran batubara. Liu dkk. (2020) melakukan kinerja pembakaran bahan bakar-udara dalam tungku pemanas ulang pada kondisi laju aliran dan saluran masuk yang berbeda, hasil penelitian menunjukkan bahwa efek *entrainment* udara dalam aliran menghasilkan cakupan area api yang lebih besar, dan terjadi peningkatan lebih dari 28,5% pada suhu pelat di seluruh tungku. Penelitian terdahulu mengenai laju aliran udara belum ada yang memecahkan masalah kelemahan pembakaran tungku yang menghasilkan pembakaran tidak sempurna. Penelitian ini diharapkan dapat mengatasi masalah tersebut di atas. Pengaruh laju aliran udara dan laju umpan bahan bakar diperlukan karena apabila pencampuran udara dan bahan bakar tidak tepat akan terjadi pembakaran tidak sempurna dan menurunkan kinerja pembakaran. Parameter kinerja pembakaran yang akan diuji meliputi efisiensi tungku, panas yang dihasilkan, dan % abu/arang yang diproduksi.

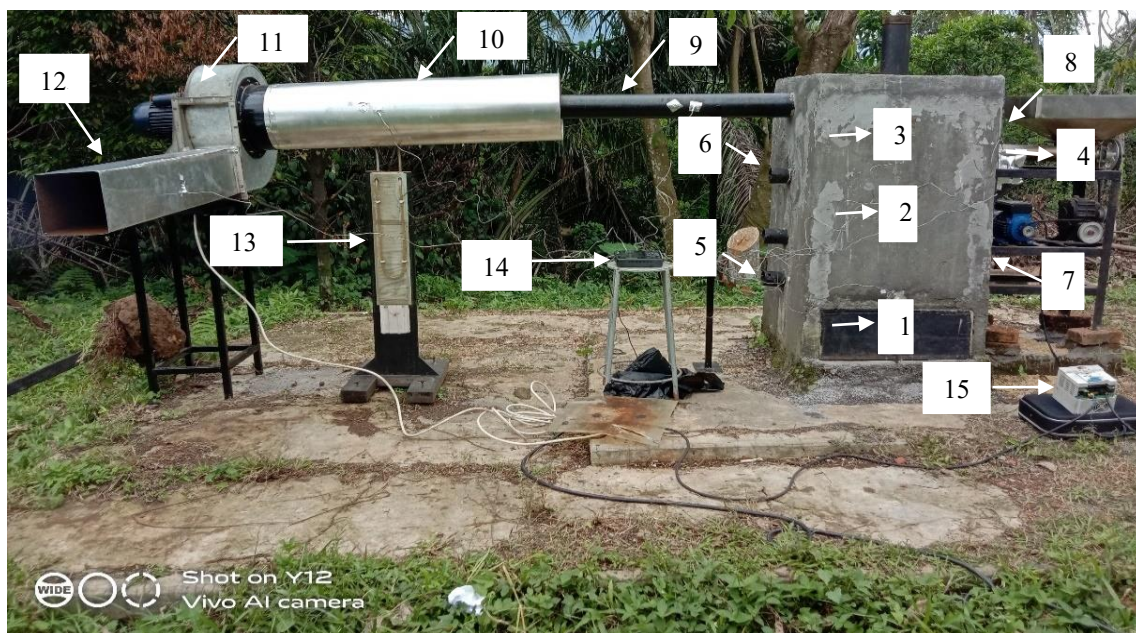
BAHAN DAN METODE

Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan dari bulan Januari-Agustus 2021 di Laboratorium Lapangan Siswadhi Soepardjo Leuwikopo, Institut Pertanian Bogor, Bogor.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah satu unit tungku pembakaran *fixed bed*, anemometer, blower hisap, *gearbox*, *inverter*, motor listrik, obeng, *tachometer*, termokopel tipe K dan timbangan *analog*. Sedangkan bahan yang digunakan pada pengujian



Keterangan:

- | | |
|---------------------------|---------------------------------|
| 1. Ruang abu | 9. Saluran <i>outlet</i> tungku |
| 2. Ruang bakar | 10. Saluran dari blower |
| 3. Ruang <i>freeboard</i> | 11. Blower hisap |
| 4. Konveyor ulir | 12. Saluran <i>outlet</i> akhir |
| 5. Saluran primer | 13. Manometer |
| 6. Saluran sekunder 1 | 14. Graphtec midi logger GL 240 |
| 7. Saluran sekunder 2 | 15. Inverter |
| 8. Saluran sekunder 3 | |

Gambar 1. Rangkaian tungku pembakaran *fixed bed*

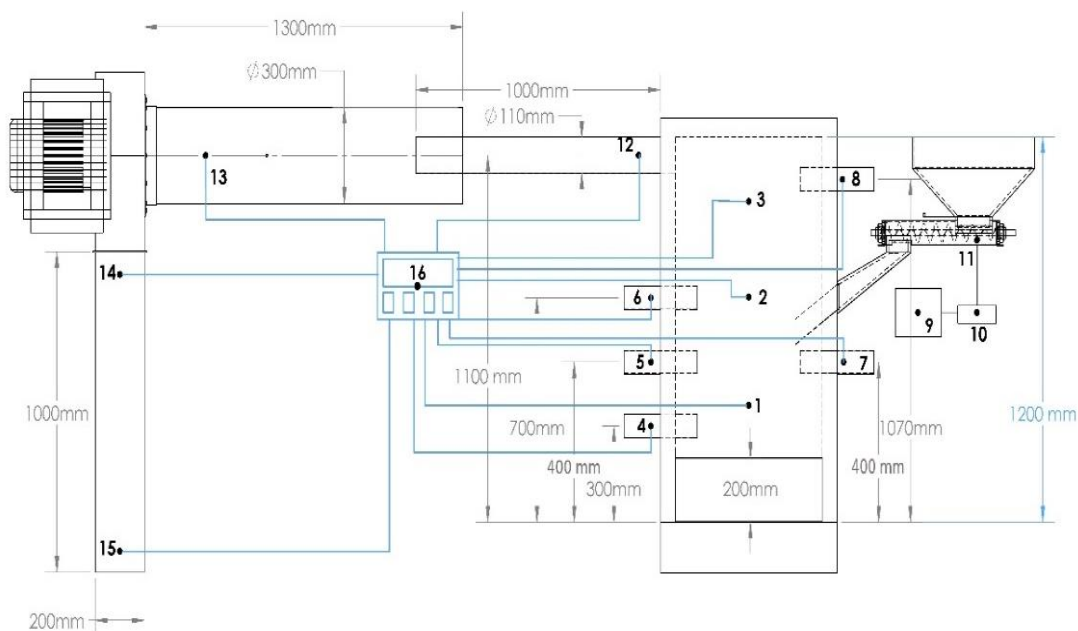
kinerja tungku *fixed bed* adalah biodiesel, korek api, dan sekam padi. Rangkaian tungku pembakaran *fixed bed* dapat dilihat pada Gambar 1.

Desain Konstruksi Tungku *Fixed Bed*

Penelitian dilakukan dengan terlebih dahulu merancang dan membangun tungku *fixed bed* berbahan bakar sekam yang terbuat dari batu bata yang dilapisi semen, tungku dirangkai dengan pengumpan konveyor ulir yang digerakkan oleh motor listrik AC. Tungku pembakaran *fixed bed* berbahan sekam padi yang didesain berbentuk balok vertikal, dengan ukuran panjang, lebar dan tinggi berturut-turut 600, 600, dan 1200 mm serta ketebalan dinding tungku 60 mm. Di bagian bawah ruang bakar terdapat ruang abu yang menyatu dengan ruang pembakaran tungku yang dipisahkan oleh *grate* tetap yang terbuat dari plat baja berlubang, berukuran panjang 600 mm, lebar 600 mm, dan tebal 2 mm. Ruang abu memiliki ukuran panjang, lebar dan tinggi berturut-turut 600, 600, dan 200 mm. Di sisi dinding sebelah kanan terdapat saluran udara primer dengan ketinggian 300 mm dan saluran udara sekunder

1 dengan ketinggian 700 mm dari dasar tungku. Di dinding sebelah kiri dirangkai dengan pengumpan konveyor ulir yang memiliki kapasitas pengumpanan sekam padi 12-18 kg/jam. Di dinding sebelah kiri juga terdapat saluran udara sekunder 2 dengan ketinggian 400 mm dan saluran udara sekunder 3 dengan ketinggian 1070 mm dari dari dasar tungku. Saluran udara primer dan sekunder terbuat dari plat baja silinder berongga dengan diameter 70 mm dan panjang 300 mm. Saluran sekunder dibutuhkan oleh unit tungku karena berfungsi untuk membantu mereaksikan pembakaran bahan yang mudah menguap. Kebutuhan udara yang optimum untuk pembakaran sempurna belum diperoleh, maka dari itu penulis menambahkan 3 saluran udara sekunder 1, 2, dan 3 pada ruang bakar. Penulis memvariasikan saluran sekunder untuk mendapatkan variasi saluran sekunder yang terbaik untuk menghasilkan pembakaran sempurna. Sistem pengoperasian tungku pembakaran *fixed bed* dapat dilihat pada Gambar 2.

Sistem pengoperasian tungku pembakaran diawali dengan pengumpanan sekam ke *hopper* menggunakan konveyor ulir yang digerakkan motor



Keterangan:

- | | |
|---------------------------|----------------------------------|
| 1. Grate | 9. Motor listrik |
| 2. Ruang bakar | 10. Inverter |
| 3. Ruang <i>freeboard</i> | 11. Konveyor ulir |
| 4. Saluran primer | 12. Saluran outlet tungku |
| 5. Saluran sekunder 1 | 13. Saluran dari blower |
| 6. Saluran sekunder 2 | 14. Blower hisap |
| 7. Saluran sekunder 3 | 15. Saluran outlet |
| 8. Saluran sekunder 4 | 16. Graphtech midi logger GL 240 |

Gambar 2. Sistem pengoperasian tungku pembakaran *fixed bed*

listrik dan pembukaan saluran udara primer dan sekunder sesuai perlakuan. Apabila tumpukan sekam di ruang bakar sudah menumpuk dilakukan pembakaran sekam. Jika sekam yang dibakar sudah menjadi bara maka blower hisap dioperasikan. Selama pembakaran dilakukan pengukuran suhu setiap 1 menit dan *record* di Graphtech midi logger GL 240. Suhu yang diukur meliputi suhu *grate*, ruang bakar, *freeboard*, saluran primer, saluran sekunder 1, 2, dan 3, *outlet* tungku, saluran dari blower dan *outlet* akhir. Setelah selesai operasi pembakaran dilakukan pengukuran sisa hasil pembakaran yang meliputi arang, abu, dan sekam yang tidak terbakar.

Pengujian

Penelitian ini dilakukan dengan 3 laju umpan sekam yaitu 12, 15, dan 18 kg/jam, dan 5 laju aliran udara yaitu 86,4; 120,96; 114,84; 108; dan 154,8 kg/jam. Jika saluran primer + saluran sekunder 1 dibuka diperoleh laju aliran udara 86,4 kg/jam; jika saluran primer + saluran sekunder 1 dan 2 dibuka diperoleh laju aliran udara 120,96 kg/jam; jika saluran primer

+ saluran sekunder 1 dan 3 dibuka diperoleh laju aliran udara 114,84 kg/jam; jika saluran primer + saluran sekunder 2 dan 3 dibuka diperoleh laju aliran udara 108 kg/jam; dan jika saluran primer + saluran sekunder 1, 2 dan 3 dibuka diperoleh laju aliran udara 154,8 kg/jam. Keterangan perlakuan dapat dilihat pada Tabel 1.

Pengujian kinerja tungku *fixed bed* dilakukan dengan mengukur beberapa parameter terkait seperti efisiensi tungku, laju konsumsi bahan bakar, persentase abu/arang yang diproduksi, laju aliran udara *outlet*, dan panas yang dihasilkan.

Efisiensi tungku (Hung dkk., 2018) diperoleh dari Persamaan 1.

$$\eta_r = [m_a C_p (T_2 - T_1) / m_f HHV] 100 \quad (1)$$

Dimana η_r = efisiensi tungku sekam (%), m_a = laju aliran campuran udara segar dan gas buang (kg/jam), C_p = panas spesifik udara (kJ/kg.K), T_1 = suhu udara lingkungan (K), T_2 = suhu campuran udara segar dan gas buang (K), m_f = laju umpan sekam (kg/jam), dan HHV = nilai panas tinggi sekam (kJ/kg).

Tabel 1. Keterangan perlakuan

Perlakuan	Keterangan
A1B1	Laju aliran udara 86,4 kg/jam, laju umpan sekam 12 kg/jam
A2B1	Laju aliran udara 120,96 kg/jam, laju umpan sekam 12 kg/jam
A3B1	Laju aliran udara 114,84 kg/jam, laju umpan sekam 12 kg/jam
A4B1	Laju aliran udara 108 kg/jam, laju umpan sekam 12 kg/jam
A5B1	Laju aliran udara 154,8 kg/jam, laju umpan sekam 12 kg/jam
A1B2	Laju aliran udara 86,4 kg/jam, laju umpan sekam 15 kg/jam
A2B2	Laju aliran udara 120,96 kg/jam, laju umpan sekam 15 kg/jam
A3B2	Laju aliran udara 114,84 kg/jam, laju umpan sekam 15 kg/jam
A4B2	Laju aliran udara 108 kg/jam, laju umpan sekam 15 kg/jam
A5B2	Laju aliran udara 154,8 kg/jam, laju umpan sekam 15 kg/jam
A1B3	Laju aliran udara 86,4 kg/jam, laju umpan sekam 18 kg/jam
A2B3	Laju aliran udara 120,96 kg/jam, laju umpan sekam 18 kg/jam
A3B3	Laju aliran udara 114,84 kg/jam, laju umpan sekam 18 kg/jam
A4B3	Laju aliran udara 108 kg/jam, laju umpan sekam 18 kg/jam
A5B3	Laju aliran udara 154,8 kg/jam, laju umpan sekam 18 kg/jam

Keterangan:

A1 : diperoleh dengan membuka saluran primer + saluran sekunder 1

A2 : diperoleh dengan membuka saluran primer + saluran sekunder 1 dan 2

A3 : diperoleh dengan membuka saluran primer + saluran sekunder 1 dan 3

A4 : diperoleh dengan membuka saluran primer + saluran sekunder 2 dan 3

A5 : diperoleh dengan membuka saluran saluran primer + saluran sekunder 1, 2, dan 3

Laju konsumsi bahan bakar sekam (Belonio 2005) diperoleh dari Persamaan 2.

$$FCR = \frac{w}{t} \quad (2)$$

Dimana FCR = laju konsumsi bahan bakar sekam (kg/jam), w = massa bahan bakar sekam yang digunakan (kg), dan t = waktu operasi (jam).

Persentase abu/arang yang diproduksi (Belonio 2005) diperoleh dari Persamaan 3.

$$\% AC = \frac{w_{a/c}}{w_f} \quad (3)$$

Dimana $\% AC$ = persentase abu/arang yang diproduksi (%), $w_{a/c}$ = berat abu/arang yang diproduksi setelah operasi (kg), dan w_f = berat bahan bakar sekam yang digunakan (kg).

Laju aliran udara *outlet* (Satria dkk., 2017) diperoleh dari Persamaan 4.

$$Q = v \times A \quad (4)$$

Dimana Q = laju aliran udara *outlet* (m³/jam), v = kecepatan aliran udara *outlet* (m/s), dan A = luas permukaan saluran udara *outlet* (m²).

Panas yang dihasilkan diperoleh dari Persamaan 5.

$$Q = m \cdot C_p (T_2 - T_1) \quad (5)$$

Dimana Q = panas yang dihasilkan (kW), m = laju aliran massa udara (kg/jam), C_p = panas spesifik udara (kJ/kg.K), T_2 = suhu *outlet* akhir (K), dan T_1 = suhu lingkungan (K).

Pengukuran Suhu dan Kecepatan Aliran Udara Selama Pembakaran pada Tungku *Fixed Bed*

Pengukuran suhu selama pembakaran pada tungku *fixed bed* dilakukan dengan menggunakan termokopel tipe K. Pengukuran suhu di tiap-tiap titik pengukuran dilakukan setiap satu menit dan hasil pengukuran suhu disimpan di alat Graphtec midi logger GL 240. Titik-titik pengukuran suhu dapat dilihat pada Gambar 2. Sebelum proses pembakaran blower hisap dioperasikan, lalu pengukuran kecepatan aliran udara dilakukan di titik pengukuran yaitu saluran udara primer, saluran udara sekunder, saluran *outlet* tungku, saluran dari blower dan saluran *outlet* akhir menggunakan Anemometer Kanomax tipe 6011. Pengukuran kecepatan aliran udara di masing-masing saluran dilakukan dengan dua metode.

Untuk saluran yang berpenampang silinder digunakan dengan mengebor tiga lubang saluran pada 60° dari sisi satu ke sisi lain. Untuk saluran yang berpenampang persegi menggunakan metode log *Tchebycheff*. Saluran dibagi menjadi area persegi panjang, yang selanjutnya disesuaikan ukurannya untuk memperhitungkan efek dinding saluran pada aliran udara. Minimal 25 titik harus diukur untuk mendapatkan rata-rata yang baik. Saluran primer dan sekunder dengan diameter saluran 7 cm diperoleh titik-titik pengukuran 1, 2, 5, dan 6 cm. Saluran dari tungku dengan diameter saluran 11 cm diperoleh titik pengukuran 2, 4, 7, dan 9 cm. Saluran dari blower dengan diameter 30 cm diperoleh titik pengukuran 4, 10, 20, dan 26 cm. Saluran keluar dari blower dengan bentuk persegi cm diperoleh titik pengukuran 1, 6, 10, 14, dan 18 cm, berdasarkan setiap titik pengukuran 1, 5, 9, 11, dan 19 cm.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian kinerja pembakaran tungku *fixed bed* dilakukan dengan terlebih dahulu melakukan analisis perhitungan tungku *fixed bed*. Hasil analisis perhitungan tungku *fixed bed* ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil analisis perhitungan tungku *fixed bed*

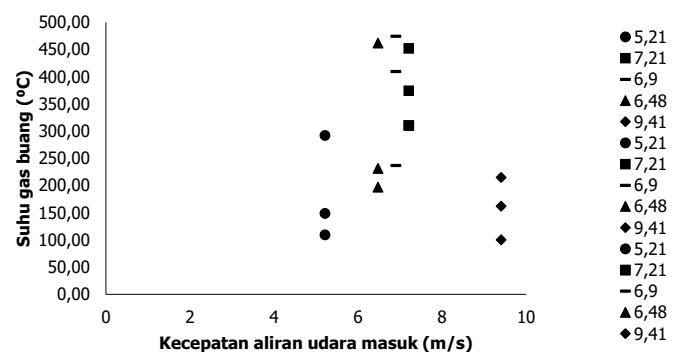
No	Perhitungan	Nilai
1	Laju umpan sekam padi	12, 15, 18 kg/jam
2	Laju aliran udara	86,4; 120,96; 114,84; 108; 154,8 kg/jam
3	Lebar tungku	600 mm
4	Panjang tungku	600 mm
5	Tinggi tungku	1200 mm
6	Volume <i>hopper</i>	0,0171 m ³
7	Massa <i>hopper</i>	2,36 kg/jam

Laju aliran udara yang dihasilkan masing-masing perlakuan A1, A2, A3, A4, dan A5 berturut-turut sebesar 86,4; 120,96; 114,84; 108 dan 154,8 kg/jam. Kecepatan aliran udara rata-rata setiap perlakuan dapat dilihat pada Tabel 3. Tabel 3 menunjukkan jumlah, arah, dan ketinggian saluran udara sekunder yang berbeda akan mempengaruhi kecepatan aliran udara *inlet* yang dihasilkan. Dari jumlah, arah, dan ketinggian saluran udara sekunder yang digunakan pada penelitian ini dihasilkan kecepatan aliran udara tertinggi pada perlakuan A5 (saluran primer + saluran sekunder 1, 2, dan 3) sebesar 9,41 m/s, hal ini dikarenakan jumlah saluran sekunder yang digunakan lebih banyak dan

arah saluran sekunder dari kanan (searah) dan kiri (berlawanan arah). Saluran udara sekunder dengan arah berlawanan menghasilkan kecepatan aliran udara yang lebih besar dibandingkan dengan saluran sekunder yang searah. Ketinggian saluran udara sekunder yang lebih rendah menghasilkan kecepatan udara yang lebih besar dibandingkan dengan ketinggian saluran sekunder yang lebih tinggi.

Distribusi Suhu Selama Pembakaran Tungku *Fixed Bed*

Distribusi suhu yang dihasilkan selama pembakaran tungku *fixed bed* setiap perlakuan berbeda-beda, hal ini dikarenakan laju umpan sekam dan laju aliran udara setiap perlakuan berbeda. Distribusi suhu di titik-titik pengukuran setiap perlakuan dapat dilihat pada Tabel 4. Tabel 4 menunjukkan suhu *outlet* tungku (suhu gas buang) berfluktuatif dengan meningkatnya kecepatan aliran udara masuk. Tren suhu gas buang yang berfluktuatif terhadap kecepatan aliran udara masuk dapat dilihat pada Gambar 3. Hal ini berbeda dengan pendapat Laryae dan No (2005) yang menyatakan suhu gas buang menurun dengan peningkatan kecepatan udara. Pada penelitian ini dihasilkan suhu gas buang yang berfluktuatif, ini berarti kenaikan laju umpan sekam tidak mempengaruhi peningkatan suhu gas buang. Hal ini berbanding terbalik dengan hasil penelitian Hung dkk., (2018), yang menyatakan operasi optimal dengan peningkatan laju umpan sekam dan laju aliran udara sekunder 15-20 kg h⁻¹ dan 0,035-0.05 m³s⁻¹, masing-masing menghasilkan peningkatan suhu 10-15 °C.



Gambar 3. Tren suhu gas buang yang berfluktuatif terhadap kecepatan aliran udara masuk

Rasio Laju Massa Sekam: Laju Massa Udara (*Air Fuel Ratio*)

Rasio massa sekam: massa udara atau *Air Fuel Ratio* (AFR) sangat penting dalam pembakaran karena *Air Fuel Ratio* (AFR) adalah rasio perbandingan antara udara dan bahan bakar yang merupakan faktor penting dalam proses pembakaran sempurna di ruang bakar.

Tabel 3. Kecepatan aliran udara rata-rata setiap perlakuan

Perlakuan	Kecepatan aliran udara						
	Sal primer (m/s)	Sal sek 1 (m/s)	Sal sek 2 (m/s)	Sal sek 3 (m/s)	Sal outlet tungku (m/s)	Sal dari blower (m/s)	Sal outlet akhir (m/s)
A1	2,51	2,70			7,48	9,73	23,97
A2	2,30	2,53	2,38		7,93	10,38	23,72
A3	2,09	2,57		2,24	7,85	10,31	23,91
A4	2,11		2,26	2,11	7,91	10,24	23,99
A5	2,29	2,39	2,57	2,16	7,97	10,29	23,82

Tabel 4. Distribusi suhu di titik pengukuran setiap perlakuan

Peralakuan	Suhu									
	T grate (°C)	T ruang bakar (°C)	T primer (°C)	T sek 1 (°C)	T sek 2 (°C)	T sek 3 (°C)	T outlet tungku (°C)	T dari blower (°C)	T outlet akhir (°C)	T lingkungan (°C)
A1B1	660,01	202,62	53,62	35,05			109,20	39,47	51,35	31,72
A2B1	361,26	410,33	30,17	33,52	39,65		374,36	43,81	60,41	29,88
A3B1	259,71	87,05	31,79	37,31		33,40	409,58	59,73	68,20	32,69
A4B1	369,58	199,60	51,56		47,21	38,62	231,12	50,04	59,76	34,13
A5B1	747,20	186,19	54,06	38,12	51,91	40,37	214,52		52,02	37,76
A1B2	474,20	203,11	60,11	41,28			292,32	41,32	64,86	38,63
A2B2	661,16	419,51	41,51	32,35	32,42		451,90	30,24	60,90	29,78
A3B2	504,77	42,85	45,96	40,97		36,44	474,23	59,05	68,81	32,79
A4B2	268,58	658,07	47,59		33,78	33,79	461,93	39,38	70,39	32,82
A5B2	689,69	418,93	57,44	41,60	38,92	54,37	99,78		55,47	36,04
A1B3	642,82	63,85	41,50	36,14			148,90	54,43	63,47	27,17
A2B3	713,26	456,21	59,43	43,31	57,99		310,07	49,69	82,73	35,62
A3B3	762,32	362,73	58,71	40,03		55,92	236,80	34,99	56,42	30,81
A4B3	758,55	198,43	48,56		37,48	53,32	196,78	33,11	55,37	29,35
A5B3	755,14	329,92	56,49	37,44	53,13	36,02	161,80		60,57	28,33

Pada proses pembakaran sempurna sekam memiliki rasio perbandingan AFR yaitu 5,5 : 1 atau yang biasa disebut dengan Stoikiometrik, artinya campuran memiliki perbandingan 5,5 kg udara dan 1 kg sekam. Tabel rasio laju massa sekam: laju massa udara dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 menunjukkan laju massa sekam yang dihasilkan berbeda-beda tergantung dengan kecepatan putar konveyor ulir yang digunakan. Semakin besar kecepatan putar konveyor ulir maka semakin besar laju

umpan sekam dan sebaliknya. Hal ini sesuai dengan Panggabena dkk. (2020) yang menyatakan peningkatan kecepatan putar ulir akan meningkatkan laju umpan sekam. Tabel 5 menunjukkan semakin besar laju umpan sekam, maka semakin kecil rasio massa sekam: massa aliran udara dan sebaliknya. Di sisi lain, laju aliran udara berbanding lurus terhadap rasio massa umpan sekam: massa aliran udara. Semakin besar laju aliran udara maka semakin besar rasio massa umpan sekam: massa aliran udara yang dihasilkan dan sebaliknya.

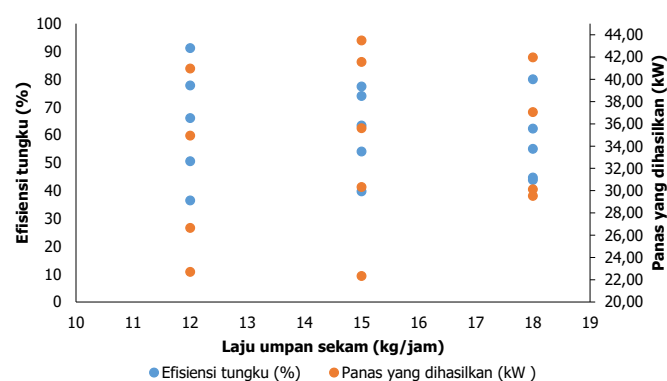
Tabel 5. Rasio laju massa sekam: laju massa udara

Perlakuan	Parameter					
	Kecepatan udara masuk (m/s)	Luas permukaan saluran udara masuk (m ²)	Laju aliran volume udara masuk (m ³ /s)	Laju aliran massa udara masuk (kg/s)	Laju massa sekam (kg/s)	Rasio massa sekam: massa udara
A1B1	5,21	0.00385	0,0200	0,0240	0,0033	1 : 7
A2B1	7,21	0.00385	0,0277	0,0333	0,0033	1 : 10
A3B1	6,90	0.00385	0,0265	0,0318	0,0033	1 : 10
A4B1	6,48	0.00385	0,0249	0,0299	0,0033	1 : 9
A5B1	9,41	0.00385	0,0362	0,0434	0,0033	1 : 13
A1B2	5,21	0.00385	0,0200	0,0240	0,0042	1 : 6
A2B2	7,21	0.00385	0,0277	0,0333	0,0042	1 : 8
A3B2	6,90	0.00385	0,0265	0,0318	0,0042	1 : 8
A4B2	6,48	0.00385	0,0249	0,0299	0,0042	1 : 7
A5B2	9,41	0.00385	0,0362	0,0434	0,0042	1 : 10
A1B3	5,21	0.00385	0,0200	0,0240	0,005	1 : 5
A2B3	7,21	0.00385	0,0277	0,0333	0,005	1 : 7
A3B3	6,90	0.00385	0,0265	0,0318	0,005	1 : 6
A4B3	6,48	0.00385	0,0249	0,0299	0,005	1 : 6
A5B3	9,41	0.00385	0,0362	0,0434	0,005	1 : 9

Kinerja Pembakaran Tungku *Fixed Bed*

Menurut Khodei dkk. (2015) parameter yang mempengaruhi kinerja keseluruhan tungku *grate* bergerak meliputi debit udara primer, kecepatan aliran, laju aliran pementasan udara sekunder, sistem distribusi udara, distribusi perfusi ukuran *grate*, emisi partikel dan spesifikasi bahan bakar. Kinerja pembakaran tungku *fixed bed* yang diamati pada penelitian ini meliputi efisiensi tungku, laju konsumsi bahan bakar dan persentase abu/arang yang diproduksi, laju aliran volume udara *outlet* dan panas yang dihasilkan. Kinerja pembakaran tungku *fixed bed* ditunjukkan pada Tabel 6.

Untuk melihat signifikan laju umpan bahan bakar dan laju aliran udara terhadap efisiensi tungku dan panas yang dihasilkan dilakukan uji ANOVA. Nilai *p-value* yang diperoleh lebih tinggi dari 0,05 maka dari semua model tidak ada yang signifikan. Hal ini berarti uji ANOVA tidak bisa memperkirakan faktor yang berpengaruh lebih besar terhadap efisiensi tungku dan panas yang dihasilkan. Grafik laju umpan sekam terhadap efisiensi tungku dan panas yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4, sedangkan grafik laju aliran udara terhadap efisiensi tungku dan panas yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 5.

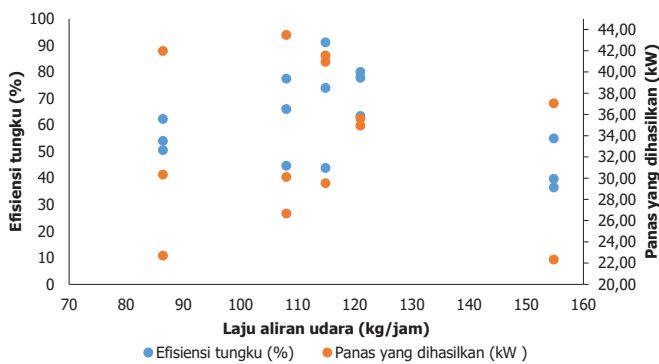


Gambar 4. Grafik laju umpan sekam terhadap efisiensi tungku dan panas yang dihasilkan

Untuk melihat perlakuan yang optimum terhadap kinerja tungku dilakukan optimasi menggunakan *response surface de optimale*. Dari optimasi ini diperoleh perlakuan optimum pada laju aliran udara 120,6 kg/jam dan laju umpan sekam 15 kg/jam yang akan menghasilkan efisiensi tungku maksimum 69,81%, panas yang dihasilkan maksimum 38,52 kW dan % abu/arang yang diproduksi minimum 17,52%. Jadi perlakuan yang paling mendekati optimum adalah perlakuan A3B2 dengan efisiensi tungku 73,99%, panas yang dihasilkan

Tabel 6. Kinerja pembakaran tungku *fixed bed*

Perlakuan	Parameter				
	Efisiensi tungku (%)	Laju konsumsi bahan bakar (kg/jam)	Persentase abu/arang yang diproduksi (%)	Laju aliran volume udara <i>outlet</i> (m ³ /jam)	Panas yang dihasilkan (kW)
A1B1	50,53	12	19,79	3451,68	22,70
A2B1	77,77	12	18,54	3415,68	34,93
A3B1	91,18	12	20,49	3443,04	40,96
A4B1	66,03	12	19,86	3454,56	26,66
A5B1	36,48	12	20,00	3430,08	16,39
A1B2	54,02	15	21,33	3451,68	30,33
A2B2	63,42	15	18,00	3415,68	35,61
A3B2	73,99	15	17,89	3443,04	41,55
A4B2	77,43	15	14,89	3454,56	43,48
A5B2	39,76	15	19,44	3430,08	22,33
A1B3	62,29	18	20,00	3451,68	41,97
A2B3	80,00	18	17,22	3415,68	53,91
A3B3	43,84	18	18,89	3443,04	29,53
A4B3	44,69	18	21,32	3454,56	30,11
A5B3	54,98	18	20,69	3430,08	37,05



Gambar 5 Grafik laju aliran udara terhadap efisiensi tungku dan panas yang dihasilkan

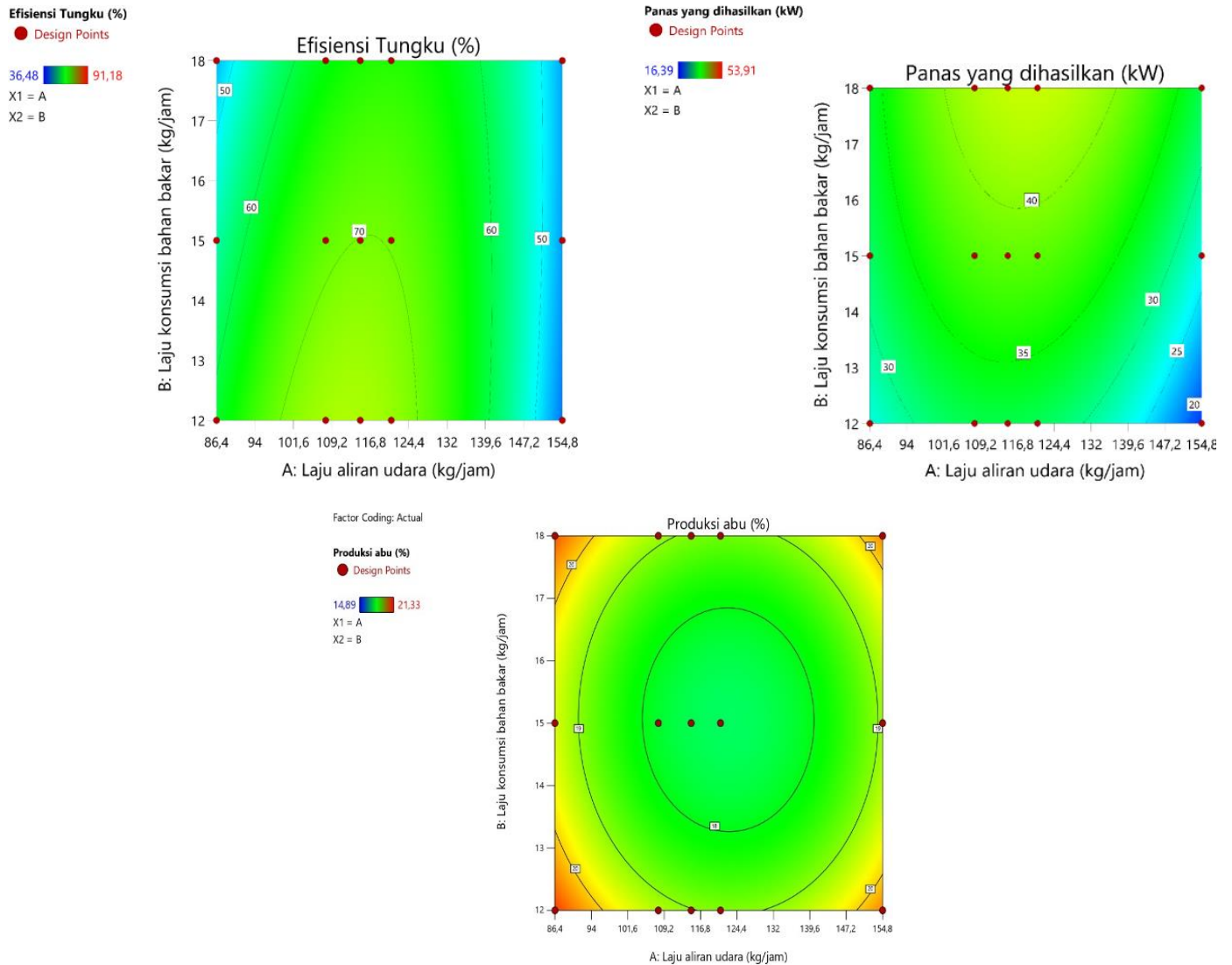
41,55 dan % abu/arang yang diproduksi 17,89%. Grafik kontur laju aliran udara dan laju umpan bahan bakar terhadap efisiensi tungku, panas yang dihasilkan dan % abu/arang yang diproduksi dapat dilihat pada Gambar 6.

Pengaruh Pola Aliran terhadap Kinerja Tungku *Fixed Bed*

Pola aliran udara yang dihasilkan setiap perlakuan berbeda-beda. Hal ini dikarenakan laju umpan bahan bakar dan laju aliran udara setiap perlakuan berbeda-beda. Pola aliran udara masing-masing perlakuan dapat

dilihat pada Gambar 7. Pola aliran udara perlakuan A3B2 merupakan perlakuan yang optimum, hal ini dikarenakan aliran udara sekunder berasal dari dua arah (searah dan berlawanan arah) sehingga aliran udara di tungku *fixed bed* tersebar merata. Disisi lain laju umpan bahan bakar perlakuan A3B2 adalah perlakuan yang optimum, sehingga menghasilkan rasio massa aliran udara: massa umpan sekam yang optimum sehingga terjadi pembakaran sempurna dan efisiensi tungku tinggi. Gambar 7 menunjukkan kelompok perlakuan A1B1, A1B2 dan A1B3, kelompok perlakuan A2B1, A2B2 dan A2B3, kelompok perlakuan A3B1, A3B2 dan A3B3, kelompok perlakuan A4B1, A4B2 dan A4B3, kelompok perlakuan A5B1, A5B2 dan A5B3 menunjukkan pola aliran udara yang hampir mendekati sama walaupun dengan laju umpan sekam yang berbeda. Pola aliran udara yang dihasilkan masing-masing perlakuan yang berbeda akan menghasilkan kontur turbulensi yang berbeda. Kontur turbulensi masing-masing perlakuan dapat dilihat pada Gambar 8.

Turbulensi adalah gerakan fluida yang ditandai dengan perubahan kekacauan dalam tekanan dan kecepatan aliran udara. Kontur turbulensi kelompok perlakuan A1B1, A1B2 dan A1B3, kelompok perlakuan A2B1, A2B2 dan A2B3, kelompok perlakuan A3B1, A3B2 dan A3B3, kelompok perlakuan A4B1, A4B2 dan A4B3,



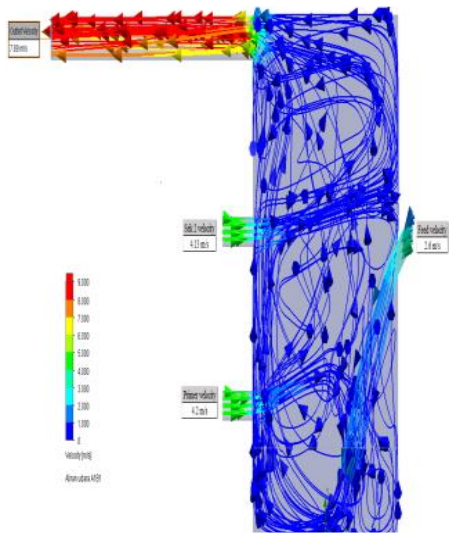
Gambar 6. Grafik kontur laju aliran udara dan laju umpan bahan bakar terhadap efisiensi tungku, panas yang dihasilkan dan % abu/arang yang diproduksi

kelompok perlakuan A5B1, A5B2 dan A5B3 menunjukkan pola kontur turbulensi yang hampir mendekati sama walaupun dengan laju umpan bahan bakar yang berbeda, hal ini menunjukkan kontur turbulensi tidak dipengaruhi laju umpan bahan bakar. Kontur turbulensi dipengaruhi laju umpan udara. Gambar 8 menunjukkan intensitas turbulensi di dalam tungku *fixed bed*. Intensitas turbulensi setiap perlakuan berbeda-beda. Intensitas turbulensi dipengaruhi kecepatan aliran udara sekunder. Kecepatan aliran udara sekunder yang tinggi menghasilkan intensitas turbulensi yang tinggi dan sebaliknya. Gambar 9 menunjukkan intensitas turbulensi tertinggi diperoleh kelompok perlakuan A5B1, A5B2 dan A5B3 dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Hal ini dikarenakan perlakuan A5B1, A5B2 dan A5B3 menggunakan tiga saluran udara sekunder dan

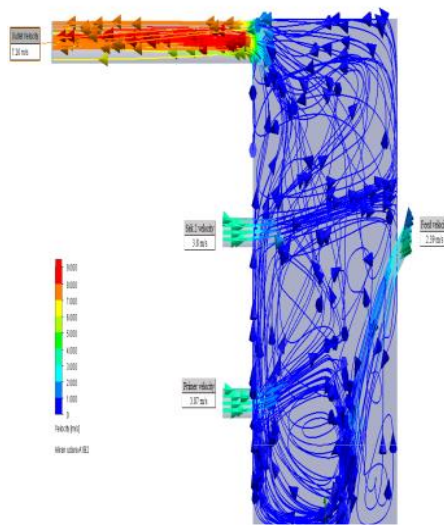
arah saluran sekunder berasal dari dua arah (searah dan berlawanan arah).

Laju konsumsi bahan bakar pada masing-masing perlakuan berbeda yaitu 12, 15, dan 18 kg/jam. Kecepatan putar konveyor ulir berpengaruh pada laju umpan bahan bakar. Hal ini dikarenakan konveyor ulir yang digunakan diatur pada frekuensi yang berbeda yaitu 25, 30, dan 35 Hz, sehingga menghasilkan kecepatan putar ulir yang berbeda yaitu 13, 17, dan 21 rpm. Konveyor ulir yang digunakan untuk mengumparkan sekam sudah dapat berfungsi dengan lancar dan stabil sehingga laju pengumpanan berjalan lancar.

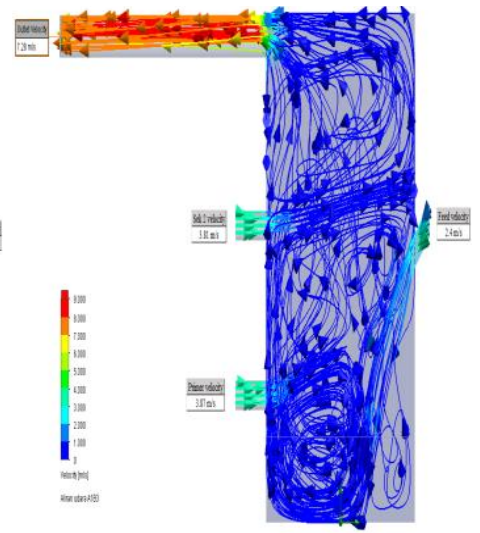
Persentase abu/arang yang diproduksi tertinggi diperoleh pada perlakuan A1B2 sebesar 21,33% dan terendah pada perlakuan A4B2 sebesar 14,89%. Persentase abu/arang yang diproduksi pada perlakuan



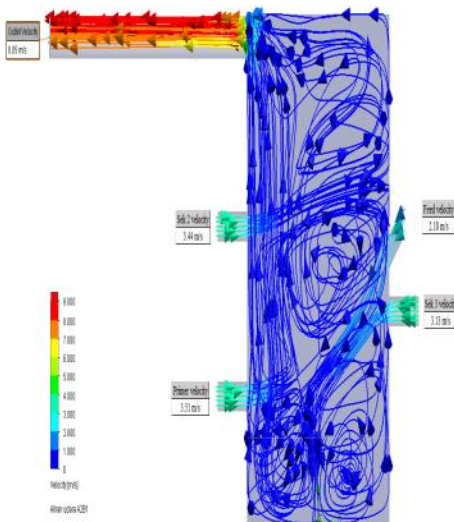
Perlakuan A1B1



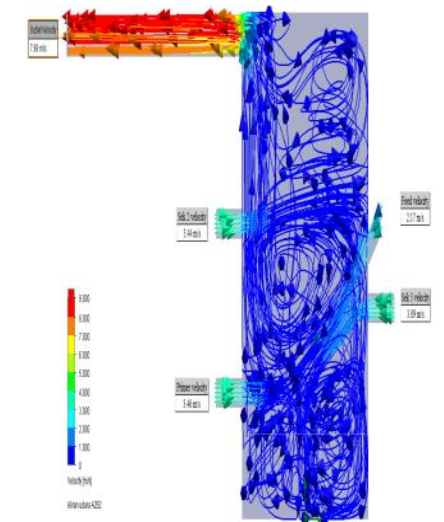
Perlakuan A1B2



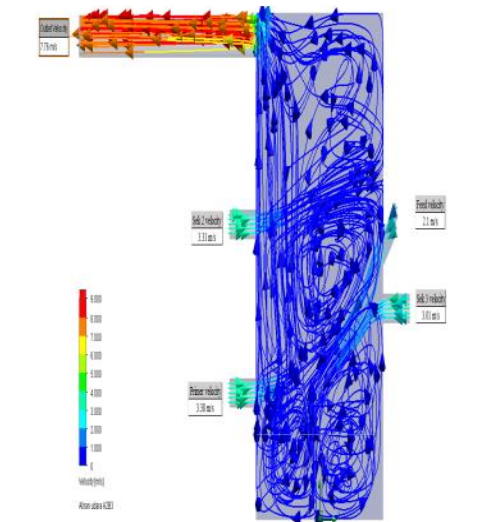
Perlakuan A1B3



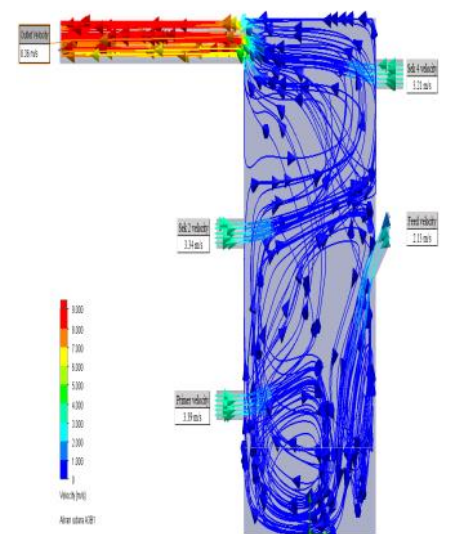
Perlakuan A2B1



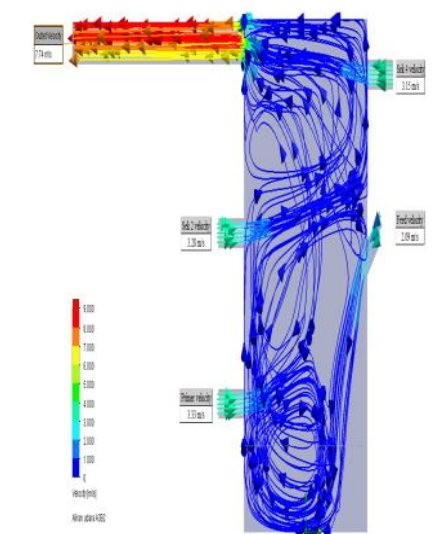
Perlakuan A2B2



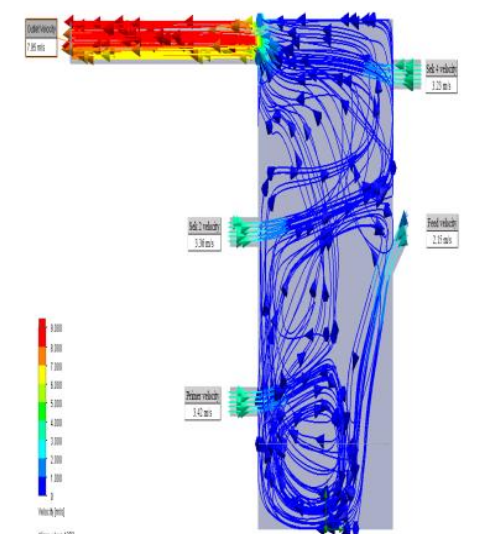
Perlakuan A2B3



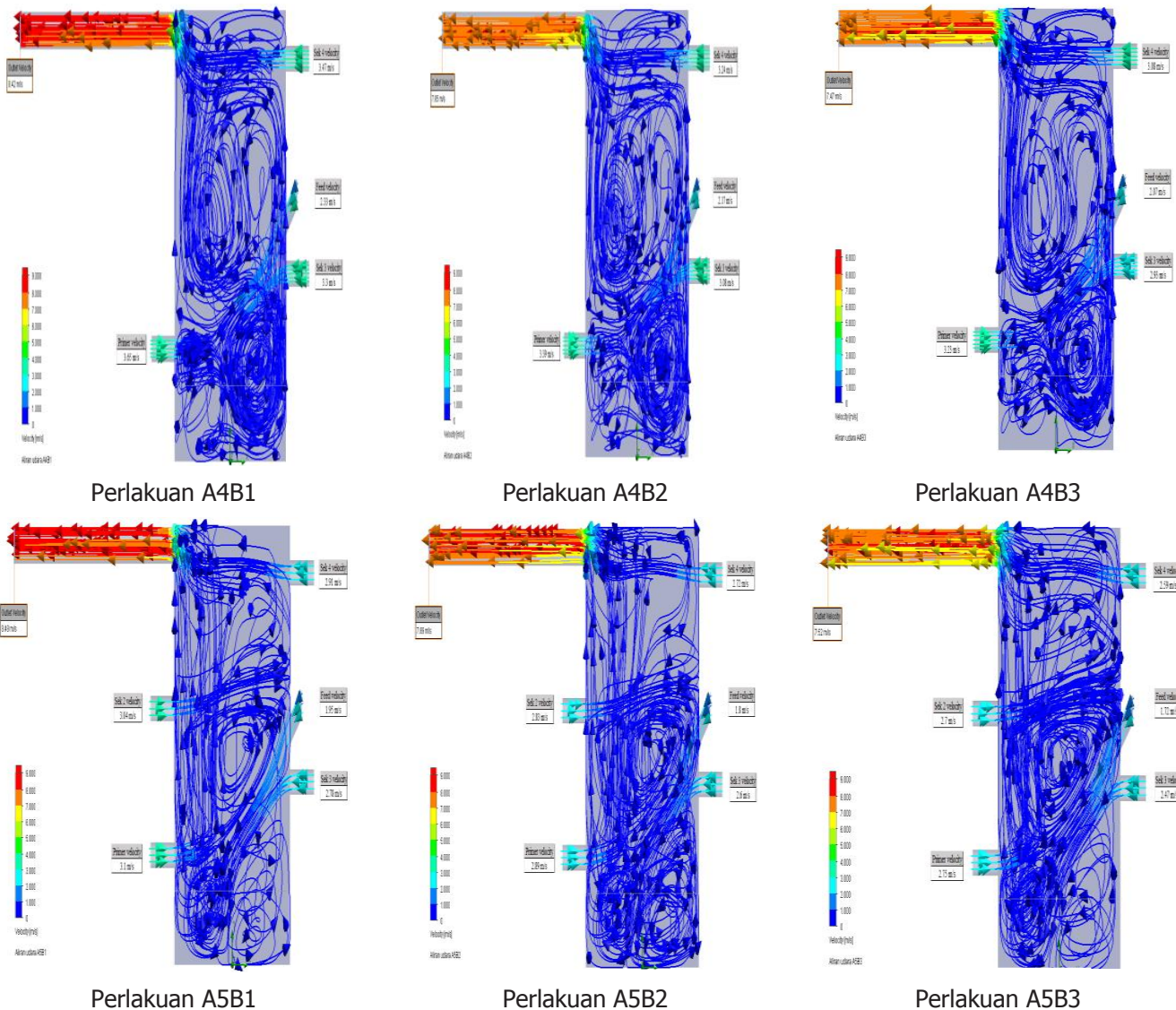
Perlakuan A3B1



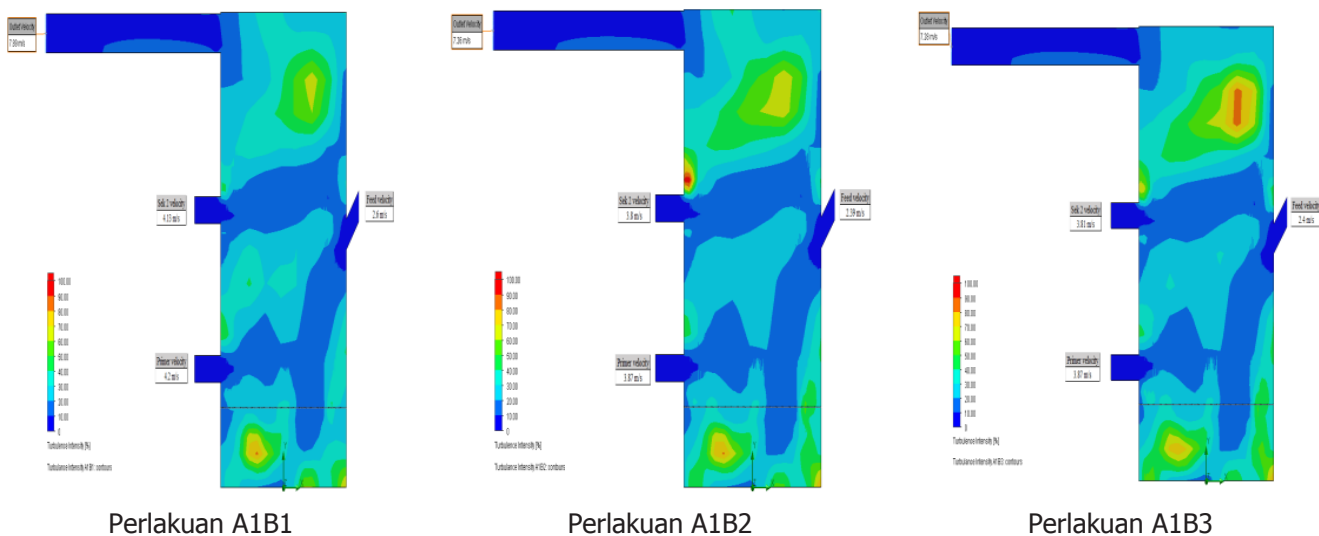
Perlakuan A3B2

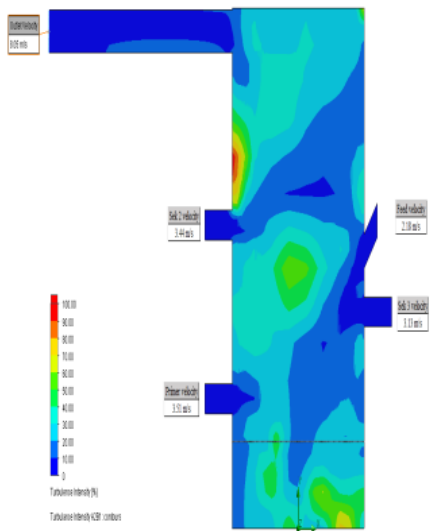


Perlakuan A3B3

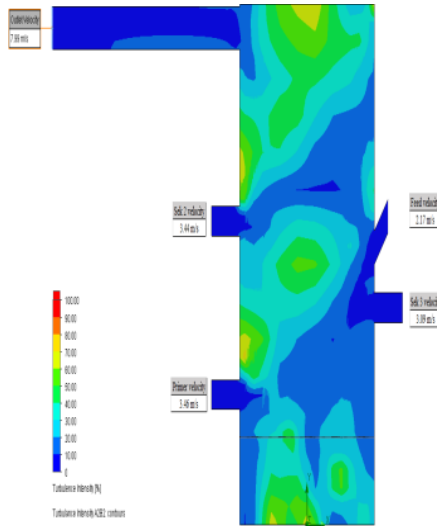


Gambar 7. Pola aliran udara masing-masing perlakuan

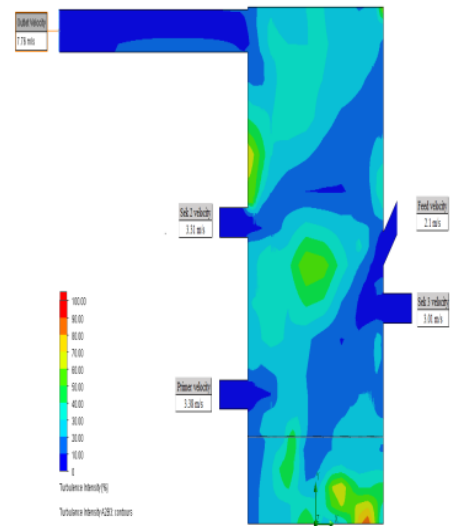




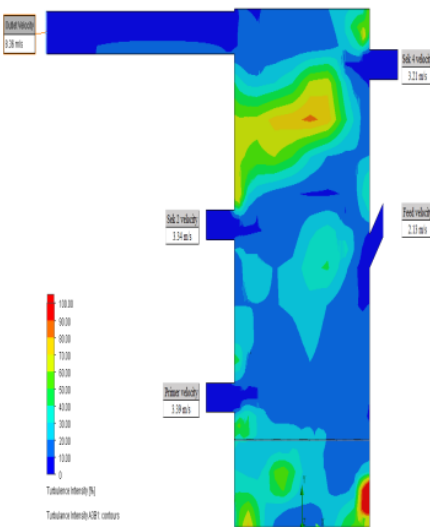
Perlakuan A2B1



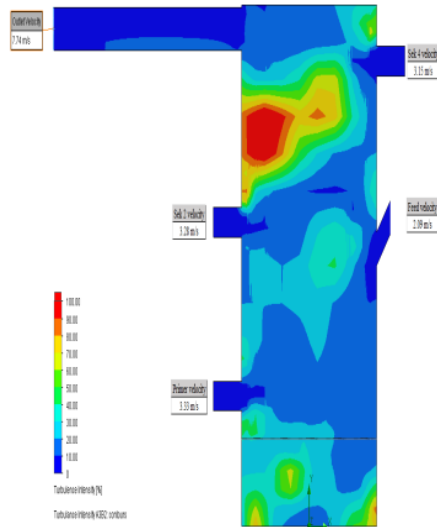
Perlakuan A2B2



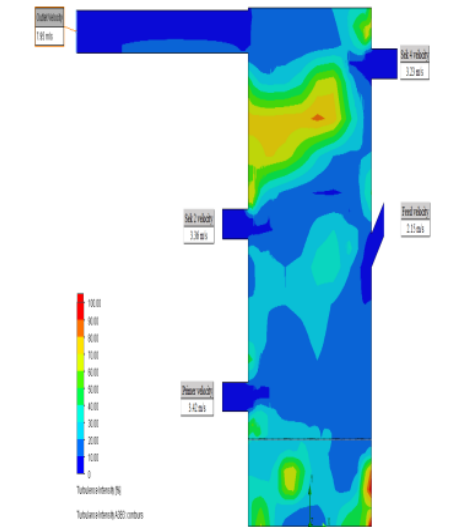
Perlakuan A2B3



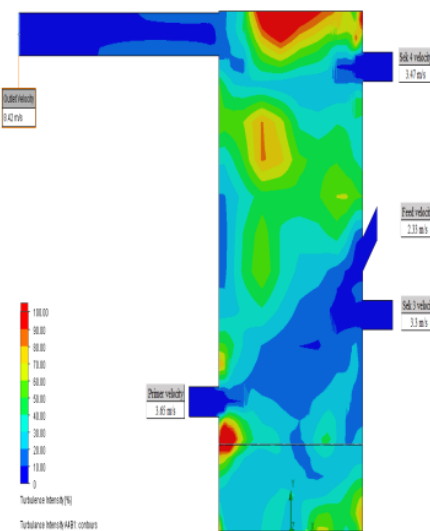
Perlakuan A3B1



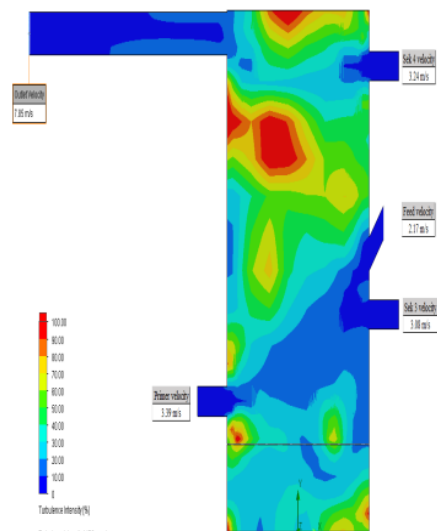
Perlakuan A3B2



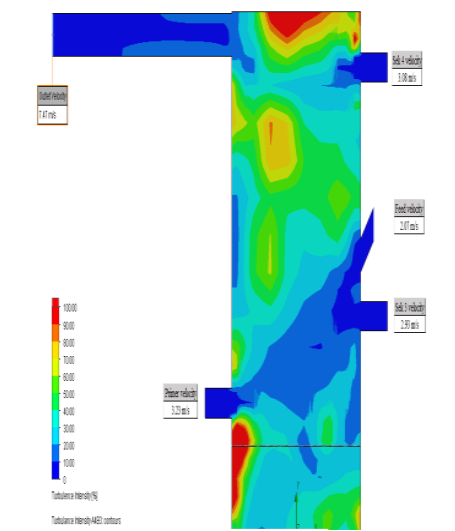
Perlakuan A3B3



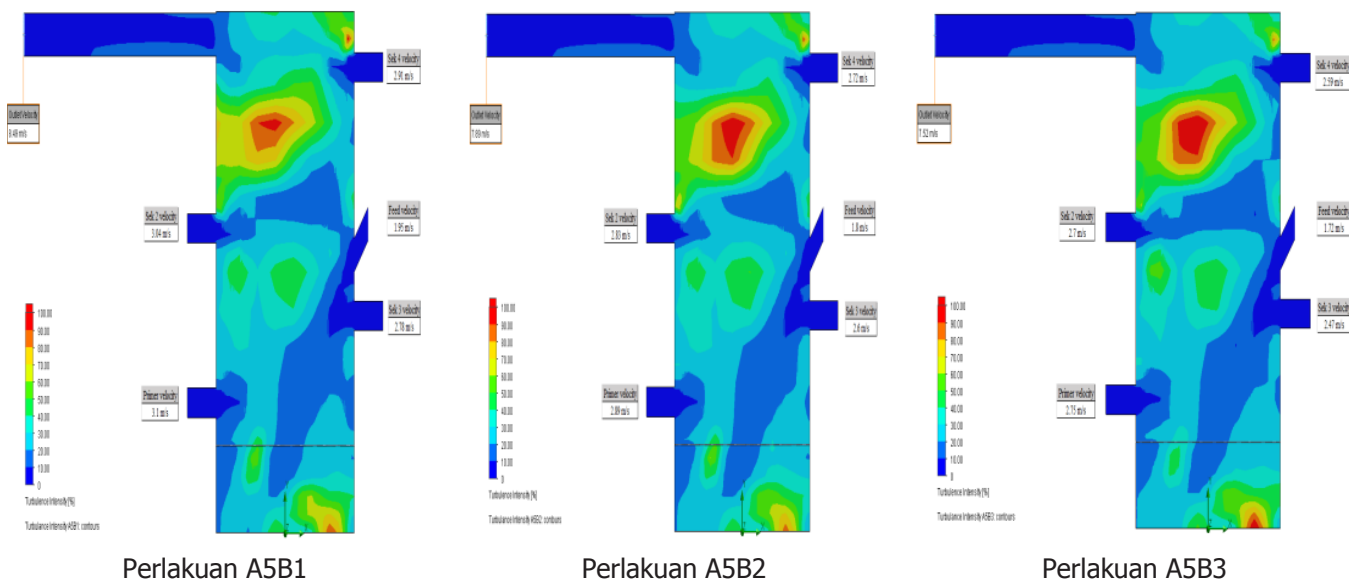
Perlakuan A4B1



Perlakuan A4B2



Perlakuan A4B3



Gambar 8. Kontur turbulensi masing-masing perlakuan

A1B2 tertinggi, hal ini dikarenakan rasio massa udara: massa sekam lebih rendah dari perlakuan lainnya sehingga pembakaran tungku *fixed bed* menghasilkan lebih banyak abu/arang dibanding dengan perlakuan lainnya.

Laju aliran volume udara *outlet* merupakan parameter penting pembakaran tungku *fixed bed*. Laju aliran volume udara *outlet* inilah yang akan digunakan sebagai sumber udara panas pengering. Laju aliran volume udara *outlet* tertinggi dihasilkan pada kelompok perlakuan A4B1, A4B2 dan A4B3 sebesar 3454,56 m³/jam (cmh) dan terendah pada kelompok perlakuan A2B1, A2B2, dan A2B3 sebesar 3415,68 m³/jam (cmh). Laju aliran volume udara *outlet* tertinggi diperoleh perlakuan A4B1, A4B2, dan A4B3, hal ini dikarenakan kecepatan aliran udara *outlet* lebih besar dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Semakin tinggi kecepatan aliran udara *outlet*, semakin tinggi laju aliran volume udara *outlet* dan sebaliknya. Laju aliran volume udara *outlet* dari semua perlakuan telah memenuhi kebutuhan udara panas teoritis 3196,8 m³/jam untuk mengeringkan gabah sebesar 500 kg.

KESIMPULAN

Laju umpan sekam dan laju aliran udara mempengaruhi kinerja pembakaran yang meliputi efisiensi tungku, laju aliran volume udara *outlet* dan panas yang dihasilkan. Jumlah, arah, dan ketinggian saluran udara sekunder yang digunakan pada pembakaran tungku *fixed bed* mempengaruhi efisiensi tungku. Tungku dengan 2 saluran udara sekunder menghasilkan efisiensi tungku lebih tinggi dibandingkan dengan 1 dan

3 saluran udara sekunder. Perlakuan optimum diperoleh pada laju umpan sekam 15 kg/jam dan laju aliran udara 114,84 kg/jam dengan efisiensi tungku sebesar 73,99%, panas yang dihasilkan 41,55 kW dan % abu/arang yang diproduksi 17,89%. Pola aliran udara dan kontur turbulensi setiap perlakuan berbeda-beda dan sangat bergantung kepada kecepatan aliran udara.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak ada konflik atau kepentingan dengan pihak lain.

DAFTAR PUSTAKA

Belonio, A. T. (2005). *Rice Husk Gas Stove Handbook*. Appropriate Technology Center. Central Philippine University. Philippine.

Cepic, Z. M. & Smaragdakis, B. B. N. (2017). Experimental analysis of the influence of air-flow rate on wheat straw combustion in a fixed bed. *Thermal Science*, 21(3): 1443-1452. <https://doi.org/10.2298/TSCI160403261C>

Hung, N. V., Quilloy, R., & Gummert, M. (2018). Improving energy efficiency and developing an air-cooled grate for the downdraft rice husk furnace. *Renewable Energy*, 115, 969-977. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.012>

Khodaei, H., Al-Abdeli, Y. M., Guzzomi, F., & Yeoh, G. H. (2015). An overview of processes and considerations in the modelling of fixed bed biomass combustion. *Energy*, 88, 946-972. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.099>

- Laryea, G. N., & No, Y. (2005). Effect air velocity on combustion characteristics small scale burner. *Journal of the Korean Society of Combustion*, 10(1), 1-6.
- Li S, Li Z, Jiang B, Chen Z, & Zhang X. (2015). Effect of secondary air mass flow rate on the airflow and combustion characteristics and NO_x formation of the lowvolatile coal-fired swirl burner. *Asia-Pac. J. Chem. Eng.*, (10), 858-875
- Liu Z, Liu S, Shi R, Wang J, Xie M, & Zheng S. 2020. A control strategy of the air flow rate of coal-fired utility boilers based on the load demand. *ACS OMEGA*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04585>
- Liu Y, Wang J, Min C, Xie G, & Sunden B. 2020. Performance of fuel-air combustion in a reheating furnace at different flowrate and inlet conditions. *Energy*, 206, 1-13.
- Mehrabian, R., Shiehnejadhesar, A., & Scharler, R. (2015). Application of numerical modelling to biomass grate furnaces. *Journal of Thermal Engineering*, 3(6), 550-556.
- Panggabean, T., Mandang, T., Nelwan, L. O., & Hermawan, W. (2020). Performance of rice husk screw feeder for fixed bed combustion. *International Journal of Scientific and Technology*, 9(10), 256-261.
- Satria, D., Irnawati, R., Sirajuddin, Haryati, S., Susanto, A., Rosyadi, I., & Wicaksono, M. M. R. (2017). Rancang bangun tungku biomassa mesin pengering rumput laut kapasitas 600 kilogram per proses. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian dan Biosistem*, 5(2), 422-428.