

# OPTIMASI TERMAL-KONSUMSI LISTRIK *HEAT EXCHANGER* BERBASIS KOMBINASI METODE BELL-DELAWARE DAN ALGORITMA *ANT COLONY*

<sup>1</sup>Reza Setiawan, <sup>2</sup>Rahmat Hidayat

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

<sup>1</sup>reza.setiawan@ft.unsika.ac.id, <sup>2</sup>rahmat.hidayat@staff.unsika.ac.id

## INFO ARTIKEL

Diterima : 25 September 2018

Direvisi : 30 September 2018

Disetujui : 12 Maret 2019

### Kata Kunci :

Optimasi, *Shell-and tube*, Metode Bell-Delaware, Algoritma *Ant Colony*, Penurunan total biaya

## ABSTRAK

Desain *shell-and-tube heat exchanger* yang banyak dibuat saat ini utamanya hanya memperhatikan performansi perpindahan panasnya saja. Padahal, perlu adanya perhatian kepada sisi biaya terutama biaya investasi pembuatan dan biaya operasional konsumsi listrik untuk pemompaan aliran fluida. Melalui penggunaan kombinasi metode Bell-Delaware dan metode numerik optimasi algoritma *Ant Colony* mampu mendapatkan desain terbaik yang tidak hanya dari sisi performansi perpindahan panasnya saja tetapi juga konsumsi energi listrik yang rendah. Pada penelitian ini dilakukan pembuatan *pseudocode* program perancangan desain *shell-and-tube heat exchanger* menggunakan metode Bell-Delaware dan optimasi algoritma *Ant Colony*. Kemudian dilakukan uji coba komputasi menggunakan data dua studi kasus desain *heat exchanger*. Dari hasil uji coba didapatkan penurunan biaya total sebesar 10,6% pada kasus pertama dengan fluida air-air dan 41,6% pada kasus kedua dengan fluida kerosin-minyak mentah dari data desain asli.

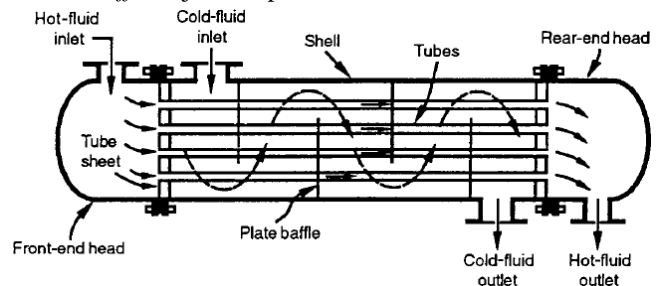
## I. PENDAHULUAN

*Heat exchanger* banyak digunakan pada pembangkit tenaga listrik dan industri proses termasuk Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bioenergi (PLTBio). Salah satu jenis *Heat Exchanger* yang paling banyak digunakan adalah tipe *shell-and-tube*. *Shell-and-tube* mentransfer panas dari satu aliran fluida ke aliran fluida lainnya tanpa mengalami kontak langsung atau bercampur. *Shell-and-tube* terdiri dari pipa-pipa yang ada di dalam pipa besar yang disusun dan diatur sedemikian rupa agar terjadi perpindahan panas secara efektif. Dalam mendesain *shell-and-tube* perlu dipahami dan diterapkan standar dalam pembuatannya. Standar pembuatan *shell-and-tube* yang secara luas digunakan adalah *Tubular Exchanger Manufacture Association (TEMA)*. Desain *shell-and-tube* dibuat berdasarkan karakteristik dan kondisi fluidanya. Desain *shell-and-tube* yang digunakan dapat bervariasi meskipun pada kondisi pemanfaatan yang sama dalam mentransfer panas. Karena kemungkinan mendapatkan banyaknya variasi desain berbeda yang muncul perlu diperhatikan tidak hanya pada sisi performansi transfer panasnya saja sebaiknya juga memperhatikan konsumsi energi listrik yang digunakan untuk pemompaan fluidanya. Hal ini dapat memberikan desain yang tidak hanya performannya yang baik tetapi juga mampu melakukan penghematan energi.

Disisi lain, perkembangan teknologi komputasi yang cepat memberikan kemudahan dalam pemecahan masalah optimasi yang kompleks sekalipun. Banyak algoritma optimasi yang muncul dan dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir. Salah satu algoritma optimasi yang dapat digunakan adalah *Ant Colony Optimization (ACO)*. Algoritma ACO memiliki performansi yang baik dalam menentukan solusi *problem* optimasi berbagai problem keteknikan. Namun algoritma *Ant Colony* belum dicoba untuk diterapkan pada optimasi desain termal- konsumsi listrik *shell-and-tube heat exchanger*. Di samping itu, dengan menggunakan metode perhitungan Bell-Delaware yang cukup akurat dan dipadukan dengan standar TEMA dapat menjadi

kombinasi optimasi yang menarik untuk diteliti dan diuji coba dalam mendapatkan desain terbaik *shell-and tube heat exchange*. Optimasi dengan tujuan transfer panas dan konsumsi listrik yang hemat juga belum mampu dilakukan oleh *software* komersil yang banyak digunakan pada saat ini. Penelitian ini berpotensi dapat menciptakan sebuah algoritma dengan kombinasi perhitungan yang mampu menghasilkan desain komponen *heat exchanger* yang hemat energi listrik dalam jumlah besar dan berkelanjutan.

Komponen dari *heat exchanger* dibedakan berdasarkan tipe dari *shell* dan *tube* masing-masing tetapi komponen dari *shell-and-tube heat exchanger* yakni *shell*, pipa-pipa, *front-end*, *rear-end* dan *baffles* dijelaskan pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1 Bagian-bagian *shell-and-tube heat exchanger* [1]

### 1.1. Perhitungan Desain *Shell-and-Tube Heat Exchanger*

#### 1.1.1. Overall Heat Transfer Coefficient

Sifat-sifat dari fluida diperlukan sebagai data dasar untuk membangun model matematika untuk desain *heat exchanger*. Sifat-sifat fluida memiliki informasi spesifik bergantung pada fluida yang digunakan dan temperaturnya. Sifat-sifat fluida seperti masa jenis, panas spesifik pada saat tekanan konstan, kekentalan dan konduktivitas termal dapat ditentukan menggunakan interpolasi tabel sifat-sifatnya. *Overall heat transfer coefficient* dapat ditentukan melalui persamaan berikut ini [2].

**OPTIMASI TERMAL-KONSUMSI LISTRIK *HEAT EXCHANGER* BERBASIS  
KOMBINASI METODE BELL-DELAWARE DAN ALGORITMA *ANT COLONY***

$$U = \left( \frac{1}{h_o} + R_{o,f} + \frac{d_o}{d_i h_i} + R_{i,f} \right)^{-1} \quad (1)$$

Untuk mendapatkan nilai U diperlukan mengetahui laju perpindahan panasnya. Laju perpindahan panas dihitung melalui temperatur dari kedua sisi fluida dan sifat-sifat fluidanya. Laju perpindahan panas dapat ditentukan melalui persamaan berikut ini [2].

$$Q = \dot{m} C_p (T_h - T_c) \quad (2)$$

Perbedaan temperatur *log-mean* diperlukan untuk mendapatkan nilai dari temperatur area permukaan dari bagian *shell* dan *tube*. Untuk mendapatkan nilai perbedaan temperatur *log-mean*, persamaan berikut dapat digunakan [2].

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{hi} - t_{c2}) - (T_{ho} - t_{ci})}{\ln \frac{(T_{hi} - t_{c2})}{(T_{ho} - t_{ci})}} \quad (3)$$

*Heat exchanger tipe shell-and-tube* tidak dapat melakukan laju perpindahan secara ideal. Perhatian terhadap faktor koreksi diperlukan pada tipe *multi-phase heat exchanger*. Faktor koreksi dapat ditentukan melalui persamaan berikut ini [3].

$$F = \frac{(\sqrt{1+R^2} \ln \frac{1-P}{1-PR})}{(R-1) \ln \left( \frac{2-P(R+1-\sqrt{1+R^2})}{2-P(R+1+\sqrt{1+R^2})} \right)} \quad (4)$$

### 1.1.2 Perpindahan Panas Pada Sisi Pipa

Persamaan untuk transfer panas pada sisi pipa memiliki banyak bentuk. Persamaan dapat dipilih secara tepat dengan memilih kondisi-kondisi persamaan yang tepat. Beberapa korelasi perpindahan panas pada sisi pipa untuk proses tanpa perubahan fasa dijelaskan berikut ini [4].

$$\text{Untuk } \left( \frac{Re_t Pr_t d_i}{L} \right)^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14} < 2$$

$$h_i = 3.66 K_t / d_i \quad (5)$$

$$\text{Untuk } \left( \frac{Re_t Pr_t d_i}{L} \right)^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14} > 2$$

Untuk  $Re_t < 2100$

$$h_i = (K_t/d_i) 1.86 \left( \frac{Re_t Pr_t d_i}{L} \right)^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (6)$$

Untuk  $2100 < Re_t < 10^4$

$$h_i = (K_t/d_i) 0.116 (Re_t^{2/3} - 125) Pr_t^{1/3} (1 + d_i/L)^{2/3} (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (7)$$

Untuk  $Re_t > 10^4$

$$h_i = (K_t/d_i) 0.027 Re_t^{0.8} Pr_t^{0.4} (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (8)$$

### 1.1.3 Perpindahan Panas Pada Sisi *Shell*

Perpindahan panas pada sisi *shell* untuk proses tanpa perubahan fasa dihitung menggunakan metode Bell-Delaware. Perhitungan menggunakan metode Bell-Delaware lebih kompleks tetapi cukup akurat. Metode Bell-Delaware membandingkan dengan susunan pipa ideal, memperhatikan kebocoran melalui kebocoran-kebocoran dan aliran *bypass*. Perhitungan metode Bell-Delaware memperhatikan faktor koreksi. Perpindahan panas pada sisi *shell* dapat ditemukan melalui persamaan berikut ini [1].

$$h_o = h_{id} J_c J_l J_b J_s J_r \quad (9)$$

Untuk mendapatkan nilai perpindahan panas pada sisi *shell*, dibutuhkan nilai faktor koreksi  $J_l, J_b, J_s$  dan  $J_r$ .  $J_c h_{id}$  adalah perpindahan panas ideal aliran *cross* pada sisi *shell*. Perpindahan panas ideal didapatkan dari aliran *cross* murni susunan pipa pada dekat garis tengah. Perpindahan panas ideal dapat dicari melalui persamaan berikut ini [1].

$$h_{id} = \frac{Nu_s k_s}{d_o} \left( \frac{\mu_s}{\mu_{sw}} \right)^{-0.14} \quad (10)$$

### 1.1.4 Kerugian Tekanan

Kerugian tekanan total adalah penjumlahan dari seluruh kerugian yang terjadi baik pada aliran pipa maupun *shell*. Kerugian tekanan pada sisi pipa umumnya karena faktor gesekan dan tekukan sepanjang pipa. Kerugian tekanan pada seluruh pipa dapat ditentukan menggunakan persamaan [5].

$$P_t = \frac{v_t^2}{2} \left( \frac{4f_t L}{d_i} + 2.5 \right) \eta_p \rho_t \quad (11)$$

Faktor gesekan *drag* untuk aliran turbulen dapat ditentukan dengan persamaan berikut ini [1].

$$f_t = 0.00128 + 0.1143 Re_t^{-0.311} \quad (12)$$

dan kerugian tekanan pada sisi *shell* dihitung menggunakan metode Bell-Delaware yang mengevaluasi dari aliran *cross* ujung *baffle* ke ujung *baffle* yang lain. Kerugian tekanan pada sisi *shell* umumnya terjadi karena pembatas dari *baffle* dan gesekan sepanjang pipa pada sisi *shell*. Kerugian tekanan pada sisi *shell* adalah penjumlahan dari kerugian tekanan dari bagian pusat, area pintu masuk aliran dan pintu keluar masuk dengan memperhatikan beberapa faktor koreksi. Kerugian tekanan pada sisi *shell* dapat ditentukan melalui persamaan berikut ini [1].

$$\Delta P_s = [(N_b - 1) \Delta P_{b,id} R_b + N_b \Delta P_{w,id}] R_l + 2 \Delta P_{b,id} \left( 1 + \frac{N_{r,cw}}{N_{r,cc}} \right) R_b R_s \quad (13)$$

### 1.1.5 Perhitungan Estimasi Biaya

Estimasi biaya dari sebuah *heat exchanger* didapatkan dari penjumlahan biaya investasi dan operasi. Total biaya dapat diekspresikan melalui persamaan berikut ini [6].

$$C_{tot} = C_{inv} + C_{op} \quad (14)$$

# OPTIMASI TERMAL-KONSUMSI LISTRIK *HEAT EXCHANGER* BERBASIS KOMBINASI METODE BELL-DELAWARE DAN ALGORITMA *ANT COLONY*

Biaya investasi digunakan sebagai biaya awal untuk pembuatan *shell-and-tube heat exchanger*. Biaya tersebut secara khusus dapat ditentukan untuk beberapa material berbeda pada sisi *shell* dan pipa dengan persamaan berikut ini [5], [7].

Untuk Material (*Shell: Carbon Steel* dan Pipa: *Carbon Steel*)

$$C_{in} = 6411 + 329.7A^{0.80} \quad (15)$$

Untuk Material (*Shell: Carbon Steel* dan Pipa: *Stainless Steel*)

$$C_{in} = 7731 + 372A^{0.85} \quad (16)$$

Untuk Material (*Shell: Stainless Steel* dan Pipa: *Stainless Steel*)

$$C_{in} = 8000 + 259.2A^{0.91} \quad (17)$$

Untuk Material (*Shell: Carbon Steel* dan Pipa: Titanium)

$$C_{in} = 12821.9 + 562A^{0.92} \quad (18)$$

Untuk Material (*Shell: Titanium* dan Pipa: Titanium)

$$C_{in} = 16027 + 640A^{0.93} \quad (19)$$

Dan biaya operasional telah digunakan untuk proses operasi selama penggunaan *shell-and-tube heat exchanger*. Sesungguhnya, biaya operasional digunakan untuk tenaga pemompaan karena kerugian tekanan pada sisi *shell* dan pipa. Biaya operasional dihitung dengan memperhatikan laju inflasi dan efisiensi pompa. Biaya operasional karena efek laju inflasi selama penggunaan dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut ini [8].

$$C_{op} = \sum_{k=1}^{ny} \frac{C_o}{(1+\lambda)^k} \quad (20)$$

Biaya operasional untuk biaya tahun terjadi dapat dihitung dengan memperhatikan lama jam operasional. Biaya tersebut dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut ini [8].

$$C_o = P K_{el} \tau \quad (21)$$

Dimana tenaga pemompaan memperhatikan efisiensi pompa dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini [8].

$$P = \left( \frac{\dot{m}_t \Delta P_t}{\rho_t} + \frac{\dot{m}_s \Delta P_s}{\rho_s} \right) \frac{1}{\eta} \quad (22)$$

## 2.1 Optimasi *Ant Colony*

Optimasi *Ant Colony* (ACO) terinspirasi dari meniru kebiasaan koloni serangga untuk mencari lokasi makanan dalam hal ini diaibarkan nilai minimum dari suatu fungsi. ACO dapat digunakan untuk memecahkan masalah-masalah kombinasi kompleks. Pencarian seluruh kombinasi dapat dilakukan dengan komputasi. ACO menyediakan sebuah pendekatan heuristik untuk *problem-problem*. *Problem-problem* yang pernah dipecahkan ACO seperti *problem* pengaturan perjalanan *sales*, *problem* penjadwalan proyek, *problem* pengaturan lalu-lintas kendaraan yang efektif dan efisien dan sebagainya [9].

Konstruksi solusi dimulai dengan memilih secara acak titik-titik pencarian oleh serangga. Lokasi yang telah disinggahi berwarna abu-abu sedangkan garis putus-putus merupakan jalur yang dipilih. Probabilitas terhadap pilihan yang berbeda diberikan pada kemungkinan-kemungkinan jalur menuju lokasi tersebut. Setelah tahap konstruksi kedua serangga telah memilih jalur dan

lokasi yang dipilih. Dalam menyelesaikan permasalahan yang terjadi sesungguhnya ACO melakukan mekanisme cara kerja algoritma. *Problem* sesungguhnya mula-mula diurai menjadi dua bagian besar yakni komponen solusi dan model *pheromone*. Setelah itu dibangun sebuah algoritma untuk menyelesaikan masalah tersebut diproses dengan metode iterasi secara terus-menerus hingga mendapatkan solusi yang diharapkan [10].

## II. METODE PENELITIAN

### 2.1 Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ini ada empat, keempat variabel tersebut dibatasi pada rentang tertentu. Keempat variabel tersebut dijelaskan pada Tabel I berikut ini.

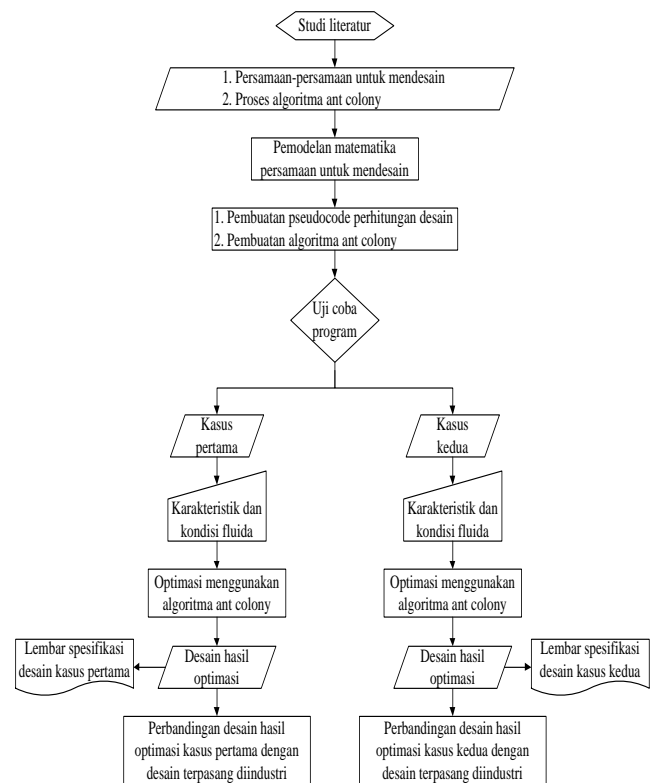
TABEL I  
VARIABEL PENELITIAN

Variabel	Nilai Batas Bawah (m)	Nilai Batas Atas (m)
Diameter luar pipa ( $d_o$ )	0.01905	0.051
Panjang pipa (L)	1	10
Rasio <i>baffle cut</i> terhadap diameter dalam <i>shell</i>	0.15	0.45
Rasio <i>baffle spacing</i> terhadap diameter dalam <i>shell</i>	0.2	0.8

Nilai batas bawah dan atas pada diameter luar pipa merujuk pada standar *British Wire Gauge* (BWG) yang secara umum digunakan sebagai penyusun pipa *heat exchanger*. Nilai batas bawah dan atas pada panjang pipa dipilih berdasarkan minimalisasi terjadinya vibrasi karena tekanan fluida yang tinggi. Nilai batas atas dan bawah rasio dipilih berdasarkan standar TEMA.

### 2.2 Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian disajikan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 1 Diagram alir penelitian

**OPTIMASI TERMAL-KONSUMSI LISTRIK *HEAT EXCHANGER* BERBASIS  
KOMBINASI METODE BELL-DELAWARE DAN ALGORITMA *ANT COLONY***

2.3. Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

2.3.1. Teknik Pengumpulan Data

Secara umum data dikelompokkan menjadi dua, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer adalah data yang dikumpulkan secara langsung melalui pengamatan, pencatatan, pengukuran, maupun wawancara langsung dengan narasumber terpercaya. Sedangkan data sekunder adalah data yang diperoleh dari hasil pencatatan, pengukuran, penyelidikan, maupun kegiatan-kegiatan lain yang dilakukan oleh pihak lain atau instansi-instansi yang terkait termasuk juga di dalamnya adalah laporan-laporan penyelidikan atau laporan kegiatan dari suatu studi instansi yang ada.

2.3.2. Teknik Analisis Data

Analisis dilakukan dengan cara membandingkan data hasil optimasi menggunakan kombinasi metode Bell-Delaware dan algoritma *Ant Colony* yaitu lembar spesifikasi desain dengan lembar spesifikasi *shell-and-tube heat exchanger* yang telah terpasang di industri. Perbandingan dilakukan pada masing-masing kedua kasus desain optimasi. Data perbandingan tersebut dianalisis dari segi konstruksi *shell-and-tube* dan fungsi objektif dari optimasi yaitu performansi transfer panas dan konsumsi energi listrik masing-masing. Kesimpulan analisis ini didapatkan apakah metode optimasi dapat memberikan solusi desain yang lebih baik tidak hanya memperhatikan performansi transfer panasnya saja tetapi juga *shell-and-tube* yang hemat konsumsi energi listrik untuk pemompaan fluida.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kode Algoritma

3.1.1. Bagian-Bagian Algoritma

Program untuk kalkulasi desain termal dari *shell-and-tube heat exchanger* dibagi ke dalam dua belas bagian utama. Masing-masing bagian mendefinisikan persamaan-persamaan untuk masing-masing proses perhitungan dari *shell-and-tube heat exchanger*. Bagian utama dari program dan konten dari kode perhitungan didalam masing-masing bagian dijelaskan pada Tabel II berikut ini.

TABEL II  
PROSES ALGORITMA PERHITUNGAN

Bagian	Uraian
1	Mendefinisikan fungsi objektif $y$
2	Mendefinisikan kondisi operasi dan material <i>process</i> , material, $m_b, m_s, T_{hb}, T_{ho}, t_{co}, T_w$
3	Mendefinisikan sifat-sifat termofisik $\rho_b, \rho_s, \rho_{sg}, \mu_b, \mu_s, \mu_{sg}, k_b, k_s, C_{pb}, C_{ps}, R_f$ dan $R_g$
4	Mengasumsikan koefisien perpindahan panas, $U_o$
5	Mendefinisikan kondisi pada operasi $\eta, K_{eb}, t_{co}, \lambda, h_{lg}, P_s, P_c, x_g$
6	Mendefinisikan desain <i>shell-and-tube</i> $N, N_p, Type, \theta, g, C_1, F_b$ dan $h_{TP}$
7	Menghitung transfer panas pada bagian pipa $R, P, X, F, \Delta T_{lm}, Q, A_o, q, N_t, D_{otl}, \delta_{sb}, \delta_{bb}, DS, Lc, \theta_b, D_{ctl}, N_{lpp}, G_t, v_t, v_s, A_{o,lt}, Re_t, h_{lg}, Co, Bo, Fr, f, f_2, h_{lo}$ dan $h_i$
8	Menghitung transfer panas pada bagian <i>shell</i> $f_t, f_s, L_{bc}, L_{bi}, L_{bo}, N_b, A_{o,cs}, N_{f,cc}, N_{f,cw}, G_s, Re_s, b_3, b_4, a, b, \Delta P_{w,id}, f_{id}, \Delta P_{b,id}, \theta_{ctl}, F_w, A_{o,bp}, A_{o,tb}, A_{o,sb}, F_c, r_s, r_{lm}, r_b, N_{ss}^+, L_i^+, L_o^+, C, n, N_{rc}, J_c, J_b, J_s, J_r, D, n', P, R_b, R_l, R_s, C_{id}, N_{us}, h_{id}, Re_{lg}, R, H, x_v, G', h_f, Nu_f, Nu, F_p, h_{NB1}, F_b, BR, F_c, h_{NB}$ dan $h_o$
9	Menghitung penurunan tekanan pada bagian pipa, $\Delta P_t$

10	Menghitung penurunan tekanan pada bagian <i>shell</i> , $\Delta P_s$
11	Menghitung estimasi biaya $C_{in}, C_o, C_{op}$ dan $C_{tot}$
12	Mendefinisikan konstrain, $U$ dan $T_w$

3.1.2. Konstrain dari Algoritma

Program memiliki dua konstrain. Konstrain-konstrain dibuat untuk mendapatkan hasil yang benar dari desain termal *shell-and-tube heat exchanger* dari iterasi proses. Untuk mendapatkan hasil yang beda, fungsi penalti digunakan. Fungsi penalti *diset* untuk menjadi batasan dari proses pencarian melalui fungsi multi objek jika hasil kalkulasi tidak berkaitan dengan konstrain algoritma. Faktor pengali dari fungsi penalti *diset* pada setiap konstrain algoritma. Fungsi penalti diletakan pada baris akhir program utama desain termal *shell-and-tube heat exchanger* untuk mengevaluasi solusi dari iterasi proses. Dua konstrain pada program berkaitan dengan koefisien perpindahan panas menyeluruh dan temperatur permukaan dari bagian pipa. Konstrain pertama adalah harus diterimanya nilai batasan koefisien perpindahan panas menyeluruh. Hal ini berdasarkan prosedur mendesain *shell-and-tube heat exchanger*. Nilai dari proses iterasi diterima jika nilai koefisien perpindahan panas menyeluruh hasil perhitungan program sama atau hampir sama dengan asumsi koefisien perpindahan panas menyeluruhnya. Karena perhitungan komputasi proses dapat menghasilkan sedikit nilai yang lebih kecil atau lebih besar dari nilai koefisien perpindahan panas menyeluruhnya. Perbedaan tersebut dapat diatur lebih kecil. Konstrain pertama dijelaskan pada pertidaksamaan berikut ini.

$$0 \leq U - U_o \leq 1$$

Konstrain pertama diatur agar mendapatkan luas penampang yang sedikit lebih besar pada desain dibandingkan luas penampang yang diperlukan sesungguhnya untuk mentransfer panas. Konstrain kedua mengandung arti bahwa temperatur dinding hasil program komputasi harus sama atau hampir sama dengan asumsi temperatur dinding dari pipa. Konstrain kedua adalah temperatur dinding permukaan pipa. Konstrain kedua dijelaskan pada pertidaksamaan berikut ini.

$$0 \leq T_{wo} - T_w \leq 0.3$$

3.1.3. *Setting* Parameter pada Algoritma *Ant Colony*

Program dijalankan menggunakan beberapa parameter seting pada setiap proses optimasi. Masing-masing proses optimasi memiliki karakteristik *setting* parameter. *Setting* parameter diperlukan untuk mendapatkan hasil terbaik dari proses optimasi. Proses *trial* dan *error* telah banyak dilakukan untuk mendapatkan kombinasi terbaik dari beberapa parameter algoritma *Ant Colony*. Parameter *setting* dengan hasil terbaik didapatkan dengan ukuran populasi 10, ukuran sampel 40; faktor intensifikasi 0,5; Rasio jarak deviasi 1 dan maximum jumlah iterasi 1000 kali.



**OPTIMASI TERMAL-KONSUMSI LISTRIK *HEAT EXCHANGER* BERBASIS  
KOMBINASI METODE BELL-DELAWARE DAN ALGORITMA *ANT COLONY***

3.2 Implementasi Program Optimasi

3.2.1 Studi Kasus Pertama: Air dan Air

Studi kasus pertama adalah *shell-and-tube heat exchanger* dengan fluida air pada bagian *shell* dan fluida air pada bagian pipa. Keduanya baik *shell* maupun pipa terbuat dari bahan *stainless steel*. Biaya energi listrik untuk *shell-and-tube heat exchanger* adalah Rp. 1.191 /kWh dan suku bunga sebesar 10% per tahun [11]. Jam kerja dari sebuah *shell-and-tube heat exchanger* adalah 7,000 jam/tahun dan durasi penggunaannya adalah selama 10 tahun dengan efisiensi pompa 70% [5].

Data dari sifat-sifat fluida dan termofisik diketahui pada kedua sisinya. Data dari masing-masing aliran yang diketahui adalah laju aliran masa, temperatur masuk dan keluar, masa jenis, viskositas, konduktivitas termal, panas spesifik dan tahanan *fouling*. Data dari masing-masing aliran dijelaskan pada Tabel III berikut ini.

TABEL III

STUDI KASUS PERTAMA: DATA SIFAT-SIFAT FLUIDA DAN TERMOFISIK								
	$\dot{m}$	$T_h$	$T_c$	$\rho$	$\mu \times 10^3$	$k \times 10^2$	$C_p$	$R_f \times 10^4$
	(kg/s)	(°C)	(°C)	(kg/m <sup>3</sup> )	(Pa.s)	(W/mK)	(J/kg)	(m <sup>2</sup> K/W)
Bagian <i>Shell</i> : Air	22,07	33,9	29,4	995	80	62	4.180	17
Bagian <i>Pipa</i> : Air	35,31	23,9	26,7	999	92	62	4.180	17

Desain asli dari studi kasus pertama menggunakan susunan segi tiga pada pipa, *shell* dengan satu kali laluan, pipa dengan dua kali laluan, jarak antar pipa sama dengan 1,25 kali dari diameter luar pipa dan *baffle spacing* sama dengan 0,79 dari diameter dalam *shell* [5]. Solusi optimal desain dan perbandingan hasil program optimasi dan data asli dijelaskan pada bagian berikut ini.

3.2.1.1 Solusi Optimal Desain

Optimasi dari studi kasus pertama dilakukan dengan menggunakan algoritma *Ant Colony*. Perbandingan hasil dari desain parameter menggunakan optimasi algoritma *Ant Colony* dan data asli desain dijelaskan pada Tabel IV berikut ini.

TABEL IV

PERBANDINGAN DESAIN DARI STUDI KASUS PERTAMA DAN DATA ASLI DESAIN		
Parameter	Data Asli [5]	<i>Ant Colony</i>
Tube layout (°)	Triangular	30
N ( <i>Shell</i> )	1	1
N <sub>p</sub> ( <i>Passes</i> )	2	2
N <sub>t</sub> ( <i>Tubes</i> )	213	324
d <sub>i</sub> (m)	0,019	0,01905
d <sub>o</sub> (m)	0,0152	0,01619
D <sub>s</sub> (m)	0,410	0,487
P <sub>t</sub> (m)	0,023	0,02381
L <sub>tc</sub> (m)	0,082	0,573
L (m)	5,904	8,120
L <sub>c</sub> (m)	-	0,146
A (m <sup>2</sup> )	75,3	526
$\Delta T_{LM}$ (K)	6,31	6,31
F	0,94	0,94
v <sub>t</sub> (m/s)	1,6	0,53
v <sub>s</sub> (m/s)	3,3	0,40
G <sub>t</sub> (kg/m <sup>2</sup> s)	1,610	528
G <sub>s</sub> (kg/m <sup>2</sup> s)	3,326	398
Pr <sub>t</sub>	6,2	6,2
Pr <sub>s</sub>	5,4	5,4
Re <sub>t</sub>	28,335	9,295
Re <sub>s</sub>	79,194	9,480
Q (W)	664,181	66,4180
h <sub>t</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	7,822	2,588
h <sub>o</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	6,330	1,766

U (W/m <sup>2</sup> K)	1.480	212
$\Delta P_t$ (Pa)	29.165	7.765
$\Delta P_s$ (Pa)	672.265	23.155
P (W)	22.774	1.125
C <sub>ti</sub> (Rp.)	385.149.367	1.552.700.000
C <sub>o</sub> (Rp.)	189.873.018	70.747.000
C <sub>tot</sub> (Rp.)	1.816.341.139	1.623.400.000

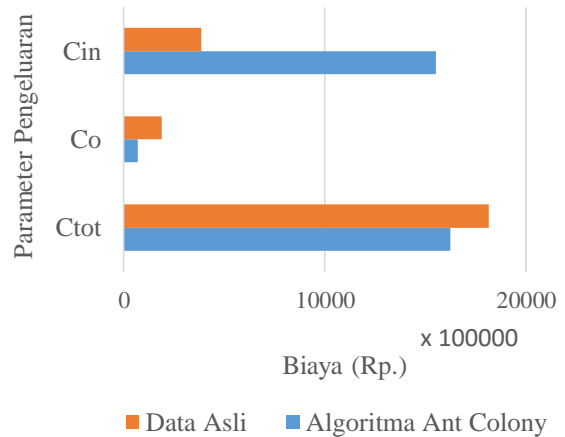
Hasil menunjukkan bahwa algoritma *Ant Colony* memiliki perbedaan hasil parameter desain jika dibandingkan dengan data asli desain. Diskusi tentang hasil-hasil dari kasus tersebut dijelaskan pada bagian selanjutnya.

3.2.1.2 Hasil dan Diskusi

Proses optimasi menggunakan algoritma *Ant Colony* telah sukses meminimalisasi total biaya untuk *shell-and-tube heat exchanger* pada studi kasus pertama. Algoritma *Ant Colony* telah mampu menurunkan biaya total dari *shell-and-tube heat exchanger* 10,6% dari total biaya dari data asli, seperti terlihat pada Tabel IV.

Biaya total menurun pada studi kasus pertama utamanya disebabkan oleh penurunan biaya total operasional. Pada kasus pertama ini, biaya operasional total setelah menggunakan algoritma *Ant Colony* menurun 62,7% jika dibandingkan dengan biaya operasional total desain asli sedangkan biaya total investasi meningkat 303% dari data desain asli. Gambar 3 merepresentasikan hasil perbandingan penggunaan algoritma *Ant Colony* dan data asli desain.

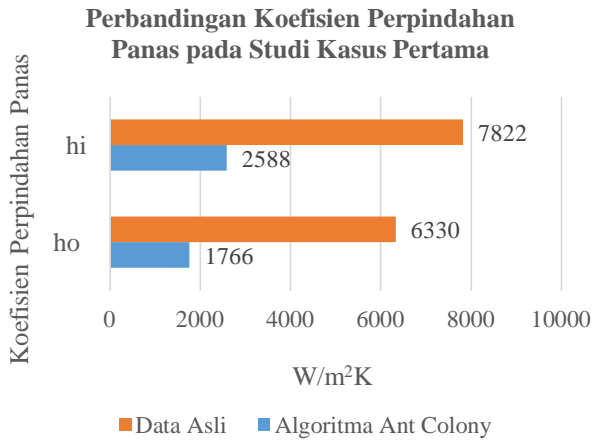
**Perbandingan Desain dari Studi Kasus Pertama**



Gambar 3 Perbandingan biaya dari studi kasus

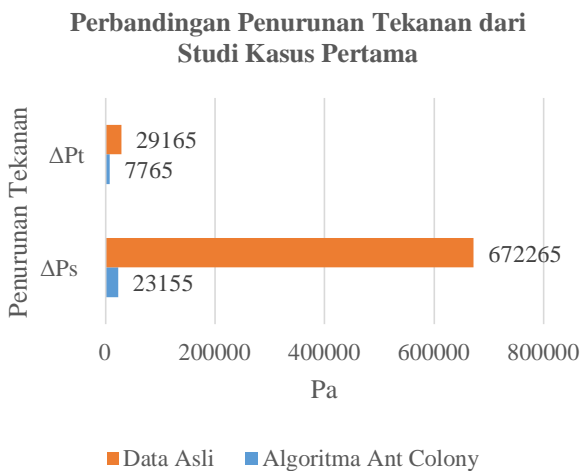
Nilai dari koefisien perpindahan panas menyeluruh, bagian pipa dan bagian *shell* cenderung menurun dari data desain asli. Untuk perpindahan panas pada sisi pipa, hasil menunjukkan penurunan sebesar 66,9% dari data desain asli. Untuk perpindahan panas pada sisi *shell*, hasil menunjukkan juga terjadi penurunan sebesar 72,1% dari data desain asli. Perpindahan panas secara menyeluruh menurun jika dibandingkan dengan data desain asli disebabkan oleh area *heat transfer*-nya lebih besar dibandingkan data desain asli seperti terlihat pada Gambar 4 berikut ini.

**OPTIMASI TERMAL-KONSUMSI LISTRIK *HEAT EXCHANGER* BERBASIS  
KOMBINASI METODE BELL-DELAWARE DAN ALGORITMA *ANT COLONY***



Gambar 4 Perbandingan koefisien perpindahan panas pada studi kasus pertama

Penurunan tekanan menurun baik pada sisi pipa maupun sisi *shell*. Penurunan tekanan pada sisi pipa menurun sebesar 73,4% jika dibandingkan dengan data asli desain dan penurunan tekanan pada sisi *shell* menurun sebesar 96,6% dari data asli desain. Seperti terlihat pada Gambar 5 berikut ini, hal ini terjadi karena kecepatan aliran fluida pada pipa menurun dan *baffle spacing* lebih panjang dari data desain asli.



Gambar 5 Perbandingan penurunan tekanan dari studi kasus pertama

### 3.2.2 Studi Kasus Kedua: Kerosin dan Minyak Mentah

Studi kasus kedua adalah *shell-and-tube heat exchanger* dengan fluida kerosin pada bagian *shell* dan fluida minyak mentah pada bagian pipa. Keduanya baik *shell* maupun pipa terbuat dari bahan *stainless steel*. Biaya energi listrik untuk *shell-and-tube heat exchanger* adalah Rp. 1.191 /kWh dan suku bunga sebesar 10% per tahun [11]. Jam kerja dari sebuah *shell-and-tube heat exchanger* adalah 7,000 jam/tahun dan durasi penggunaannya adalah selama 10 tahun dengan efisiensi pompa 70% [5].

Data dari sifat-sifat fluida dan termofisik diketahui pada kedua sisinya. Data dari masing-masing aliran yang diketahui adalah laju aliran masa, temperatur masuk dan keluar, masa jenis, viskositas, konduktivitas termal, panas spesifik dan tahanan *fouling*. Data dari masing-masing aliran dijelaskan pada Tabel V berikut ini.

TABEL V  
STUDI KASUS KEDUA: DATA SIFAT-SIFAT FLUIDA DAN TERMOFISIK [5]

	$\dot{m}$ (kg/s)	$T_h$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu \times 10^5$ (Pa.s)	$k \times 10^2$ (W/mK)	$C_p$ (J/kg)	$R_f \times 10^4$ (m <sup>2</sup> K/W)
Bagian <i>Shell</i> :	5,52	199,0	93,3	850	40	13	2.470	61
Kerosin								
Bagian <i>Pipa</i> :	18,80	37,8	76,7	995	358	13	2.050	61
Minyak Mentah								

Desain asli dari studi kasus pertama menggunakan susunan segi empat pada pipa, *shell* dengan satu kali laluan, pipa dengan dua kali laluan, jarak antar pipa sama dengan 1,25 kali dari diameter luar pipa dan *baffle spacing* sama dengan 0,24 dari diameter dalam *shell* [5]. Solusi optimal desain dan perbandingan hasil program optimasi dan data asli dijelaskan pada bagian berikut ini.

#### 3.2.2.1 Solusi Optimal Desain

Optimasi dari studi kasus pertama dilakukan dengan menggunakan algoritma *Ant Colony*. Perbandingan hasil dari desain parameter menggunakan optimasi algoritma *Ant Colony* dan data asli desain dijelaskan pada Tabel VI berikut ini. Hasil menunjukkan bahwa algoritma *Ant Colony* memiliki perbedaan hasil parameter desain jika dibandingkan dengan data asli desain. Diskusi tentang hasil-hasil dari kasus tersebut dijelaskan pada bagian selanjutnya.

TABEL VI  
PERBANDINGAN DESAIN DARI STUDI KASUS PERTAMA DAN DATA ASLI DESAIN

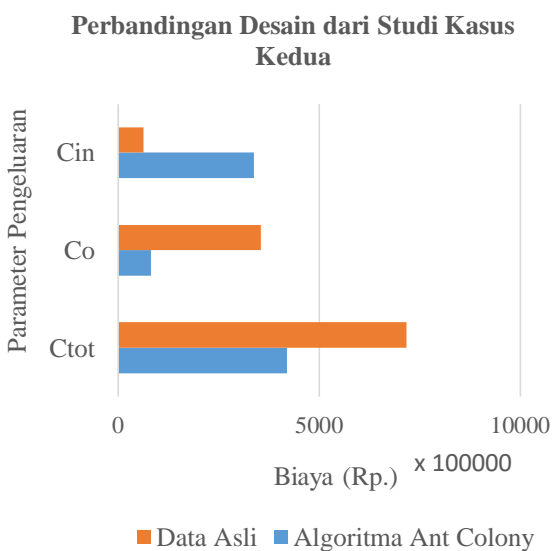
Parameter	Data Asli [5]	<i>Ant Colony</i>
Tube layout (°)	Square	30
N ( <i>Shell</i> )	1	1
N <sub>p</sub> ( <i>Passes</i> )	4	2
N <sub>t</sub> ( <i>Tubes</i> )	158	158
d <sub>o</sub> (m)	0,025	0,01905
d <sub>i</sub> (m)	0,020	0,01619
D <sub>s</sub> (m)	0,539	0,388
P <sub>t</sub> (m)	0,031	0,02381
L <sub>bc</sub> (m)	0,127	0,150
L (m)	-	0,085
L <sub>c</sub> (m)	5,983	5,770
A (m <sup>2</sup> )	74,21	65,04
ΔT <sub>LM</sub> (K)	84,55	84,55
F	0,89	0,89
v <sub>i</sub> (m/s)	1,523	0,974
v <sub>s</sub> (m/s)	0,483	0,566
G <sub>t</sub> (kg/m <sup>2</sup> s)	1.515,4	969,4
G <sub>s</sub> (kg/m <sup>2</sup> s)	410,6	481,3
Pr <sub>t</sub>	5,6	5,6
Pr <sub>s</sub>	7,6	7,6
Re <sub>t</sub>	8.468	43.845
Re <sub>s</sub>	25.344	61.000
Q (W)	1.441.156	1.441.156
h <sub>t</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	1.086	2.239,8
h <sub>s</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	978,9	706,2
U (W/m <sup>2</sup> K)	268,1	305,9
ΔP <sub>t</sub> (Pa)	53.195	9.624
ΔP <sub>s</sub> (Pa)	25.344	14.930
P (W)	1.671	398
C <sub>n</sub> (Rp.)	62.918.114	337.475.579
C <sub>o</sub> (Rp.)	354.123.794	81.623.152
C <sub>tot</sub> (Rp.)	717.041.909	419.098.731

**OPTIMASI TERMAL-KONSUMSI LISTRIK *HEAT EXCHANGER* BERBASIS  
KOMBINASI METODE BELL-DELAWARE DAN ALGORITMA *ANT COLONY***

3.2.2.2 Hasil dan Diskusi

Proses optimasi menggunakan algoritma *Ant Colony* telah sukses meminimalisasi total biaya untuk *shell-and-tube heat exchanger* pada studi kasus pertama. Algoritma *Ant Colony* telah mampu menurunkan biaya total dari *shell-and-tube heat exchanger* 41,6% dari total biaya dari data asli, seperti terlihat pada Tabel VI.

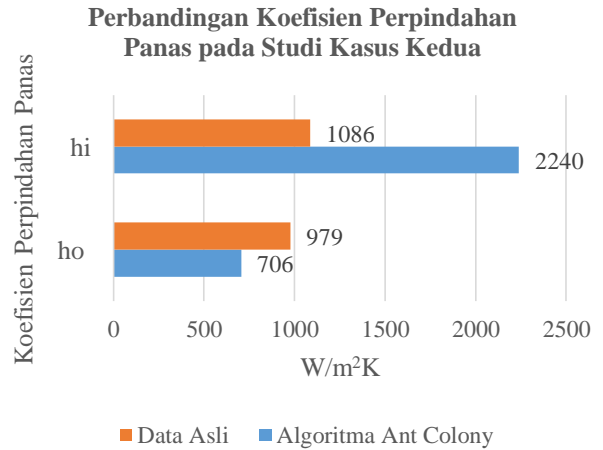
Biaya total menurun pada studi kasus pertama utamanya disebabkan oleh penurunan biaya total operasional. Pada kasus pertama ini, biaya total setelah menggunakan algoritma *Ant Colony* menurun 77,0% jika dibandingkan dengan biaya operasional total sedangkan biaya total investasi meningkat 436,4% dari data desain asli. Gambar 6 merepresentasikan hasil perbandingan penggunaan algoritma *Ant Colony* dan data asli desain.



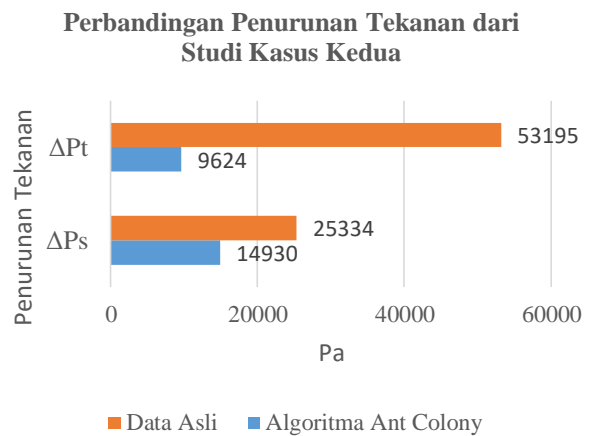
Gambar 6 Perbandingan biaya dari studi kasus kedua

Nilai dari koefisien perpindahan panas menyeluruh, bagian pipa dan bagian *shell* cenderung menurun dari data desain asli. Untuk perpindahan panas pada sisi pipa, hasil menunjukkan peningkatan sebesar 106,3% dari data desain asli. Untuk perpindahan panas pada sisi *shell*, hasil menunjukkan juga terjadi penurunan sebesar 27,9% dari data desain asli. Perpindahan panas secara menyeluruh menurun jika dibandingkan dengan data desain asli disebabkan oleh area *heat transfer*-nya lebih besar dibandingkan data desain asli seperti terlihat pada Gambar 7. berikut ini.

Penurunan tekanan menurun baik pada sisi pipa maupun sisi *shell*. Penurunan tekanan pada sisi pipa menurun sebesar 81,9% jika dibandingkan dengan data asli desain dan penurunan tekanan pada sisi *shell* menurun sebesar 41,1% dari data asli desain. Seperti terlihat pada Gambar 8 berikut ini, hal ini terjadi karena kecepatan aliran fluida pada pipa menurun dan *baffle spacing* lebih panjang dari data desain asli.



Gambar 7 Perbandingan koefisien perpindahan panas pada studi kasus kedua



Gambar 8 Perbandingan penurunan tekanan dari studi kasus kedua

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan yang dapat ditarik adalah mengumpulkan persamaan yang cocok untuk proses komputasi telah dilakukan, proses komputasi tidak memerlukan tabel atau grafik untuk mendefinisikan parameter-parameter dalam mendesain *shell-and-tube heat exchanger*. Seluruh proses perhitungan telah dilakukan dengan menggunakan persamaan-persamaan yang dapat digunakan pada kasus yang luas. Proses perhitungan dapat mendesain *shell-and-tube heat exchanger* baik pada susunan pipa 30°, 45° dan 90°. Estimasi dana untuk *shell-and-tube heat exchanger* dapat diselesaikan untuk material bahan baja karbon, baja tahan karat (*stainless steel*), titanium dan kombinasi material-material tersebut. Pembuatan algoritma kode pemrograman yang efisien untuk perhitungan dan berkaitan dengan standar TEMA telah dilakukan, kondisi algoritma pada proses komputasi telah bekerja dengan baik dan telah mampu mendefinisikan standar TEMA kedalam algoritma seperti standar pipa BWG, 1,25 nilai minimum celah antar pipa terhadap rasio diameter luar pipa dan maksimum 80% *baffle spacing* terhadap rasio diameter dalam bagian *shell*. Parameter seting untuk algoritma *Ant Colony* telah ditemukan untuk mendapatkan harga total minimum dari desain *shell-and-tube heat exchanger*. Algoritma *Ant Colony*, harga total

## OPTIMASI TERMAL-KONSUMSI LISTRIK *HEAT EXCHANGER* BERBASIS KOMBINASI METODE BELL-DELAWARE DAN ALGORITMA *ANT COLONY*

yang paling kecil didapat dengan menggunakan *setting* parameter Program MATLAB telah diaplikasikan untuk menyelesaikan dua desain termal *shell-and-tube heat exchanger*. Kasus pertama adalah sebuah *shell-and-tube heat exchanger* dengan fluida air dan air, sedangkan kasus kedua adalah sebuah *shell-and-tube heat exchanger* dengan fluida kerosin dan minyak. Hasil menunjukkan bahwa program algoritma *Ant Colony* dapat mereduksi total biaya sebesar 10,6% dari desain awal pada kasus pertama dan mereduksi total biaya sebesar 41,6% dari desain awal pada kasus kedua.

[11] Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral, Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 28 Tahun 2016 Tentang Tarif Tenaga Listrik yang Disediakan oleh PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero), Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral. 2016.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi, Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan atas dukungan dana penelitian melalui program Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat tahun 2018 dengan skema Penelitian Dosen Pemula dengan Surat Keputusan No. 092/SP2H/LT/DRPM/2018 dan Perjanjian/Kontrak No. 091/SP2H/UN64.10/LT/2018.

### DAFTAR RUJUKAN

- [1] Shah, Ramesh K. dan Sekulic, Dušan P., *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [2] Cao, Eduardo, *Heat Transfer in Process Engineering*, New York : John Wiley & Sons, 2009.
- [3] Hewitt, G. F., L. Shires, George dan Bott, T. R., *Process Heat Transfer*, New York : Begell House, 2000.
- [4] Sadeghzaden, H., Ehyaei, M. A. dan Rosen, M. A., *Techno-economic Optimization of a Shell and Tube Heat Exchanger by Genetic and Particle Swarm Algorithm*, *Energy Conversion and Management*, Vol. 93, 2015, Hal. 84- 91.
- [5] Yang, Jie, Oh, Sun-ryung dan Liu, Wei., *Optimization of Shell-and-tube Heat Exchangers using a General Design Approach Motivated by Constructal Theory*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 77, 2014, Hal. 1144-1154.
- [6] Caputo, Antonio C, Pelagagge, Pacifico M dan Salini, Paolo, *Heat Exchanger Design Based on Economic Optimisation*, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, 2008, Hal. 1151-1159.
- [7] Taal, Marcel, dkk., *Cost Estimation and Energy Price Forecasts for Economic Evaluation of Retrofit Projects*, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, 2013, Hal. 1819-1835.
- [8] Sanaye, Sepehr dan Hajabdollahi, Hassan, *Multi-objective Optimization of Shell and Tube Heat Exchangers*, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, 2010, Hal. 1937-1945. ISSN 1359-4311.
- [9] Aora, Rajesh Kumar, *Optimization Algorithms and Applications*, Florida: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015.
- [10] Blum, Cristian, *Ant Colony Optimization: Introduction and recent Trends*, *Physics of Life Reviews*, Vol. 2, 2005, Hal. 353-373.