

# Evaluasi Kinerja Rotary Air Preheater dengan Metode $\varepsilon$ -NTU pada Pengaruh Sudut Seal

Wildan Tajudin Alhijri, Teguh Hady Ariwibowo

Teknologi Pembangkit Energi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya  
Jalan Raya ITS Sukolilo, Surabaya 60111  
wildanta@pg.student.pens.ac.id

**Abstrak** – Rotary air preheater memanfaatkan gas buang sisa pembakaran pada boiler. Kalor gas buang dipindahkan ke matriks kemudian dipindahkan udara pembakaran. Efektifitas rotary air preheater dipengaruhi oleh sudut seal. Seal berfungsi sebagai pembatas antara aliran panas dan dingin. Efektifitas rotary air preheater dihitung menggunakan metode persamaan  $\varepsilon$ -NTU. Penggunaan metode  $\varepsilon$ -NTU memerlukan nilai koefisien perpindahan panas konveksi yang terdapat pada aliran panas maupun dingin. Untuk mendapatkan nilai koefisien perpindahan panas, analisa matriks tunggal dilakukan pada kondisi heat flux konstan. Sudut seal aliran panas diatur tetap  $30^\circ$ , sedangkan pada aliran dingin diubah mulai dari  $0^\circ$  sampai  $120^\circ$ . Pengaturan sudut seal mempengaruhi luasan permukaan perpindahan panas pada matriks. Kecepatan aliran yang rendah memiliki waktu bersinggungan dengan matriks lebih lama sehingga laju perpindahan kalor meningkat. Pengaturan sudut seal aliran dingin  $0^\circ$  menghasilkan nilai efektifitas tertinggi yaitu 43,7% pada  $C_r * 24$ . Nilai efektifitas berbanding lurus dengan nilai NTU.

**Kata kunci:** rotary air preheater, seal,  $\varepsilon$ -NTU

**Abstract** – Rotary air preheater utilizes exhaust gas residual combustion in boilers. Heat of exhaust gas transferred to the matrix then moved by combustion air. The effectiveness of rotary air preheater is affected by the angle of the seal. Seal as a dividing line between the hot and cold streams. The effectiveness of rotary air preheater is calculated using equation method of  $\varepsilon$ -NTU. The use of methods of  $\varepsilon$ -NTU need the values for the coefficient of heat transfer by convection on the flow of heat and cold. To get the value of koefisien heat transfer, matrix analysis done with a single condition of constant heat flux. The angle of heat seal set remains  $30^\circ$ , whereas in a cold stream of personalised way starting from  $0^\circ$  to  $120^\circ$ . Setting the seal angle affect surface area of heat transfer on the matrix. Low speed of flow have more time to contact with matriks, so can increase heat transfer. Cold flow seal angle setting  $0^\circ$  produce the highest effectiveness is 43,7% on  $C_r * 24$ . The value of effectiveness is directly proportional to the value of NTU.

**Key words:** rotary air preheater, seal,  $\varepsilon$ -NTU

## I. PENDAHULUAN

Pada pusat listrik tenaga uap, proses pemanasan udara terjadi di rotary air preheater yang berjenis Ljungstrom [1]. Ljungstrom air preheater berkontribusi sebesar 20% terhadap efektifitas boiler dan mengurangi 25% konsumsi bahan bakar [2]. Rotary air preheater menukarkan kalor menggunakan matriks sebagai elemen penyimpan panas berputar. Matriks dialiri oleh gas buang dan udara lingkungan pada saluran berbeda yang dibatasi oleh seal dan mengalir secara berlawanan [3]. Seal secara langsung membatasi permukaan matriks dengan aliran udara. Perubahan sudut seal berdampak pada efektifitas rotary air preheater. Jenis Seal yang memiliki nilai efektifitas tinggi pada rotary air preheater adalah annular sector-shaped [3].

## II. LANDASAN TEORI

### A. Regenerator

Regenerator memiliki beberapa parameter, antara lain massa matriks, kapasitas kalor matriks, kerapatan matriks dan kerapatan luas permukaan matriks .

$$C_r = M_w c_w \frac{N}{60} \quad (1)$$

$$M_w = A_r L \rho_r \quad (2)$$

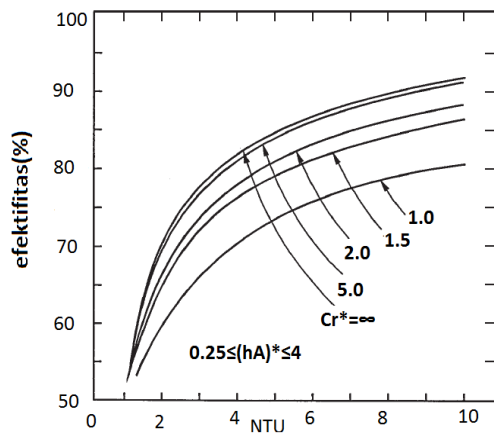
$$\beta = \frac{A_r}{V_m} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{d_h \cdot \beta}{4} \quad (4)$$

Keterangan :  $A_r$  : luas area rotor,  $m^2$   
 $C_r$  : kapasitas kalor matriks, W/K  
 $c_w$  : kalor spesifik matriks, J/kg.K  
 $d_h$  : diameter hidrolis, m  
 $L$  : kedalaman matriks, m  
 $M_w$  : massa matriks, kg  
 $N$  : kecepatan putar rotor, m/s  
 $V_m$  : volume matriks,  $m^3$   
 $\beta$  : kerapatan matriks,  $m^2/m^3$   
 $\sigma$  : rasio free frontal area terhadap frontal area

### B. Persamaan $\varepsilon$ -NTU

Evaluasi rotary air preheater menggunakan persamaan  $\varepsilon$ -NTU untuk counterflow regenerators. Gambar 1 merupakan grafik pengaruh NTU terhadap nilai efektifitas pada counterflow regenerator.



Gambar 1. Grafik efektifitas terhadap NTU [3]

$$\epsilon = \epsilon_{cf} \left[ 1 - \frac{1}{9(Cr^*)^{1.93}} \right] \tag{5}$$

$$\epsilon_{cf} = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C^*)]}{1 - C^* \exp[-NTU(1 - C^*)]} \tag{6}$$

Keterangan :  $\epsilon$  : efektifitas rotary air preheater  
 $\epsilon_{cf}$  : efektifitas counterflow

Pada Persamaan (6),  $Cr^*$  merupakan perbandingan nilai kapasitas perpindahan panas pada dinding matriks terhadap kapasitas perpindahan panas minimal yang terjadi. Pada Persamaan (7),  $C^*$  merupakan rasio kapasitas perpindahan panas minimal terhadap kapasitas perpindahan panas maksimal pada aliran udara panas maupun udara dingin.  $NTU$  merupakan Number Transfer of Unit yang dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$C = \dot{m}.c_p \tag{7}$$

$$Cr^* = \frac{C_r}{C_{min}} \tag{8}$$

$$NTU = \frac{1}{C_{min}} \left[ \frac{1}{\frac{1}{(hA)_h} + \frac{1}{(hA)_c}} \right] \tag{9}$$

Keterangan :  $C$  : kapasitas perpindahan panas, W/K

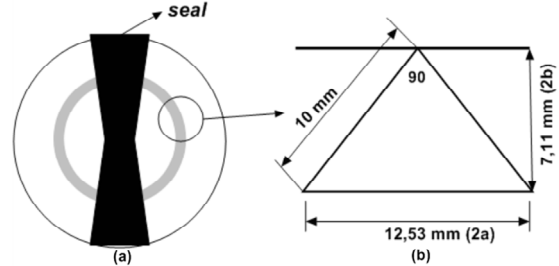
$C_{min}$  : kapasitas perpindahan panas minimal, W/K

$c_p$  : kalor spesifik, W/K

$h$  : koefisien perpindahan panas konveksi, W/m<sup>2</sup>.K

C. Seal

Seal berfungsi sebagai pembatas aliran panas dan aliran dingin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. (a) seal dan (b) geometri matriks

Pengaturan sudut seal mempengaruhi luasan area yang dialiri oleh udara panas maupun udara dingin.

$$\theta_t = \theta_c + \theta_h + \theta_r = 2\pi \tag{10}$$

$$A_{c/h} = \frac{\theta_{c/h}}{\theta_t} A \tag{11}$$

$$(hA)^* = \frac{hA(sisiC_{min})}{hA(sisiC_{max})} \tag{12}$$

Keterangan :  $A$  : luas permukaan penukar kalor, m<sup>2</sup>

$\theta_c$  : area sudut pada aliran dingin

$\theta_h$  : area sudut pada aliran panas

$\theta_r$  : area sudut seal

$\theta_t$  : sudut total

$\pi$  : konstanta, 3,14

D. Koefisien perpindahan panas konveksi

Analisa matriks didekati dengan persamaan aliran pada saluran.

$$h = \frac{Nu.k}{d_h} \tag{13}$$

$$d_h = \frac{4.ab}{a + \sqrt{a^2 + 4b^2}} \tag{14}$$

Keterangan :  $k$  : konduktivitas termal, W/m.K  
 $Nu$ : bilangan Nusselt

Pada pembahasan ini, nilai koefisien perpindahan panas konveksi yaitu pada sisi aliran udara panas dan sisi aliran udara dingin. Nilai koefisien konduksi didapat berdasarkan temperatur udara ambient yang mengalir.

E. Segitiga kecepatan

Kecepatan udara yang memasuki matriks dapat diperoleh dengan melakukan pendekatan segitiga kecepatan. Hal itu dikarenakan matriks yang terus berputar pada porosnya. Kecepatan abolut adalah kecepatan udara yang tegak lurus yang memasuki matriks. Sedangkan kecepatan relatif adalah resultan antara kecepatan abolut dan kecepatan putar matriks.

$$x = \sqrt{y^2 + u^2} \tag{15}$$

Keterangan :  $x$  : kecepatan relatif, m/s  
 $y$  : kecepatan absolut, m/s  
 $u$  : kecepatan putar diameter, m/s

**III. METODE PENELITIAN**

Perhitungan dilakukan dengan asumsi *steady state* dengan mengabaikan fenomena konduksi, radiasi dan *pressure drop*. Pada sistem dan lingkungan tidak terjadi proses perpindahan panas. Dimensi *rotary air preheater* yang dievaluasi memiliki diameter 505 mm dengan kedalaman matriks 200 mm. Analisa untuk mendapatkan nilai koefisien perpindahan panas konveksi dilakukan pada satu penampang matriks dengan jarak 277,5 mm dari poros rotor.

Sudut *seal* pada aliran panas ditetapkan sebesar 30°, sedangkan pada aliran dingin diubah-ubah mulai dari 0°, 30°, 60°, 90°, dan 120°. Variabel yang ditentukan dalam evaluasi *rotary air preheater* dapat dilihat pada Tabel 1. Variabel tersebut diatur guna mendapatkan nilai  $Cr^*$  yang tetap pada tiap pengaturan sudut *seal*.

**IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

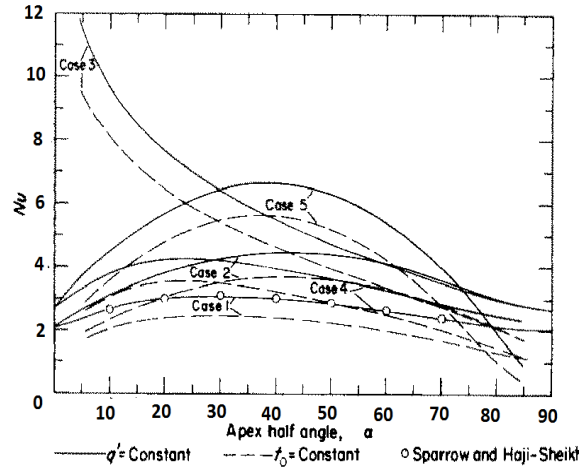
Dalam evaluasi *rotary air preheater* nilai kecepatan relatif sama dengan nilai kecepatan absolut. Berdasarkan Persamaan (16), kecepatan relatif memiliki nilai sama dengan kecepatan absolut yaitu 1,2 m/s. Pustaka [4] menyatakan bahwa bilangan Nusselt pada matriks sama dengan bilangan Nusselt yang terdapat pada aliran *ducting* satu penampang. Gambar 4 merupakan grafik bilangan Nusselt terhadap setengah nilai sudut pada segitiga. Matriks yang digunakan memiliki sudut 90° pada kondisi *case 1*, yaitu adiabatik dan *heat fluks* konstan dengan nilai bilangan Nusselt 2,47. Berdasarkan persamaan (11), nilai  $h$  yang didapatkan dengan bilangan nusselt 2,47 adalah 11,713 W/m<sup>2</sup>K pada sisi aliran udara panas dan 11,245 W/m<sup>2</sup>K pada sisi aliran udara dingin.

*Rotary air preheater* dalam penelitian ini memiliki karakteristik yang terdapat pada Tabel 2. Nilai kerapatan luas permukaan matriks 674,94 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, kapasitas kalor matriks 2,183 W/K, kalor spesifik matriks 1,017 J/Kg.K, dan massa matriks 10,738 kg.

Berdasarkan Persamaan (11) dan (12), sudut *seal* yang dirubah akan mempengaruhi luasan perpindahan panas pada matriks. Berdasarkan Persamaan (10), nilai luasan juga mempengaruhi nilai NTU. Hal tersebut disajikan pada Tabel 3, dapat diketahui bahwa nilai efektifitas akan menurun seiring dengan bertambah besarnya nilai sudut *seal* pada semua nilai  $Cr^*$ .

**Tabel 1.** Variabel pengaturan

Rotary air preheater	
Material matriks	Alumunium
Diameter matriks	505 mm
Kedalaman matriks	200 mm
Sudut <i>seal</i> aliran panas	30°
Sudut <i>seal</i> aliran dingin	0 – 120°
Batas kerja	
Kecepatan putar matriks	12 rpm
Laju massa	0,09 – 0,36 kg/s
Temperatur masuk aliran panas	47°C
Temperatur masuk aliran dingin	32°C



**Gambar 4.** Bilangan Nusselt pada penampang segitiga[5]

Gambar 7 merupakan grafik efektifitas terhadap perubahan nilai NTU pada  $Cr^*$  6, 12, dan 24. Pada grafik tersebut, nilai efektifitas pada  $Cr^*$  6, 12, dan 24 berhimpitan. Fenomena tersebut sesuai dengan teori pada Gambar 1. Nilai efektifitas yang berhimpitan terjadi pada nilai  $Cr^*$  lebih dari 5.

Pada Gambar 8, nilai efektifitas berbanding terbalik dengan nilai besar sudut *seal*. Sudut *seal* dengan nilai 0° memiliki nilai efektifitas lebih besar dibandingkan dengan sudut seal 120°. Hal tersebut dikarenakan dengan sudut seal 0° luas permukaan perpindahan kalor yang bersentuhan langsung dengan aliran udara lebih besar, sehingga semakin besar kalor yang dapat dipindahkan dari udara panas ke matriks maupun dari matriks menuju udara dingin.

Efektifitas *rotary air preheater* pada nilai  $Cr^*$  24 lebih besar dibandingkan pada nilai  $Cr^*$  6 dan 12 dengan besar sudut *seal* yang sama. Pada  $Cr^*$  24, kecepatan udara yang melewati *rotary air preheater* adalah 0,5 m/s pada aliran dingin dan 1 m/s pada aliran panas. Fluida dingin yang memiliki kecepatan rendah memiliki waktu bersinggungan dengan permukaan matriks lebih lama dibandingkan dengan fluida yang memiliki kecepatan aliran lebih besar, sehingga memiliki laju perpindahan kalor yang besar. Hal tersebut mengakibatkan kapasitas perpindahan kalor dari matriks menuju udara dingin lebih besar dibandingkan dengan kapasitas perpindahan kalor dari udara panas ke matriks,

**Tabel 2.** Karakteristik *rotary air preheater*

Rotary air preheater	
$Nu$	2,47
$d_{hydraulic}$	5,858 mm
$h$ aliran panas	11,713 W/m <sup>2</sup> K
$h$ aliran dingin	11,245 W/m <sup>2</sup> K
$A$	21,948 m <sup>2</sup>
$\beta$	674,94 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
$\sigma$	0,9412
$Cr^*$	0,806 W/K
$c_w$	1,017 J/kgK

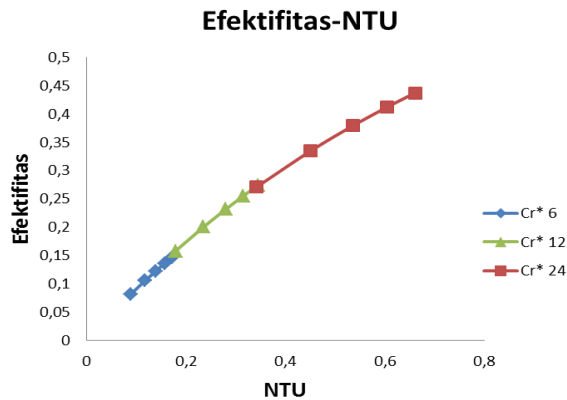
$M_w$  3,964 kg  
sehingga proses perpindahan kalor dapat terjadi terus menerus.

Tabel 3. Nilai Efektifitas

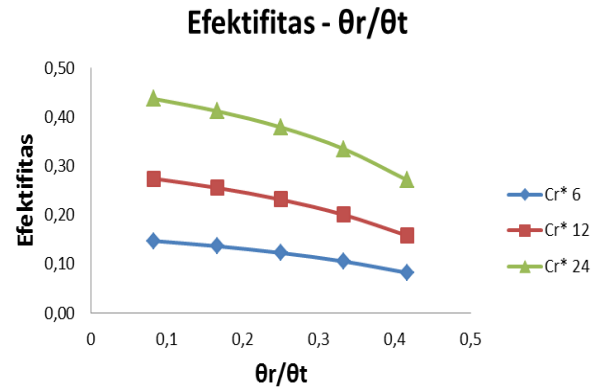
Sudut seal aliran dingin	Efektifitas pada $C_r^*$		
	6	12	24
0	0,145	0,273	0,437
30	0,134	0,254	0,411
60	0,121	0,230	0,379
90	0,103	0,199	0,334
120	0,081	0,157	0,271

Pada  $C_r^*$  12, kecepatan udara yang melewati rotary air preheater adalah 2 m/s pada aliran dingin dan 1 m/s pada aliran panas. Pada kondisi tersebut kalor yang dipindahkan dari udara panas menuju matriks lebih besar dibandingkan dengan kalor yang dipindahkan dari matriks menuju udara dingin. Hal tersebut mengakibatkan matriks menerima kalor sampai batas kapasitas perpindahan kalor sehingga tidak dapat menyerap kalor dari udara panas secara baik.

Pada  $C_r^*$  6, kecepatan udara yang melewati rotary air preheater pada aliran dingin dan panas adalah 2 m/s. Pada kecepatan aliran udara yang lebih tinggi maka proses perpindahan kalor pada udara panas menuju matriks maupun matriks menuju udara dingin akan menurun. Menurunnya laju perpindahan panas tersebut dikarenakan waktu bersinggungan antara matriks dan udara terjadi lebih cepat.



Gambar 7. Grafik efektifitas terhadap NTU



Gambar 8. Grafik efektifitas terhadap sudut seal

## V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang didapatkan berdasarkan analisa yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Pada nilai  $C_r^*$  6, 12, dan 24 grafik efektifitas terhadap perubahan NTU berhimpitan dan memiliki kecenderungan meningkat seiring semakin besarnya nilai NTU.
2. Efektifitas rotary air preheater dengan sudut seal  $0^\circ$  pada aliran dingin memiliki nilai tertinggi yaitu 43,7%.
3. Efektifitas rotary air preheater pada nilai  $C_r^*$  24 lebih besar dibandingkan dengan  $C_r^*$  12 dan 6.
4. Efektifitas rotary air preheater dapat ditingkatkan dengan cara menurunkan kecepatan aliran udara yang melewati matriks.

## PUSTAKA

- [1] Heselton and E. Kenneth, *Boiler Operation's Handbook*, The Fairmont press inc., 2005.
- [2] S. Eljšan, N. Stošić, A. Kovačević, and I. Buljubašić, Improvement of Energy Efficiency of Coal-fired Steam Boilers by Optimizing Working Parameters of Regenerative Air Preheaters, *RAME*, vol. 2, 2013, pp.30-32.
- [3] R.K. Shah and D.P. Sekulic, *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, John Wiley & Sons Inc., 2003.
- [4] P.C. Mioralli and M.M. Ganzarolli, Thermal analysis of a rotary regenerator with fixed pressure drop or fixed pumping power, *Applied Thermal Engineering* 52, 2013, pp. 187-197.
- [5] F.W. Schimt and M.E. Newell, Heat Transfer in Fully Developed Laminar Flow through Rectangular and Isosceles Triangular Ducts, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 10, 1967, pp. 1121-1123.