

OPTIMASI DESAIN ALAT PENUKAR KALOR TIPE SHELL AND TUBE PADA PROSES PRODUKSI CHILI SAUCE

Agus Subeno^{*}), Yogi Sirodz Gaos^{**})

PT. Kratu Nusantara, Bogor, Jawa Barat, Indonesia

Fakultas Teknik, Universitas Ibn Khaldun Bogor, Jawa Barat, Indonesia

e-mail: subeno_agus@yahoo.co.id

ABSTRAK

Untuk memenuhi kebutuhan chilli sauce yang terus meningkat, diperlukan penambahan alat penukar kalor untuk memproduksinya. Perancangan alat penukar kalor yang baru ini dilakukan terlebih dahulu untuk mengurangi biaya produksi dibandingkan langsung membeli alat penukar kalor yang sudah jadi. Optimasi desain APK shell and tube ini dilakukan dengan metode full factorial menggunakan empat variable bebas dan tiga level eksperimen, sehingga diperoleh 81 kali hitungan eksperimen. Pada tahap selanjutnya hasil hitungan manual yang optimum dilakukan validasi dengan software HTRI versi 7 berlisensi. Hasil optimasi full factorial didapatkan nilai koefisien perpindahan kalor bersih (U_c) dan desain (U_d) tertinggi masing-masing sebesar 44,93 W/m^2K dan 55.45 W/m^2K dengan luas permukaan APK sebesar 4.25 m^2 , diameter luar pipa 0,0127 m, susunan pipa 45°, jarak antara pipa PR adalah 2.4 dan panjang pipa 2,6 m. Alat penukar kalor shell and tube ini memiliki kapasitas maksimum memindahkan panas sebesar 13.77 kW dengan laju aliran massa chilli sauce sebesar 0,167 kg/detik dengan batasan overdesign sebesar 25%. Hasil validasi HTRI diperoleh penyimpangan kontruksi dengan luas area perpindahan panas sebesar 11,05% dan koefisien perpindahan panas sebesar 14,8-22,8% lebih rendah dari data hitungan manual.

Kata Kunci: Alat penukar kalor shell & tube, full factorial dan HTRI.

ABSTRACT

To full fill the requiring of the chilli sauce, additional heat exchangers are needed to produce it. The design of the new heat exchanger is done first to reduce production costs compared to directly buying a ready heat exchanger. STHE optimize design was performed by full factorial method by using four independent variables by three levels design calculation so we get 81 data results. The optimum design has been performed validation with HTRI software version 7 licensed. The result of full factorial optimization showed the highest value of cleanest heat transfer coefficient (U_c), design heat transfer coefficient (U_d) and overall heat transfer area are 44,93 W/m^2K (U_c), 55.45 W/m^2K (U_d) and 4.25 m^2 respectively. It's have outer diameter pipe 0,0127 m, pipe arrangement 45°, pitch ratio 2.4 and pipe length 2,6 m. The BES STHE duty is about 13.77 kW and 0,167 kg/s for chilli sauce flow rate with an overdesign limit of 25%. The deviation result of STHE construction with heat transfer surface area 11,05% and heat transfer coefficient are 14,8-22,8% respectively higher than HTRI validation .

Key words: shell & tube heat exchanger, full factorial and HTRI

PENDAHULUAN

Kebutuhan kelengkapan rasa dalam konsumsi makanan saat ini sangat beraneka ragam pelengkap rasa, salah satunya adalah kebutuhan *chili sauce* (saus sambal) yang terus meningkat di konsumen seluruh wilayah di Indonesia. Di dalam proses pemasakan *chili sauce* tersebut diperlukan suatu Alat penukar kalor yang berfungsi untuk meningkatkan suhu sampai dengan suhu masak yang sesuai dengan standar kebutuhan. Dalam penelitian ini kajian

perencanaan dan perancangan alat penukar kalor dilakukan di plant pemasakan chili sauce. Plant ini merupakan plant yang digunakan untuk proses pemasakan / pemanasan bahan chili sauce yang sudah di campur dengan komponen bahan bahan yang sudah ditentukan dengan mengalirkan bahan tersebut melalui suatu alat penukar kalor. Pada proses pemasakan ini sumber panas yang dimanfaatkan untuk memanaskan bahan bahan chili sauce yaitu fluida uap yang dihasilkan dari ketel uap. Uap mengalir pada alur alur yang ada pada PHE (Plate Heat Exchanger), begitu juga dengan bahan campuran chili sauce tersebut

mengalir pada alur sisi yang lain. Tingginya frekwensi produksi berhenti karena kebocoran antar seal/gasket pada PHE tersebut, sehingga diperlukan suatu optimasi desain pemilihan Alat penukar kalor yang tepat untuk mengganti Alat penukar kalor tipe *PHE* tersebut ke alat penukar kalor yang mudah perawatan dan tahan lama terhadap tekanan aliran fluida. Alat penukar kalor yang mempunyai syarat ketahanan terhadap temperatur tinggi mudah dalam perawatan dan memerlukan biaya rendah perawatan yang ditentukan berdasarkan fungsi diantaranya adalah Alat penukar kalor jenis *shell and tube*, alat penukar kalor jenis *double pipe* dan alat penukar kalor jenis *plate and frame*, berdasarkan kriteria tersebut pemanas yang cocok untuk menggantikan *PHE (Plate Heat Exchanger)* pemasak chili sauce adalah Alat penukar kalor jenis *shell and tube*.

Berdasarkan identifikasi peneliti lakukan bagaimana membuat desain Alat penukar kalor tipe *shell and tube* yang berbasis pada optimasi pada proses produksi chili sauce yang kinerjanya sama dengan *PHE (Plate Heat Exchanger)* untuk menghasilkan chili sauce sesuai standar? Dan diharapkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Mampu mengoptimalkan Alat penukar kalor tipe *shell and tube* untuk memanaskan/memasak fluida dengan menggunakan metoda full factorial.
- Mendapatkan kinerja Alat penukar kalor *shell and tube* yang sama dengan alat penukar kalor yang sudah terpasang yaitu alat penukar kalor *PHE (Plate Heat Exchanger)*.
- Melakukan validasi hasil perhitungan pada proses optimasi desain dengan menggunakan program HTRI.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di PT X yang berlokasi di kawasan industri Jababeka I Cikarang, Kab. Bekasi. Pengamatan sistem alat penukar kalor yang terpasang yang digunakan untuk proses produksi *chili sauce* dengan menggunakan *PHE (Plate Heat Exchanger)*.

Pada proses pemasakan di *PHE* ini proses pemasakan produk dengan mengalirkan produk melalui pelat pelat HE, suhu produk yang masuk ke *PHE* dari tangki *buffer* sekitar 36°C. Produk dari *buffer* dialirkan oleh pompa I menuju ke pemasakan I, suhu produk pada pemasakan I adalah 60°C, proses ini bertujuan untuk memudahkan proses pemvakuman di *deaerator tank* untuk menghilangkan buih atau busa yang ada di dalam produk. Selanjutnya produk masuk ke pemasakan II yang bertujuan untuk mematangkan produk sampai dengan suhu 98-

102°C, kemudian produk melewati blok *PHE* untuk proses pendinginan sebelum di tampung di *storage tank* untuk proses pengemasan. Pada proses di *PHE* ini suhu uap yang masuk ke dalam *PHE* adalah 152°C dengan tekanan uap sebesar 5 bar.

Perbaikan pada model sesuai dengan data terbaru yang didapat setelah diyakini model yang dibuat cukup layak, mulai dilakukan prediksi atas kelayakan ekonomis dengan biaya menggunakan teknologi saat ini.

Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Ketel uap tekanan rendah sebagai alat yang menghasilkan uap yang digunakan untuk memanaskan / memasak *chili sauce*.
- PHE (Plate Heat Exchanger)*
Alat penukar kalor yang digunakan saat ini untuk memindahkan panas dari fluida panas (uap dari boiler /ketel uap) ke fluida dingin (*chili sauce*), ataupun proses sebaliknya.
- Pedoman Tekanan / *Pressure Gauge / Manometer*
Suatu alat untuk menunjukkan besarnya tekanan dari suatu medium yang berbeda dalam suatu ruangan atau suatu aliran yang bertekanan, dan sebagai medium dapat berupa uap, gas dan cairan. Mempunyai akurasi yang tepat dengan tekanan yang diukur, mempunyai angka-angka yang jelas dan mudah dibaca.
- Temperature control panel* lengkap dengan *thermocouple* tipe PT 100 digunakan untuk mengontrol suhu *chili sauce* yang dipanaskan mengalir pada *PHE*

Data data Hasil Pengamatan

Tabel 1. Variabel bebas dan level eksperimen

No.	Properties Chilli Sauce	Reference Standards	Units	Test Results			
				14.-2-19	19-02-19	05-03-19	Average
1	Temp. Inlet	36 - 37	°C	36	36,5	36,8	36,4
2	Temp. Outlet	59 - 61	°C	60	60,2	60,1	60,1
3	Water contents	76 - 79	%	77,9	77,5	78,3	77,9
4	Density inlet	720 - 730	Kg.m ³	724	726	725,2	725,067
5	Density outlet	740 - 760	Kg.m ³	750	752	750,6	750,867
6	Viscosity Inlet	1800 - 1900	Ns.m ⁻¹	1852	1872	1898	1874
7	Viscosity Outlet	930 - 970	Ns.m ⁻¹	938	955	954	949
Steam							
1	Steam Inlet		°C	153	152	151	152
2	Steam Outlet		°C	81	80	79	80

Dengan mengacu pada data-data di atas maka matrik variable bebas dengan tiga level eksperimen adalah sebagai berikut:

Tabel 2. Variabel bebas dan level eksperimen

Kode	Variabel bebas	Simbol	Level I	Level II	Level III
A	Diameter luar pipa dalam m	d	0,0127	0,01905	0,0254
B	Panjang pipa dalam m	L	2,6	2,8	3
C	Jarak antar pipa/ Pitch tube ratio)	P _r	1,5	2	2,4
D	Susunan pipa (Tube layout pattera)	T _l	30°	45°	60°

Data awal kondisi operasi alat penukar kalor yang dipergunakan sebagai berikut:

- Temperatur uap masuk ($t_{h,i}$) 152 °C
= 425 °K
- Temperatur uap keluar ($t_{h,o}$) 80 °C
= 353 °K
- Temperatur *chilli sauce* masuk ($T_{c,i}$) 36 °C
= 309 °K
- Temperatur *chilli sauce* keluar ($T_{c,o}$) 60 °C
= 333 °K

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Manual Alat Penukar Kalor *Shell and Tube*

Pada perhitungan manual APK *shell and tube* ini, digunakan salah satu kombinasi dari variabel bebas untuk dilakukan optimasi. Variabel bebas yang digunakan untuk perhitungan desain secara manual ini adalah sebagai berikut:

- Diameter luar pipa dalam 0,01905 m
- Panjang pipa dalam 2,6 m
- Jarak antar pipa/ Pitch tube ratio) 2,4
- Susunan pipa (*Tube layout pattern*) 45°

Kombinasi variabel bebas lainnya akan dihitung menggunakan desain eksperimen *full factorial*.

Faktor koreksi konfigurasi APK *Shell and Tube*

Mengacu data input tidak tetap pada suhu fluidanya, maka profil suhu fluida panas dan fluida dingin adalah berikut :

Tabel 3. suhu pada kedua fluida

Fluida panas (K)	Parameter	Fluida dingin (K)	Perbedaan
425	Suhu tinggi	333	92
353	Suhu rendah	309	44
72	Perbedaan	24	48

Matrik Optimasi *Full Factorial*

Dalam optimasi desain perhitungan pada alat penukar kalor *shell and tube* pada pemasakan tingkat awal *chilli sauce* ini metode yang digunakan dalam menganalisis penelitian ini adalah metode eksperimen *full factorial*. Metode ini telah digunakan secara luas di perusahaan manufaktur. Rancangan eksperimen yang paling sering digunakan adalah desain *full factorial* pada dua tingkat dan tiga tingkat. Desain faktorial memungkinkan percobaan untuk mempelajari respon pada efek gabungan faktor.

Analisis *full factorial* akan dilakukan terhadap semua variable yang akan dioptimasi. Variabel tersebut meliputi, diameter pipa, panjang pipa, jumlah pipa dan susunan pipa. Tujuan dari percobaan faktorial adalah untuk melihat interaksi antara variable yang akan dioptimasi sehingga diketahui variable akan saling sinergi terhadap respons (positif), dan variabel yang akan menghambat kinerja dari variabel lain (negatif), Menurut *Jiju Antony*, banyaknya jumlah percobaan untuk mempelajari hubungan faktor **k** pada level **n** adalah **n^k**. Pada penelitian ini dilakukan dengan kombinasi 4 variabel bebas dan 3 level. Desain eksperimen *full factorial* yang dipakai adalah *Matrix Full Factorial* dengan jumlah eksperimen yang diperlukan adalah 81 ($3^4=81$) percobaan [14]. Dari data perhitungan ini akan dilakukan identifikasi kombinasi variabel yang paling optimum yaitu :

- Dengan luas permukaan *tube* kecil tapi mempunyai nilai U paling besar.
- Mempunyai nilai U_d lebih besar dari U_c
- Dengan nilai overdesign tidak lebih dari 25%

Analisis Perhitungan yang Optimum

Tujuan optimasi dalam Penelitian ini adalah untuk mendapatkan konfigurasi yang maksimum dari alat penukar kalor tipe *shell and tube*. Perbandingan karakteristik fluida panas dan fluida dingin berdasarkan data input dari desain yang di hitung secara manual adalah sebagai berikut:

Tabel 4. Perbandingan karakteristik fluida

No	Properti Fluida	Symbol	Desain Perhitungan Manual		Unit
			Chilli Sauce	Steam	
1	Laju aliran massa	m	0,167	0,042642734	kg/s
2	Suhu fluida masuk	Ti	309	425	K
3	Suhu fluida keluar	To	333	353	K
4	Massa jenis fluida masuk	pi	725,067	0,051008	kg/m ³
5	Massa jenis fluida keluar	po	750,867	0,06147	kg/m ³
6	Massa jenis fluida pada suhu T	p	737,967	0,056239	kg/m ³
7	Panas jenis fluida masuk	cpi	3450	3075	J/kgK
8	Panas jenis fluida keluar	cpo	2219	4193	J/kgK
9	Panas jenis fluida pada suhu T	cp	2790	3634	J/kgK
10	Koefisien konduksi bahan pipa masuk	ki	0,388	0,1192	W/mK
11	Koefisien konduksi bahan pipa keluar	ko	0,59	0,1172	W/mK
12	Koefisien konduksi bahan pipa pada suhu T	k	0,489	0,1178	W/mK
13	Viskositas kinematik fluida masuk	µi	1,874	0,0001812	kg/s,m
14	Viskositas kinematik fluida keluar	µo	0,949	0,0003084	kg/s,m
15	Viskositas kinematik fluida pada suhu T	µ	1,411	0,0002448	kg/s,m

Nilai yang didapatkan untuk konstruksi shell dan tube berdasarkan desain perhitungan manual dengan perhitungan optimasi menggunakan full factorial adalah sebagai berikut:

Tabel 5. Kontruksi shell & tube hitungan manual

No	Data	Symbol	Konstruksi Shell		Unit
			Nilai Perhitungan manual	Nilai Optimum Full factorial	
1	Diameter Shell	Ds	0,334	0,260	m
2	bundle cross flow area at the shell	As	0,021	0,014	m ²
3	The equivalent diameter	De	0,121	0,080	m

No	Data	Symbol	Konstruksi Tube		Unit
			Nilai Perhitungan manual	Nilai Optimum Full factorial	
1	Diameter dalam tube	di	0,01656	0,01021	m
2	Diameter luar tube	do	0,01905	0,0127	m
3	Panjang tube	L	2,6	2,6	m
4	Jumlah tube	Nt	41	40	pcs
5	Baffle Spacing	B	0,16250	0,1625	m
6	Jarak antar tube	C	0,02667	0,01778	m
7	Tube layout constanta	CL	1	1	
8	Constainta Tube Pass	CTP	0,903	0,903	
9	Konduktifitas thermal SUS 316	k	14,6	14,6	W/mK
10	tube pitch	Pt	0,04572	0,03048	m
11	Tube Pitch Ratio	PR	2,4	2,4	
12	Luas penampang tube	Ac	0,00022	0,000082	m ²
13	Luas area perpindahan panas	Ao	6,22	4,25	m ²

Berdasarkan perhitungan optimasi full factorial maka kinerja APK shell dan tubemengacu dari data rancangan hitungan manual adalah sebagai berikut:

Tabel 6. Kinerja APK hitungan manual

No	Data	Symbol	Kinerja APK		Unit
			Nilai Perhitungan manual	Nilai Optimum Full factorial	
1	Koefisien perpan menyeluruh	U	37,186	55,447	W/m ² K
2	Beda suhu rata rata Logaritmik	ΔT _{LMTD}	65,076	65,076	K
3	Perpindahan Panas aktual	Q _{act}	13,515	13,770	KW
4	Perpindahan panas Chilli sauce	Q _{cold}	11,158	11,158	KW
5	Perpindahan panas Steam	Q _{hot}	11,158	11,158	KW
			20,6	20,6	%
6	Number Transfer unit	NTU	0,197	0,201	
			19,7	20,106	%

Evaluasi Koefisien Perpindahan Panas dan Over Design

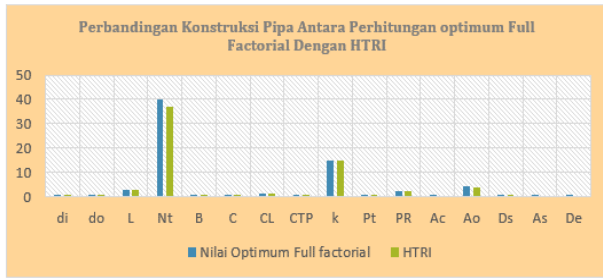
Perhitungan full factorial untuk perhitungan overdesign yang besar (lebih dari 25%) dibutuhkan dimensi yang besar juga, tentunya hal ini berakibat pada biaya fabrikasi yang lebih mahal, sehingga desain alat penukar shell and tube ini dibatasi overdesainnya antara 10% hingga 25%. Artinya perbandingan Ud dengan Uc harus berada pada nilai 110% sampai dengan 125%.

Tabel 7. iterasi yang OD>25%

No	Iterasi	OD [m]	PR -	L m	CL [Degree]	Ao m ²	Nt (unit)	Overdesign
1	2	0,01905	2,00	3,00	45	8,08	45	76%
2	18	0,01270	2,00	2,60	45	4,25	40	48%
3	19	0,02540	2,00	2,60	45	8,92	44	55%
4	23	0,01905	2,40	3,00	45	7,36	42	35%
5	27	0,02540	1,50	2,80	45	10,50	48	123%
6	29	0,01905	2,00	2,80	45	7,70	46	55%
7	33	0,01270	1,50	2,60	45	4,25	40	103%
8	37	0,01270	2,00	3,00	45	4,90	40	62%
9	38	0,01905	1,50	2,60	45	6,69	44	112%
10	40	0,02540	1,50	2,60	45	9,33	46	121%
11	41	0,01270	1,50	3,00	45	4,90	40	125%
12	44	0,02540	2,40	3,00	45	9,81	42	35%
13	46	0,01270	2,40	3,00	45	4,90	40	35%
14	49	0,01905	1,50	2,80	45	8,54	51	139%
15	55	0,01270	1,50	2,80	45	4,58	40	98%
16	58	0,02540	1,50	3,00	45	11,01	47	149%
17	60	0,02540	2,00	2,80	45	11,39	52	69%
18	68	0,01905	1,50	3,00	45	8,79	49	163%
19	71	0,01905	2,00	2,60	45	7,78	50	76%
20	72	0,02540	2,00	3,00	45	11,72	50	89%
21	81	0,01270	2,00	2,80	45	4,58	40	40%

Dalam penelitian ini dipilih Alat penukar kalor optimum pada iterasi no, 11 dengan pertimbangan pada kondisi desain ini memiliki nilai Ud dan Uc tertinggi dengan kondisi over design masih dalam batasan yang disyaratkan yaitu antara 10%-25%.Iterasi nomor 11 akan dijadikan data dalam melakukan validasi dengan software HTRI.

Validasi hasil perhitungan menggunakan HTRI



Gambar 1. Grafik perbandingan konstruksi pipa antara perhitungan optimum full factorial dengan HTRI

Berdasarkan data-data di atas dapat diidentifikasi bahwa data rancangan nomor 11 merupakan desain yang paling optimum dengan nilai *over design* 23.41%. Dan diperoleh nilai koefisien perpindahan kalor bersih (U_c) yang paling tinggi yaitu sebesar 44,929 W/m²K dan koefisien perpindahan kalor desain (U_d) 55,227 W/m²K yang memiliki luas permukaan Alat penukar kalor sebesar 4,25 m². Variabel bebas pada iterasi rancangan ke-11 memiliki diameter luar pipa 0,0127 m; bentuk susunan pipa 45 dengan nilai CL 1; jarak antara pipa PR adalah 2,4 dan panjang pipa 2,6 m.

Pada desain optimum diketahui adanya keseimbangan energi antara kemampuan pindah panas Alat penukar kalor, energi panas dilepas oleh *steam*, dan energi panas diserap *Chili sauce* adalah sama $Q_d=Q_c$. Keseimbangan energi tercapai, dimana diameter pipa sebesar 12,7 mm, tebal pipa 1,254 mm dengan jumlah pipa 40 batang dan panjang pipa masing-masing 2,6 m. Material pipayang digunakan adalah jenis *SUS 316* dengan konduktivitas termal material 14,6 W/m.K. Rancangan konstanta sudut antara pipa CL sebesar 1,0 yang mewakili sudut 45°, jarak antar dinding pipa C sebesar 17,76 mm dan jarak antar pusat pipa P_t sebesar 30,48 mm, sehingga diperoleh luas netto aliran cangkang A_s sebesar 0,01445 m². Pada sisi *shell* (cangkang) diketahui laju aliran *steam* sebesar 0,043 kg/s yang melewati luas netto cangkang A_s suhu *steam* masuk yang memiliki suhu 185°C, mampu menghasilkan suhu *chilli sauce* keluar sebesar 60 °C. Alat penukar kalor *BES STHE 1-3 pass* ini memiliki kapasitas maksimum sebesar 13,77 kW.

Dari parameter-parameter hasil perhitungan manual dengan metoda pemilihan menggunakan metode *full factorial* 4 variabel bebas 3 level dan hasil yang diperoleh dari perhitungan menggunakan *software* HTRI, perbedaannya tidak signifikan dan dari kemampuan memenuhi kebutuhan perpindahan panas dengan temperatur yang bervariasi sehingga dapat disimpulkan bahwa optimasi desain Alat penukar kalor dengan menggunakan 4 variabel

bebas 3 level dapat digunakan dalam mendesain Alat penukar kalor pada proses produksi *chili sauce* tersebut.

KESIMPULAN

1. Tipe Alat penukar kalor yang desain secara optimum untuk proses pemasakan *chilli sauce* ini adalah tipe *shell and tube BES 1-3 tube phase* dengan fluida dingin (*chili sauce*) pada sisi *tube* dan fluida panas (*steam*) pada sisi *shell*.
2. Berdasarkan hasil eksperimen menggunakan metode *full factorial* dapat diidentifikasi bahwa data rancangan nomor 11 merupakan desain yang paling optimum. Pada data rancangan nomor 11 tersebut diperoleh nilai koefisien perpindahan kalor (U_d) yang paling optimum yaitu sebesar 55,447 W/m²K dan koefisien perpindahan kalor bersih (U_c) 44,929 W/m²K dengan catatan bahwa nilai U_d harus lebih besar daripada nilai U_c , luas permukaan adalah 4,25 m². Dengan diameter luar pipa 0,0127 m; bentuk susunan pipa 45 dengan nilai CL 1,0; mempunyai *Pitch Ratio* (PR) sebesar 2,4 dan panjang pipa 2,6 m dan nilai *over design* tidak lebih dari 25%.
3. Terdapat perbedaan kinerja Alat penukar kalor data rancangan dengan data HTRI disebabkan adanya penurunan log perubahan suhu rata-rata penukar panas (ΔT_{LMTD}) data HTRI sebesar 62,6°C atau mencapai 3,8% lebih rendah dari data rancangan.
4. Terdapat perbedaan antara luas area perpindahan panas dari data rancangan dengan data HTRI. Perbedaan hitungan manual dengan data HTRI sebesar 14,8 – 22,8 %, hal ini dikarenakan adanya pengurangan luas permukaan total akibat penambahan *buffle* yang di perhitungan manual tidak diperhitungkan.
5. Dari parameter-parameter hasil perhitungan manual dengan metoda pemilihan menggunakan metode *full factorial* 4 variabel bebas 3 level dan hasil yang diperoleh dari perhitungan menggunakan *software* HTRI, bahwa optimasi desain Alat penukar kalor dengan menggunakan 4 variabel bebas 3 level dapat digunakan dalam mendesain alat penukar kalor pada proses produksi *chili sauce*.
6. Penambahan Alat penukar kalor *shell and tube* pada proses produksi *chili sauce* mendapatkan penghematan dari analisis kelayakan investasi, didapat nilai modal kembali setelah 1,449 tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. P. Dagang, "Riset saham harian," no. september, pp. 1–7, 2018.
- [2] Y. Haseli, I. Dincer, and G. F. Naterer, "Optimum temperatures in a shell and tube condenser with respect to exergy," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 51, no. 9–10, pp. 2462–2470, 2008.
- [3] S. Fettaka, J. Thibault, and Y. Gupta, "Design of shell-and-tube heat exchangers using multiobjective optimization," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 60, no. 1, pp. 343–354, 2013.
- [4] D. K. Mohanty, "Application of firefly algorithm for design optimization of a shell and tube heat exchanger from economic point of view," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 102, pp. 228–238, 2016.
- [5] I. Bizzy and R. Setiadi, "Studi Perhitungan Alat Penukar Kalor Tipe Shell Tube Dengan Program Heat Transfer Research Inch. (HTRI)," *Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 67–77, 2013.
- [6] S. Bahri, "Optimasi Cooler Jenis Shell And Tube Untuk Pendinginan Slurry Pada Proses Pembuatan Autoclaved Aerated," vol. 6, no. 2, pp. 88–97.
- [7] A. L. H. Costa and E. M. Queiroz, "Design optimization of shell-and-tube heat exchangers," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 28, no. 14–15, pp. 1798–1805, 2008.
- [8] M. Y. Kholifudin, "Metode Grafik; Solusi Problematika Azaz Black," *J. Ris. dan Kaji. Pendidik. Fis.*, vol. 4, no. 2, p. 54, 2018.
- [9] E. Mumford and E. Mumford, *Heat Transfer A practical approach second edition*, Yunus A. Cengel. 2018.
- [10] J. P. Holman, "Heat Transfer," *McGraw-Hill*. p. 702, 1986.
- [11] Tubular Exchanger Manufacturers Association Inc, "Standard of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, Ninth Edition," 2007.
- [12] M. Asadi, Y. Song, B. Sunden, and G. Xie, "Economic optimization design of shell-and-tube heat exchangers by a cuckoo-search-algorithm," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 73, no. 1, pp. 1030–1038, 2014.
- [13] D. Arepally, S. R. Ravula, G. K. Malik, and V. R. Kamidi, "Mathematical Modelling , Energy and Exergy Analysis of Tomato Slices in a Mixed Mode Natural Convection Solar Dryer," vol. 20, no. 4, pp. 1–11, 2017.
- [14] Sukarman, "Optimasi Desain Alat Penukar Kalor Gas Buang Untuk Pemanas Air Degreaser," pp. 1–9, 2018.