

Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Kecepatan dan Temperatur *Air Heater* Terhadap Karakteristik Pengeringan Batubara pada *Coal Dryer* dengan *Tube Heater* Tersusun *Aligned*

Anindya Ayu Pakarti dan Djatmiko Ichسانی

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: djatmiko@me.its.ac.id

Abstrak—Salah satu model pengeringan batubara adalah *coal dryer* yang memberikan keuntungan seperti tingginya tingkat perpindahan panas dan massa. Dari penelitian ini dapat diketahui karakteristik pengeringan pada ruang pengering batubara dengan *tube heater* tersusun *aligned*. Hasil eksperimen kuantitatif menunjukkan peningkatan temperatur *air heater* diikuti dengan penurunan *moisture content* batubara dan peningkatan *drying rate*. Pengurangan *moisture content* terbesar dan *drying rate* tertinggi didapatkan pada temperatur *air heater* 60°C diikuti 50°C serta 40°C dan didapatkan juga pada kecepatan udara masuk 1,8m/s, diikuti 1,61m/s dan 1,45m/s. Konfigurasi *tube heater* secara *aligned* menimbulkan proses heating disertai proses humidifikasi. Kondisi udara di sekitar *tube heater* mengalami peningkatan temperatur dan *humidity ratio* serta penurunan *relative humidity*. Proses humidifikasi diakibatkan adanya konsentrasi perpindahan massa *moisture* batubara di sekitar *tube heater* karena nilai *relative humidity* udara di sekitar *tube heater* yang lebih rendah daripada batubara di sekitarnya.

Kata kunci—*Air heater*, *Aligned*, *Coal dryer*, *Drying rate*, *Moisture content*

I. PENDAHULUAN

Batubara adalah salah satu sumber energi yang penting bagi dunia, yang digunakan pembangkit listrik, untuk menghasilkan listrik hampir 40% di seluruh dunia. Di banyak negara angka-angka ini jauh lebih tinggi. Polandia menggunakan batubara lebih dari 94% untuk pembangkit listrik, Afrika Selatan 92%, Cina 77% dan Australia 76%. Batubara merupakan sumber energi yang mengalami pertumbuhan yang paling cepat di dunia di tahun-tahun belakangan ini lebih cepat daripada gas, minyak, nuklir, air dan sumberdaya pengganti.

Batubara telah memainkan peran yang sangat penting selama berabad-abad tidak hanya membangkitkan listrik, namun juga merupakan bahan bakar utama bagi produksi baja dan semen, serta kegiatan industri lainnya. Mengingat sumber daya batu bara Indonesia yang masih melimpah, tetapi dilain pihak harga Bahan Bakar Minyak (BBM) yang tetap tinggimenuntut industri yang selama ini berbahan bakar minyak untuk berlalih menggunakan batubara. [1]Terkait dengan hal tersebut, pemerintah mengeluarkan Kebijakan Energi Nasional (KEN) melalui PP No.5 Tahun 2006 yang memiliki tujuan utama untuk menciptakan keamanan pasokan energy nasional secara berkelanjutan dan memanfaatkan energy secara efisien serta terwujudnya

bauran energy (*energy mix*) yang optimal pada tahun 2025. Untuk itu ketergantungan terhadap satu jenis sumber energy seperti minyak bumi harus dikurangi dengan memanfaatkan sumber energy alternatif diantaranya batubara [2].

Potensi batubara di Indonesia sangat melimpah namun sebagian besar merupakan batubara dengan kualitas rendah. Distribusi kualitas batubara di Indonesia berdasarkan kalori pada tahun 2005 batubara kalori sedang dan rendah memiliki prosentase yang sangat besar dibandingkan dengan batubara dengan kalori yang tinggi [3]. Salah satu teknologi peningkatan kualitas batubara adalah teknologi yang mengurangi kadar air yang terkandung dalam batubara. Pengurangan kadar air ini dapat dilakukan dengan pengeringan atau *drying* yang disebut dengan teknologi pengeringan batubara (*coal dryer*). Teknologi ini tidak hanya bersifat mengurangi kadar air namun juga bersifat meningkatkan nilai kalori batubara tersebut. *Coal dryer* diperlukan sebagai upaya strategis pengembangan teknologi dalam peningkatan kualitas batubara untuk menghadapi tantangan krisis energi dunia.

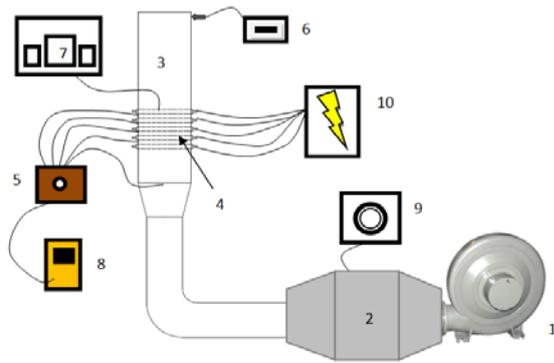
Pada tugas akhir ini akan dianalisa pengaruh variasi temperatur udara pemanas dan variasi kecepatan udara pemanas terhadap karakteristik laju pengeringan pada ruang pengering batubara. perubahan *moisture content*, rasio *humidity*, dan *relative humidity* seiring berjalannya waktu pengeringan.

II. URAIAN PENELITIAN

Pada penyusunan Tugas Akhir ini prosedur penelitian dilakukan dalam tiga tahap. Tahap awal dari penelitian ini adalah dilakukan studi literatur mengenai perilaku *drying rate*, *mixture content*, *ratio humidity* dan *relative umidity* yang berasal dari buku, jurnal, maupun penelitian terdahulu.

Tahap yang kedua adalah perencanaan eksperimen, perancangan dimensi alat uji, dan variabel yang ingin divariasikan. Dimensi dan peralatan alat uji diperoleh dari penelitian sebelumnya oleh Levy *et al* [4].

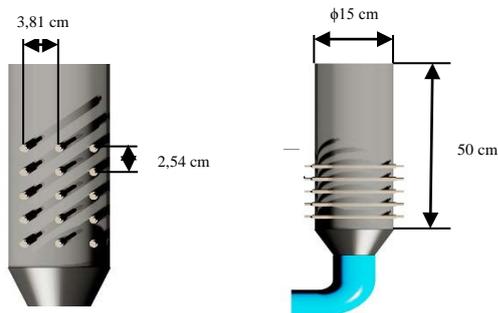
Alat eksperimen pengeringan batubara yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 1. *Chamber* terbuat dari bahan akrilik memiliki tinggi 0,5 m dan berdiameter 0,15 m. *Chamber* diletakkan di atas sebuah pipa yang berfungsi menyalurkan udara. Di atas *chamber* dilengkapi dengan saringan agar batubara tidak terbang keluar dari *chamber*. Udara dalam eksperimen ini berasal dari blower dan dialirkan melalui ruang pemanas udara sebelum memasuki



Gambar 1. Instalasi Alat Percobaan

Keterangan gambar:

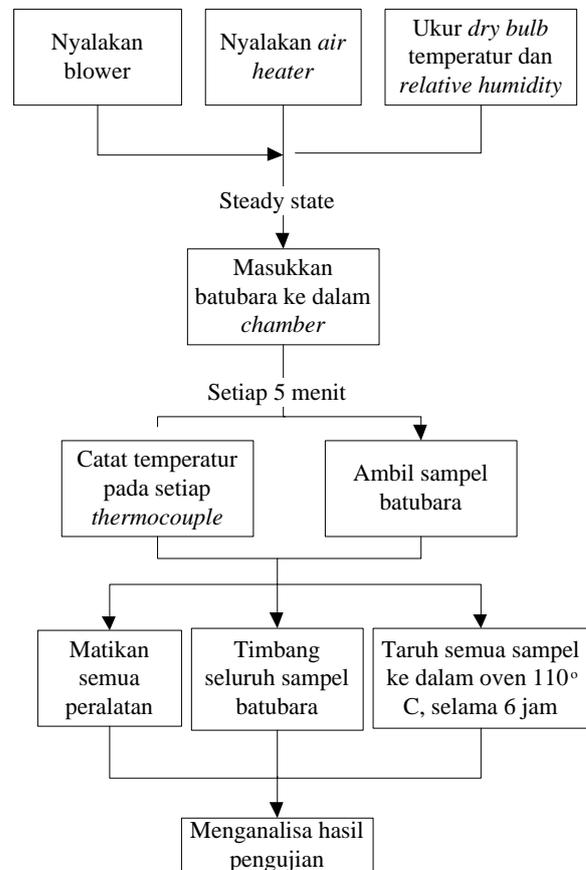
- 1. Blower
- 2. Pemanas Udara
- 3. Drying Chamber
- 4. Tube Heater
- 5. Thermocouple Selector
- 6. Hygrometer
- 7. Thermocontrol
- 8. Digital Termometer
- 9. Voltage Regulator
- 10. Sumber Listrik



Gambar 2. Gambar dimensi ruang chamber

chamber. Thermocouple diletakkan di dinding *chamber* untuk mengukur distribusi temperatur arah vertikal. 15 buah *tube heater* di letakkan horizontal di dalam ruang *chamber* dengan susunan *aligned* dan berdiameter 1.27 cm. *Tuber heater* sebagai pemanas yang di atur konstan 60°C dengan menggunakan *thermocontrol*. *Tube heater* disusun dengan jarak 2,45 dan 3,81 cm dapat dilihat pada Gambar 2. Diantara *tube heater* dipasang *thermocouple*. Dengan mengatur *vontage regulator* pada udara pemanas dan *blower*, maka kecepatan udara masuk dan temperatur udara masuk dapat divariasikan.

Metode eksperimen yang digunakan ada dua yaitu pertama dengan metode pengeringan batubara terisi penuh sampai menutup *tube heater* sebanyak 3 kg dan kedua dengan metode pengeringan *fluidized bed dryer* sebanyak 0,2 kg batubara. Kecepatan udara masuk yang divariasikan adalah 1,8 m/s, 1,61 m/s dan 1,45 m/s sedangkan temperatur udara masuk yang divariasikan adalah 40°C, 50°C dan 60°C. Prosedur pengeringan *coal dryer* terdapat pada Gambar 3. Tahap ketiga merupakan tahap perhitungan matematis. Setelah didapatkan data hasil pengeringan batubara dan data pendukung lain, dilakukan analisa perubahan *moisture content* dan *drying rate* terhadap waktu, *effisiensi* pengeringan, dan analisa pada *psychrometric chart*. Analisa dilakukan untuk semua variasi kecepatan dan temperatur udara masuk.



Gambar 3. Prosedur pengujian coal dryer

Untuk mendiskripsikan proses pengeringan, maka digunakan beberapa asumsi antara lain: (a) Pada dinding *drying chamber* bersifat adiabatik, (b) batubara dan udara mempunyai suhu yang sama selama percobaan, (c) temperatur, *specific humidity*, dan kecepatan udara masuk konstan selama percobaan, (d) sistem beroperasi pada keadaan tunak, (e) analisa dibatasi pada perpindahan massa antara uap air di permukaan produk dengan udara pengering, (f) massa batubara sebelum proses pengeringan dianggap sams, (g) temperatur pada tiap *tube heater* dianggap sama.

Dari hasil percobaan didapatkan nilai m_s (massa batubara setelah pengeringan) dan m_k (massa batubara kering setelah di oven) maka *moisture content*, *drying performance* dan rasio kelembabandapat dicari dengan menggunakan rumus:

(1) *Moisture Content*

Untuk mengetahui *moisture content* batubara digunakan rata-rata *moisture content dry basis* setiap sampel batubara. Dari data yang didapatkan m_s dan m_k untuk masing-masing temperatur udara masuk dan kecepatan udara masuk pada menit ke 0 (nol) dapat dihitung *moisture content dry basis*-nya. Asumsi m_k batubara adalah massa batubara ketika benar-benar kering, sehingga dapat diasumsikan massa batubara yang hilang adalah *moisture content* dari batubara yang hilang setelah pengeringan [5].

$$MC_{d,b} = \frac{m_{H_2O}}{M_d} = \frac{m_a - m_d}{m_d} = \frac{m_s - m_k}{m_k} \times 100\% \quad (1)$$

dimana:

- m_d = Massa kering bahan (kg)
- m_a = Massa awal bahan (kg)
- m_s = Massa Batubara setelah pengeringan (kg)
- m_k = Massa Batubara kering setelah di oven (kg)

(2) *Drying Rate*

Dari data eksperimen dilakukan pengambilan sampel dari 3 kg batubara, untuk mewakili drying rate keseluruhan batubara maka dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [5]:

$$\Gamma = \frac{dW}{dt} = \frac{W_t - W_{(t-\Delta t)}}{\Delta t} = \frac{M_o - M_s}{\text{waktu}} \quad (2)$$

Dengan menggunakan rumus *moisture content* maka didapatkan rumus *drying rate*:

$$M_k = \frac{M_o}{(MC_{d.b} + 1)} = \frac{3 \text{ kg}}{(MC_{d.b} + 1)}$$

$$M_s = (MC_{(t)} \times M_k) + M_k$$

$$\Gamma = \frac{3 \text{ kg} - \left(\frac{MC_{(t)} + 1}{MC + 1}\right)}{\text{waktu}} \quad (3)$$

dimana:

- W_t = Kadar air pada waktu t
- $W_{(t-\Delta t)}$ = Kadar air pada waktu t+Δt
- Δt = Selang waktu
- M_o = Massa total batubara sebelum pengeringan
- M_s = Massa total batubara setelah pengeringan
- M_k = Massa total batubara kering setelah di oven
- MC = *Moisture content* batubara
- $MC_{(t)}$ = *Moisture content* pada waktu t

(3) *Ratio Humidity*

Rumus dasar yang digunakan untuk mendapatkan ω (*humidity ratio*) batubara sesuai rumus [5]:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{m_{\text{yang hilang}}}{m_{\text{udara}} + \omega_{(t-1)}} \quad (4)$$

Untuk mencari $m_{\text{yang hilang}}$ digunakan rumus:

$$m_{\text{loss}}(y) = \frac{m_y}{(MC + 1) \times (MC - MC_{(t)})} \quad (5)$$

Untuk mencari m_1 digunakan rumus:

$$m_y = \rho \times V_y \quad (6)$$

$$V_y = \frac{\pi}{4} d^2 \times t_y \quad (7)$$

dimana :

- ω = Rasio kelembaban udara (kg/kg)
- m_v = massa uap air yang terkandung (kg_{uap air})
- m_a = massa udara kering (kg_{udara kering})
- m_y = massa batubara pada posisi y
- V_y = volume batubara pada posisi y
- ρ = massa jenis batubara sebesar 914 kg/m³
- d = diameter dalam chamber
- t_y = tinggi *thermocouple* pada posisi y

Setelah mendapatkan *ratio humidity* dan temperatur rata-rata di setiap titik pada *chamber* maka dapat di plot pada *psychrometric char* sehingga didapatkan property yang lainnya seperti *relative humidity* (ϕ).

(4) *Effisiensi*

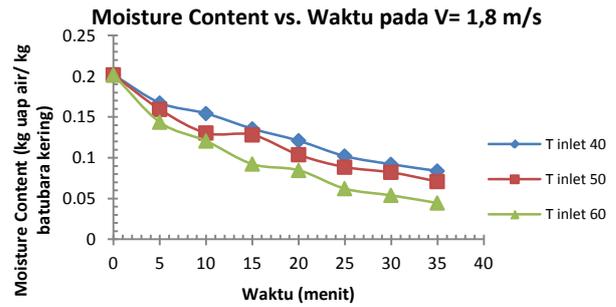
Adapun rumus yang digunakan untuk menghitung effisiensi dari alat pengering batubara adalah sebagai berikut [6]:

$$\eta = \frac{Q_{out}}{W_{in}} = \frac{Q_{penguapan}}{W_{blower} + W_{air \text{ heater}} + W_{tube \text{ heater}}} \quad (8)$$

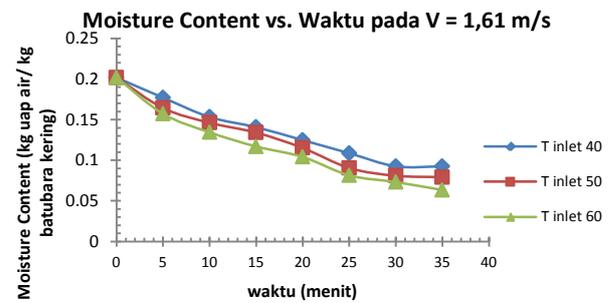
III. HASIL DISKUSI

Berdasarkan data yang didapat dari hasil eksperimen pada penelitian ini akan dianalisa parameter pengeringan pada *chamber coal dryer* untuk dua metode pengeringan. Analisa Perubahan *Moisture Content* Batubara Terhadap Waktu Pengeringan

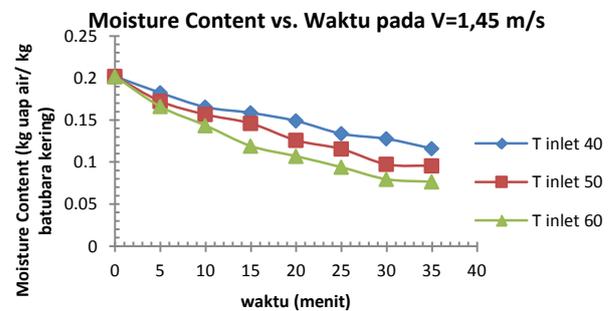
A. Analisa Perubahan *Moisture Content* Batubara Terhadap Waktu Pengeringan



(a)

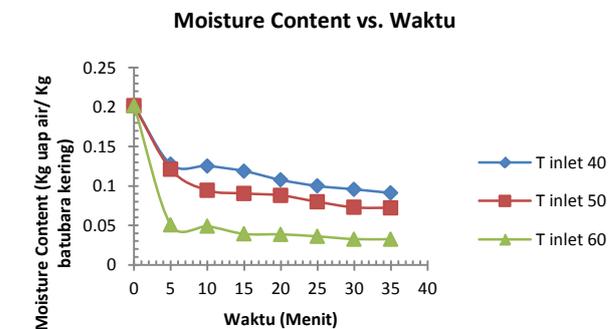


(b)



(c)

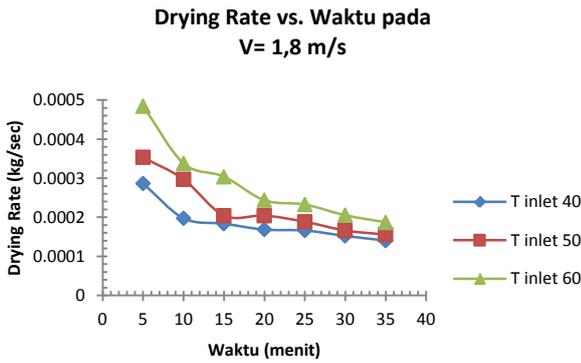
Gambar 4. Grafik perubahan *moisture content* batubara terhadap waktu pengeringan untuk 3kg batubara dengan kecepatan udara masuk (a) 1,8 m/s (b) 1,61 m/s (c) 1,45 m/s



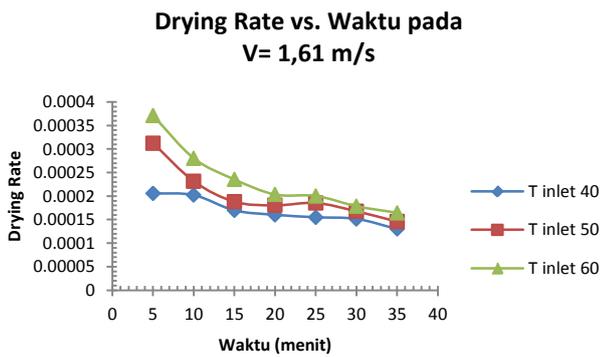
Gambar 5. Grafik perubahan *moisture content* 0.2 kg batubara terhadap waktu pada kecepatan udara masuk 1,8 m/s

Dari Gambar 4. dan Gambar 5. trend grafik untuk ketiga parameter temperatur udara masuk menjelaskan *moisture content* berkurang sangat cepat pada temperatur yang paling tinggi yaitu 60°C diikuti dengan temperatur 50°C dan 40°C. *Moisture content* berkurang sangat cepat pada temperatur yang paling tinggi. Waktu yang ditempuh *moisture content*

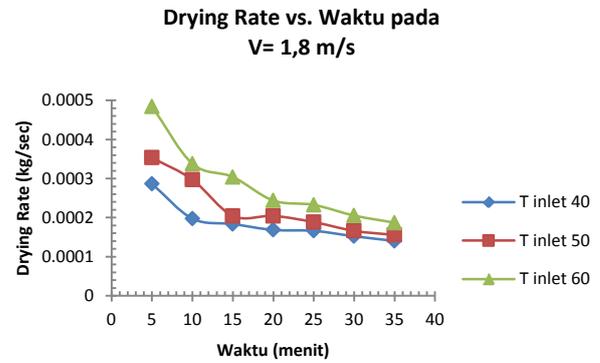
B. Analisa Perubahan Drying Rate Batubara Terhadap Waktu Pengeringan



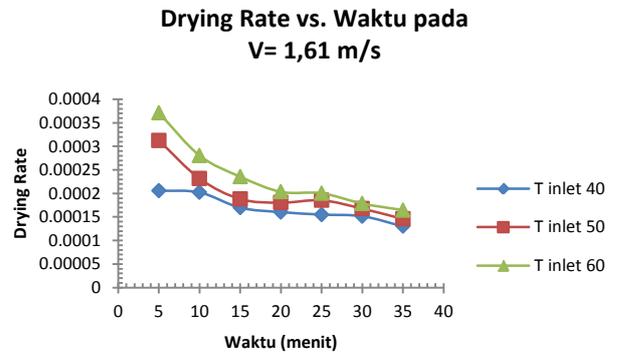
(a)



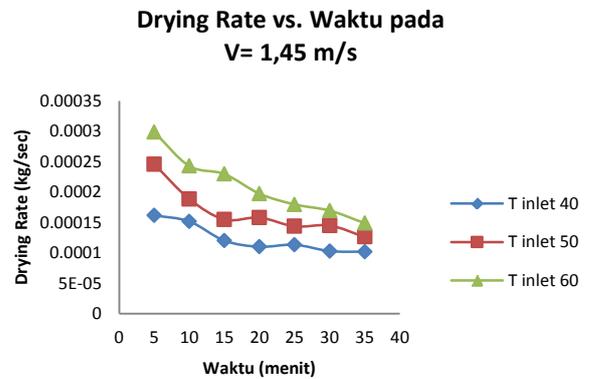
(b)



(a)



(b)

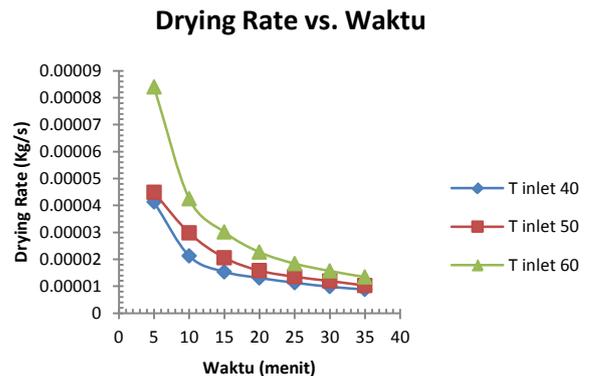


(c)

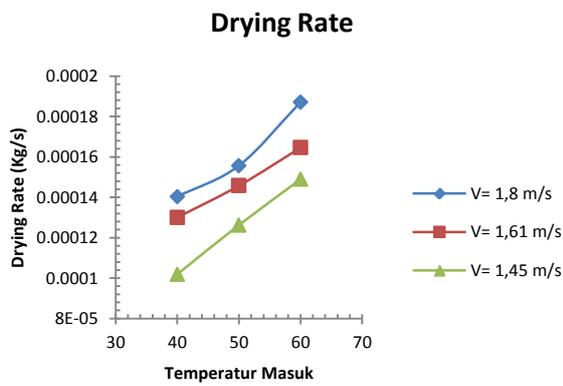
Gambar 6. Grafik perubahan *drying rate* batubara terhadap waktu pengeringan untuk 3kg batubara dengan kecepatan udara masuk (a) 1,8 m/s (b) 1,61 m/s (c) 1,45 m.s

untuk mencapai *equilibrium* akan berkurang ketika meningkatkan suhu pengeringan. Wei-Chen Wang [7] dari jurnalnya memiliki hasil yang sama ketika melakukan percobaan pengeringan terhadap tiga jenis batubara yang memiliki moisture content yang berbeda-beda dan menggunakan tiga parameter temperatur udara masuk yang berbeda dengan *fluidized bed dryer*. Dari rujukan [8] menjelaskan bahwa untuk mengurangi *moisture content* di dalam batubara dapat dicapai dengan cara menurunkan *relative humidity* pada udara pengering.

Saat pengeringan dimulai udara panas yang dialirkan melewati permukaan batubara akan menaikkan tekanan uap air di dalam batubara terutama pada daerah permukaan sejalan dengan kenaikan suhunya. Sehingga tekanan uap air di dalam batubara menjadi lebih besar dibandingkan dengan tekanan uap air di udara sekitarnya. Perbedaan tekanan ini menyebabkan terjadinya aliran uap air dari dalam batubara menuju ke permukaan [8]. Semakin tinggi temperatur pengeringannya akan semakin besar selisih temperatur batubara dan udara sekitarnya. Nilai *moisture content* batubara mengalami penurunan yang besar seiring dengan proses perpindahan massa air yang terkandung dalam batubara menuju udara pengering.



Gambar 7. Grafik perubahan *drying rate* 0,2 kg batubara terhadap waktu pada kecepatan udara masuk 1,8 m/s



Gambar 8. Grafik perubahan efek dari kecepatan udara masuk dengan *drying rate* pada pengeringan 3 kg batubara

Berdasarkan Gambar 6 dan Gambar 7 trend grafik nilai *drying rate* terbesar didapatkan pada temperatur udara masuk 60°C diikuti dengan temperatur 50°C dan 40°C. Nilai *drying rate* terbesar dicapai saat temperatur udara masuk 60°C. Selisih perbedaan panas ini menyebabkan perbedaan tekanan uap air batubara dengan tekanan uap air udara. Tekanan uap air di dalam batubara menjadi lebih besar daripada tekanan uap air di udara perbedaan tekanan yang menyebabkan terjadinya aliran uap air didalam batubara ke udara.

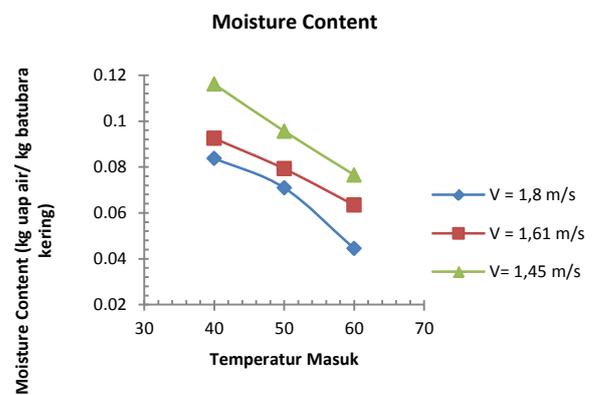
Trend grafik *moisture content* batubara terhadap waktu pengeringan dapat menjelaskan tren dari grafik *drying rate* terhadap waktu pengeringan, bahwa semakin tinggi temperatur maka akan semakin turun nilai *humidity relative* pada udara pengering sehingga *moisture content* pada batubara akan semakin berkurang lebih cepat. Sehingga semakin menurunnya kandungan air dalam batubara maka semakin tinggi *drying rate* yang terjadi.

C. Analisa Efek dari Kecepatan Udara Masuk dengan *Drying Rate* pada Batubara

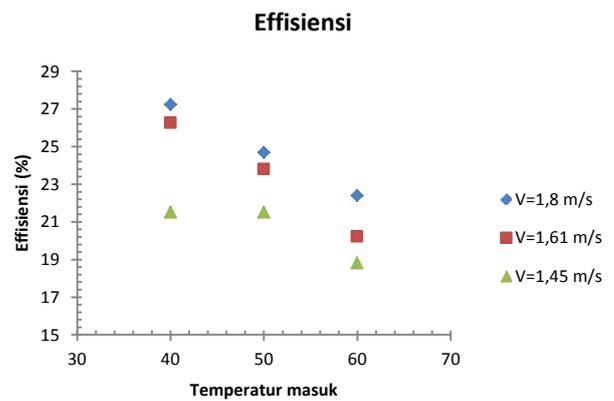
Pengeringan terjadi karena konveksi yaitu dengan melewati udara panas di sekeliling batubara. Udara akan turun temperaturnya karena bahan dan *moisture content* akan bermigrasi dari dalam bahan menuju permukaan bahan kemudian terbawa oleh udara pengering [8]. Dapat dilihat dari Gambar 7. bahwa *drying rate* tertinggi terjadi pada kecepatan udara inlet 1,8 m/s kemudian disusul dibawahnya 1,61 m/s dan 1,45 m/s. Berdasarkan rumus koefisien perpindahan panas konveksi (h) rujukan [9] menjelaskan $Nu = \frac{hL}{kf} = f(Re_L, Pr)$ dengan bertambahnya kecepatan udara pengering maka nilai Re_L juga akan bertambah maka dengan bertambahnya nilai reynolds number nilai Nusselt number juga akan bertambah sehingga nilai h akan ikut bertambah

D. Analisa Efek Kecepatan Udara Masuk dengan *Moisture Content* pada Batubara

Gambar 9. menunjukkan tren grafik untuk ketiga parameter temperatur udara masuk menjelaskan kecepatan udara inlet 1.8 m/s berada paling bawah kemudian disusul diatasnya kecepatan udara masuk 1.61 m/s dan 1.45 m/s. Dapat dijelaskan dari grafik *drying rate* pada Gambar 7. bahwa ketika laju pengeringan semakin tinggi maka *moisture content* batubara akan semakin cepat berkurang.



Gambar 9. Grafik perubahan efek dari kecepatan udara masuk dengan *moisture content* pada pengeringan 3 kg batubara



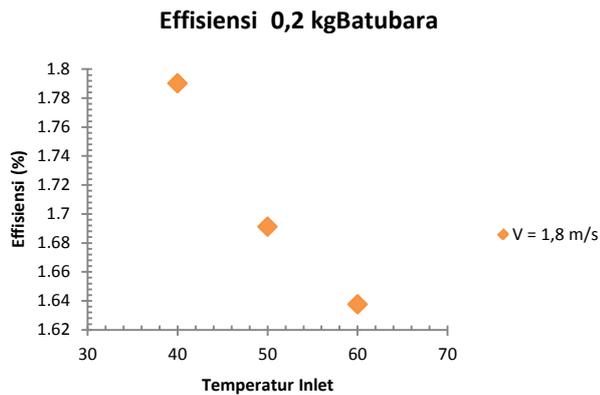
Gambar 10. Grafik *effisiensi* pengeringan 3 kg batubara terhadap temperatur udara masuk

E. Analisa *Effisiensi* Coal Dryer Batubara

Nilai *effisiensi* tertinggi untuk masing-masing kecepatan udara masuk adalah 40°C kemudian disusul dibawahnya temperatur udara inlet 50°C dan 60°C Gambar 10 dan Gambar 11. Dari hasil pengambilan data dan perhitungan dapat dijelaskan Q penguapan pada temperatur 60°C lebih tinggi disbanding Q penguapan pada temperatur 50°C dan 40°C, tetapi W total yang diberikan untuk pengeringan lebih besar pada temperatur inlet 60°C daripada temperatur inlet lainnya. Dari rumus dasar *effisiensi* $\eta = (Q_{penguapan} / W_{total})$ karena Q yang di uapkan lebih besar tetapi W total yang diberikan semakin tinggi *effisiensi* nya menjadi lebih kecil untuk temperatur inlet 60°C. Gambar 10. Memperlihatkan *effisiensi* yang sangat kecil ini disebabkan karena energy yang diberikan lebih banyak disbanding kalor yang diuapkan.

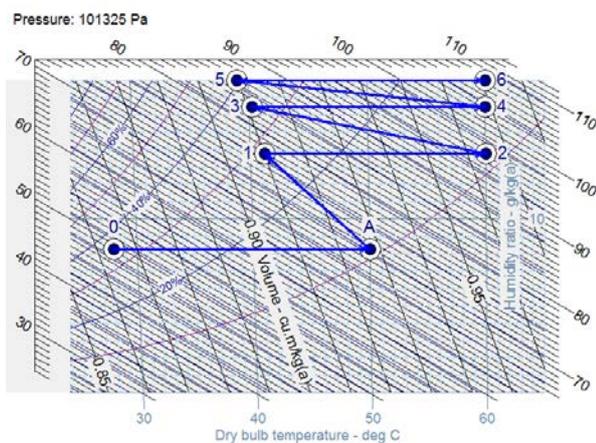
Berdasarkan psychrometric chart pada Gambar 12. dengan kecepatan udara masuk 1,8 m/s temperatur udara masuk 50°C terdapat beberapa titik yang diambil data propertiesnya untuk dianalisa proses yang terjadi di setiap tahap. Proses yang terjadi dalam psychrometric chart antara lain:

- Proses I** : Proses pemanasan sensible (0 – A)
- Proses II** : Proses pendinginan dan humidifikasi, ditandai dengan penyerapan *moisture content* batubara yang diikuti dengan naiknya nilai *humidity ratio* dan turunnya temperatur udara pengering. (A – 1)



Gambar 11. Grafik *effisiensi* pengeringan 0,2 kg batubara terhadap temperatur udara masuk

F. Analisa Psrychrometric Chart Tube Heater



Gambar 12. *Psychrometric chart* tube heater pada kecepatan udara masuk 1.8 m/s dengan temperatur udara masuk 50°C

- Proses III** : Proses pemanasan sensible. (1 – 2)
- Proses IV** : Proses pendinginan dan humidifikasi, ditandai dengan penyerapan moisture content batubara yang diikuti dengan naiknya nilai *humidity ratio* dan turunnya temperatur udara pengering. (2 – 3)
- Proses V** : Proses pemanasan sensible. (3 – 4)
- Proses VI** : Proses pendinginan dan humidifikasi, ditandai dengan penyerapan moisture content batubara yang diikuti dengan naiknya nilai *humidity ratio* dan turunnya temperatur udara pengering. (4 – 5)
- Proses VII** : Proses pemanasan sensible. (5 – 6)

IV. KESIMPULAN

Dari analisa yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Peningkatan temperatur *air heater* akan diikuti dengan penurunan *moisture content* dalam batubara.
2. Peningkatan temperatur *air heater* akan diikuti dengan peningkatan *drying rate* pada batubara.
3. Peningkatan laju pengeringan batubara diikuti dengan penurunan nilai kandungan air dalam batubara.

4. Peningkatan kecepatan udara masuk pada pengeringan batubara diikuti dengan menurunnya kandungan air di dalam batubara.
5. Peningkatan kecepatan udara masuk pada pengeringan batubara diikuti dengan kenaikan laju pengeringan batubara.
6. Effisiensi paling tinggi dari studi eksperimen pengeringan batubara ini pada kecepatan udara masuk 1.8 m/s dengan temperatur udara masuk 40°C.
7. Effisiensi dengan *coal dryer* tersusun penuh lebih besar dibandingkan effisiensi dari *fluidized bed coal dryer*.
8. Proses *Heating* pada *tube heater* dengan susunan *aligned* mengakibatkan proses *heating* disertai humidifikasi yang ditandai dengan peningkatan temperatur udara disekitar tube heater dan diikuti dengan peningkatan nilai *humidity ratio* udara sekitar *tube heater*
9. Proses *heating* oleh *tube heater* dengan susunan *aligned* mengakibatkan penurunan *relative humidity* udara di sekitar *tube heater* dan bernilai lebih kecil dibandingkan nilai *relative humidity* batubara di sekitar *tube heater*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sumber Daya Batubara, Tinjauan Lengkap Mengenai Batubara. 2005. World Coal Institute. Inggris.
- [2] Pusat Litbang Teknologi Mineral dan Batubara .2006. Jakarta, Indonesia
- [3] Blueprint Pengelolaan Energi Nasional, Peraturan Presiden Nomor 5 Tahun 2006, 2006. Jakarta, Indonesia.
- [4] Edward K, Levy., Sarunac, Nenad., Bilirgen, Harun., Caram, Hugo, *Use Of Coal Drying To Reduce Water Consumed In Pulverized Coal Power Plants Final Report*. 2011. Energy Research Center Lehigh University. Betlehem.
- [5] Stoecker, Wilbert F., Jones, Jerold W., *Refrigerasi dan Pengkondisian Udara*. Edisi Kedua, (Alih Bahasa, Supratman Hara). 1982. Erlangga. Jakarta.
- [6] Michel, Moran J., Howard, Shapiro J., *Termodinamika Teknik* jilid 1. Edisi Keempat. 2004. Erlangga. Jakarta.
- [7] Wang, Wei Chang., *Laboratory Investigation of Drying Process Illinois Coals*. 2012. North Carolina State University. Raleigh.
- [8] Mujumdar, Arun *Handbook of Industrial Drying 3rd Edition*. Singapore: Taylor & Francis Group, LLC (2006)
- [9] Incropera, Frank P., De Witt, David P. *Fundamental of Heat and Mass Transfer 5th Edition*. New York: John Wiley & Sons Inc (2002)