

**PEMODELAN PENGERINGAN PAPER WEB DI DRYER SECTION DARI MESIN
KERTAS DENGAN ANALISIS PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA****Ach. Muhib Zainuri¹**¹Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang
muhibzain@gmail.com**ABSTRACT**

The problem in papermaking process at dryer section of paper mill is the large heat energy consumed to decrease residual moisture from paper web. Energy used is for nearly 1/3 of the total energy consumption in an integrated paper mill and approximately 80% of its steam requirement. In this study a model for paper web drying at dryer section of paper machine was developed based on heat and mass balances around drying cycles. Temperature increase in paper web is modeled with heat equation. As the temperature change is known, the evaporated water can be computed via mass transfer equation. Relationships for heat transfer coefficients between paper web and the air as well as between dryer cylinder and paper web could be represented effectively in terms of moisture content, basis weight, and machine velocity. The solution for the model is computed with numerical methods by finite difference method. The result of modelling paper web drying at dryer section shows that heat energy needed will decrease by increasing machine velocity. This kind of modelling gives crucial information of the dryer section, thus helping paper manufacturers optimize dryer section configurations.

Keywords : *paper web, heat and mass transfer, heat transfer coefficient, bone-dry weight, dryer section*

ABSTRAK

Masalah yang timbul pada proses pembuatan kertas di dryer section adalah besarnya energi yang dibutuhkan untuk menurunkan sisa uap air dari *paper web*. Energi yang digunakan hampir 1/3 kebutuhan energi total pada pabrik kertas terintegrasi dan hampir 80% dalam bentuk uap. Pada kajian ini model pengeringan *paper web* di dryer section dari mesin kertas berdasarkan kesetimbangan panas dan massa sepanjang siklus. Peningkatan suhu *paper web* dimodelkan dengan persamaan kalor. Perubahan suhu yang diketahui, maka uap air yang diuapkan dapat dihitung dengan persamaan perpindahan massa. Hubungan koefisien perpindahan panas di antara *paper web* dan udara serta antara slinder dryer dan *paper web* dapat dinyatakan dalam bentuk kandungan uap air, gramatur, dan kecepatan mesin. Penyelesaian model dihitung dengan analisa numerik dengan metode beda hingga. Hasil pemodelan pengeringan *paper web* di dryer section menunjukkan bahwa energi panas yang dibutuhkan berkurang dengan meningkatkannya kecepatan mesin. Pemodelan ini memberikan informasi yang sangat penting dan membantu optimalisasi konfigurasi dryer section bagi pembuat kertas.

Kata-kata kunci: *paper web, perpindahan panas dan massa, koefisien perpindahan panas, berat kering, dryer section.*

PENDAHULUAN

Pembuatan kertas pada dasarnya adalah *dewatering process*. Sebagian besar air harus dikeluarkan dengan proses gravitasi dan gaya *vacuum* di *forming section*, aksi mekanis di *press section*, dan energi termal di *dryer section*. Dengan basis tiap 1.0 kg padatan (*fiber*) yang dikeluarkan: 195 kg air di *forming section*; 2,8 kg air di *press section*; dan 1,2 kg

uap air di *dryer section* (Park, 2016). Meskipun *dryer section* mengeluarkan porsi paling sedikit dari total *dewatering*, tetapi pengguna energi paling besar. Hal ini karena serat kertas (*pulp fibers*) bersifat *porous*, *hygroscopics*, dan mengandung air yang sulit dikeluarkan (*hard-to-remove*) dengan hanya aksi mekanis.

Industri pulp dan kertas menempati urutan keempat terbesar di dunia dalam pemakaian energi disamping industri kimia, baja, dan minyak. Pemakaian energi terbesar terutama pada proses penguapan uap air di *dryer section* dari mesin kertas (Noboa, 2010). Umumnya pada *dryer section*, untuk menguapkan tiap 1 kg uap air pada lembaran *paper web* diperlukan 2600 – 3500 kJ energi panas dalam bentuk uap (Martinsson, 2012). Ini berarti, 1/3 dari total konsumsi energi pada *integrated paper mill* digunakan oleh *dryer section* untuk mengurangi kadar air dari 60% menjadi di bawah 10% (Pontremoli, 2007) yang membuat *dryer section* sebagai pengguna energi panas terbesar dan sejauh ini merupakan bagian yang paling mahal dalam proses pembuatan kertas.

Kebutuhan energi yang besar di *dryer section* menuntut kajian bagaimana karakteristik perubahan perilaku yang terjadi pada *dryer section* karena adanya gangguan kesetimbangan massa dan energi akibat perubahan laju perpindahan panas dan perpindahan massa pada proses pengeringan *paper web*. Kenyataan ini memerlukan pemodelan yang mencakup beberapa kombinasi subproses dalam pengeringan *paper web*. Subproses ini dimodelkan dengan persamaan differensial atau persamaan differensial parsial. Penyelesaian model dilakukan dengan analisa numerik menggunakan metode beda hingga (*finite difference method*) yang dapat menjelaskan hubungan antara temperatur *cylinder dryer* dan temperatur udara di dalam *dryer hood* terhadap temperatur *paper web* dan *dry solid content* agar diperoleh derajat kekeringan (*dryness*) *paper web* yang diharapkan.

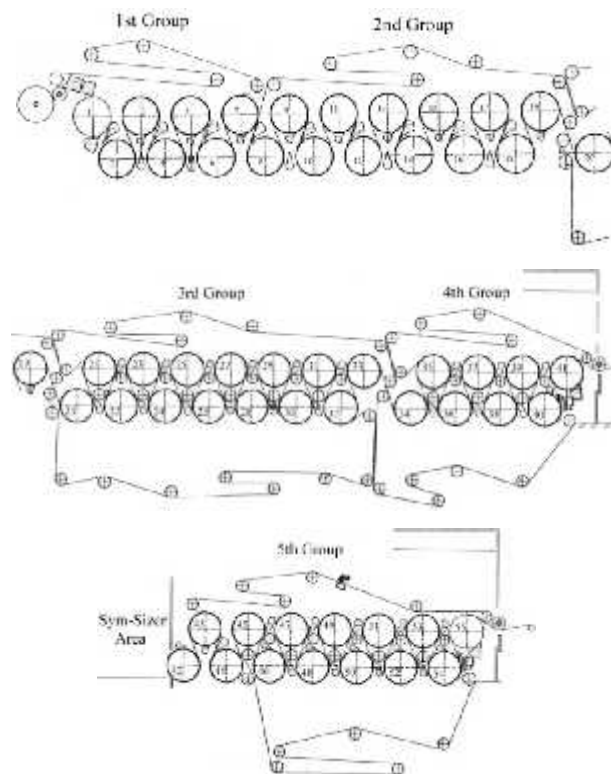
TINJAUAN PUSTAKA

Dryer section bertujuan untuk mengeringkan lembaran kertas dengan cara penguapan (*evaporation*) sisa uap air (*residual moisture*) di dalam *paper web* dengan cara kontak langsung dengan permukaan *cylinder dryer* yang sangat panas sehingga mencapai derajat kekeringan yang diharapkan. Energi panas diperlukan untuk mencapai sifat-sifat *paper sheet* yang diinginkan karena sifat-sifat kertas diperoleh selama pengeringan. Penggunaan model dan simulasi merupakan cara paling baik menentukan unjuk kerja *dryer section*

(Arasakesari *et al.*, 2011; Perré *et al.*, 2014; Yeo *et al.*, 2009). Tujuan kajian ini adalah: (1) untuk mengembangkan pemodelan numerik dengan metode beda hingga pada *dryer section* dari mesin kertas yang dapat menjelaskan karakteristik proses pengeringan *paper web* dan (2) untuk simulasi temperatur dan *moisture content* di dalam *paper web* dengan temperatur permukaan *cylinder dryer*, kondisi udara di dalam *ventilation hood*, dan kecepatan mesin sebagai variabel bebas.

A. Model Proses Pengeringan

Gambar 1 menunjukkan skema konfigurasi *dryer section* (Vitikainen *et al.*, 2009). *Dryer section* dibagi menjadi 5 grup berdasarkan tekanan uap yang dimasukkan ke dalam *cylinder dryer*, masing-masing 4 dan 1 grup di *pre-dryer* dan *after-dryer*. Proses penguapan uap air dari lembaran kertas di *dryer section* menggunakan *multicylinder dryer*. Kertas dikeringkan berbelok-belok melewati *cylinder dryer* yang bergerak dengan kecepatan linier yang sama.

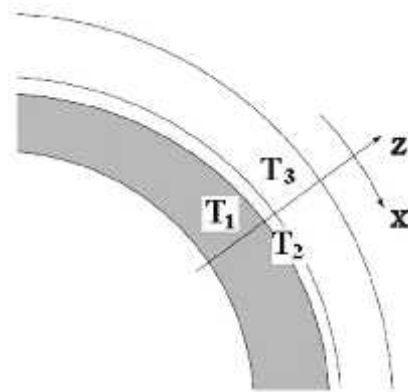


GAMBAR 1. KONFIGURASI DRYER SECTION

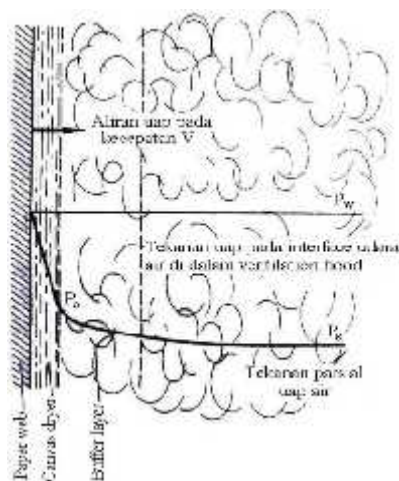
B. Pendekatan Model Perpindahan Panas

Tujuan kajian adalah untuk memodelkan *process flow*, distribusi temperatur, dan *moisture content* pada pengeringan *paper web* di *dryer section*. Untuk menyederhanakan

pemodelan dibuat beberapa asumsi, yaitu: (1) udara dinyakan sebagai campuran *dry air* dan uap air, (2) tidak ada variasi temperatur permukaan *cylinder dryer*, (3) dinding *dryer hood* bersifat adiabatik. Interaksi panas antara *cylinder dryer paper web*, dan *canvas dryer* secara skematik ditunjukkan pada gbr. 2.a.



(a)



(b)

GAMBAR 2. MODEL (A) PERPINDAHAN PANAS (B) PERPINDAHAN MASSA

C. Pendekatan Model Perpindahan Massa

Penguapan terjadi karena interaksi uap air pada *paper web* yang bergerak dengan kecepatan V dan udara di dalam *ventilation hood*. Dengan pembauran (*diffusion*) molekular, uap air ini mengalir melalui *canvas dryer* dengan penurunan tekanan P_w ke P_c . Penurunan tekanan kemudian terjadi melalui lapisan penyangga (*buffer layer*) dari P_c ke P_s dengan proses difusi dan konveksi sebagai *driving force* untuk mengeluarkan uap air dari *paper web* ke *dryer hood* kemudian dibuang ke lingkungan (gbr. 2.b).

METODE PENELITIAN

Multicylinder drying process terdiri dari siklus berulang mengikuti arah *paper web*. Gambar 3.a menunjukkan siklus pengeringan *single felted* grup 1 dan 2 yang dinotasikan dengan C'-D. Pada siklus ini *paper web* tetap kontak dengan permukaan *cylinder dryer* yang tetap ditekan oleh *canvas dryer (single felted)* dan akan tetap diikuti pada *free-run*. Gambar 3b menunjukkan siklus pengeringan *double felted* dengan *paper web* tetap kontak dengan permukaan *cylinder dryer* dengan sisi bagian luar ditekan *canvas dryer* tetapi pada bagian *free-run*, *paper web* kontak langsung dengan udara di dalam *ventilation hood*.

Pemodelan Perpindahan Panas

1. *Boundary condition* pada arah – Z

Panas yang diserap oleh *paper web* dari *cylinder dryer* dinyatakan dengan pers. 1. Perhitungan dibuat pada *boundary* di permukaan *cylinder dryer*:

$$q = -k_w \frac{\partial}{\partial z} \Big|_{z_c=d_c} = \frac{k_w (a_w)}{a_w (a_w)} \frac{\partial}{\partial z} \Big|_{z_c=d_c} = h_d (T_c - T_w) \tag{1}$$

Perpindahan panas antara *paper web* dan kanvas *dryer* dinyatakan dengan pers. 2, yaitu:

$$q = -k_f \frac{\partial}{\partial z} \Big|_{z_f=d_f} = \frac{k_f}{\partial_f} \frac{\partial}{\partial z} \Big|_{z_c=d_c} = h_w (T_f - T_w) \tag{2}$$

Perpindahan panas antara *paper web* dan udara di dalam *ventilation hood* dinyatakan dengan pers. 3:

$$q = h_e \frac{\partial}{\partial z} \Big|_{z_w=d_w} = h_e (T_d - T_w) \tag{3}$$

2. *Boundary condition* pada arah – X

Boundary condition pada arah - X diterapkan untuk *paper web*. Sifat-sifat *paper web* tergantung pada *moisture content* di dalam *paper web*. Konduktifitas termal, kapasitas kalor spesifik, dan *basis weight* dari *paper web* dinyatakan dengan pers. 4, 5, dan 6:

$$k_w = \frac{k_d + a_w \cdot k_{H_2O}}{1 + a_w} \tag{4}$$

$$C_w = \frac{C_f - 1,3 \cdot a_x + a_w}{1 + a_w} \tag{5}$$

$$B = (1 + a_w) \cdot D \tag{6}$$

Pemodelan Perpindahan Massa

Penguapan terjadi karena interaksi uap air pada *paper web* yang bergerak dengan kecepatan V dan udara di dalam *ventilation hood*. Dengan pembauran (*diffusion*) molekular, uap air ini mengalir melalui *canvas dryer* dengan penurunan tekanan P_w ke P_c . Penurunan tekanan kemudian terjadi melalui lapisan penyangga (*buffer layer*) dari P_c ke P_s dengan proses difusi dan konveksi sebagai *driving force* untuk mengeluarkan uap air dari *paper web* ke *dryer hood* kemudian dibuang ke lingkungan (gbr. 2.b).

Laju penguapan uap air m dari *paper web* dapat dinyatakan sebagai:

$$m = \frac{h_e}{c_{u1} + \chi_s \cdot c_v} (\chi_s - \chi) \tag{7}$$

dengan perbandingan kelembaban udara χ_s , χ_v , dan χ ditentukan dari pers.:

$$\chi_s = \frac{0,6}{P - P_s} \cdot P_s \tag{8}$$

$$\chi = \frac{1,0}{2} \frac{(T_w - T_d) + \chi_v(2 - 2,3 \cdot T_w)}{+1,8 \cdot T_d - 4,1 \cdot T_w} \tag{9}$$

$$\chi_v = \frac{0,6}{P - P_w} \cdot P_w \tag{10}$$

P_w dan P_s ditentukan dari pers. Antoine, yaitu:

$$P_w = 10^{5,1 - \frac{1.5}{T_w + 2.1}} \tag{11}$$

$$P_s = 10^{5,1 - \frac{1.5}{T_s + 2.1}} \tag{12}$$

Kalor penguapan H_{ev} adalah jumlah dari kalor laten penguapan h_{vap} uap air dan kalor laten kondensasi uap air h_s dari permukaan *paper web* pada suhu tetap (Coveney, 2009):

$$H_{ev} = h_{vap} + h_s \tag{13}$$

dengan kalor laten penguapan h_{vap} ditentukan dari pers.:

$$h_v = 505,374(1 - T_r)^{0,3} + 269,6581(1 - T_r)^{0,4} \tag{14}$$

di mana penurunan temperatur T_r (*reduced temperature*) ditentukan dari persamaan:

$$T_r = \frac{T_w}{3.9} \tag{15}$$

Kalor laten kondensasi uap air dari permukaan *paper web* ditentukan dari pers.:

$$h_s = R \left(\frac{1 - \phi}{\phi} \right) \cdot 0,10085 \cdot \alpha_w^{1,0} \cdot T_w^2 \tag{16}$$

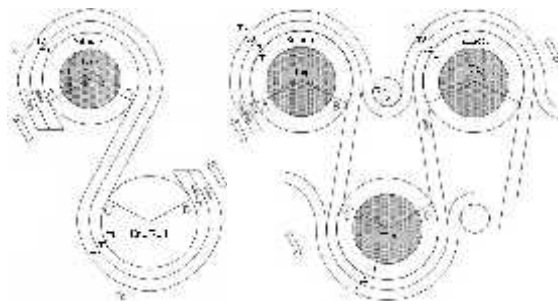
dengan w ditentukan berdasarkan temperatur dan kandungan uap air pada *paper web*:

$$w = 1 - \exp(-47,58 \cdot \alpha_w^{1,8} - 0,10085 \cdot T_w \cdot \alpha_w^{1,0}) \quad (17)$$

Dengan mengkombinasikan pers. (14) hingga (17), maka pers. (13) dapat ditulis kembali dalam bentuk:

$$H_e = 505,3747 \left(1 - \frac{T_w}{373,95}\right)^{0,3} + 269,6581 \left(1 - \frac{T_w}{373,95}\right)^{0,4} + 0,011124 \left(1 - \frac{1}{w}\right) \alpha_w^{1,0} \cdot T_w \cdot (T_w + 273,15) \quad (18)$$

Multicylinder drying process terdiri dari siklus berulang mengikuti arah *paper web*. Gambar 3.a menunjukkan siklus pengeringan *single felted* grup 1 dan 2 yang dinotasikan dengan C'-D. Pada siklus ini *paper web* tetap kontak dengan permukaan *cylinder dryer* yang tetap ditekan oleh *canvas dryer (single felted)* dan akan tetap diikuti pada *free-run*. Gambar 3b menunjukkan siklus pengeringan *double felted* dengan *paper web* tetap kontak dengan permukaan *cylinder dryer* dengan sisi bagian luar ditekan *canvas dryer* tetapi pada bagian *free-run*, *paper web* kontak langsung dengan udara di dalam *ventilation hood*.



GAMBAR 3. SIKLUS PENGERINGAN, A. SINGLE FELTED, B. DOUBLE FELTED

Pada zona A-B, dinamika temperatur *paper web* dapat dinyatakan dalam bentuk pers. 19:

$$\frac{dT_2}{d} = \frac{1}{D(1 + \alpha_w)C_w \cdot T_{2,t-1}} \cdot \{h_a T_1 - (h_a + h_w) T_2 + h_w T_3 - m \cdot H_e\} \quad (19)$$

Dinamika temperatur kanvas dryer dapat dinyatakan dalam bentuk pers. 20:

$$\frac{dT_3}{d} = \frac{1}{L_c \rho_c C_c} \{h_w T_2 - (h_w + h_e) T_3 + h_e T_a\} \quad (20)$$

Pada zona B-C' di mana paper web tetap kontak dengan kanvas dryer pada satu sisi di daerah free-run, dinamika temperatur paper web, kanvas dryer, dan kandungan uap air dinyatakan dalam pers. 21:

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{D(0,3 - 1,3 \cdot a_e + a_w) \cdot T_{2i-1}} \cdot \{ h_e \cdot T_d - T_{2i-1} (h_e + h_w) + h_w T_3 - m \cdot H_e \} \tag{21}$$

$$\frac{dT_3}{dt} = \frac{1}{L_c \rho_c c_c} \{ h_w T_2 - (h_w + h_e) T_3 + h_e T_d \} \tag{22}$$

$$\frac{da_w}{dt} = - \frac{m}{D} \tag{23}$$

Pada zona B-C di mana paper web tetap bergerak bebas, dinamika temperatur paper web dan kandungan uap air dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{D(0,3 - 1,3 \cdot a_e + a_w) \cdot T_2} \cdot \{ 2 \cdot h_e (T_d - T_2) - 2 \cdot m \cdot H_e \} \tag{24}$$

$$\frac{da_w}{dt} = - 2 \cdot \frac{m}{D} \tag{25}$$

Di dalam perhitungan persamaan simulasi, penentuan koefisien perpindahan panas sangatlah penting. Diketahui bahwa koefisien perpindahan panas sangat dipengaruhi oleh dinamika kandungan uap air, temperatur, BW, dan kecepatan paper web (Sadeghi, 2009; Ekvall, 2014). Untuk pre-dryer, h_d dan h_e akan dapat dinyatakan sebagai (Yeo et al., 2014):

$$h_d = c_1 \times \text{EXP}(c_w \times a_w) + c_3 \times \text{EXP}(c_4 \times a_w) \tag{26}$$

$$h_e = k_1 \times B \times V^n \times \text{EXP}(k_2 \times B \times V^n \times a_w) + k_3 \times B \times V^n \times e^{-k_4 \times B \times V^n \times a_w} \tag{27}$$

Untuk after-dryer, h_d ditentukan dengan bentuk (Yeo et al., 2009):

$$h_d = c_1 \times a_w^3 + c_2 \times a_w^2 + c_3 \times a_w + c_4 \tag{28}$$

Nilai h_e untuk after-dryer memiliki bentuk yang sama dengan pre-dryer. Nilai parameter konstanta perpindahan panas c_1 , k_1 , dan n yang diperoleh dari hasil eksperimen dan spesifikasi mesin kertas ditunjukkan pada tabel 1.

TABEL 1. KONSTANTA PERPINDAHAN PANAS

Parameter	Pre-dryer	After-dryer
c ₁	0,1661	19,09
c ₂	1,512	-6,489
c ₃	-0,4775	1,167
c ₄	-15,67	0,1684
k ₁	0,0231	0,0085
k ₂	0,4243	3,103
k ₃	-0,008	-0,0053
k ₄	-14,67	-100,63
n	0,518	0,52

D. Simulasi Pengeringan

Simulasi dibuat untuk validasi model terhadap data operasional. Dipilih tiga jenis *copy paper* dengan *bone-dry weight* 60, 70, 80 g/m². Tabel 2 menunjukkan data operasional di *dryer section*.

TABEL 2. DATA OPERASIONAL PENELITIAN

Deskripsi	<i>Bone-dry weight D</i> (g/m ² = gsm)		
	60	70	80
Kecepatan mesin (m/min)	900	1000	1100
Kandungan abu a _z (%)	18	17	18
<i>Moisture content</i> keluar pre-dryer (%)	8,5	8,5	8,5
<i>Moisture content</i> keluar after-dryer (%)	4,5	4,4	4,5
Tek. uap cylinder grup I	1 bar (abs.)		
Tek. uap <i>cylinder</i> grup II	2 bar (abs.)		
Tek. uap <i>cylinder</i> grup III	3 bar (abs.)		
Tek. uap <i>cylinder</i> grup IV	4 bar (abs.)		
Tek. uap <i>cylinder</i> grup V	2 bar (abs.)		
<i>Cylinder</i> tanpa dialiri uap	1, 2, 10, 12, 15		

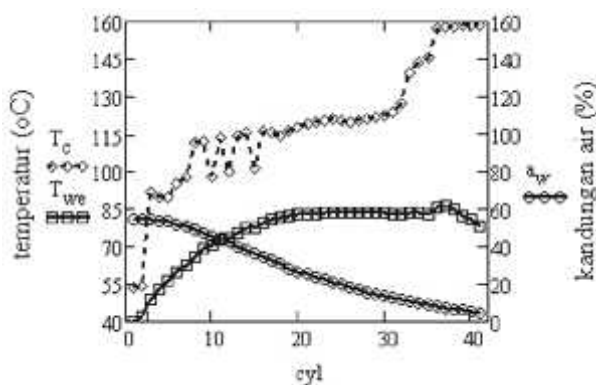
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Untuk bisa digunakan, *papergrade* dan *paperboard* harus mempunyai kadar air di bawah 10% dan temperatur pengeringan *paper web* tidak melebihi 90 °C untuk mencegah

overheating (Coveney, 2009). Oleh karena itu, simulasi pengeringan menunjukkan hasil yang memuaskan jika kadar air, a_w , menunjukkan nilai di bawah 10%.

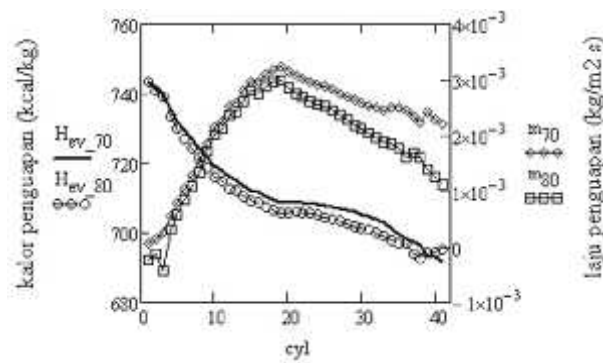
E. Hubungan Temperatur dan Basis Weight

Gambar 4 menunjukkan hubungan antara tempera-tur silinder *dryer* dengan temperatur dan *basis weight* dari *paper web*. Pada fase pemanasan (*heating phase*) dan zona laju tetap (*constant rate zone*) yaitu pada *dryer section* grup no. 42 hingga 47, temperatur *paper web* meningkat tajam. Pada *bone-dry weight* 60, 70, dan 80 *gsm*, peningkatan temperatur masing-masing sebesar 29,25; 26,85; dan 26,84 °C. *Basis weight* dari *paper web* belum menunjukkan penurunan yang besar pada *heating phase* dan *constant rate zone*, yaitu hanya: 0,0034; 0,003; dan 0,0044 *kg H₂O/kg bone-dry weight* masing-masing pada *bone-dry weight* 60, 70, dan 80 *gsm*. Penurunan kadar uap air yang cukup besar terjadi pada *falling rate zone*, yaitu sebesar 0,01; 0,011; dan 0,013 *kg H₂O/kg bone-dry weight* masing-masing pada *bone-dry weight* 60, 70, dan 80 *gsm*.



GAMBAR 4. VARIASI TEMPERATUR CYLINDER DRYER DAN PAPER WEB DAN KANDUNGAN UAP AIR PAPER WEB

Gambar 5 menunjukkan variasi kalor penguapan dan laju penguapan sepanjang *cylinder dryer* jenis *copy paper* 70 dan 80 *g/m²*. Pada kecepatan mesin dan *D* yang lebih besar, menunjukkan kalor penguapan dan laju penguapan lebih kecil. Hal ini berhubungan dengan h_e yang sebanding dengan V dan D , sehingga kalor yang dibuthkan akan semakin kecil.

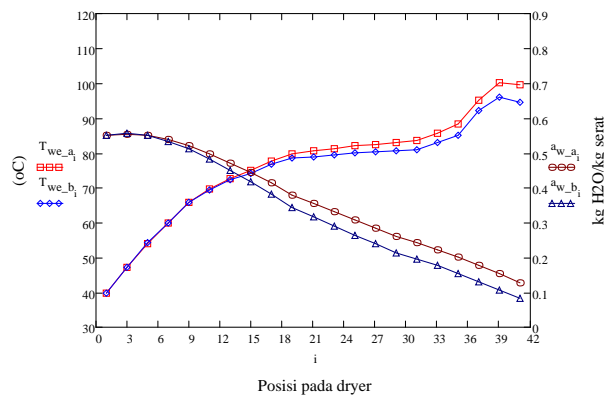


GAMBAR 5. VARIASI TEMPERATUR CYLINDER DRYER DAN PAPER WEB DAN KANDUNGAN UAP AIR PAPER

Dari gbr. 4 dan 5 dapat diketahui bahwa temperatur dan *basis weight* dari *paper web* sangat dipengaruhi oleh: (1) temperatur permukaan silinder *dryer*, (2) kecepatan mesin, (3) temperatur udara bola kering T_d dan bola basah T_w di dalam *ventilation hood bone-dry weight* dari *paper web*, dan (4) *bone-dry weight* dari *paper web* (tabel 4.1 dan tabel 4.2). Pada penelitian ini analisis akan difokuskan di *pre-dryer* karena karakteristik di *pre-dryer* sangat berpengaruh terhadap mutu kertas yang akan dihasilkan. Kajian dititik-beratkan pada pengaruh kecepatan mesin, kondisi temperatur udara di dalam *ventilation hood*, dan *bone-dry weight* terhadap kandungan uap air dan temperatur *paper web* selama proses pengeringan di *dryer section*.

Hubungan Kecepatan pada Kandungan Air dan Suhu

Hubungan antara V pada kecepatan 600 dan 900 mpm terhadap karakteristik temperatur dan kandungan uap air selama proses pengeringan di dalam *dryer section* ditunjukkan pada gbr. 6. Adapun sumbu x dalam hal ini adalah koordinat posisi pada *cylinder dryer*, sedangkan sumbu y adalah kandungan uap air dan temperatur *paper web* ($^{\circ}\text{C}$).



GAMBAR 6. PENGARUH KECEPATAN TERHADAP TEMPERATUR DAN KADAR AIR PAPER WEB

Pada gbr. 6 menunjukkan grafik pengaruh kecepatan mesin terhadap kandungan uap air dan temperatur *paper web*. Simulasi dibuat pada *bone-dry weight* $U = 80$ gsm, kecepatan mesin 600 dan 900 mpm, temperatur awal *paper web* $T_{W_0} = 38$ °C dan kadar uap air awal $a_{W_0} = 55\%$ yang sama.

KESIMPULAN DAN IMPLIKASI

Dryer section merupakan bagian dari mesin kertas yang paling kompleks dan paling mahal dalam proses pembuatan kertas. Untuk mengeluarkan kandungan air dalam *paper web* dari 30 % menjadi sekitar 5 %, *dryer section* membutuhkan energi yang sangat besar dalam bentuk panas. Proses pengeringan *paper web* di *dryer section* dapat dijelaskan dengan pendekatan analisis perpindahan panas dan perpindahan massa. Beberapa idealisasi kondisi yang digunakan, antara lain *dryer hood* adalah *totally closed* ($heat\ flux = 0$), dan pengaruh komposisi bahan terhadap sifat fisis perpindahan panas dan massa pada kertas diabaikan, adalah untuk menyederhanakan analisis.

Kesimpulan yang didapat dari penelitian ini adalah:

- Proses perpindahan panas berlangsung secara konduksi, konveksi, dan radiasi. Koefisien perpindahan panas antara *paper web* dan udara serta antara silinder *dryer* dan *paper web* dapat dinyatakan secara efektif dalam bentuk kandungan uap air, basis weight, dan kecepatan mesin.
- Perpindahan massa yaitu massa uap air yang dikeluarkan dari permukaan *paper web* ke *surrounding air* (*dryer hood*) berlangsung secara difusi-konveksi terjadi sepanjang

lintasan *paper web* dan dianggap hanya berlangsung pada permukaan *paper web*.

Perpindahan massa terjadi karena beda kelembaban antara *paper web* dan di *dryer hood*.

- Model dapat menentukan distribusi *moisture content* sepanjang *cylinder*, sehingga dapat digunakan sebagai prediksi dalam operasional *dryer section*.
- Peningkatan kecepatan mesin dapat menaikkan laju perpindahan massa uap air dari permukaan *paper web* di *dryer section*. Peningkatan kecepatan dengan memperhatikan sifat-sifat fisik lembaran *paper web*.

Implikasi dari penelitian ini adalah:

- Strategi pemodelan dilakukan untuk *simplified problem*. Penyederhanaan yang dibuat adalah *constant paper web quality*. Praktek di lapangan kualitas *paper web* dapat berubah yang dapat disebabkan pengaruh *fibre composition, operating condition, grade change*, dan sebagainya. Perlu dipikirkan pengembangan *software* yang dapat menjelaskan semua fenomena yang terjadi secara lebih komprehensif.
- *Dryer section* merupakan obyek kajian yang menarik. Pengecekan demi peningkatan *performance* dan *runnability* harus dilaksanakan melalui program pemodelan dan simulasi yang dilaksanakan setiap kali mesin kertas stop atau pada saat akan ganti jenis kertas.
- Perlu penelitian lanjutan terhadap proses pengeringan jenis kertas lain, misal *tissue paper* yang menggunakan *Yankee cylinder dryer*, *coated paper* yang menggunakan *infrared drying*, atau *security paper* yang menggunakan *impingement drying* dan membandingkan proses dan hasil analisis dengan menggunakan *multicylinder drying*.
- Ada kemungkinan untuk optimalisasi selanjutnya pada proses pengeringan *paper web* di *dryer section* yang dapat dilakukan dengan *can-by-can analysis*, dengan cara: (1) optimalisasi kelembaban udara di dalam *dryer section*, (2) optimalisasi kecepatan untuk mendapatkan laju pengeringan kertas yang sesuai, dan (3) optimalisasi kelembaban udara dan kecepatan mesin yang optimum untuk jenis bone-dry paper tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- Park, Sunkyu, (2016), *Drying Behavior of Cellulose Fibers Characterized by Thermal Analysis*, Dissertation Ph.D., North Carolina State University.

- Arasakesari, Subramaniam; Keselman, Dmitry; Achanta, Srinivas, (2011), *Dynamic Simulation of Yankee Drying of Paper*, Proctor & Gamble Co., Este Process Technology Center, Cincinnati, Ohio.
- Perré, Lescanne Y.; Brocard, Yves, (2014), Modeling of Paper Drying: a Comprehensive Computational Model Used by the Industry, *Proceeding of the 14th International Drying Symposium (IDS 2009)*, Sao Paulo, Brazil.
- Yeo, Yeong-Koo; Hwang, Ki-Seok, Yi, Sung Chul; Kang, Hong, (2014), Modelling of the Drying Process in Paper Plants, *J. Chem. Eng.*, **21**, 761–766.
- Vitikainen, A.; Wärrri, P.; Tolonen, V, (2009), *Dryer Section Book of PT. Kertas Tjiwi Kimia PM-10*, Valmet Paper Machinery, Rautpohja, Finland.
- Sadeghi, Mohsen; Dougl, Murray W.J., (2014), *From Fine-Paper to Linerboard: Validation of A Microscale Simulator for Single Technique and Hybrid Dryers*, Pulp and Paper Research Institute of Canada, Pointe-Claire, QC, Canada.
- Ekvall, Jenny, (2014), *Dryer Section Control in Paper Machines During Web Break*, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology.
- Coveney, D.B.; Robb, G.A., (2009), The Dryer Section, in *Handbook of Paper Making and Paperboard Making*, Editor: MacDonald, Ronald G.; Franklin, John N., McGraw-Hill Book Company, New York, USA, 405 – 551.
- Noboa, Homero L.; Sayed, Jamal Yagoobi, (2010), *A Critical Review Drying Models for Coated Paper*, Drying Research Center, Texas A&M University, Mechanical Engineering Department.
- Martinsson, Johan; Ekvall, Jenny, (2012), *Parameter Optimization of Paper Machine Model*, Department of Automatic Control, Lund University, Lund, Sweden.
- Pontremoli, Alessandro, (2007), *Modelling and Control of a Paper Dryer Section Using Modelica*, Department of Automatic Control, Lund University, Lund, Sweden.

II. SIMBOL

a_w : kandungan uap air *paper web*

a_z : perbandingan abu (*ash ratio*)

BW : berat dasar (*basis weight*) *paper web* (kg/m²)

C_a : kalor spesifik udara pada suhu bola kering (kcal/kg °C)

- C_c : kalor spesifik kanvas *dryer* (kcal/kg °C)
- C_w : kalor spesifik *paper web* (kcal/kg °C)
- D : berat kering (*bone-dry weight*) *paper web* (kg/m²)
- h_{dw} : koefisien perpindahan panas antara silinder *dryer* dan *paper web* (kcal/m² sec °C)
- h_e : koefisien perpindahan panas antara *paper web* dan udara (kcal/m² sec °C)
- h_{wc} : koefisien perpindahan panas antara *paper web* dan kanvas *dryer* (kcal/m² sec °C)
- h_{vap} : kalor laten penguapan uap air dari permukaan *paper web* (kcal/kg)
- h_s : kalor laten kondensasi uap air dari permukaan *paper web* pada suhu tetap (kcal/kg)
- H_{ev} : kalor penguapan uap air dari permukaan *paper web*
- m : laju penguapan uap air dari permukaan *paper web* (kg/m² sec)
- R : konstanta gas (udara) = 1,987 kcal/kg mol K
- P : tekanan total udara di dalam *ventilation hood* (bar)
- P_s : tekanan parsial uap air pada permukaan *paper web* (bar)
- P_w : tekanan uap air karena *interface* air-udara di dalam *ventilation hood* (bar)
- T_d : temperatur udara bola kering (°C)
- T_w : temperatur udara bola basah (°C)
- T_{we} : temperatur *paper web* (°C)
- χ : perbandingan kelembaban udara pada *ventilation hood* (kg H₂O/kg *dry air*)