



## Pemodelan Koefisien Perpindahan Panas Pada Sistem Pengeringan Berbasis Energi Sekam Padi Dengan Pendekatan Analogi Perpindahan Panas Dan Massa

I Gede Bawa Susana<sup>1\*)</sup>, Rudy Sutanto<sup>2)</sup>

<sup>1,2)</sup>Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Mataram, Jl. Majapahit No. 62, Mataram, 83125

e-mail: [gedebawa@unram.ac.id](mailto:gedebawa@unram.ac.id)

### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan koefisien perpindahan panas pada sistem pengeringan berbasis energi sekam padi menggunakan pendekatan analogi perpindahan panas dan massa (Chilton–Colburn). Analisis dilakukan pada kondisi temperatur udara masuk pengering sebesar 92,10°C dan temperatur lingkungan rata-rata 31°C, dengan pendekatan sifat termofisik udara pada temperatur rata-rata 60°C. Parameter yang digunakan meliputi densitas, kapasitas panas spesifik, viskositas kinematik, difusivitas massa, serta bilangan tak berdimensi seperti Reynolds, Prandtl, dan Schmidt. Hasil menunjukkan bahwa bilangan Reynolds sebesar 444 mengindikasikan bahwa aliran berada pada kondisi transisi menuju turbulen ringan yang mendukung konveksi paksa. Berdasarkan analogi perpindahan panas dan massa, diperoleh bilangan Sherwood sebesar 40,6, koefisien perpindahan massa sebesar 0,248 m/s, serta koefisien perpindahan panas sebesar 249 W/m<sup>2</sup>·K dengan laju perpindahan panas mencapai 15,2 kW. Pendekatan analogi Chilton–Colburn menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas berbanding lurus dengan bilangan Reynolds pangkat 0,6 serta dipengaruhi oleh sifat fluida dan karakteristik partikel. Hasil ini menegaskan bahwa perpindahan panas dan massa terjadi secara simultan dan saling berkaitan erat dalam proses pengeringan. Model yang dikembangkan mampu merepresentasikan kondisi nyata sistem dan berada dalam rentang nilai literatur, sehingga dapat digunakan sebagai metode sederhana dan efektif dalam memprediksi performa sistem pengering berbasis biomassa.

Kata Kunci: pengeringan, sekam padi, analogi perpindahan panas dan massa, Chilton–Colburn, koefisien perpindahan panas

### ABSTRACT

*This study aims to model the heat transfer coefficient in a rice husk–based drying system using the heat-mass transfer analogy (Chilton–Colburn analogy). The analysis was conducted under an inlet air temperature of 92.10°C and ambient temperature of 31°C, with thermophysical properties of air evaluated at an average temperature of 60°C. The parameters considered include air density, specific heat capacity, kinematic viscosity, mass diffusivity, and dimensionless numbers such as Reynolds, Prandtl, and Schmidt. The results indicate that a Reynolds number of 444 corresponds to a transitional flow regime approaching mild turbulence, which enhances forced convection heat transfer. Based on the heat and mass transfer analogy, the Sherwood number was found to be 40.6, yielding a mass transfer coefficient of 0.248 m/s and a heat transfer coefficient of 249 W/m<sup>2</sup>·K, with a heat transfer rate of 15.2 kW. The Chilton–Colburn analogy demonstrates that the heat transfer coefficient is proportional to the Reynolds number to the power of 0.6 and is influenced by fluid properties and particle characteristics. These findings confirm that heat and mass transfer occur simultaneously and are strongly coupled during the drying process. The developed model shows good agreement with literature values and can be applied as a simple and effective predictive tool for analyzing and optimizing biomass-based drying systems.*

Keywords: *drying, rice husk, heat and mass transfer analogy, Chilton–Colburn, heat transfer coefficient*

### 1. Pendahuluan

Proses pengeringan merupakan salah satu tahapan penting dalam pengolahan bahan pertanian dan pangan, yang bertujuan untuk menurunkan kadar air sehingga meningkatkan umur simpan dan kualitas produk. Secara

fundamental, pengeringan melibatkan fenomena simultan antara perpindahan panas dan perpindahan massa, dan energi panas digunakan untuk menguapkan air dari dalam material ke lingkungan sekitarnya. Proses pengeringan melibatkan fenomena perpindahan panas, massa, dan

momentum secara simultan dengan perubahan fase yang berkelanjutan, serta dipengaruhi difusivitas kelembapan efektif dan koefisien perpindahan massa konvektif [1, 2]. Efisiensi proses pengeringan sangat dipengaruhi oleh karakteristik perpindahan panas dan massa yang terjadi selama proses berlangsung.

Dalam sistem pengeringan, koefisien perpindahan panas merupakan parameter kunci yang menentukan laju transfer energi dari media pemanas ke bahan yang dikeringkan. Panas terutama ditransfer ke dalam melalui konveksi dari udara ke permukaan bahan dan melalui konduksi dari permukaan ke pusat bahan, sedangkan kelembapan berdifusi ke luar ke permukaan bahan dan menguap [3]. Secara umum, koefisien perpindahan panas didefinisikan sebagai perbandingan fluks panas terhadap perbedaan temperatur antara permukaan dan fluida. Nilai koefisien ini sangat dipengaruhi oleh kondisi aliran, sifat fluida, serta karakteristik material yang dikeringkan. Seperti pada biji-bijian, koefisien perpindahan panas dan massa biji-bijian bervariasi di sepanjang permukaan. Selain itu, daerah dengan porositas lebih rendah dalam tumpukan biji-bijian menunjukkan laju perpindahan panas dan kelembapan yang lebih rendah, serta perpindahan kelembapan di dalam tumpukan biji-bijian mendominasi waktu pengeringan dibandingkan dengan perpindahan panas [4].

Seiring meningkatnya kebutuhan energi dan isu keberlanjutan, pemanfaatan energi biomassa sebagai sumber panas alternatif dalam sistem pengeringan semakin berkembang. Salah satu biomassa yang potensial adalah sekam padi, yang merupakan limbah pertanian yang melimpah dan memiliki nilai kalor yang cukup tinggi. Pengelolaan sekam padi yang belum optimal sebagai produk samping utama pengolahan padi berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan, khususnya sebagai limbah padat [5]. Di sisi lain, sekam padi memiliki potensi energi yang cukup besar. Beberapa penelitian melaporkan bahwa nilai kalor sekam padi berada pada kisaran yang cukup tinggi, bahkan mendekati setengah dari nilai kalor batubara, yaitu sekitar 11–15,3 MJ/kg [6], nilai kalor bersih (net calorific value) sebesar 12–16 MJ/kg [7], serta berkisar antara 13–19 MJ/kg dengan rata-rata sekitar 18 MJ/kg [8]. Selain itu, nilai *higher heating value* dilaporkan sebesar  $18,14 \pm 0,04$  MJ/kg [9]. Penggunaan sekam padi sebagai sumber energi pengeringan tidak hanya meningkatkan efisiensi biaya, tetapi juga mendukung konsep energi terbarukan dan ramah lingkungan. Seperti Pulau Lombok, sebagai salah satu wilayah agraris, memiliki produksi padi yang signifikan, di mana pada tahun 2024 tercatat mencapai 785.918 ton gabah kering giling berdasarkan data Badan Pusat Statistik [10]. Dalam proses penggilingan padi menjadi beras, dihasilkan produk samping berupa sekam padi dengan proporsi sekitar 20% dari total produksi [11, 12]. Dengan demikian, secara teoritis potensi ketersediaan sekam padi di Pulau Lombok pada tahun 2024 diperkirakan mencapai 157.184 ton [13]. Sistem pengeringan berbasis biomassa, khususnya sekam padi, memiliki

kompleksitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem konvensional. Hal ini disebabkan oleh fluktuasi temperatur, distribusi panas yang tidak seragam, serta interaksi antara perpindahan panas dan massa yang terjadi secara bersamaan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pemodelan yang mampu menggambarkan fenomena tersebut secara komprehensif. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah analogi perpindahan panas dan massa, yang menghubungkan fenomena perpindahan panas dengan perpindahan massa melalui parameter tak berdimensi seperti bilangan Nusselt, Reynolds, Prandtl, dan Schmidt. Pendekatan ini memungkinkan estimasi koefisien perpindahan panas dan massa secara lebih praktis tanpa harus melakukan pengukuran langsung yang kompleks.

Performa sistem pengering sangat bergantung pada distribusi panas dan efisiensi perpindahan energi di dalam sistem. Salah satu parameter utama yang menentukan performa tersebut adalah koefisien perpindahan panas konvektif. Nilai koefisien ini tidak konstan dan dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kecepatan udara, sifat termofisik fluida, serta geometri sistem pengering. Selain itu, proses pengeringan juga melibatkan perpindahan massa berupa difusi uap air dari dalam bahan ke permukaan dan selanjutnya ke udara pengering. Koefisien perpindahan massa menjadi parameter penting dalam menentukan laju penguapan air. Koefisien ini dapat didefinisikan sebagai konstanta yang menghubungkan laju perpindahan massa dengan gaya pendorong berupa perbedaan konsentrasi. Keterkaitan antara perpindahan panas dan massa dalam proses pengeringan dapat dianalisis melalui pendekatan analogi, seperti analogi Chilton–Colburn, yang menyatakan bahwa mekanisme perpindahan momentum, panas, dan massa memiliki kesamaan karakteristik. Pendekatan ini memungkinkan penentuan koefisien perpindahan panas berdasarkan korelasi perpindahan massa, atau sebaliknya, sehingga mempermudah analisis sistem yang kompleks. Dalam penelitian Krempaský *et al.* (2025), dijelaskan bahwa secara umum, metode semi-teoretis (analogi perpindahan panas dan massa atau teori lapisan difusi) menyertakan semua parameter penting dalam perhitungan dan dianggap lebih andal [14]. Pengembangan model koefisien perpindahan panas berbasis analogi perpindahan panas dan massa diharapkan dapat memberikan pendekatan yang lebih sederhana namun tetap akurat dalam menganalisis performa sistem pengering. Model ini juga dapat digunakan sebagai dasar dalam perancangan dan optimasi sistem pengering berbasis biomassa agar lebih efisien dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model koefisien perpindahan panas pada sistem pengeringan berbasis energi sekam padi melalui pendekatan analogi perpindahan panas dan massa (Chilton–Colburn), guna memperoleh estimasi kinerja perpindahan panas dan massa yang representatif terhadap kondisi operasional sistem.

## 2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan matematis untuk memprediksi koefisien perpindahan panas pada sistem pengeringan berbasis energi sekam padi. Model dikembangkan menggunakan analogi perpindahan panas dan massa (Chilton–Colburn) yang menghubungkan fenomena perpindahan massa dengan perpindahan panas melalui bilangan tak berdimensi.

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi temperatur udara masuk pengering dan kecepatan udara berdasarkan penelitian sebelumnya sebesar  $92,10^{\circ}\text{C}$  dan  $2\text{ m/s}$  [15, 16]. Temperatur lingkungan adalah rata-rata  $31^{\circ}\text{C}$ , serta diameter partikel sekam sebesar  $0,005\text{ m}$ . Sifat termofisik udara diambil berdasarkan temperatur rata-rata sistem, meliputi densitas, panas spesifik, viskositas kinematik, difusivitas massa, dan bilangan Prandtl.

Pemodelan dilakukan dengan pengembangan model matematis berdasarkan persamaan dari beberapa literatur perpindahan panas dan perpindahan massa [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]. Regime aliran (laminar, transisi, turbulen) ditentukan berdasarkan bilangan Reynolds ( $Re$ ) seperti pada Persamaan 1.

$$Re = \frac{V \cdot d_p}{\nu} \quad \dots (1)$$

Bilangan Reynolds digunakan untuk menentukan karakteristik aliran fluida pada sistem pengeringan. Dengan  $V$  adalah kecepatan udara (m/s),  $\nu$  adalah viskositas kinematik  $\text{m}^2/\text{s}$ ,  $d_p$  merupakan diameter partikel sekam (m). Perbandingan antara difusi momentum dan difusi massa berdasarkan bilangan Schmidt ( $Sc$ ) seperti pada Persamaan 2.

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad \dots (2)$$

$D_{AB}$  merupakan difusivitas massa atau difusivitas uap air di udara ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). Perpindahan massa pada partikel/droplet ditentukan berdasarkan bilangan Sherwood ( $Sh$ ) disajikan pada Persamaan 3.

$$Sh = 2 + 1.1Re^{0.6}Sc^{1/3} \quad \dots (3)$$

Koefisien perpindahan massa ( $h_D$ ) dihitung berdasarkan Persamaan 4.

$$h_D = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{d_p} \quad \dots (4)$$

Hubungan antara koefisien perpindahan panas ( $h$ ) ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ) dan koefisien perpindahan massa ( $h_D$ ) ( $\text{m}/\text{s}$ ) berdasarkan analogi Chilton–Colburn seperti disajikan pada Persamaan 5.

$$h = h_D \cdot \rho \cdot C_p \left( \frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad \dots (5)$$

$\rho$  merupakan densitas udara/massa jenis ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $C_p$  adalah kapasitas panas spesifik ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ), dan  $Pr$  adalah bilangan Prandtl. Persamaan 5 untuk mencari koefisien perpindahan

panas sekam padi berdasarkan koefisien perpindahan massa menggunakan analogi. Pendekatan ini sangat umum dalam analisis pengeringan biomassa karena lebih mudah mengukur perpindahan massa dibandingkan dengan perpindahan panas secara langsung. Laju perpindahan panas ( $Q$ ) ( $\text{W}$ ) dihitung berdasarkan persamaan 6.

$$Q = h \cdot A(T_{udara} - T_{lingkungan}) \quad \dots (6)$$

$A$  merupakan luas permukaan perpindahan panas untuk  $1\text{ m}^2$ . Dalam penelitian ini, perhitungan berbasis partikel tunggal/kondisi seragam, aliran udara relatif homogen, perpindahan panas dominan konveksi *eksternal* yang sesuai untuk penerapan skala kecil, lapisan tipis, dan pengering sederhana.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Perhitungan sifat termofisik

Berdasarkan temperatur udara masuk pengering sebesar  $92,10^{\circ}\text{C}$  dan temperatur lingkungan rata-rata  $31^{\circ}\text{C}$ , maka dapat dicari sifat udara dengan kondisi tersebut seperti disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Sifat termofisik udara

No	Parameter	Nilai
1.	Densitas udara, $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	0,96
2.	Kapasitas panas spesifik, $C_p$ ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )	1008
3.	Viskositas kinematik, $\nu$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$2,25 \times 10^{-5}$
4.	Difusivitas massa, $D_{AB}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$3,05 \times 10^{-5}$
5.	Bilangan Prandtl, $Pr$	0,70
6.	Bilangan Schmidt, $Sc$	0,74

Sifat termofisik udara pada penelitian ini ditentukan berdasarkan temperatur rata-rata sistem, yaitu sekitar  $60^{\circ}\text{C}$ . Pendekatan ini digunakan untuk menyederhanakan perhitungan dengan asumsi bahwa variasi sifat fluida terhadap temperatur relatif kecil dan tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil pemodelan. Koefisien perpindahan panas dalam sistem pengeringan tidak hanya dipengaruhi oleh sifat fluida, tetapi juga sangat sensitif terhadap parameter operasi seperti kecepatan udara, temperatur, dan ukuran partikel. Berdasarkan pendekatan analogi Chilton–Colburn, setiap parameter yang mempengaruhi bilangan Reynolds dan sifat fluida akan berdampak langsung terhadap nilai  $h$ .

Kecepatan udara merupakan parameter dominan karena berbanding lurus dengan bilangan Reynolds ( $Re \propto v$ ). Peningkatan kecepatan udara akan memperbesar gaya inersia aliran dan menipiskan lapisan batas termal di sekitar partikel, sehingga meningkatkan gradien temperatur dan laju perpindahan panas. Temperatur mempengaruhi sifat termofisik fluida seperti viskositas, densitas, dan difusivitas massa. Peningkatan temperatur umumnya meningkatkan difusivitas massa ( $D_{AB}$ ) dan menurunkan densitas fluida, yang berdampak pada peningkatan bilangan Reynolds dan

Schmidt. Selain itu, kenaikan temperatur juga memperbesar beda temperatur antara udara dan bahan, sehingga meningkatkan driving force perpindahan panas. Secara keseluruhan, peningkatan temperatur akan meningkatkan nilai *h* dan laju perpindahan panas, namun pada temperatur tinggi perlu diperhatikan potensi degradasi kualitas bahan. Ukuran partikel berpengaruh terhadap luas permukaan kontak dan karakteristik aliran di sekitar partikel.

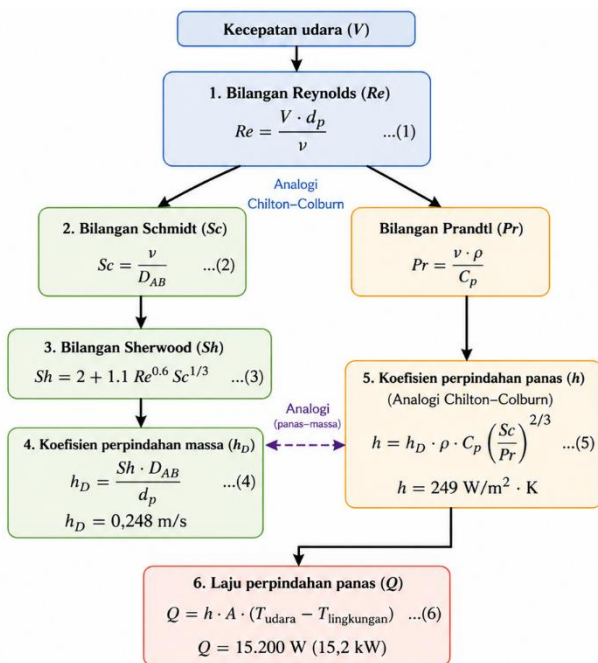
3.2 Hasil pemodelan koefisien perpindahan panas

Dari Tabel 1, maka diperoleh nilai untuk koefisien perpindahan panas berdasarkan pendekatan perpindahan panas dan massa seperti disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil perhitungan perpindahan panas dan massa

No	Parameter	Nilai
1.	Bilangan Reynolds, $Re$	444
2.	Bilangan Schmidt, $Sc$	0,74
3.	Bilangan Sherwood, $Sh$	40,6
4.	Koefisien perpindahan massa, $h_D$ (m/s)	0,248
5.	Koefisien perpindahan panas, $h$ (W/m <sup>2</sup> .K)	249
6.	Laju perpindahan panas, $Q$ (W)	15200

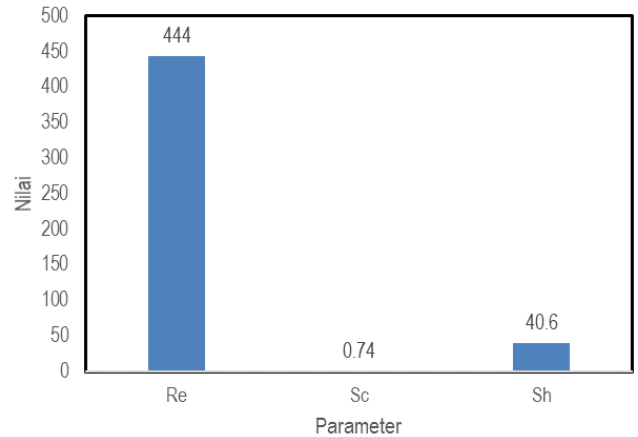
Hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan yang kuat antara perpindahan panas dan perpindahan massa selama proses pengeringan. Gambar 1 menunjukkan skema hubungan antar variabel terkait pendekatan analogi perpindahan panas dan massa.



Gambar 1. Skema pemodelan perpindahan panas dan massa pada sistem pengering berbasis sekam padi

Laju penguapan air dari bahan meningkat seiring dengan meningkatnya laju perpindahan panas. Melalui pendekatan analogi, diperoleh bahwa peningkatan koefisien

perpindahan panas diikuti oleh peningkatan koefisien perpindahan massa. Nilai bilangan tak berdimensi menunjukkan bahwa bilangan Reynolds ( $Re$ ) sebesar 444 merupakan nilai tertinggi dibandingkan dengan bilangan Schmidt ( $Sc$ ) sebesar 0,74 dan bilangan Sherwood ( $Sh$ ) sebesar 40,6. Hal ini seperti disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Nilai pada bilangan tak berdimensi

Nilai Reynolds tersebut mengindikasikan bahwa aliran udara pada sistem pengering berada pada kondisi laminar menuju transisi, sehingga perpindahan panas dan massa berlangsung cukup stabil. Nilai Schmidt yang mendekati satu menunjukkan bahwa laju difusi momentum dan difusi massa di udara relatif sebanding. Sementara itu, nilai Sherwood yang cukup tinggi menandakan bahwa mekanisme perpindahan massa dari permukaan bahan ke udara pengering berlangsung efektif, sehingga uap air dapat dilepaskan dengan baik selama proses pengeringan. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme perpindahan panas dan massa berlangsung secara simultan dan saling mempengaruhi. Fenomena ini sesuai dengan teori bahwa proses pengeringan dikendalikan oleh dua tahapan utama, yaitu perpindahan panas ke permukaan bahan dan difusi uap air dari dalam bahan ke permukaan. Ketidakseimbangan salah satu proses akan menyebabkan penurunan efisiensi pengeringan secara keseluruhan. Hal ini sesuai dengan penelitian Khan *et al.* dan Hii *et al.*, bahwa pengeringan merupakan proses perpindahan panas dan massa secara simultan yang kompleks, dengan panas diberikan untuk memfasilitasi difusi kelembapan dari dalam bahan ke permukaan dan selanjutnya menguap ke udara pengering; proses ini dapat dimodelkan secara empiris, teoretis, maupun rekayasa reaksi [24, 25].

3.3 Karakteristi aliran dan perpindahan panas

Berdasarkan Tabel 2, bilangan Reynolds sebesar 444 menunjukkan bahwa aliran berada pada kondisi transisi menuju turbulen ringan, yang umumnya meningkatkan intensitas perpindahan panas. Kondisi ini mendukung terjadinya konveksi paksa yang efektif dalam sistem pengeringan. Bilangan Schmidt sebesar 0,74 menunjukkan

bahwa difusi momentum dan difusi massa terjadi dalam skala yang sebanding, sehingga pendekatan analogi panas–massa dapat diterapkan dengan baik. Koefisien perpindahan panas sebesar 245–250 W/m<sup>2</sup>·K berada dalam rentang nilai literatur yaitu 100–400 W/m<sup>2</sup>·K untuk sistem pengeringan berbasis biomassa. Hal ini mengindikasikan bahwa model yang dikembangkan mampu merepresentasikan kondisi nyata sistem pengeringan. Hasil ini menunjukkan bahwa perpindahan panas dalam sistem didominasi oleh mekanisme konveksi paksa, yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran udara dan karakteristik partikel sekam padi. Selain itu, nilai laju perpindahan panas sebesar 15,2 kW menunjukkan bahwa peningkatan suhu udara pengering memberikan pengaruh signifikan terhadap performa sistem. Model juga menunjukkan sensitivitas terhadap perubahan kecepatan aliran udara, sehingga dapat digunakan sebagai alat prediksi dalam perancangan sistem pengering yang lebih efisien. Selain itu, nilai laju perpindahan panas sebesar 15,2 kW menunjukkan bahwa energi panas yang dihasilkan dari pembakaran sekam padi dapat dimanfaatkan secara efektif dalam proses pengeringan. Peningkatan temperatur udara pengering secara langsung meningkatkan nilai laju perpindahan panas, yang berdampak pada percepatan proses pengeringan bahan. Bilangan Reynolds digunakan untuk menentukan karakteristik aliran fluida [17]. Analogi Chilton–Colburn digunakan untuk menghubungkan perpindahan massa dan panas [22].

Berdasarkan hasil pemodelan menggunakan analogi Chilton–Colburn, diperoleh persamaan umum koefisien perpindahan panas sebagai fungsi bilangan Reynolds, Schmidt, dan Prandtl. Model ini menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas berbanding lurus dengan bilangan Reynolds pangkat 0,6 serta dipengaruhi oleh sifat termofisik fluida dan karakteristik partikel. Persamaan ini dapat digunakan untuk memprediksi koefisien perpindahan panas pada sistem pengeringan berbasis energi sekam padi. Model menunjukkan yaitu  $h \propto Re^{0,6}$ ,  $h \propto \frac{1}{d_p}$ ,  $h \propto D_{AB}$ , dan  $h \propto \nu^{0,6}$ . Secara empiris, koefisien perpindahan panas berbanding terbalik dengan diameter partikel ( $h \propto \frac{1}{d_p}$ ). Partikel yang lebih kecil memiliki luas permukaan spesifik yang lebih besar dan lapisan batas yang lebih tipis, sehingga meningkatkan intensitas perpindahan panas dan massa. Namun, pada ukuran partikel yang terlalu kecil dalam sistem skala besar (packed bed), dapat terjadi peningkatan resistansi aliran dan penurunan permeabilitas, yang justru menurunkan efektivitas perpindahan secara keseluruhan. Model menunjukkan  $h \propto Re^{0,6}$  mengindikasikan bahwa peningkatan kecepatan udara akan meningkatkan koefisien perpindahan panas. Misalkan jika kenaikan kecepatan udara sebesar 10%, maka akan meningkatkan nilai  $h$  sekitar 6%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem sangat dipengaruhi oleh parameter aliran, sehingga pengaturan kecepatan udara menjadi faktor penting dalam optimasi kinerja pengering. Hubungan empiris antara

kecepatan udara dan koefisien perpindahan panas yang mengikuti pola  $h \propto \nu^{0,6}$  sejalan dengan korelasi Ranz–Marshall dan analogi Chilton–Colburn [20, 22], yang menunjukkan bahwa bilangan Reynolds memiliki pengaruh dominan terhadap perpindahan panas pada sistem pengeringan berbasis partikel.

Secara keseluruhan, kombinasi parameter operasi dan sifat fluida yang digunakan dalam penelitian ini menghasilkan kondisi yang mendukung terjadinya perpindahan panas yang efektif. Hal ini tercermin dari nilai koefisien perpindahan panas yang relatif tinggi serta kesesuaian hasil model dengan data literatur. Dengan demikian, asumsi yang digunakan dalam pemodelan dapat dianggap representatif untuk menggambarkan kondisi nyata sistem pengeringan berbasis energi sekam padi. Beberapa keterbatasan dalam penelitian ini meliputi asumsi sifat udara konstan padahal dalam kenyataan berubah terhadap suhu, tidak mempertimbangkan radiasi panas padahal suhu pembakaran cukup tinggi, pendekatan *steady-state* yaitu belum mempertimbangkan kondisi dinamis. Hasil penelitian memberikan implikasi penting dalam pengembangan sistem pengering, khususnya dalam menentukan kondisi operasi optimal. Dengan mengetahui hubungan antara parameter operasi dan koefisien perpindahan panas, sistem dapat dirancang untuk mencapai efisiensi energi yang lebih tinggi. Selain itu, pendekatan analogi perpindahan panas dan massa dapat digunakan sebagai metode sederhana namun efektif dalam analisis sistem pengering berbasis biomassa khususnya sekam padi. Hal ini sangat bermanfaat dalam pengembangan teknologi pengeringan yang murah, efisien, dan ramah lingkungan. Hal ini sejalan dengan pernyataan Auliadi *et al.* (2025) bahwa sekam padi memiliki biaya rendah serta ketersediaan yang melimpah, sehingga layak dipilih sebagai material alternatif [26].

Perhitungan koefisien perpindahan panas dalam penelitian ini didasarkan pada asumsi partikel tunggal dan distribusi aliran yang seragam. Pada aplikasi skala besar dengan jumlah sekam padi yang lebih banyak, kemungkinan terjadi ketidakteraturan distribusi aliran udara serta peningkatan resistansi termal dalam tumpukan material. Hal ini dapat menyebabkan penurunan nilai koefisien perpindahan panas efektif dibandingkan hasil model. Oleh karena itu, untuk aplikasi praktis skala besar, diperlukan pengembangan model lebih lanjut dengan mempertimbangkan efek *packed bed* dan distribusi aliran udara.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, pemodelan koefisien perpindahan panas menggunakan pendekatan analogi perpindahan panas dan massa mampu merepresentasikan karakteristik sistem pengeringan berbasis energi sekam padi dengan baik. Nilai bilangan Reynolds sebesar 444 menunjukkan aliran berada pada kondisi transisi menuju turbulen yang mendukung konveksi paksa, sehingga

menghasilkan koefisien perpindahan panas sebesar 249 W/m<sup>2</sup>·K yang masih berada dalam rentang literatur. Hasil juga menunjukkan adanya keterkaitan kuat antara perpindahan panas dan massa, di mana peningkatan perpindahan panas diikuti oleh peningkatan perpindahan massa yang mempercepat proses pengeringan. Model yang dikembangkan menunjukkan hubungan  $h \propto Re^{0.6}$ , sehingga kecepatan udara menjadi parameter kunci dalam optimasi sistem. Selain itu, laju perpindahan panas sebesar 15,2 kW mengindikasikan bahwa energi dari pembakaran sekam padi dapat dimanfaatkan secara efektif. Meskipun demikian, model masih memiliki keterbatasan seperti asumsi sifat fluida konstan, pengabaian radiasi panas, dan kondisi tunak, sehingga diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk aplikasi skala besar dengan mempertimbangkan distribusi aliran dan efek *packed bed*.

#### Daftar Pustaka

- [1] M. I. H. Khan, C. P. Batuwatta-Gamage, M. A. Karim, and Y. T. Gu, "Fundamental understanding of heat and mass transfer processes for physics-informed machine learning-based drying modelling," *Energies*, vol. 15, no. 24, pp. 9347, 2022, doi: 10.3390/en15249347.
- [2] E. Baidhe, C. L. Clementson, K. Hellevang, and L. Zhulu, "Comprehensive analysis of drying kinetics, heat and mass transfer, and thermodynamic properties in high-temperature drying of high-moisture corn," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 48, no. 6, pp. e70159, 2025, doi: 10.1111/jfpe.70159.
- [3] P. Chen, N. Chen, W. Zhu, D. Wang, M. Jiang, C. Qu, Y. Li, and Z. Zou, "A Heat and mass transfer model of peanut convective drying based on a two-component structure," *Foods*, vol. 12, no. 9, pp. 1823, 2023, doi: 10.3390/foods12091823.
- [4] X. Li, Y. Wang, K. Yang, and X. Du, "Numerical study of heat and mass transfer during drying process of barley grain piles based on the pore scale," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 46, no. 11, pp. e14433, 2023, doi: 10.1111/jfpe.14433.
- [5] S. D. S. Piyathissa, P. D. Kahandage, Namgay, H. Zhang, R. Noguchi, and T. Ahamed, "Introducing a novel rice husk combustion technology for maximizing energy and amorphous silica production using a prototype hybrid rice husk burner to minimize environmental impacts and health risk," *Energies*, vol. 16, no. 3, pp. 1120, 2023, doi: 10.3390/en16031120.
- [6] J. O. Awulu, P. A. Omale, and J. A. Ameh, "Comparative analysis of calorific values of selected agricultural wastes," *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*, vol. 37, no. 4, pp. 1141-1146, 2018, doi: 10.4314/njt.374.1881.
- [7] International Finance Corporation, "Converting Biomass to Energy: A Guide for Developers and Investors," N.W. Washington, D.C.: Pennsylvania Avenue, June 2017.
- [8] J. Smith, "Combined Heat and Power from Rice Husks," England, London: GMB Energy Central, 2007.
- [9] J. I. Arranz, M. T. Miranda, I. Montero, and F. J. Sepúlveda, "Thermal study and emission characteristics of rice husk using TG-MS," *Materials*, vol. 14, no. 20, pp. 6203, 2021, doi: 10.3390/ma14206203.
- [10] BPS., Berita Resmi Statistik, "Luas Panen dan Produksi Padi di Provinsi Nusa Tenggara Barat, 2024," Available online: <https://ntb.bps.go.id/en/statistics-table/3/WmpaNk1YbGFjR0pOUjBKYWFQIBSU3MwVHpOVWR6MDkjMw==/luas-panen--produktivitas--dan-produksi-padi-menurut-kabupaten-kota-di-provinsi-nusa-tenggara-barat--2024.html> (accessed on January 17, 2026).
- [11] S. K. S. Hossain, L. Mathurand, and P. K. Roy, "Rice husk/rice husk ash as an alternative source of silica in ceramics: a review," *Journal of Asian Ceramic Societies*, vol. 6, no. 4, pp. 299-313, 2018, doi: 10.1080/21870764.2018.1539210.
- [12] Dinas Pertanian Pemerintah Kabupaten Buleleng, "Pembuatan Arang Sekam Padi Sebagai Media Tanam di BPP Seririt", Available online: [https://distan.bulelengkab.go.id/informasi/detail/berita/67\\_pembuatan-arang-sekam-padi-sebagai-media-tanam-di-bpp-seririt](https://distan.bulelengkab.go.id/informasi/detail/berita/67_pembuatan-arang-sekam-padi-sebagai-media-tanam-di-bpp-seririt) (accessed on February 2, 2026).
- [13] I G. Bawa Susana, I K. P. Putra, and I G. A. K. C. A. W. Aryadi, "Analysis of rice husk biomass potential in Lombok Island, Indonesia as a renewable energy source," *Energy, Materials and Product Design*, vol. 4, no. 1, pp. 260-265, 2025, doi: 10.29303/empd.v4i1.6877.
- [14] J. Krempaský, J. Havlík, and T. Dlouhý, "Overview of calculation methods for determining the heat transfer coefficient for condensation of flue gas from biomass boilers in vertical tube condensers," *Heat and Mass Transfer*, vol. 61, no. 58, pp. 1-14, 2025, doi: 10.1007/s00231-025-03577-1.
- [15] I. B. Alit, I G. Bawa Susana, and I M. Mara, "Thermal characteristics of the dryer with rice husk double furnace-heat exchanger for smallholder scale drying," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, no. 101565, pp. 1-8, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101565.

- [16] I. B. Alit, I G. Bawa Susana, and I M. Mara, "Utilization of rice husk biomass in the conventional corn dryer based on the heat exchanger pipes diameter," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 22, no. 100764, pp. 1-9, 2020, doi: 10.1016/j.csite.2020.100764.
- [17] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," 7th ed., New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [18] P. J. Pritchard, "Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics," 8th Edition, John Wiley & Sons, 2010.
- [19] R. B. Bird, W. E. Stewart, and E. N. Lightfoot, "Transport Phenomena," John Wiley & Sons, 2006.
- [20] W. E. Ranz, and W. R. Marshall, "Evaporation from drops," *Chem. Eng. Progr.*, vol. 48, no. 14, pp. 1-6, 1952.
- [21] C. J. Geankoplis, "Transport Processes and Separation Process Principles: Includes Unit Operations," Prentice Hall Professional Technical Reference, 2003.
- [22] T. H. Chilton, and A. P. Colburn, "Mass transfer (absorption) coefficients prediction from data on heat transfer and fluid friction," *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 26, no. 11, pp. 1183–1187, 1934.
- [23] J. P. Holman, "Heat Transfer," 10th Edition, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, 2010.
- [24] M. I. H. Khan, Z. Welsh, Y. Gu, M. A. Karim, and B. Bhandari, "Modelling of simultaneous heat and mass transfer considering the spatial distribution of air velocity during intermittent microwave convective drying," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 153, pp. 119668, 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119668.
- [25] C. L. Hii, C. L. Chiang, and A. Putranto, "Modelling heat and mass transfer processes during drying: Empirical, theoretical and reaction engineering approach," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2586, no. 1, pp. 060011, 2023, doi: 10.1063/5.0105710.
- [26] D. L. Auliadi, N. Mulyaningsih, and S. Hastuti, "Pengaruh penambahan serat daun pandan duri pada komposit sekam padi dengan matriks epoxy terhadap koefisien absorpsi bunyi," *AutoMech: Jurnal Teknik Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 40-46, 2025, doi: 10.24269/jtm.v5i02.11861.