

ANALISIS PREDIKSI MODEL *FOULING* PADA HEAT EXCHANGER DI *CRUDE OIL REFINERY*

PREDICTION ANALYSIS OF FOULING MODEL ON HEAT EXCHANGER IN THE CRUDE OIL REFINERY

Hairul Huda^{1*}, Renanto², Totok Ruki Biyanto³, Rif'an Fathoni¹, Tantra Diwa Larasati¹

¹Department of Chemical Engineering, Engineering Faculty, Mulawarman University
Jl. Sambaliung No. 9, Gunung Kelua, Samarinda, Indonesia

²Department of Chemical Engineering, Faculty of Industrial Technology And Systems Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Jl. Teknik Kimia, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Indonesia

³Department of Engineering Physics, Faculty of Industrial Technology And Systems Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Teknik Kimia, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Indonesia

*email : hairulhuda@gmail.com

(Received: 31 Mei 2022; Reviewed: 2 Juni 2022; Accepted: 21 Juni 2022)

Abstrak

Fouling kebanyakan terjadi di industri minyak. *Fouling* merupakan deposit yang tidak diinginkan dalam HE (*heat exchanger*). Model *fouling* yang diandalkan sangat langka meskipun model empiris dan teoritis telah diusulkan untuk menggambarkan *fouling* pada penukar panas. Model umum *fouling* empiris yang digunakan adalah linear, *falling rate*, dan *asymptotic*. Metodologi penelitian diawali dengan didapatkannya dan digunakannya data operasional *fouling* yang kemudian yang dilanjutkan dengan penggunaan model *asymptotic fouling* dan diakhiri dengan menghitung tebal *fouling* di semua HE. Objek kajian penelitian ini adalah semua HE di HEN (*heat exchanger network*) pada *crude oil refinery*. Penelitian bertujuan penggunaan model *asymptotic fouling* dan mendapatkan tebal *fouling*. *Fouling* dari waktu ke waktu semakin bertambah akan tetapi pada bagian akhir cenderung stasioner, dimana untuk nilai akhir resistansi *fouling* paling besar pada HE-10 yaitu 14,8E-03 (m²°C/W) dan paling kecil nilai resistansi *fouling* pada HE-01 yaitu 1,27E-03 (m²°C/W). Tebal *fouling* HE dalam kondisi asimtot menunjukkan bahwa HE mengalami proses *deposition* sama dengan *suppression* yaitu *fouling* yang terbentuk sama dengan tergerus.

Kata Kunci: fouling, heat exchanger, asymptotic, crude oil refinery, heat exchanger network

Abstract

Fouling mainly occurs in the oil industry. *Fouling* is an unwanted deposit in HE (*heat exchanger*). Reliable *fouling* models are scarce, although empirical and theoretical models have been proposed to describe *fouling* in heat exchangers. The general models of empirical *fouling* used are linear, *falling rate*, and *asymptotic*. The research methodology begins with the acquisition and use of operational *fouling* data, which is then followed by an *asymptotic fouling* model and ends with calculating the thickness of *fouling* in all HE. The object of this research study is all HE in the HEN (*heat exchanger network*) in the *crude oil refinery*. This research aims to use the *asymptotic fouling* model and to get the *fouling* thickness. The *fouling* resistance from time to time increases, but in the end, it tends to be stationary, where for the final value, the highest *fouling* resistance in

the HE-10 is $14.8E-03$ (m^2C/W), and the lowest value of the fouling resistance in the HE- 01 is $1.27E-03$ (m^2C/W). The thickness of HE fouling in asymptotic conditions indicates that HE undergoes the same deposition process as suppression.

Keywords: fouling, heat exchanger, asymptotic, crude oil refinery, heat exchanger network

1. PENDAHULUAN

Fouling masalah yang belum terselesaikan dalam industri proses dan energi. *Fouling* umumnya didefinisikan sebagai akumulasi dan pembentukan bahan yang tidak diinginkan pada permukaan peralatan pemrosesan, yang dapat secara serius menurunkan kapasitas permukaan untuk mentransfer panas di bawah kondisi perbedaan suhu yang dirancang. Epstein (1983) telah merasionalisasi dan mengategorikan *fouling*. *Fouling* pada permukaan perpindahan panas adalah salah satu masalah terpenting dalam peralatan perpindahan panas. *Fouling* adalah fenomena yang sangat kompleks dan akumulasi deposit yang tidak diinginkan pada permukaan penukar panas (HE/ *heat exchanger*) yang merupakan tahanan terhadap transfer panas. Karakter deposit tergantung pada fluida (cairan atau gas) yang melewati HE dan perbedaan tekanan terjadi pada HE dikarenakan penurunan luasan daerah aliran yang mengakibatkan meningkatnya biaya pemompaan (Smaili, Vassiliadis dan Wilson, 2001). Pengotoran dapat dicirikan sebagai gabungan, keadaan tidak stabil, momentum, massa dan masalah perpindahan panas dengan kimia, kelarutan, korosi dan proses biologis juga dapat terjadi yang telah digambarkan sebagai masalah utama yang belum terselesaikan dalam perpindahan panas (Bott, 1995; Taborek dkk., 1972) dan masalah yang hampir universal dalam desain dan operasi peralatan HE (Watkinson dan Wilson, 1997). *Fouling* kebanyakan terjadi di industri minyak dan terjadi dalam berbagai proses industri yang dapat berupa kristal, sedimen, senyawa biologi, reaksi kimia, ataupun korosi (Pogiatzis dkk., 2011). *Fouling* dalam HE adalah proses yang tidak diinginkan yang mengurangi realisasi manfaat maksimal dari integrasi panas. Literatur mengenai penelitian *fouling* dalam industri seperti industri petrokimia (Brodowicz dan Markowski, 2003), pabrik susu (Riverol dan Napolitano, 2005), boiler untuk biomassa (Romeo and Garetta, 2006) telah dilaporkan. *Fouling* tidak hanya mengurangi pemulihan panas tetapi juga mengakibatkan masalah operasi dan bahkan menyebabkan fasilitas *shutdown* (Wang dkk., 2015). Sampai sekarang, masalah *fouling* di rangkai *crude oil refinery* masih tetap belum terpecahkan (Ishiyama dkk., 2009). Minyak mentah mengandung jumlah garam anorganik yang bervariasi seperti NaCl, CaCl₂, dan MgCl₂ (Bai dan Wang, 2007). Kehadiran garam semacam itu tidak hanya memainkan peran penting dalam proses pengotoran tetapi juga meningkatkan korosi pada penukar panas dan meracuni katalis dalam unit pemrosesan di bagian hilir *crude distillation unit* (CDU). Liu dkk., (2003) membahas pentingnya mengurangi konsentrasi garam di aliran minyak mentah. Hal ini biasanya dilakukan melalui proses *desalting* dengan mengencerkan kandungan garam dengan menambahkan air tawar sebelum dimasukkan ke *desalter* pada temperatur antara 90°C dan 120°C dengan laju penambahan yang direkomendasikan sebesar 3,0-4,5% dari aliran minyak mentah (Choi, 2005), yang pada gilirannya penting untuk menghindari pengotoran.

Fouling juga bisa terjadi di *furnace* dan merupakan masalah utama untuk kilang (Jegla dkk., 2011; Morales-Fuentes dkk., 2014). Tidak seperti di HE, kerugian dalam perpindahan panas karena *fouling* dikompensasikan oleh kekuatan pendorong besar yang dihasilkan oleh panas radiasi yang disediakan oleh *furnace*. Kebutuhan energi di *furnace* dikurangi dengan cara *crude oil* yang dipompa dari penyimpanan yang kemudian dipanaskan dalam serangkaian penukar panas berupa *heat exchanger network* (HEN) di *crude oil refinery*. Media pemanasan di HEN adalah aliran produk dan *pump-around* dari CDU. HEN mengambil panas sekitar 70% dari produk dan berfungsi sebagai pendingin produk. Masalah *fouling* pada HEN dapat mengakibatkan penambahan konsumsi energi dan akhirnya merugikan pada sisi ekonomi hingga miliaran dolar per tahun. Dampak utama dari *fouling* pada HEN adalah mengurangi panas yang diambil kembali. Amerika Serikat mengalami kerugian karena *fouling* pada destilasi unit *crude oil refinery* mencapai US\$ 4.2-10 miliar pertahun (Wang dkk., 2007). Dari kedua sisi ekonomi dan lingkungan, hal ini memberikan motivasi yang besar untuk meminimalkan *fouling*, sehingga memaksimalkan pengambilan panas di HEN.

Fouling dapat dikurangi dan tidak dapat dihindari. Desain yang lebih baik dari HE seperti perbaikan pada desain mekanik dengan merancang *tube* yang tepat dan pengaturan *baffle* mampu mengurangi

kecenderungan *fouling* (Sanaye dan Niroomand, 2007). Selanjutnya, investasi pada stand-by peralatan sering dibuat untuk menghindari penurunan kapasitas selama pembersihan penukar panas yang kotor, meskipun dalam tahap desain, desainer telah mempertimbangkan faktor *fouling* yang mengacu pada standar TEMA dimana luas permukaan perpindahan panas ditambahkan untuk membuat mengatasi kinerja yang hilang akibat *fouling*. HTRI dan TEMA (Chenoweth, 1990) memperkirakan bahwa 11% sampai 67% lebih luas permukaan perpindahan panas harus ditambahkan dalam penukar panas untuk mengimbangi efek *fouling*. Garrett-Price (1985) memperkirakan bahwa penambahan luas permukaan perpindahan panas 30-40% akan menambahkan sekitar 25% harga peralatan. Biaya instalasi untuk penukar panas yang lebih besar dan lebih berat juga meningkat karena fondasi yang lebih kuat dan lebih banyak ruang yang diperlukan. Biaya instalasi untuk HE biasanya diperkirakan sekitar 2-3 kali biaya pembelian (Sanaye dan Niroomand, 2007). Penggantian dengan HE lebih efisien dan memasang *redundant* HE dapat juga mengatasi masalah *fouling*, namun biaya modal HEN juga meningkat (Georgiadis dkk., 1999; Smaïli dkk., 2001).

Model *fouling* yang diandalkan sangat langka meskipun model empiris dan teoritis telah diusulkan untuk menggambarkan *fouling* pada penukar panas. Model *fouling* empiris yang digunakan adalah linear, *falling rate*, dan *asymptotic*. Model *asymptotic* lebih cocok untuk HE pada proses *crude oil refinery* (Andersson dkk., 2009). Model empiris umumnya digunakan untuk tujuan mengoptimisasi jadwal pembersihan penukar (Georgiadis dkk., 1999; Smaïli dkk., 2001; Woods dkk., 1976). Panchal's *threshold fouling* model juga digunakan untuk tujuan ini dalam aplikasi yang terbatas (Wang dan Sundén, 2003). Model matematika yang mendasar seperti Epstein model (tidak dapat digunakan sebagai model prediksi *fouling* untuk *crude oil refinery* karena adanya konstanta yang tidak diketahui dalam persamaan model. Sebagian penelitian yang menggunakan model *fouling* dengan mengabaikan periode inisiasi sangat sulit atau tidak mungkin untuk diprediksi (Bott, 1995). Penelitian ini fokus pada penggunaan model *asymptotic fouling* pada semua 11 HE pada HEN dengan waktu 360 hari yang berguna pada kinerja HE dan mendapatkan tebal *fouling* pada objek kajian semua HE di HEN.

1.1. Resistansi *Fouling*

Kondisi permukaan perpindahan panas yang bersih, luas penampang untuk aliran adalah maksimum tidak ada kotoran yang diendapkan pada sisi *tube*. *Fouling* terjadi pada sisi *tube* baik pada bagian dalam (*inner tube*) maupun luar *tube* (*outside tube*). *Fouling* pada penelitian terjadi pada bagian *inner tube* dikarenakan *crude oil* lewat pada sisi *inner tube* dan pada *outside tube* dilalui oleh media fluida panas keluaran dari hasil CDU yang umumnya cenderung bersih dari *fouling*. Namun, seiring bertambahnya *fouling* dalam sisi *tube* selama operasi maka mengurangi luas penampang *tube* dan karena itu penurunan tekanan di sisi *tube* penukar panas meningkat.

Salah satu model yang paling sederhana untuk menjelaskan proses *fouling* diajukan oleh (Kern & Seaton, 1959);(Bott, 1995b). Model *asymptotic fouling* menggunakan Persamaan (1).

$$R_{f(t)} = R_{f\infty} (1 - \exp^{-\beta t}) \quad (1)$$

Data operasional diambil dari perusahaan minyak dan tipe *crude oil* adalah *light crude*. Untuk mendapatkan parameter $R_{f\infty}$ dan β menggunakan metode *nonlinier Generalized Reduced Gradient* (GRG). Mendapatkan nilai awal untuk parameter $R_{f\infty}$ dan β digunakan tebakan awal dan kemudian untuk menyelesaikan masalah digunakan fungsi tujuan *Root Mean Square* (RMS) minimum dipilih untuk menentukan parameter yang sesuai $R_{f\infty}$ dan β . Ketebalan *fouling* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan *foulant thermal resistance* seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2–4).

$$R_f = \frac{d_c \ln\left(\frac{d_c}{d_f}\right)}{2k_f} \quad (2)$$

$$d_f = \frac{d_c}{\exp\left(\frac{2R_f k_f}{d_c}\right)} \quad (3)$$

$$t_f = \frac{d_c - d_f}{2} \quad (4)$$

Dimana:

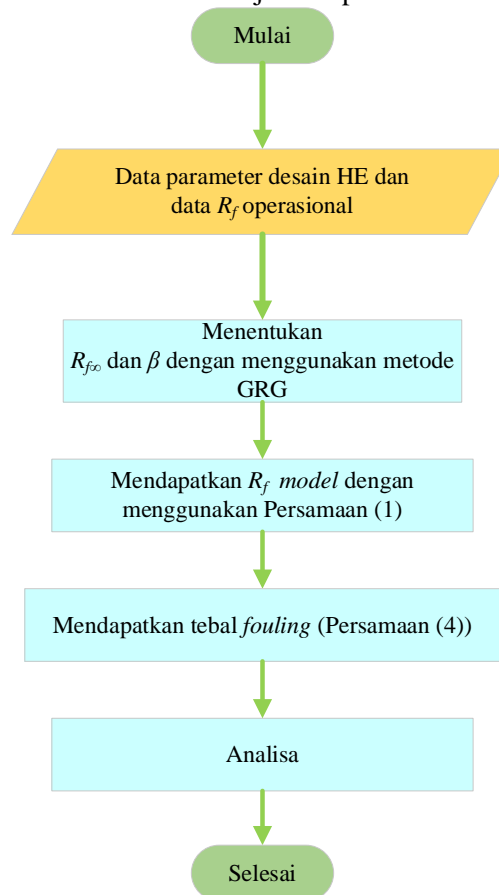
d_c : diameter dalam *tube* dalam keadaan bersih (m)

d_f : diameter dalam *tube* dalam keadaan *fouling* (m)

- k_f : thermal conductivity of the foulant ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$)
 t_f : tebal *fouling* (m)
 R_f : resistansi *fouling* ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$)
 $R_{f\infty}$: resistansi *fouling* pada waktu tak hingga (nilai *asymptotic*) ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$)
 t : waktu (hari)
 β : konstanta pembentukan *fouling* terhadap waktu ($\frac{1}{hari}$)

2. METODOLOGI

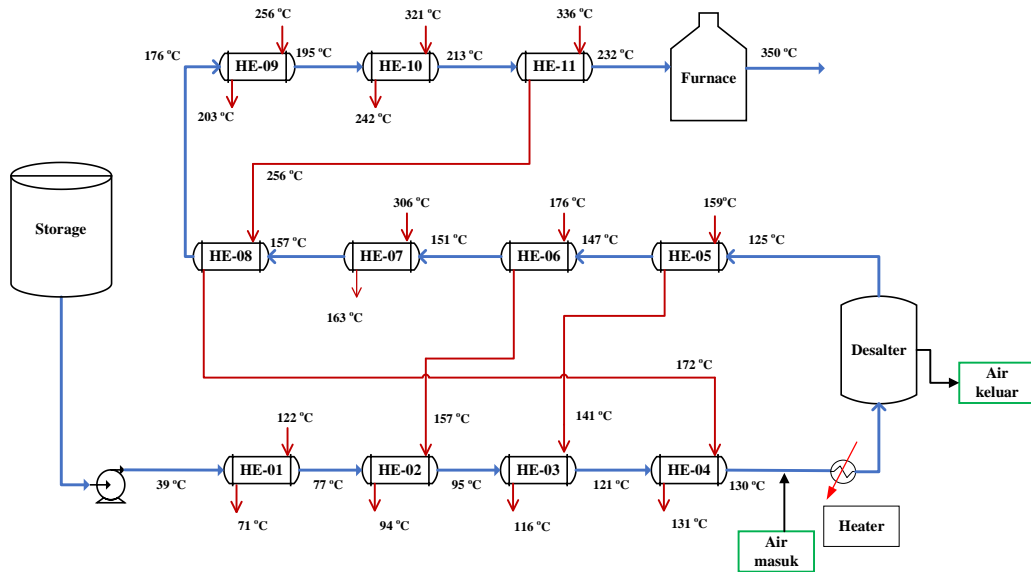
Data awal yang diambil untuk objek kajian yaitu data operasional, data temperatur aliran panas dan dingin untuk masuk dan keluar pada tiap HE, laju alir massa (*flowrate*) aliran panas dan dingin, dan semua data yang mempresentasikan kondisi proses pada alat HE yang terjadi. Tipe HE yang digunakan adalah *shell and tube*. Data awal ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 1. Diagram alir *asymptotic fouling* model dan tebal *fouling* di HE pada HEN

2.2. Objek Kajian HEN

Objek kajian yang digunakan untuk memodelkan R_f rangkaian HE yang saling berhubungan dan aliran HE terakhir masuk ke dalam *furnace*. Rangkaian HE yang digunakan berjumlah 11 buah yang tersusun secara seri-paralel yang terdiri dari 4 HE *independent* dan 7 HE *integrated*. Untuk HE *independent* yaitu HE-01, HE-07, HE-09 dan HE-10. Sedangkan untuk HE *integrated* yaitu pada HE-02, HE-03, HE-04, HE-05, HE-06, HE-08 dan HE-11. Model HEN tersebut merupakan skema HEN yang tersusun secara seri-paralel yang berjumlah 11 HE. 11 HE tersebut dipilih karena merupakan satu rangkaian HE yang terintegrasi dalam HEN di *crude oil refinery* dengan R_f yang relatif besar.



Gambar 1. Diagram Skematik HEN (Huda dkk., 2020)

Gambar 2 skematik HEN yang terdiri dari satu aliran dingin dan tujuh aliran panas. *Crude oil* di tangki penyimpanan (*storage tank*) dialirkan sebagai aliran dingin yang kemudian dipompa dengan temperatur masuk 39°C ke HE-01 hingga ke HE-04. *Crude oil* setelah melalui *heater* sebelum *desalter*. *Heater* sebelum *desalter* digunakan jika temperatur masuk *desalter* tidak mencapai 115°C, yang berguna untuk memanaskan *crude oil* untuk memenuhi persyaratan temperatur hilir dan menjaga viskositas *crude oil* untuk menghindari kesukaran pengendapan air pencuci pada *desalter*. *Crude oil* dari *desalter* alirkan ke HE-05 hingga HE-11. *Crude oil* keluar dari HE-11 dialirkan ke *furnace* dan keluar dari *furnace* mencapai temperatur 350°C.

HE yang digunakan pada proses *crude oil refinery* ini bertipe *shell-and-tube heat exchanger*. Model HE yang dipakai untuk memperhitungkan resistansi *fouling* R_f , didapatkan dari perkembangan model individu HE dengan asumsi penukar panas dalam keadaan *steady-state*, kondisi *thermal* fluida selalu sama, HE dalam kondisi bersih atau tidak ada *fouling* pada kondisi awal, *fouling* terdapat pada sisi *tube* dan sisi *shell* tidak ada *fouling* dan tipe aliran HE *counter-current*. Sehingga, persamaan laju perpindahan panas di seluruh permukaan penukar panas akan mudah dikalkulasi secara analitik sesuai dengan aliran.

Tabel 1. Data Desain HE

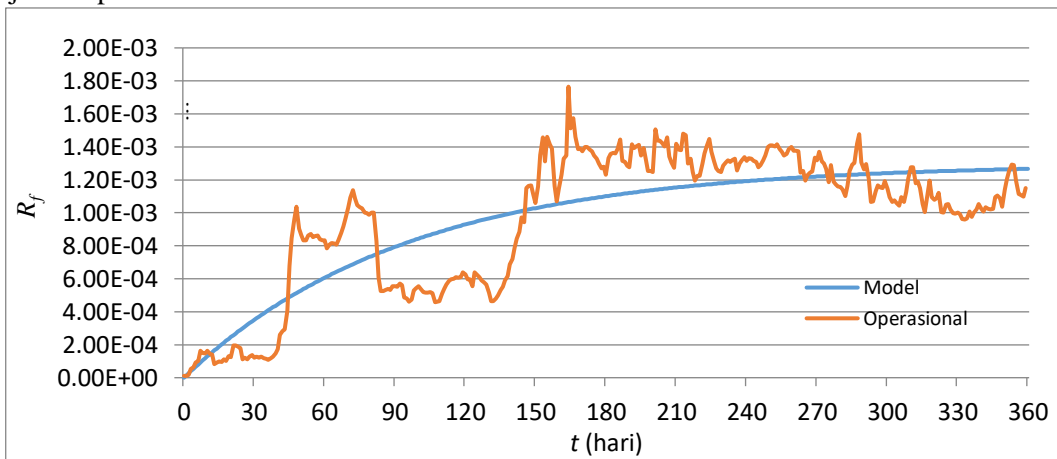
No HE	k_f (W/m ² °C)	A (m ²)	m_h (kg/hr)	m_c (kg/hr)	c_{ph} (J/kg.°C)	c_{pc} (J/kg.°C)
HE-01	0,1070	650	372070	420279	2600	2150
HE-02	0,1030	576	99246	420279	2475	2285
HE-03	0,0980	1144	377161	420279	2530	2390
HE-04	0,0900	744	96001	420279	2335	2470
HE-05	0,0910	1624	377161	420085	2630	2530
HE-06	0,0885	238	99246	420085	2670	2580
HE-07	0,0875	296	14436	420085	2930	2605
HE-08	0,0815	581	96001	420085	2590	2665
HE-09	0,0875	495	121864	420085	2920	2755
HE-10	0,0920	243	85828	420085	3140	2845
HE-11	0,1000	327	96001	420085	2920	2935

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Subbab bagian ini membahas tentang fenomena R_f operasional dan R_f model. R_f operasional diperoleh dari hasil data lapangan yang berasal dari data *sheet* selama 360 hari (tahunan) dari berbagai temperatur aliran masuk dan temperatur aliran keluar aliran panas dan dingin HE di *crude oil refinery*.

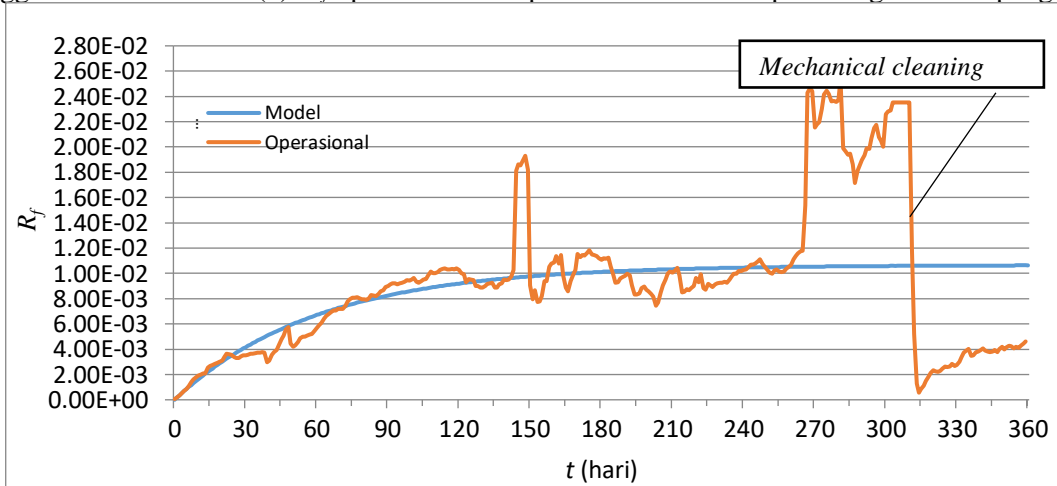
3.1. Resistansi Fouling Heat Exchanger pada HEN

Data R_f operasional yang dihasilkan adalah $R_{f\infty}$ dan β yang diperoleh dari *fitting* data operasional *fouling*. Model R_f selanjutnya diperoleh dari perhitungan dari Persamaan (1). Data operasional diambil dari perusahaan minyak yang namanya dirahasiakan sesuai perjanjian dan tipe *crude oil* adalah *light crude*. Nilai parameter $R_{f\infty}$ dan β didapatkan dengan menggunakan metode *nonlinier Generalized Reduced Gradient* (GRG). Konsep metode *nonlinier* GRG yaitu arah pencarian ditinjau dari kondisi daerah yang diinginkan sehingga terdapat jaminan bahwa arah pencarian tersebut selalu berada pada daerah fisibel. Setiap titik yang dihasilkan pada setiap iterasi akan selalu berada pada daerah fisibel. Metode ini mampu menjamin bahwa solusi optimal yang dihasilkan juga berada pada daerah fisibel dan untuk mendapatkan solusi optimal tidak perlu dilakukan penyelesaian terhadap sistem persamaan yang rumit. Untuk mendapatkan nilai awal untuk parameter $R_{f\infty}$ dan β digunakan tebakan awal kemudian untuk menyelesaikan masalah digunakan fungsi tujuan *Root Mean Square* (RMS) minimum dipilih untuk menentukan parameter yang sesuai $R_{f\infty}$ dan β . Gambar 3 sampai dengan 8 menunjukkan hasil *fitting* untuk R_f model yang mewakili beberapa HE yang sesuai Persamaan (1) dan profil model *fouling* semua HE ditunjukkan Gambar 9 Hasil pada $R_{f\infty}$, R_f dan β ditunjukkan pada Tabel 2.



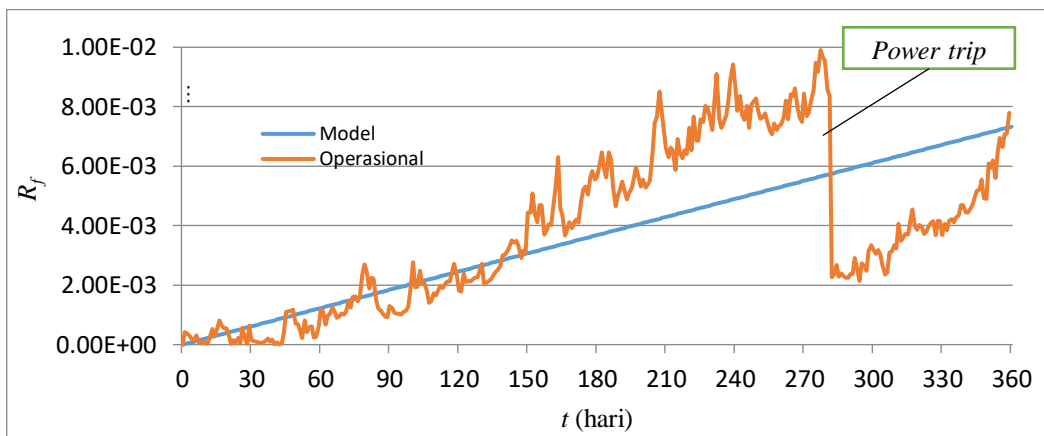
Gambar 3. Grafik R_f untuk operasional dan model pada HE-01

Gambar 3 dipilih ditampilkan karena pada temperatur paling rendah dan merupakan HE yang pertama yaitu HE-01. HE-01 mempunyai nilai R_f operasional $1.18E-05$ ($m^2\text{C}/W$). Nilai R_f model awal pada hari pertama yaitu $1.36E-05$ ($m^2\text{C}/W$), nilai $R_{f\infty}$ $1.30E-02$, nilai β $1.05E-02$ (1/hari) dan nilai R_f model akhir pada hari 360 yaitu $1.27E-03$ ($m^2\text{C}/W$) (ditunjukkan pada Tabel 2.). Profil R_f operasional dan R_f model pada HE-01 ditunjukkan pada Gambar 3. R_f model diperoleh dengan menggunakan Persamaan (1). R_f operasional didapatkan melalui hasil perhitungan data lapangan.



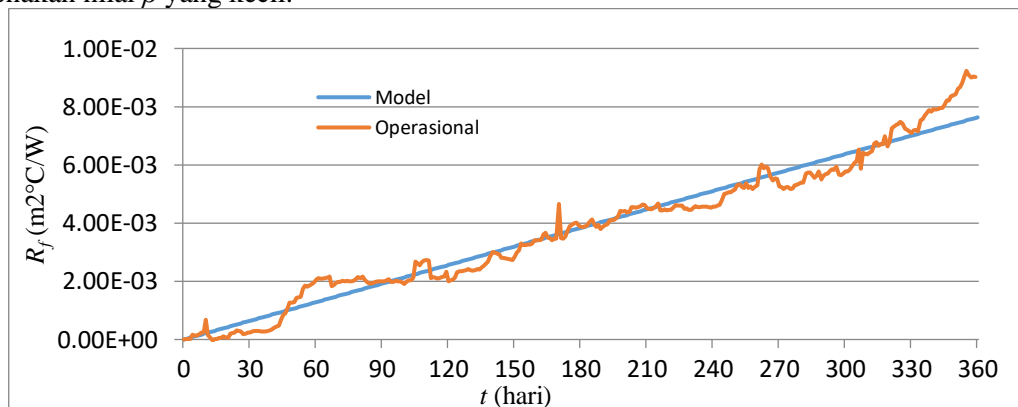
Gambar 4. Grafik R_f untuk operasional dan model pada HE-03

Gambar 4 ditampilkan karena pada HE-03 adanya *mechanical cleaning*. HE-03 mempunyai nilai R_f operasional awal $5.47E-05$ (m^2C/W). Nilai R_f model awal pada hari pertama yaitu $1.75E-04$ (m^2C/W), nilai $R_{f\infty}$ $1.07E-02$ (m^2C/W), nilai β $1.65E-02$ (1/hari) dan nilai R_f model akhir pada hari 360 yaitu $1.06E-02$ (m^2C/W). Gambar 4 melakukan proses *mechanical cleaning* pada hari ke 304, dan menunjukkan bahwa setelah pembersihan nilai R_f kembali mendekati nilai awal dalam kondisi bersih. Proses *mechanical cleaning* yang cepat dan tidak terjadwal masih belum mampu mengembalikan kondisi HE dalam kondisi pembersihan ke awal hal ini disebabkan keefektifan pembersihan dan hilangnya kinerja termal penukar panas, akan tetapi dapat menurunkan nilai *fouling*. Faktor lainnya yang mempengaruhi karakteristik *fouling* yang berbeda setelah setiap pembersihan *mechanical cleaning* adalah perubahan temperatur yang menghasilkan nilai *LMTD* yang lebih tinggi karena kondisi pengotoran di HE lain dalam HEN. Interaksi antara penukar panas pada kondisi pengotoran yang berbeda mempengaruhi kinerja HE lainnya dan ini disebabkan oleh nilai *LMTD* yang lebih tinggi cenderung meningkatkan kinerja termal dari penukar panas, tetapi temperatur *tube-wall surface* yang lebih tinggi menyebabkan peningkatan laju *fouling* yang mengurangi kemampuan HE.



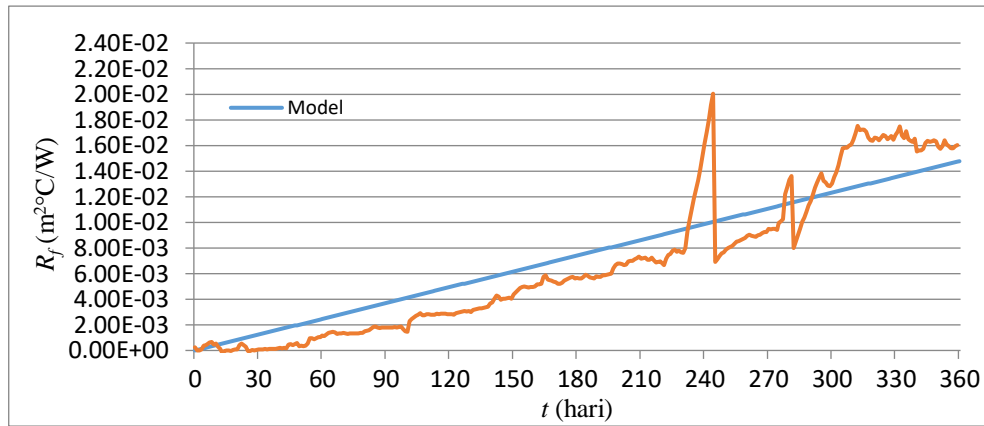
Gambar 5. Grafik R_f untuk operasional dan model pada HE-08

Gambar 5 ditampilkan karena adanya *power trip*. Nilai R_f operasional awal yaitu $3.14E-06$ (m^2C/W). R_f model awal pada hari pertama yaitu $2.06E-05$ (m^2C/W) nilai $R_{f\infty}$ $3.87E-01$ (m^2C/W), nilai β $5.31E-05$ (1/hari) dan nilai akhir pada hari 360 yaitu $7.33E-03$ (m^2C/W). HE-08 ada proses *power trip* yang menyebabkan nilai R_f kembali mendekati nilai R_f awal. Profil R_f model berbentuk linier dikarenakan nilai β yang kecil.



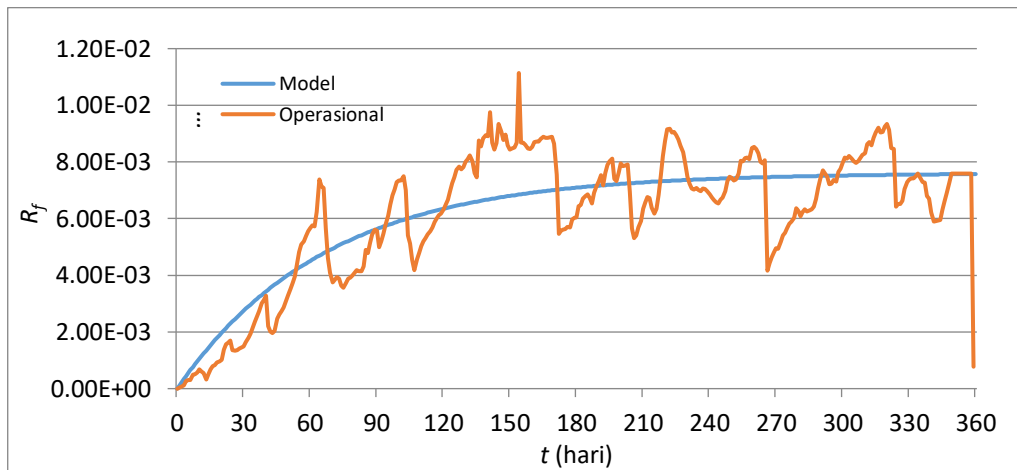
Gambar 6. Grafik R_f untuk operasional dan model pada HE-09

Gambar 6 menunjukkan profil R_f operasional dan R_f model yang cenderung linier pada HE-09. HE-09 mempunyai nilai R_f operasional $4.43E-06$ (m^2C/W) dan R_f model awal pada hari pertama yaitu $2.14E-05$ (m^2C/W), nilai $R_{f\infty}$ $4.16E-01$ (m^2C/W), nilai β $5.14E-05$ (1/hari) dan nilai akhir R_f pada hari 360 yaitu $7.63E-03$ (m^2C/W). HE-09 mempunyai profil R_f model berbentuk linier dikarenakan nilai β yang kecil.



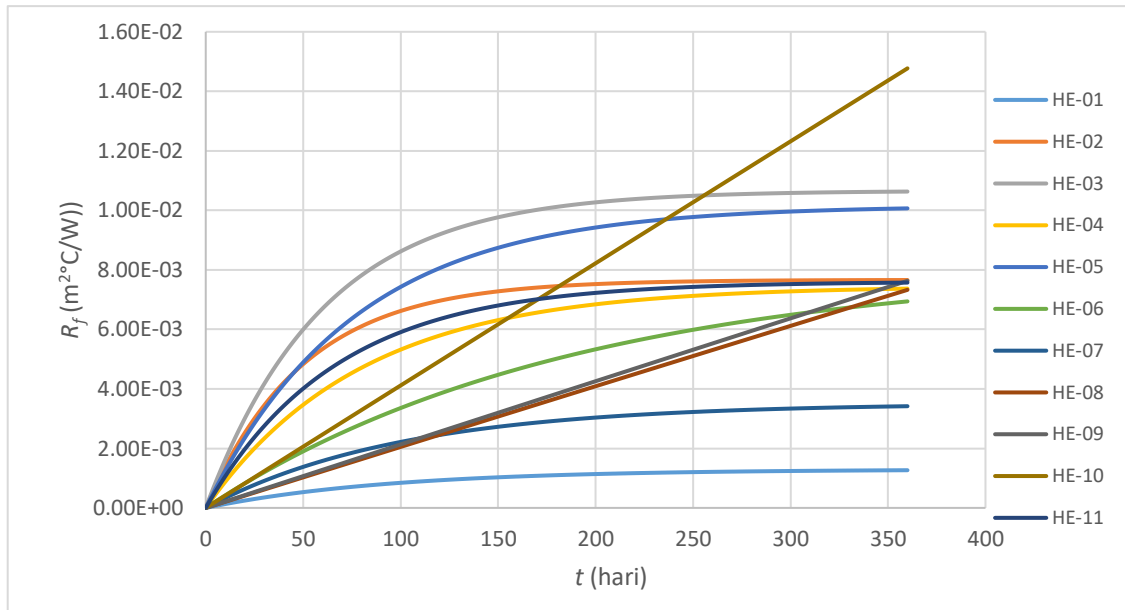
Gambar 7. Grafik R_f untuk operasional dan model pada HE-10

Gambar 7 menunjukkan profil R_f operasional dan R_f model. HE-10 mempunyai nilai R_f operasional $2.57E-04$ (m^2C/W) dan R_f model awal pada hari pertama yaitu $4.12E-05$ (m^2C/W), nilai $R_{f\infty}$ $1.90E-02$ (m^2C/W), nilai β $2.17E-05$ ($1/hari$) dan nilai akhir R_f pada hari 360 yaitu $1.48E-02$ (m^2C/W). HE-10 mempunyai profil R_f model berbentuk linier dikarenakan nilai β yang kecil. R_f cenderung datar atau stasioner di bagian akhirnya disebabkan *fouling* yang tergerus sama dengan yang terbentuk.



Gambar 8. Grafik R_f untuk operasional dan model pada HE-11

Gambar 8 menunjukkan profil R_f operasional dan R_f model. HE-11 mempunyai nilai R_f operasional $6.99E-06$ (m^2C/W) dan R_f model awal pada hari pertama yaitu $1.13E-04$ (m^2C/W), nilai $R_{f\infty}$ $7.61E-03$ (m^2C/W), nilai β $1.50E-02$ ($1/hari$) dan nilai akhir R_f pada hari 360 yaitu $7.57E-03$ (m^2C/W). HE-11 mempunyai profil R_f model berbentuk linier dikarenakan nilai β yang kecil. HE-08, HE-09 dan HE-10 distribusi (pola atau model dari penyebaran data) data R_f operasional yang berbeda dengan HE yang lain yang mana sebaran data operasional cenderung linier dan jarak antara data operasional R_f secara umum pada setiap t (hari) terus naik (bertambah) dengan nilai yang berdekatan dan menyebabkan nilai β yang diperoleh bernilai kecil setelah di *fitting* dengan R_f operasional.



Gambar 9. Profil model R_f pada semua HE pada HEN

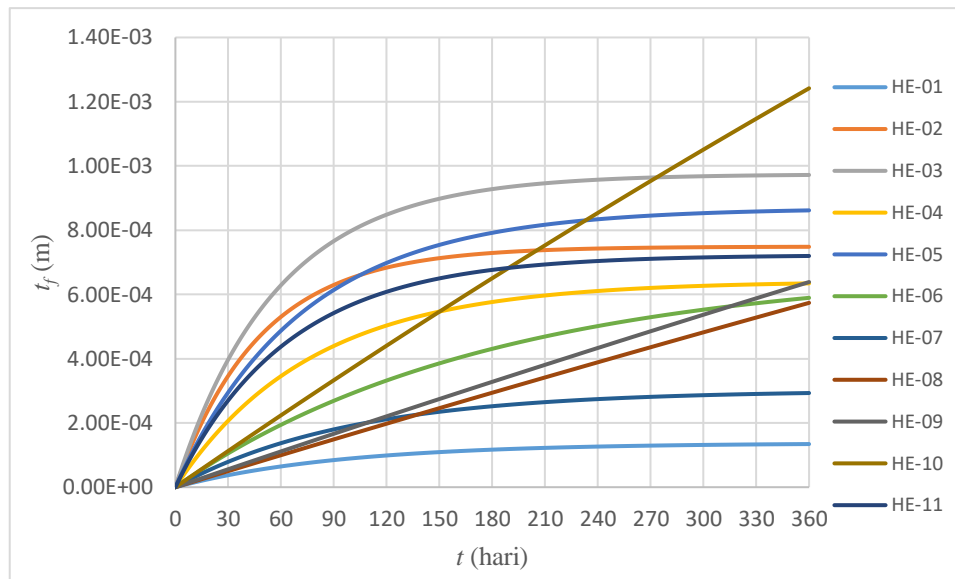
Tabel 2. Nilai $R_{f\infty}$, R_f , dan β pada setiap HE

Nomor HE	$R_{f\infty}$ ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)	β (1/hari)	R_f pada hari ke 360 ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$).
HE-01	1,30E-03	1,05E-02	1,27E-03
HE-02	7,66E-03	1,99E-02	7,66E-03
HE-03	10,7E-03	1,65E-02	10,6E-03
HE-04	7,45E-03	1,25E-02	7,37E-03
HE-05	10,2E-03	1,31E-02	10,1E-03
HE-06	8,14E-03	5,31E-03	6,94E-03
HE-07	3,51E-03	9,96E-03	3,42E-03
HE-08	387E-03	5,31E-05	7,33E-03
HE-09	416E-03	5,14E-05	7,63E-03
HE-10	1,90E+00	2,17E-05	14,8E-02
HE-11	7,61E-03	1,50E-02	7,57E-03

Nilai β ini yang mempengaruhi R_f model tampak seperti linier meskipun Persamaan (1) menunjukkan persamaan eksponensial. Tabel 2 menunjukkan hasil R_f yang diperoleh menunjukkan nilai R_f diperoleh berada pada kisaran 0,002-0,005 (Donald Q. Kern, 1983) yang menunjukkan secara umum bahwa hasil sesuai dengan nilai R_f fraksi-fraksi pengolahan minyak.

3.2. Tebal Fouling

Kondisi permukaan perpindahan panas yang bersih, luas penampang untuk aliran adalah maksimum tidak ada kotoran yang diendapkan pada sisi *tube*. Namun, seiring bertambahnya *fouling* dalam sisi *tube* selama operasi maka mengurangi luas penampang *tube* dan, oleh karena itu penurunan tekanan di sisi *tube* penukar panas meningkat.



Gambar 10. Tebal fouling semua HE di HEN

Gambar 15 menunjukkan profil tebal fouling pada setiap HE. Fouling yang paling tebal pada HE-10 dengan nilai $1,24E-3$ (m) dan tebal fouling paling tipis pada HE-01 dengan nilai $1,34E-4$ (m). Nilai tebal fouling dipengaruhi oleh R_f . Tebal fouling beberapa HE menunjukkan tebal fouling yang masih linier atau belum asimtot yang artinya terus mengalami penambahan.

4. KESIMPULAN

Pemodelan fouling perlu dilakukan untuk dapat mengestimasi adanya fouling. Nilai fouling resistance akan semakin rendah dengan nilai diameter dalam shell yang semakin kecil. Diameter dalam shell menyebabkan perubahan pada luas permukaan perpindahan panas heat exchanger baik di sisi shell maupun di sisi tube. Diameter dalam shell semakin kecil maka luas permukaan perpindahan panas heat exchanger pada sisi shell dan tube akan semakin kecil juga. Resistansi fouling dari waktu ke waktu semakin bertambah akan tetapi pada bagian akhir cenderung stasioner, dimana untuk nilai akhir resistansi fouling paling besar pada HE-10 yaitu $14,8E-03$ ($m^2\text{C}/W$) dan paling kecil nilai resistansi fouling pada HE-01 yaitu $1,27E-03$ ($m^2\text{C}/W$). Tebal fouling HE dalam kondisi asimtot menunjukkan bahwa HE mengalami proses deposition sama dengan suppression yaitu fouling yang terbentuk sama dengan tergerus, hal ini adalah kondisi yang ideal (baik) jika dibandingkan dengan kondisi asimtot.

DAFTAR PUSTAKA

- Andersson, E., Quah, J. and Polley, G. (2009) "Experience in the Application of Compabloc TM in Refinery Pre-Heat Trains and First Analysis of Data From an Operational Unit," in Muller-Steinhagen, H., Malayeri, M. R., and Watkinson, A. P. (eds) *International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning VIII*. Schladming, Austria: www.heatexchanger-fouling.com, pp. 39–43.
- Bai, Z. S. and Wang, H. L. (2007) "Crude Oil Desalting Using Hydrocyclones," *Chemical Engineering Research and Design*, 85(12), pp. 1586–1590. doi: 10.1016/S0263-8762(07)73203-3.
- Bott, T. R. (1995) *Fouling of Heat Exchangers*. 26th edn. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-444-82186-7.X5000-3.
- Brodowicz, K. and Markowski, M. (2003) "Calculation of Heat Exchanger Networks for Limiting Fouling Effects in The Petrochemical Industry," *Applied Thermal Engineering*, 23(17), pp. 2241–2253. doi: 10.1016/S1359-4311(03)00190-X.

- Chenoweth, J. M. (1990) *Final Report of the HTRI/TEMA Joint Committee to Review the Fouling Section of the TEMA Standards*, *Heat Transfer Engineering*. doi: 10.1080/01457639008939724.
- Choi, D. W. (2005) "How To Buy and Operate Desalters," *Hydrocarbon Processing*, 84 (3), pp. 75–79.
- Epstein, N. (1983) "Thinking about heat transfer fouling: A 5 × 5 matrix," *Heat Transfer Engineering*, 4(1), pp. 43–56. doi: 10.1080/01457638108939594.
- Garrett-Price, B. (1985) "Fouling of Heat Exchangers: Characteristics, Costs, Prevention, Control and Removal," *Noyes Publications, 1985*, 0599(July), p. 417. doi: 10.1002/cite.330580414.
- Georgiadis, M. C., Papageorgiou, L. G. and Macchietto, S. (1999) "Optimal Cyclic Cleaning Scheduling in Heat Exchanger Networks Under Fouling," *Computers and Chemical Engineering*, 23(SUPPL. 1), pp. S203–S206. doi: 10.1016/S0098-1354(99)80050-7.
- Huda, H. *et al.* (2020) "Oil refinery heat exchanger network cleaning scheduling strategy with unit cleanability consideration," *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 20(1), pp. 31–48. doi: 10.22146/ajche.51880.
- Ishiyama, E. M., Paterson, W. R. and Wilson, D. I. (2009) "The Effect of Fouling on Heat Transfer, Pressure Drop, and Throughput in Refinery Preheat Trains: Optimization of Cleaning Schedules," *Heat Transfer Engineering*, 30(10–11), pp. 805–814. doi: 10.1080/01457630902751486.
- Jegla, Z., Kohoutek, J. and Stehlik, P. (2011) "Design and operating aspects influencing fouling inside radiant coils of fired heater operated in crude oil distillation plants," *Proceedings of international conference on heat exchanger fouling and cleaning*, 2011, pp. 7–14. Available at: www.heatexchanger-fouling.com.
- Kern, D. Q. (1983) *Process Heat Transfer*. McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Kern, D. Q. and Seaton, R. E. (1959) "A Theoretical Analysis of Thermal Surface Fouling," *British Chemical Engineering*, 4(5), pp. 258–262.
- Liu, G., Xu, X. and Gao, J. (2003) "Study on the Compatibility of High-Paraffin Crude Oil with Electric Desalting Demulsifiers," *Energy Fuels*, 17(3), pp. 625–630. doi: 10.1021/ef020166g.
- Morales-Fuentes, A. *et al.* (2014) "Analysis of the influence of operating conditions on fouling rates in fired heaters," *Applied Thermal Engineering*, 62(2), pp. 777–784. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.10.016.
- Pogiatzis, T., Vassiliadis, V. S. and Wilson, D. I. (2011) "An MINLP Formulation for Scheduling The Cleaning of Heat Exchanger Networks Subject to Fouling and Ageing," *Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*, 2011, pp. 349–356.
- Riverol, C. and Napolitano, V. (2005) "Estimation of Fouling in a Plate Heat Exchanger Through The Application on Neural Networks," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 80(5), pp. 594–600. doi: 10.1002/jctb.1198.
- Romeo, L. M. and Gareta, R. (2006) "Hybrid System for Fouling Control in Biomass Boilers," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 19(8), pp. 915–925. doi: 10.1016/j.engappai.2006.01.019.

- Sanaye, S. and Niroomand, B. (2007) "Simulation of Heat Exchanger Network (HEN) and Planning The Optimum Cleaning Schedule," *Energy Conversion and Management*, 48(5), pp. 1450–1461. doi: 10.1016/j.enconman.2006.12.006.
- Smaïli, F., Vassiliadis, V. S. and Wilson, D. I. (2001) "Mitigation of Fouling in Refinery Heat Exchanger Networks by Optimal Management of Cleaning," *Energy and Fuels*, 15(5), pp. 1038–1056. doi: 10.1021/ef010052p.
- Taborek, J. *et al.* (1972) "Fouling: The major unresolved problem in heat transfer," *Chemical Engineering Progress*, 68(2), pp. 59–67.
- Wang, L. and Sundén, B. (2003) "Optimal Design of Plate Heat Exchangers With and Without Pressure Drop Specifications," *Applied Thermal Engineering*, 23(3), pp. 295–311. doi: 10.1016/S1359-4311(02)00195-3.
- Wang, L., Sundén, B. and Manglik, R. M. (2007) *Plate heat exchangers: Design, applications and performance*. Southampton, UK: WIT Press.
- Wang, Y., Zhan, S. and Feng, X. (2015) "Optimization of Velocity for Energy Saving and Mitigating Fouling in a Crude Oil Preheat Train with Fixed Network Structure," *Energy*, 93, pp. 1478–1488. doi: 10.1016/j.energy.2015.09.130.
- Watkinson, A. P. and Wilson, D. I. (1997) "Chemical reaction fouling: A review," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 14(4), pp. 361–374. doi: 10.1016/S0894-1777(96)00138-0.
- Woods, D. R., Anderson, S. J. and Norman, S. L. (1976) "Evaluation of Capital Cost Data: Heat exchangers," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 54, pp. 469–488.