

# OPTIMISASI DAN PENGENDALIAN DI DAERAH PENDINGINAN LAMINAR PABRIK BAJA LEMBARAN PANAS

*Optimisation and Controlling in The Laminar Cooling Area in The  
Hot Strip Mill*

Sri Ratna Sulistiyanti<sup>1</sup>, F. Soesianto<sup>2</sup>, Purnomo<sup>3</sup>

Program Studi Teknik Elektro

Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada

## ABSTRACT

In the rolling process of steel slab in the HSM (Hot Strip Mill) there are several criteria to be satisfied, among other thing the rolling temperature between 550--650°C. This requires controlling operation in laminar cooling area.

The determination temperature distribution of steel slab in cooling area was done using a numerical method, to determine the best combination of process variables (rate of movement of steel slab and flow rate of water cooling) to arrive at some optimal condition.

For steel slab's dimension of 60 m x 1.2 m x 0.02 m, 0.19 - 0.20 m/s for rate of movement of steel slab, and 230 - 260 m<sup>3</sup>/h for flow rate of water cooling were the optimal set up. Water cooling applied to both surfaces was better than water cooling only to one surface.

Controlling two process variables used to fuzzy logic controller (FLC) until the temperature of steel slab was  $\pm 600^{\circ}\text{C}$ .

Keywords : *optimisation, controlling, laminar cooling, hot strip mill*

## PENGANTAR

Pabrik Baja Lembaran Panas (*Hot Strip Mill*) adalah pabrik penggilingan baja secara panas, yang menggiling lembaran baja

<sup>1</sup> Fakultas Teknik Universitas Lampung, Bandar Lampung

<sup>2</sup> Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

<sup>3</sup> Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

berukuran 200 mm - 250 mm menja-di baja gulungan dengan ketebalan 1,85 mm - 25,6 mm.

Proses produksi di Pabrik Baja Lembaran Panas diawali dengan pemanasan lembaran yang dikirim dari Pabrik lembaran dengan menggunakan dua buah dapur pemanas untuk memanaskan lembaran baja hingga suhu 1260°C. Dua dapur pemanas yang digunakan mempunyai jenis yang berbeda, yaitu Dapur Pemanas Ulang I (*Re-heating Furnace I*) berjenis *pusher* dan Dapur Pemanas Ulang II (*Reheating Furnace II*) berjenis *walking beam*.

Rangkaian proses di HSM dimulai dari lembaran *yard* (tempat bahan baku HSM berupa lembaran yang mempunyai panjang antara 4100--12000 mm ditempat-kan), kemudian lembaran masuk ke dapur pemanas ulang (*reheating furnace*), lembaran yang keluar dari pemanas direduksi kelebarnya di dalam daerah *sizing press*. Dari daerah *sizing press*, lembaran masuk ke daerah penggilingan kasar (*roughing mill*) untuk direduksi ketebalannya secara bertahap dari *pass* ke *pass*. Lembaran (*transfer bar*) yang keluar dari *roughing mill* masuk ke daerah *crop shear* untuk dipotong ujung kepala dan ekornya. Proses selanjutnya adalah *finishing*, agar material yang keluar dari *roughing mill* yang mempunyai ketebalan 25 mm--40 mm, mengalami reduksi ketebalan di daerah *finishing mill*, menjadi 1,55 mm - 25,6 mm. Setelah daerah ini tidak ada lagi proses reduksi ketebalan.

Lembaran yang keluar dari *finishing mill* kemudian didinginkan dalam pendingin laminar dari suhu  $\pm 850^{\circ}$ -- $950^{\circ}$ C menjadi  $550^{\circ}$ -- $650^{\circ}$ C lalu digulung di daerah penggulangan (*area coiler*).

Langkah pendinginan di daerah pendinginan laminar yang tidak sesuai akan berakibat buruk bagi produk yang dihasilkan. Di PT. KS belum ada (termasuk dalam pengembangan) sistem otomasi di area pen-dingin laminar, pada hal sistem otomasi itu diperlukan agar efisiensi proses produksi dapat ditingkatkan dan supaya dapat menghasilkan produk dengan spesifikasi baru serta kualitas yang bersaing.

Untuk otomasi di daerah pendinginan laminar diperlukan kondisi yang opti-mal dengan memperhatikan profil suhu pendinginan optimal, kadar C yang diharapkan dalam produk, dan sebagainya agar dihasilkan baja berkualitas tinggi. Dalam praktek untuk menentukan suhu pendinginan secara langsung sangatlah sulit. Oleh ka-rena itu, dalam penelitian ini digunakan cara optimisasi pengendalian pada daerah pendinginan laminar untuk menentukan cara yang optimal.

Tujuan penelitian adalah membuat sistem pengendalian optimal proses pendinginan laminar agar terjadi peningkatan kualitas lembaran dengan cara menja-min nilai temperatur penggulungan sesuai target produksi.

Persamaan perpindahan panas konduksi dua dimensi pada titik-titik pada bagian dalam :

$$k \left[ \frac{\Delta x \cdot l}{\Delta y} (T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}) + \frac{\Delta y \cdot l}{\Delta x} (T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}) \right] = 0 \quad (1)$$

dengan :

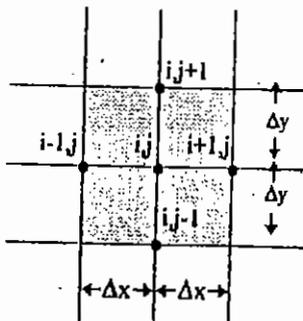
- |            |                         |             |                         |
|------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| $k$        | : konduktivitas termal  | $T_{i-1,j}$ | : suhu pada titik i-1,j |
| $\Delta x$ | : tambahan jarak arah x | $T_{i+1,j}$ | : suhu pada titik i+1,j |
| $\Delta y$ | : tambahan jarak arah y | $T_{i,j-1}$ | : suhu pada titik i,j-1 |
| $l$        | : lebar pelat baja      | $T_{i,j+1}$ | : suhu pada titik i,j+1 |
| $T_{i,j}$  | : suhu pada titik i,j   |             |                         |

Jika benda padat berada dalam kondisi batas konveksi, suhu pada permukaan harus dihitung dengan cara yang berbeda dengan yang di atas. Neraca energi pada node  $i, j$  ialah :

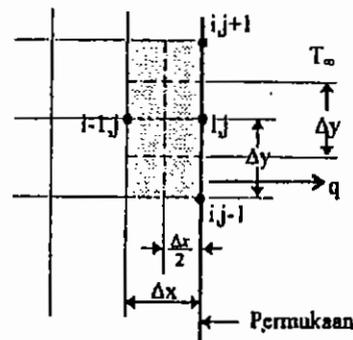
$$-kl \left( \Delta y \frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{2} \frac{T_{i,j} - T_{i+1,j}}{\Delta y} + \frac{\Delta x}{2} \frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{\Delta y} \right) + h\Delta x (T_{i,j} - T_{\infty}) = 0 \quad (2)$$

dengan :

- |              |  |
|--------------|--|
| $h$          | : koefisien perpindahan panas konveksi |
| $T_{\infty}$ | : suhu lingkungan                      |



Gambar 1. Nomenklatur yang digunakan dalam analisis numerik dua-dimensi perpindahan kalor konduksi



Gambar 2. Nomenklatur untuk persamaan node kondisi batas konveksi

Jadi bila terdapat kondisi batas konveksi, maka persamaan (2) yang digunakan, dan persamaan (1) untuk titik-titik di bagian dalam.

Nilai  $h$  diperoleh dengan mengambil jenis pendinginan *arrays of slot nozzles* yang mempunyai karakteristik sebagai berikut [Anonim, 1983] :

$$h = \frac{2}{3} (fo^{3/4}) (Pr^{0.42}) \left( \frac{k}{l} \right) \left( \frac{2Re}{\frac{f}{fo} + \frac{fo}{f}} \right)^{2/3} \quad (3)$$

Untuk menyelesaikan persamaan beda-bersinggga tersebut di atas digu-nakan analisis numerik. Untuk kondisi pendinginan baja lembaran panas (model fisik plat seperti Gambar 3) terdapat laju lembaran baja yang harus diperhatikan dalam menyelesaikan perhitungan ini. Oleh karena itu, pada penyelesaian analisis numerik ditambahkan persamaan aliran energi pada masing-masing titik sebesar :

$$\rho c V \Delta x l (T_{i-1,j} - T_{i,j}) = 0 \quad (4)$$

dengan :

$\rho$  = massa jenis baja, kg/m<sup>3</sup>

$\Delta x$  = tambahan jarak arah x, m

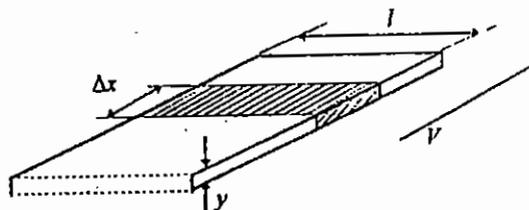
$c$  = panas jenis baja, J/kg °C

$l$  = lebar pelat baja, m

$V$  = laju baja, m/detik

sehingga persamaan (1) menjadi :

$$\rho c V \Delta x l (T_{i-1,j} - T_{i,j}) + k \left[ \frac{\Delta x \cdot l}{\Delta y} (T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}) + \frac{\Delta y \cdot l}{\Delta x} (T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}) \right] = 0 \quad (5)$$



Keterangan :  $l$  : lebar lembaran baja

$\Delta x$  : tambahan panjang arah x

$y$  : tebal lembaran baja

$V$  : kecepatan gerak lembaran baja arah x

**Gambar 3. Model fisik pelat baja yang digunakan**

dan persamaan (2) menjadi

$$\rho c V \Delta x d (T_{i-1,j} - T_{i,j}) + k \left[ \frac{\Delta x \cdot l}{\Delta y} (T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}) + \frac{\Delta y \cdot l}{\Delta x} (T_{i,j+1} - T_{i,j}) \right] - h \Delta x d (T_w - T_\infty) = 0 \quad (6)$$

$\Delta y$  = tambahan jarak arah y, m

$k$  = koefisien konduktivitas panas, W/m.°C

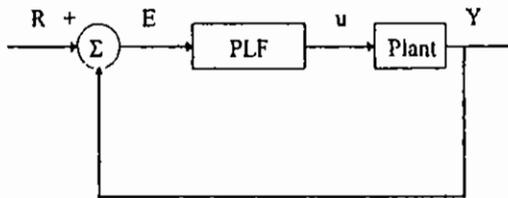
$h$  = koefisien panas konveksi, W/m<sup>2</sup>.°C

$T_w$  = suhu benda, °C

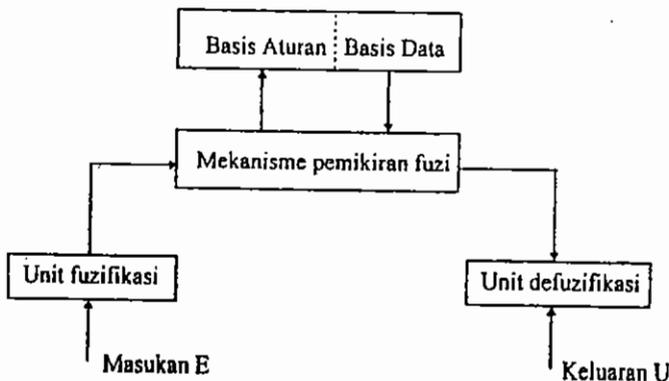
$T_\infty$  = suhu lingkungan, °C

Konsep pengendalian menggunakan FLT dengan dua masukan, yaitu E (*error*) dan CE (*change of error*) dan satu keluaran U. Data masukan diperoleh dari hasil eksekusi program optimisasi.

PLF dapat digambarkan dalam sistem kendali kalang tertutup seperti terlihat



Gambar 4. Sistem Pengendali Logika Fuzi



Gambar 5. Struktur Dasar PLF

pada gambar 4, dan struktur dasar kendali logika fuzi ditunjukkan oleh gambar 5 dengan elemen-elemen utama PLF adalah unit fuzifikasi, unit pemikiran logika fuzi, basis pengetahuan, dan unit defuzifikasi.

## CARA PENELITIAN

### 1. Bahan Penelitian

1. Data sekunder dimensi dan suhu plat baja
1. Data sekunder suhu air pendingin
2. Data sekunder sistem pendingin
3. Literatur-literatur, baik yang berasal dari jurnal, buku teks, *handbook*, maupun sumber pustaka yang lain.

### 2. Alat

1. CPU, monitor, dan printer.
2. Perangkat lunak Windows 97, MATLAB for Windows V 4.2c.1, dan FLT untuk penulisan program, MS Word V.7 untuk penulisan laporan akhir.

### 3. Tahap penyusunan algoritma dari fungsi-fungsi

Setelah dilakukan studi literatur tentang berbagai metode untuk menyelesaikan optimisasi serta pengambilan data sekunder di lapangan, maka penelitian ditempuh dengan tahap-tahap antara lain :

#### a. Tahap penyusunan algoritma fungsi-fungsi

Untuk tahap awal penelitian, dilakukan penyusunan algoritma fungsi-fungsi yang berkaitan dengan optimisasi dalam bentuk matrik, sebagai berikut :

1. baca  $r, c, V, dx, dy, l, k, m \text{ air}, r \text{ air}, Pr, T \text{ air}, T \text{ awal}, T \text{ akhir}, Bsn, Lasn, Q, sn, lsn, H$ .
2. cari nilai  $h \text{ air}$
3. for  $i=1$  to 90
4. hitung  $T$  untuk setiap tambahan jarak
5. end

### b. Tahap penyusunan matriks optimisasi

Matriks untuk optimisasi disusun dari lima matriks kecil, yaitu matriks a, matriks b, matriks c, matriks d, dan matriks e. Penyusunan itu bertujuan untuk memperkecil beban komputasi. Sebelum membuat matriks-matriks kecil terlebih dahulu dihitung :

$$m = \rho * c * V * \Delta x * l$$

$$n = k * \Delta x * l / \Delta y$$

$$o = k * \Delta y * l / \Delta x$$

$$p = h_{air} * \Delta x * l$$

yang pada program tertulis

$$r = \rho$$

$$dx = \Delta x$$

$$dy = \Delta y$$

Setelah diperoleh lima matriks kecil itu, kemudian disusun

matriks besar  $X = \begin{bmatrix} a & c & d \\ b & e & b \\ d & c & a \end{bmatrix}$  sebagai matriks posisi titik pada plat baja

yang akan ditentukan suhunya.

Selanjutnya ditentukan matriks Y yang tersusun dari persamaan-persamaan yang digunakan pada penyusunan matriks X bersama dengan suhu air ( $T_{air}$ ), suhu awal plat baja ( $T_{awal}$ ), dan suhu akhir plat baja yang dikehendaki ( $T_{akhir}$ ), sehingga persamaan-persamaan yang baru berbentuk :

$$ya = o * T_{air}$$

$$yb = T_{akhir} * o + ya$$

$$yc = ya + T_{awal} * (m + o)$$

$$yd = n * T_{akhir}$$

$$ye = T_{awal} * (m + n)$$

$$Y1 = [yb; -ya; -ya; \dots; -ya; yc]$$

$$Y2 = [yd; 0; 0; \dots; 0; ye]$$

$$Y = [Y1; Y2; Y1]$$

Setelah matriks  $X$  dan  $Y$  diperoleh, suhu pada masing-masing titik ditentukan dengan cara invers matriks  $X$  dikalikan dengan matriks  $Y$ ,

Setelah matriks  $X$  dan  $Y$  diperoleh, suhu pada masing-masing titik ditentukan dengan cara invers matriks  $X$  dikalikan dengan matriks  $Y$ ,

$$T = \text{inv}(X) * Y$$

Hasil yang diperoleh dari perhitungan-perhitungan tersebut di atas kemudian dibuat tabel laju plat terhadap debit air pendingin. Dari tabel itu dapat ditentukan kondisi yang optimum untuk menjalankan operasi pendinginan plat baja.

### c. Tahap Penyusunan PLF

Untuk menyusun PLF digunakan perangkat lunak MATLAB dengan fasilitas *Fuzzy Logic Toolbox (FLT)*. FLT adalah suatu kumpulan MATLAB *m-script file* yang merupakan rutin-rutin atau fungsi pada sistem logika fuzi, seperti fuzifikasi, operator logika, dan defuzifikasi. Pada intinya FLT membangun suatu matrik *Fuzzy Inference System (FIS)* yang berisi segala parameter PLF. Selain secara grafis, matriks FIS dapat dibangun dari file ekstensi FIS yang berupa file dengan format standar ASCII.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel hasil optimal hasil pemrograman dengan MATLAB dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

**Tabel 1. Peta laju plat baja terhadap debit air pendingin untuk kondisi I**

Keadaan		Laju plat baja (m/detik)					
		0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23
Debit Pendingin m <sup>3</sup> /jam	100	1	0	0	0	0	0
	200	1	1	0	0	0	0
	230	0	1	1	0	0	0
	260	0	1	1	0	0	0
	300	0	0	1	0	0	0
	400	0	0	0	1	1	0

Keterangan : 1 = ya      0 = tidak      ■ = optimum

**Tabel 2. Peta laju plat baja terhadap debit air pendingin untuk kondisi II**

Keadaan		Laju plat baja (m/detik)					
		0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23
Debit Pendingin m <sup>3</sup> /jam	100	1	0	0	0	0	0
	200	1	1	0	0	0	0
	230	0	1	1	0	0	0
	260	0	1	1	0	0	0
	300	0	0	1	0	0	0
	400	0	0	1	1	0	0

Keterangan : 1 = ya      0 = tidak      ■ = optimum

PLF menghasilkan *agregate* sebesar  $-1.03e-018$ , dengan kriteria PLF sebagai berikut :

- Tipe : Mamdani
- Jumlah masukan : 2
- Jumlah keluaran : 1
- Jumlah aturan : 9
- AndMethod : min
- OrMethod : max
- ImpMethod : max
- AgMethod : max
- Metode defuzifikasi : centroid

Dari hasil itu terlihat laju plat baja optimal 0,19–0,20 m/detik dan debit air pendingin 230–260 m/jam untuk mendapatkan suhu penggulangan 600 ° C. Pengoperasian dengan air pendingin pada kedua permukaan (kondisi I) lebih baik dilakukan daripada air pendingin hanya pada salah satu permukaan plat baja (kondisi II).

Aturan-aturan fuzi yang digunakan :

1. Jika laju adalah besar dan debit adalah N maka U adalah PB
2. Jika laju adalah besar dan debit adalah Z maka U adalah PB
3. Jika laju adalah besar dan debit adalah P maka U adalah PS
4. Jika laju adalah Z dan debit adalah N maka U adalah PS
5. Jika laju adalah Z dan debit adalah Z maka U adalah Z
6. Jika laju adalah Z dan debit adalah P maka U adalah NS
7. Jika laju adalah N dan debit adalah N maka U adalah NS
8. Jika laju adalah N dan debit adalah N maka U adalah NS
9. Jika laju adalah N dan debit adalah P maka U adalah NB

Aturan-aturan itu digunakan untuk mengendalikan proses pendinginan plat baja. Aturan 1 dan aturan 2, yaitu bila laju besar dan

debit negatif serta debit zero keluaran positif besar (PB) berfungsi untuk mempersingkat waktu bangkit. Aturan 3 dan aturan 4 berfungsi untuk mereduksi isolasi. Aturan 5, yaitu bila laju zero dan debit zero keluaran zero, maka proses telah sesuai dengan set point sehingga tidak perlu diumpan balik. Aturan 6, 7, dan 8 untuk kondisi pada saat overshoot terjadi, ialah membalik sinyal penggerak ke set point. Aturan 9 untuk kondisi yang berlawanan dengan aturan 1.

## KESIMPULAN dan SARAN

### 1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Laju plat baja optimal 0,19–0,20 m/detik dengan debit air pendingin 230–260 m/detik.

2. Semakin cepat laju plat baja, semakin kecil selisih suhu antara bagian atas, bagian tengah, dan bagian bawah, tetapi hasil akhir pendinginan tidak sesuai dengan yang diharapkan ( $\pm 600^\circ\text{C}$ ).

3. Untuk hasil PLF terdapat 9 aturan yang berfungsi untuk menurunkan overshoot, mereduksi osilasi dan terdapat satu aturan yang tepat sehingga tidak diperlukan aksi untuk mengatur proses agar kembali ke set pint, yaitu aturan kelima.

### 2. Saran

1. FLT hanya mampu untuk dua masukan dan satu keluaran. Oleh karena itu, perlu ditingkatkan kemampuannya untuk masukan yang lebih banyak sehingga peubah-peubah yang belum dimasukkan dapat ditambahkan agar lebih banyak pertimbangannya.

2. Penelitian ini diharapkan dapat dikembangkan untuk skala pabrik yang sebenarnya.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Rektor Universitas Gadjah Mada, Direktur Program Pasca Sarjana dan Ketua Jurusan Teknik Elektro.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 1983, *Heat Exchanger Design Handbook Vol. 2*, Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, Dusseldorf, Hemisphere Publishing Corporation, New York.