

Analisis Laju Fouling pada Tube Heat Exchanger 53 EA-1001

Yasir Amani¹, M. Ilham Maulana²

¹⁾ Program Studi Magister Teknik Mesin Pascasarjana Universitas Syiah Kuala Banda Aceh
Jl. Tgk. Syech Abdurrauf, No. 7, Darussalam – Banda Aceh 23111, INDONESIA

^{2,3)} Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syech Abdurrauf, No. 7, Darussalam – Banda Aceh 23111, INDONESIA

Abstract

Appliance of Heat Exchanger type 53 EA-1001 exist in company PT. Pupuk Iskandar Muda operate the time some long time is hence formed by coat of fouling, existence of fouling will lessen the hot coefesien transfer totally (U) to a point appliance planning reach the minimum price, this information is obtained to can to schedule for the periodic routine of sweeping as well as commutation of pipe of appliance of heat exchange which is improper used again by prediction is maximum gather fouling at appliance of Heat Exchanger. Existence of fouling will lessen the final hot coefficients transfer to a point planning, so that can be scheduled for by a routine treatment. Hot influence Coeffesien transfer totally (U) to fluid flow speed, resulting height of stream speed. 8640 hour operate for at fouling factor 0,0082 (Rd) yield the volume fouling 0,0066 m³ need the treatment of age Heat Exchanger 27th year of gagging fouling at volume 63,585 m³. Stream emitting a stream is laminar with the value 950 Btu.ft³ / hr.lb.s energy and 1,46 times from missing energy in the situation without there is fouling.

Keywords : fouling, appliance of heat exchanger, coefficient of transfer heat, flow, fluid.

1. Pendahuluan

Alat penukar kalor (*heat exchanger*) yang berfungsi sebagai pemindah energi dari satu fluida ke fluida lain banyak digunakan pada kegiatan domestik dan industri. Berbagai jenis *heat exchanger* yang dibuat dan digunakan dalam industri digunakan dalam industri petrokimia yang mengubah bahan baku gas alam menjadi pupuk urea.

Dalam banyak kasus terjadi alat penukar kalor yang digunakan pada PT. Pupuk Iskandar Muda banyak hal, termasuk *reformer waste heat exchanger fouling* (pengotoran akibat karat) pada alat penukar kalor akibat perubahan kondisi operasi. Pada operasionalnya *heat exchanger* ini sering mendapat masalah yaitu terjadi *boiling corrotion* pada material tube yang berdekatan dengan tube sheet sisi gas inlet. Menurut Ali [1] dan Susanto [2], Permasalahan ini di duga akibat distribusi aliran di sisi shell yang tidak merata, sehingga terjadi stagnasi aliran di daerah yang berdekatan dengan tube sheet. Besar kecepatan aliran menentukan jenis aliran, yaitu aliran laminar atau turbulen. Turbulensi yang terjadi dalam aliran akibat tingginya kecepatan aliran dapat memperbesar bilangan Reynold dan bilangan Nusselt yang kemudian meningkatkan perpindahan panas secara konveksi. Namun semakin tinggi kecepatan aliran berarti waktu kontak kedua fluida semakin singkat. Kemungkinan yang paling dominan adalah menipisnya ketebalan pipa karena tererosi aliran secara terus menerus dari dalam maupun luar pipa, kemungkinan yang lain diameter pipa mengalami

deformasi karena perbedaan suhu yang berkepanjangan juga pembentukan kerak pada permukaan pipa dan untuk itulah perlu dilakukan pemeriksaan yang lebih detail.

Sejak tahun 2000, alat penukar kalor secondary reformer waste heat exchanger 53 EA-1001 yang ada pada perusahaan PT. Pupuk Iskandar Muda Lhokseumawe mengalami kebocoran yang mengakibatkan diberhentikan pengoperasiannya untuk perbaikan sampai tahun 2004. Hasil analisis lapangan bahwa terjadinya kebocoran akibat terjadi pengotoran pada bagian dalam pipa air. Sejak tahun 2005 hingga tahun 2011, alat penukar kalor secondary reformer waste heat exchanger 53 EA-1001 yang ada pada perusahaan PT. Pupuk Iskandar Muda Lhokseumawe mengalami kebocoran dan sudah tiga kali melakukan perbaikan ulang. Dari kejadian kronologis yang terjadi di lapangan belum diperoleh informasi yang detail yang dapat memprediksi proses terjadinya fouling dalam pipa air pada alat penukar kalor secondary reformer waste heat exchanger 53 EA-1001 yang ada pada perusahaan PT. Pupuk Iskandar Muda informasi ini diperoleh untuk membuat jadwal rutin berkala pembersihan dan juga pergantian pipa alat penukar kalor yang tidak layak digunakan lagi. Adapun jenis alat penukar kalor tersebut yaitu item 53 EA-1001 (Natural Gas Super Heater); Tube steam (in P = 42 kg/cm², T = 385 °C); Shell Natural Gas (in P = 17 kg/cm², G = T = 20-30 °C, T_{out} = 65-70 °C); dengan surface area (A) = 11,7 m².

Menurut Y. A. Cengel [3], hampir pada semua *Heat Exchanger*, didominasi oleh konveksi dan konduksi dari fluida panas ke fluida dingin, dimana keduanya dipisahkan oleh dinding. Perpindahan panas secara konveksi sangat di pengaruhi oleh bentuk geometri *heat exchanger* dan tiga bilangan tak berdimensi, yaitu bilangan *Reynold*, bilangan *Nusselt* dan bilangan *Prandtl*. Besar konveksi yang terjadi dalam suatu *shell and tube heat exchanger* akan berbeda dengan *double pipe heat exchanger*, *cross-flow heat exchanger* atau *compact heat exchanger* atau *plate heat exchanger* untuk temperatur yang sama. Sedang besar ketiga bilangan tak berdimensi tersebut tergantung pada kecepatan aliran serta properti fluida yang meliputi massa jenis, viskositas absolut, panas jenis dan konduktivitas panas.

Proses fouling diakibatkan fluida yang dipanaskan dalam prosesnya atau pengalirannya menimbulkan deposit endapan. Beberapa penelitian mengenai fouling di alat penukar kalor dilakukan oleh Gonzales-Garcia [4], akan tetapi model deteksi fouling yang diprediksikan kurang akurat. Oddgeir [5], deteksi fouling dengan menggunakan standar Kalman filter yang masih sedikit sekali dalam penggunaannya. Ali [1] dan Susanto [2], bahwa fouling paling dominan terjadi adalah menipisnya ketebalan pipa karena tererosi aliran secara terus menerus dari dalam maupun luar pipa, kemungkinan yang lain diameter pipa mengalami deformasi karena perbedaan suhu yang berkepanjangan juga pembentukan kerak pada permukaan pipa. Untuk itu perlu dilakukan penelitian untuk memprediksikan penumpukkan fouling pada pipa sehingga dapat dibuat jadwal rutin untuk pembersihan dan penggantian pipa yang tidak layak untuk dioperasikan kembali.

Adapun tujuan penelitian ini yang pertama adalah menentukan harga koefisien perpindahan panas Overall (U) sistem dua fluida di dalam alat penukar panas *Plate and Frame*, sehingga dapat dibuat jadwal rutin berkala pembersihan dan juga penggantian pipa alat penukar kalor yang tidak layak digunakan lagi. Kedua, mempelajari pengaruh temperatur fluida terhadap koefisien perpindahan panas overall (U), sehingga dapat mengetahui sebab terjadinya fouling dan memprediksi penumpukkan fouling maksimum pada alat penukar kalor secondary reformer waste heat exchanger 53 EA-1001 yang ada pada perusahaan PT. Pupuk Iskandar Muda. Ketiga, melakukan analisa dan perpindahan panas pada sisi shell 53 EA-1001, sehingga diperoleh metode untuk eksperimen fouling detection.

Untuk mengetahui laju pertumbuhan atau penumpukkan fouling yang pada dalam pipa alat penukar kalor secondary reformer waste heat 53 EA-1001 yang ada pada perusahaan PT. Pupuk Iskandar Muda Lhokseumawe, fluida panas yang diteliti adalah air hasil yang dipanaskan bersumber hasil

pembakaran gas metana (CH_4) (di dalamnya gas metana (CH_4) yang terdapat kandungan H_2 , CO , dan N_2) pada alat penukar kalor secondary reformer waste heat 53 EA-1001 yang diamati secara langsung sehingga dapat dibuat permodelan. Untuk melihat pola aliran dan distribusi kecepatan aliran pada sisi shell. Dan hasilnya dapat diterapkan suatu model untuk pendeteksian fouling cara metode slope menggabungkan dengan metode NTU (Number of Transfer Unit) dengan menggunakan persamaan empirik untuk perubahan laju aliran.

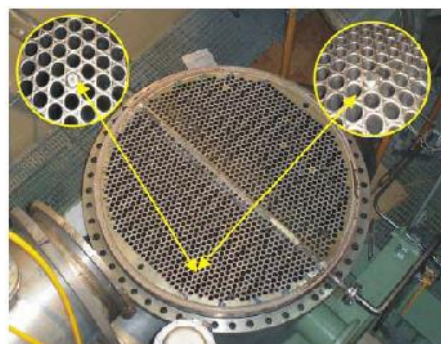
Penelitian ini diharapkan dapat mengetahui penyebab terjadinya fouling pada 53 EA-1001 dan juga untuk memprediksikan penumpukkan fouling pada pipa sehingga dapat dibuat jadwal rutin untuk pembersihan dan penggantian pipa yang tidak layak untuk dioperasikan kembali. Disamping itu juga dapat menjadi acuan pada penyempurnaan design mendatang dengan mengingat kondisi design yang ada selama ini 53 EA-1001 masih terjadi permasalahan yang ekseknya menimbulkan korosi dan erosi pada material tube yang diduga akibat adanya stagnasi aliran di sisi shell sehingga kinerja 53 EA-1001 tidak optimal.

2. Tinjauan Kepustakaan

2.1 Alat Penukar Panas

Menurut Wahyu [6], Alat penukar panas konvensional seperti penukar panas pipa rangkap (*double pipe heat exchanger*) dan penukar panas cangkang buluh (*shell and tube heat exchanger*) selama beberapa decade mendominasi fungsi sebagai penukar panas di industri. Perkembangan kemudian, karena tuntutan efisiensi energi, biaya, serta tuntutan terhadap beban perpindahan panas yang lebih tinggi dengan ukuran penukar panas yang kompak menjadi penting. Menanggapi hal itu, maka dibuat suatu penukar panas kompak. Salah satu jenis penukar panas kompak tersebut adalah penukar panas *plate and frame heat exchanger*.

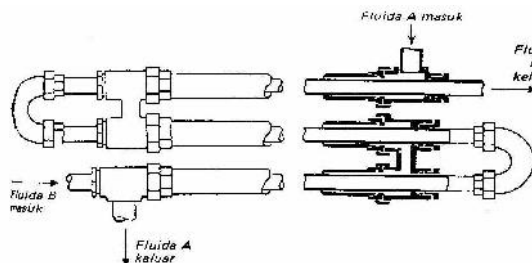
Dengan dilakukan pemeliharaan secara rutin maka kelangsungan perpindahan kalor tetap baik dan kerusakan total dapat dihindarkan.



Gambar 1. Tube-tube Penukar Kalor RSG Yang Ditutup Karena Mengalami Penipisan. [6]

2.1.1 Penukar panas pipa rangkap (double pipe heat exchanger)

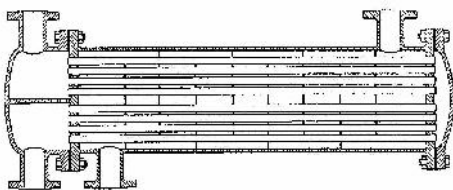
Alat penukar panas pipa rangkap terdiri dari dua pipa logam standart yang dikedua ujungnya dilas menjadi satu atau dihubungkan dengan kotak penyekat [7]. Menurut Holman [8], Fluida yang satu mengalir di dalam pipa, sedangkan fluida kedua mengalir di dalam ruang anulus antara pipa luar dengan pipa dalam. Alat penukar panas jenis ini dapat digunakan pada laju alir fluida yang kecil dan tekanan operasi yang tinggi. Penukar panas jenis pipa rangkap dapat dilihat pada Gambar 2. Sedangkan untuk kapasitas yang lebih besar digunakan penukar panas jenis selongsong dan buluh (*shell and tube heat exchanger*).



Gambar 2. Penukar panas jenis pipa rangkap. Sumber : Holman (1995)

2.1.2 Penukar panas cangkang dan buluh (*shell and tube heat exchanger*)

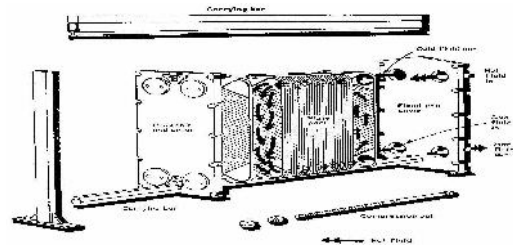
Alat penukar panas cangkang dan buluh terdiri atas suatu bundel pipa yang dihubungkan secara parallel dan ditempatkan dalam sebuah pipa mantel (cangkang). Fluida yang satu mengalir di dalam bundel pipa, sedangkan fluida yang lain mengalir di luar pipa pada arah yang sama, berlawanan, atau bersilangan. Kedua ujung pipa tersebut dilas pada penunjang pipa yang menempel pada mantel [9]. Untuk meningkatkan efisiensi pertukaran panas, biasanya pada alat penukar panas cangkang dan buluh dipasang sekat (*baffle*). Ini bertujuan untuk membuat turbulensi aliran fluida dan menambah waktu tinggal (*residence time*), namun pemasangan sekat akan memperbesar *pressure drop* operasi dan menambah beban kerja pompa, sehingga laju alir fluida yang dipertukarkan panasnya harus diatur. Penukar panas jenis cangkang dan buluh dapat dilihat pada Gambar 3. berikut ini.



Gambar 3. Penukar panas jenis cangkang dan buluh. Sumber : Rudi [9]

2.1.3 Penukar panas plate and frame (*plate and frame heat exchanger*)

Menurut McCabe [10], Alat penukar panas pelat dan bingkai terdiri dari paket pelat-pelat tegak lurus, bergelombang, atau profil lain. Pemisah antara pelat tegak lurus dipasang penyekat lunak (biasanya terbuat dari karet). Pelat-pelat dan sekat disatukan oleh suatu perangkat penekan yang pada setiap sudut pelat (kebanyakan segi empat) terdapat lubang pengalir fluida. Melalui dua dari lubang ini, fluida dialirkan masuk dan keluar pada sisi yang lain, sedangkan fluida yang lain mengalir melalui lubang dan ruang pada sisi sebaliknya karena ada sekat. Penukar panas jenis pelat and *frame* dapat dilihat pada Gambar 4. berikut ini.



Gambar 4. Penukar panas jenis pelat and frame. Sumber : McCabe (1985)

2.2 Alat Penukar Kalor

Menurut S. Lalot [11], Alat penukar kalor merupakan suatu peralatan dimana terjadi perpindahan panas dari suatu fluida yang temperaturnya lebih tinggi kepada fluida yang temperaturnya lebih rendah. Proses perpindahan panas tersebut dapat dilakukan secara langsung atau tidak. Maksudnya ialah (1) Alat penukar kalor yang langsung, ialah dimana fluida yang panas akan bercampur secara langsung dengan fluida dingin (tanpa adanya pemisah) dalam suatu bejana atau dalam ruangan tertentu. (2) Alat penukar kalor yang tidak langsung, ialah dimana fluida panas tidak berhubungan langsung (*indirect contact*) dengan fluida dingin. Jadi proses perpindahan panasnya itu mempunyai media perantara, seperti pipa, pelat atau peralatan jenis lainnya.

Menurut Roetzel [12], Begitu banyaknya jenis dari alat penukar kalor *shell* dan *tubes* yang dipergunakan pada dunia industri. Untuk membuat pembagiannya secara pasti adalah sangat sulit. Tetapi oleh *Standard of Turbular Exchanger Manufactures Association* (TEMA) dikelompokkan berdasarkan pemakaian dari *heat exchanger* itu menjadi 3 kelompok, yaitu : (1) Alat penukar kalor kelas "R", yang dipergunakan pada industri minyak dan peralatan yang berhubungan dengan proses tersebut. (2) Alat penukar kalor kelas "C", yang umumnya dipergunakan pada keperluan komersial. (3) Alat penukar kalor kelas "B", yang umumnya

dipergunakan pada proses kimia. Kelas R, kelas C dan kelas B ini, kesemuanya adalah alat penukar kalor yang tidak dibakar (*unfired shell and tubes*), tidak sama dengan dapur atau ketel uap.

2.3 Fouling pada Alat Penukar Kalor

Menurut Turaikha [13], fouling adalah suatu pembentukan endapan atau sisa zat anorganik dan atau organik pada permukaan yang terjadi akibat transfer panas. Fouling berdasarkan proses terjadinya menjadi enam jenis yaitu :

1. Fouling karena pemadatan terjadi karena jenis kandungan tertentu dalam umpan larutan.
2. Fouling karena pengendapan suhu tinggi. Ini terjadi akibat garam-garam yang termasuk kesadahan tetap seperti kalsium sulfat, magnesium sulfat, kalsium karbonat, magnesium karbonat, dan senyawa silikat kelarutannya turun oleh karena suhu. Dalam pemekatan larutan garam yang mengandung kesadahan tetap melalui proses evaporasi pada suhu didihnya, sehingga terjadi kenaikan konsentrasi garam dalam larutan sekaligus penurunan kelarutannya karena kenaikan suhu. Menurut Bryers, R.W. [14], disaat larutan konsentrasi bergerak dari kondisi jenuh ke kondisi super jenuh terjadilah nukleasi dan pertumbuhan kristal. Kristal bertambah besar dan setelah mencapai berat tertentu mengendap secara gravitasi. Pada waktu yang bersamaan karena campuran larutannya turun akibat kenaikan suhu maka garam yang saat suhunya rendah dalam larutan akan mengendap. Fouling yang terjadi karena pengendapan pada suhu tinggi disebut juga scaling, dan sisa endapan yang didapat disebut scale atau kerak.
3. Fouling karena sedimentasi partikel. Pemekatan larutan yang mengandung partikel padatan terdispersi melalui penguapan pelarutnya menghasilkan peningkatan kadar padatan dalam larutan. Menurut Polley [15], Kondisi larutan yang pekat menimbulkan resiko sedimentasi partikel padatan pada permukaan transfer panas, sisa padatan tersebut dapat menempel secara adhesi pada dinding transfer panas.
4. Fouling karena reaksi kimia. Jika larutannya mengandung senyawa-senyawa yang dapat saling bereaksi pada suhu tinggi membentuk garam hasil reaksi berupa endapan-endapan, maka timbullah sisa endapan garam pada dinding transfer panas. Fouling yang diakibatkan oleh reaksi kimia tersebut dinamakan salting.

5. Fouling karena proses biologi. Terjadinya sisa endapan akibat proses biologi dapat terjadi pada sistem yang menggunakan air tanah atau air perairan yang mengandung mikroorganisme. Akibat terjadinya pengumpulan jamur, ganggang, dan lain-lain yang menempel pada dinding akan membentuk sisa endapan biologi yang dinamakan dengan biofouling.
6. Fouling karena korosi. Korosi disebabkan logam karena oksidasi yang terjadi pada permukaan yang mengandung besi sehingga terbentuk besi oksidasi (yang dinamakan dengan karatan). Menurut R. B. Dooley [16], Terjadinya korosi pada permukaan dinding bagian dalam pipa, besi oksidasi yang terjadi akan mengumpul dan menutupi penampang saluran pipa yang menyebabkan tertahannya aliran sehingga terjadi penurunan tekanan.

2.4 Penyebab Terjadinya Endapan

Bansal [17], fouling diakibatkan fluida yang dipanaskan sehingga sisa endapan yang terbentuk, disebabkan tiga penyebab yaitu :

1. Isolator panas yang terjadi pada permukaan menyebabkan terjadinya penurunan transfer panas melewati dinding pipa. Tahanan transfer panas yang ditimbulkan dari sisa endapan pada dinding pipa akan mengakibatkan penurunan nilai luas permukaan transfer panas sehingga panas yang diterima fluida dari sumber panas melewati dinding pipa menjadi menurun. Menurut Oddgeir [5], Untuk menghindari penurunan luas permukaan transfer panas tersebut sepanjang periode operasional alat penukar kalor, pada tahapan perancangan peralatan telah diperhitungkan adanya sisa endapan kerak melalui penggunaan nilai Fouling Factor (Rd) yang dipersyaratkan sehingga luas permukaan transfer panas yang disediakan menjadi lebih dari nilai yang dibutuhkan.
2. Meningkatkan kekasaran permukaan dinding pipa (permukaan transfer panas) yang menaikkan friksi aliran. Nilai ϵ (kekasaran permukaan dinding) ditingkatkan dari sisa endapan pada permukaan dinding pipa akan menyebabkan faktor friksi f meningkat, sehingga tenaga yang hilang karena friksi meningkat pula. Akibatnya kebutuhan akan tenaga pemompaan fluida akan naik pula.
3. Jika terjadi korosi agar diciptakan lingkungan penampang saluran terlokalisasi. Menurut DeAnda [18], menumpuknya dan memperkecilnya luas penampang pipa akibat sisa endapan besi oksida dari korosi yang terakumulasi pada dinding bagian

dalam pipa dapat menyebabkan menghambatnya aliran yang berakibat meningkatnya tenaga pemompaan untuk pengaliran dengan laju alir yang sama.

2.5 Perhitungan Perpindahan Panas

2.5.1. Neraca enthalphi dalam penukar panas

Menurut Cengel dan Turner [3], bahwa panas yang dipindahkan untuk salah satu arus fluida dalam penukar panas, yaitu :

$$q = m \cdot (H_b - H_a) \quad (1)$$

dimana

q = laju perpindahan kalor ke dalam arus fluida

m = Laju alir massa

H_a, H_b = Enthalphi persatuan massa arus fluida masuk dan keluar alat penukar panas.

Perpindahan kalor dari atau ke udara sekitar tidak dikehendaki. Salah satu dari kedua arus fluida yang berada disebelah luar dapat mengambil kalor atau melepaskan kalor ke udara sekitar jika fluida itu lebih dingin atau lebih panas. Pencegahan hal itu dilakukan dengan mengisolasi penukar panas. Dengan menggunakan persamaan (1) dapat digunakan untuk menghitung besarnya kalor yang dipindahkan masing-masing fluida :

- Fluida panas, $q = m_h \cdot (H_{hb} - H_{ha})$
- Fluida dingin, $q = m_c \cdot (H_{cb} - H_{ca})$

dimana,

m_c, m_h = Laju alir massa fluida dingin, fluida panas

H_{ca}, H_{ha} = Enthalphi persatuan massa fluida dingin, fluida panas saat masuk penukar panas.

H_{cb}, H_{hb} = Enthalphi persatuan massa fluida dingin, fluida panas saat keluar penukar panas.

q_c, q_h = laju perpindahan panas fluida dingin, panas.

Tanda q_c adalah positif (+), tetapi tanda q_h negatif (-). Hal itu dibuat karena fluida panas melepas kalor, dan panas yang dilepaskan diambil fluida dingin, sehingga persamaan menjadi :

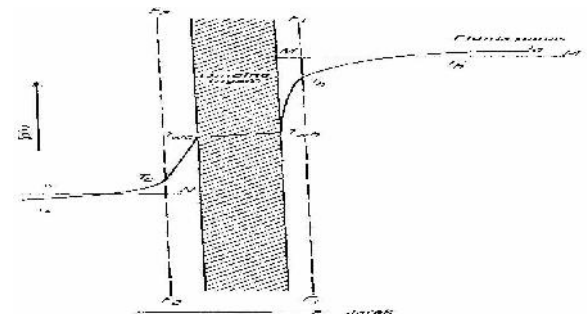
$$m_h \cdot (H_{ha} - H_{hb}) = m_c \cdot (H_{cb} - H_{ca})$$

dan jika kalor spesifik (c_p) dianggap konstan, neraca enthalphi dapat dituliskan :

$$m_h \cdot c_{ph} \cdot (T_{ha} - T_{hb}) = m_c \cdot c_{pc} \cdot (T_{cb} - T_{ca}) \quad (2)$$

2.5.2. Koefisien perpindahan panas menyeluruh (U)

Menurut Warren [19], Profil gradient temperatur perpindahan panas yang terjadi pada suatu dinding (logam) antara fluida panas pada satu sisi dan fluida dingin pada sisi lain dengan pengaliran konveksi paksa. Pada gambar 5 memperlihatkan penurunan temperatur secara bertahap yang terdiri dari konveksi (pada fluida panas), konduksi (pada logam) dan konveksi pada fluida dingin. Gradient suhu pada konveksi paksa dapat dilihat pada Gambar 5. Dengan persamaan Fourier tentang konduksi dan persamaan Newton tentang pendinginan (konveksi), maka panas yang dipindahkan dapat dibedakan, antara lain :



Gambar 5. Gradient suhu pada konveksi paksa. Sumber : Warren (1998)

1. Konveksi pada fluida panas, $dq = -h A dT$

$$dq = -h A (T_{wh} - T_h)$$

$$dq = h A (T_h - T_{wh})$$

$$dq = h_1 A_1 (T_h - T_{wh})$$

$$(T_h - T_{wh}) = dq \cdot (1 / (h_1 dA_1))$$

2. Konduksi pada dinding logam, $dq = -k A_{Lmt} dT / \Delta x$

$$dq = -k A (T_{wc} - T_{wh}) / \Delta x$$

$$dq = k A_{Lmt} (T_{wh} - T_{wc}) / \Delta x$$

$$(T_{wh} - T_{wc}) = dq \cdot (\Delta x / (k dA_{Lmt}))$$

3. Konveksi pada fluida dingin, $dq = h_2 A_2 (T_{wc} - T_c)$

$$(T_{wc} - T_c) = dq \cdot (1 / (h_2 dA_2))$$

2.5.3 Jenis shell and tube

Jenis ini merupakan jenis yang paling banyak digunakan dalam industri perminyakan. Alat ini terdiri dari sebuah shell (tabung/ silinder besar) dimana didalamnya terdapat suatu bundle (berkas) pipa dengan diameter yang relative kecil. Satu jenis fluida mengalir didalam pipa-pipa sedangkan fluida lainnya mengalir dibagian luar pipa tetapi masih didalam shell [20].

2.5.4 Fouling factor (faktor pengotoran)

Menurut Oddgeir G. [5], Faktor pengotoran ini sangat mempengaruhi perpindahan panas pada *heat exchanger*. Pengotoran ini dapat terjadi endapan dari fluida yang mengalir, juga disebabkan oleh korosi

pada komponen dari *heat exchanger* akibat pengaruh dari jenis fluida yang dialirinya. Selama *heat exchanger* ini dioperasikan pengaruh pengotoran pasti akan terjadi. Terjadinya pengotoran tersebut dapat mengganggu atau mempengaruhi temperatur fluida mengalir juga dapat menurunkan atau mempengaruhi koefisien perpindahan panas menyeluruh dari fluida tersebut. Beberapa faktor yang dipengaruhi akibat pengotoran antara lain :

- Temperatur fluida
- Temperatur dinding tube
- Kecepatan aliran fluida

Menurut Aquino B [21], Faktor pengotoran (*fouling factor*) dapat dicari persamaan :

$$R_d = U_c - U_d / U_c U_d \quad (3)$$

U_c = Koefisien perpindahan panas menyeluruh bersih

$$= h_{io} \times h_o / h_{io} + h_o \quad (4)$$

h_{io} = Koefisien perpindahan panas pada permukaan luar tube

h_o = Koefisien perpindahan panas fluida diluar tube

U_d = Koefisien perpindahan panas menyeluruh (*design*)
 $= Q / \Delta T \quad (5)$

2.5.5 Penurunan tekanan pada shell side

Apabila dibicarakan besarnya penurunan tekanan pada sisi shell alat penukar kalor, masalahnya proporsional dengan beberapa kali fluida itu menyeberangi *tube bundle* diantara sekat-sekat. Menurut CP. Kothandaraman [22], besarnya penurunan tekanan pada isothermal untuk fluida yang dipanaskan atau didinginkan, serta kerugian saat masuk dan keluar adalah :

$$\Delta P_s = \frac{f_s \cdot G^2 s \cdot D_s \cdot (N+1)}{5,22 \cdot 10^{10} \cdot D_s \cdot S_s \cdot \Psi_s} \quad (6)$$

2.5.6 Penurunan tekanan pada tube side

Besarnya penurunan tekanan pada tube side alat penukar kalor telah diformulasikan, persamaan terhadap faktor gesekan dari fluida yang dipanaskan atau yang didinginkan didalam tube.

$$\Delta P_t = \frac{f_s \cdot G^2 s \cdot D_s \cdot L \cdot n}{5,22 \cdot 10^{10} \cdot D_t \cdot S_s \cdot \Psi_t} \quad (7)$$

Dimana :

n = Jumlah pass aliran tube

L = Panjang tube

$L.n$ = Panjang total lintasan dalam ft

Mengingat bahwa fluida itu mengalami belokan pada saat passnya, maka akan terdapat kerugian tambahan penurunan tekanan.

$$\Delta p_{pr} = \frac{4n \cdot V^2}{St \cdot 2g} \text{ psi} \quad (8)$$

3. Metode Penelitian

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian pada Perusahaan PT. Pupuk Iskandar Muda Lhokseumawe yang berlokasi di Gampong Batuphat Kecamatan Muara Satu Kota Lhokseumawe. Sebelah utara berbatasan dengan laut, sebelah barat berbatasan dengan Gampong Tambon Baroh Kecamatan Kruenggeukueh Kabupaten Aceh Utara. Sedangkan sebelah selatan berbatasan Gampong Binjee Kecamatan Nisam Kabupaten Aceh Utara, dan sebelah timur berbatasan dengan Gampong Blang Pulo Kecamatan Muara Dua Kota Lhokseumawe. Karena keterbatasan biaya dan waktu penelitian, maka penelitian dilaksanakan dalam waktu 3 bulan. Data penelitian diambil setelah seminar proposal.

3.2 Peralatan Penelitian

Kajian yang menjadi penelitian adalah alat penukar kalor secondary reformer waste heat exchanger 53 EA-1001 yang ada pada perusahaan PT. Pupuk Iskandar Muda Lhokseumawe mengalami kebocoran dan sudah tiga kali melakukan perbaikan ulang.

Penelitian ini guna memprediksi berkembang terjadinya fouling dalam pipa air pada alat penukar kalor secondary reformer waste heat exchanger 53 EA-1001 yang ada pada perusahaan PT. Pupuk Iskandar Muda sehingga dapat dibuat jadwal rutin berkala pembersihan dan juga pergantian pipa alat penukar kalor yang tidak layak digunakan lagi. Adapun jenis alat penukar kalor tersebut yaitu item 53 EA-1001 (*Natural Gas Super Heater*); *Tube steam* (in $P = 42 \text{ kg/cm}^2$, $T = 385^\circ\text{C}$); *Shell Natural Gas* (in $P = 17 \text{ kg/cm}^2$, $G = T = 20\text{-}30^\circ\text{C}$, $T_{out} = 65\text{-}70^\circ\text{C}$); dengan *surface area* (A) = $11,7 \text{ m}^2$.

Alat penukar kalor ini dipasangkan secara vertikal dengan tinggi keseluruhan 16,6 m dan diameter luar shell 2,156 m. Pipa air yang disusun secara selang seling berjumlah 362 dengan diameter pipa 38,1 mm. Adapun alat ukur yang dipergunakan adalah alat pengukur temperatur dan alat ukur laju aliran gas panas untuk dapat mengukur keluar dan masuk aliran gas panas.

3.3 Bahan dan Prosedur Kerja

a. Bahan

Pada penelitian ini digunakan beberapa peralatan utama, yaitu :

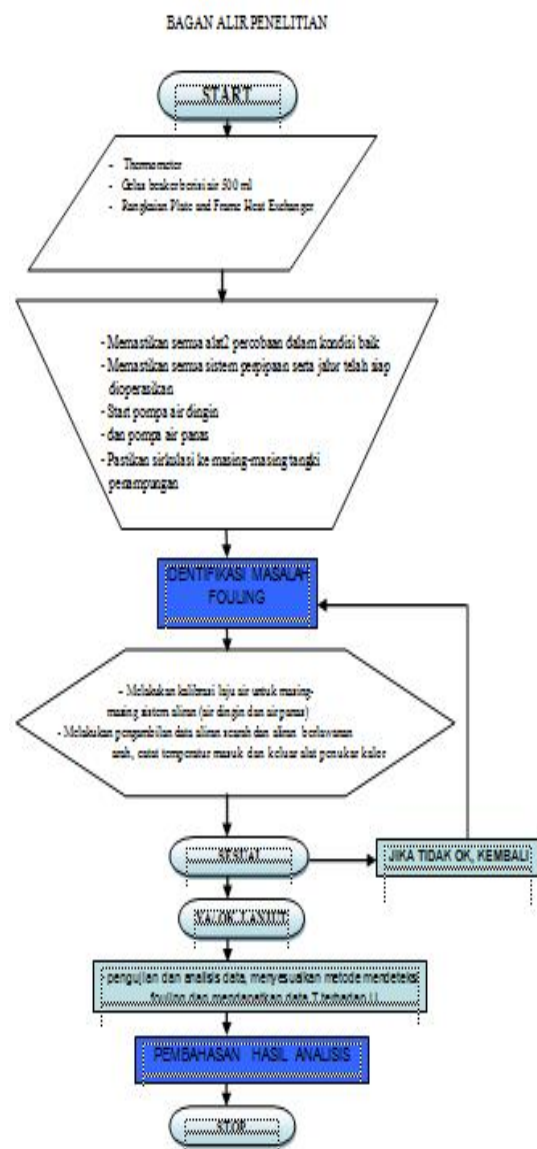
1. *Thermometer*
2. Gelas beaker berisi air 500 ml
3. Rangkaian *shell dan tube heat Exchanger*
4. *Stop Watch*
5. Sedikit zat warna di atas pemanas listrik 600 W

6. Air, sebagai fluida panas dan dingin (fluida dingin dialirkan sekali lewat)
- b. Prosedur Kerja
1. Studi Literatur
Studi literatur adalah rangkaian proses mengumpulkan referensi yang berkaitan dengan topik penelitian yang berasal dari buku, internet, dan jurnal.
 2. Pengumpulan data lapangan
Pengumpulan data lapangan adalah proses mendapatkan informasi, riwayat peralatan, data sheet peralatan, lokasi korosi, parameter input simulasi, kondisi operasional dan lingkungan yang diperoleh dari PT. Pupuk Iskandar Muda, misalnya: pengumpulan data dilakukan dengan cara tanya-jawab langsung dengan beberapa karyawan, menelaah dari manual *handbook* dan mencatat data-data pada saat alat penukar kalor beroperasi.
 3. Langkah kerja
Untuk mendapatkan data-data sebagai penunjang diperlukan adanya langkah langkah kerja, yaitu :
 - a. Memastikan semua alat-alat percobaan dalam kondisi baik
 - b. Memastikan semua sistem perpipaan serta kerangan (jalur) telah siap untuk dioperasikan
 - c. Start pompa air dingin dan pompa air panas untuk sirkulasi ke masing-masing tangki penampungan
 - d. Melakukan kalibrasi laju air untuk masing-masing sistem aliran (air dingin dan air panas)
 - e. Melakukan pengambilan data untuk aliran searah (*co-current*) dan berlawanan arah (*counter-current*) dengan cara mencatat temperatur masuk dan keluar *Heat Exchanger* (alat penukar kalor) pada masing-masing sistem aliran (air dingin dan air panas)
 - c. Pengolahan data dan Analisis
 1. Menganalisa data-data tersebut untuk mendapatkan perhitungan efisiensi alat penukar kalor tipe *shell and tube*
 2. Data hasil pengamatan pada alat penukar kalor secondary reformer waste heat boiler 53 EA-1001 yang diamati secara langsung dianalisis dengan menggunakan statistik komputer dengan software SPSS version 16.0
 3. Pengolahan data hasil pengujian sifat mekanik dilakukan secara persamaan empiris dengan menggunakan metode slope. Nilai-nilai hasil pengujian digambarkan dalam bentuk grafik sehingga memudahkan analisa data.

a. Target/ Indikator Penelitian

Target dari hasil penelitian ini didapatkan suatu prosentase mengetahui penyebab terjadinya fouling pada 53 EA-1001, metode memprediksi fouling dengan melihat pengaruh data T terhadap U, mengetahui harga koefisien perpindahan panas mencapai harga minimum alat yang direncanakan. Tingginya kecepatan aliran berarti waktu kontak kedua fluida semakin singkat sehingga meningkatnya bilangan Reynold dan Nusselt, serta parameter model fouling yang sesuai dan ideal. Sehingga dapat memprediksikan penumpukkan fouling pada pipa sehingga dapat dibuat jadwal rutin untuk pembersihan dan pergantian pipa yang tidak layak untuk dioperasikan kembali. Disamping itu juga dapat menjadi acuan pada penyempurnaan *design* mendatang.

b. Skema Prosedur Penelitian



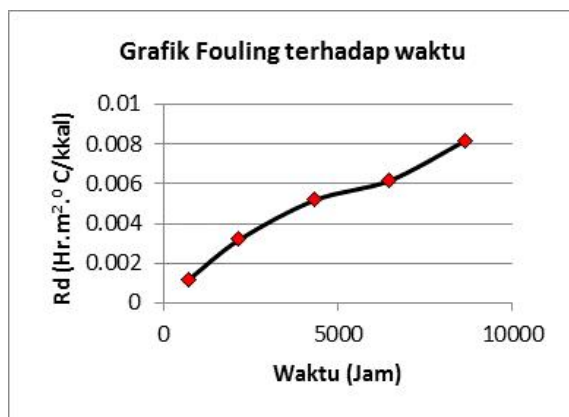
Gambar 6. Bagan alir penelitian

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Transfer Panas dan Fouling pada Alat Penukar Kalor

Pada alat penukar kalor tipe EA 53 1001 panas yang ditimbulkan adalah panas sensible bukan panas laten. Panas sensible panas jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan atau menurunkan suhu benda, jika kalor ditambahkan pada suatu benda dipanasi, suhu benda akan naik karena molekul-molekul menerima panas dan gerak lebih cepat, jika panas sensible diambil dari suatu benda, suhunya akan turun, karena gerak molekul-molekul menjadi lambat, perubahan ini dapat dilihat dan diukur dari perubahan suhu pada thermometer. Panas laten atau tersembunyi, panas yang diperlukan untuk mengubah wujud zat dari padat menjadi cair, dari cair menjadi gas atau sebaliknya, tanpa mengubah suhunya.

Berdasarkan persamaan (3) maka nilai R_d dapat dihitung, dengan ketentuan $R_{di} = 0,04$ diperoleh dari Tabel 1. Untuk uap panas lanjut yang mengalir pada tube EA 53 1001 yaitu $R_{di} = 0,04$ dan uap panas gas lanjut (steam) yang mengalir pada shell $R_{do} = 0$. Jadi dengan menggunakan persamaan 2.20 (pada bab dua) diperoleh nilai R_d , yaitu $R_d = 0,008187$. Gambar 7. merupakan Grafik hubungan waktu operasi evaporasi terhadap nilai fouling faktor.



Gambar 7. Grafik hubungan waktu evaporasi terhadap fouling faktor.

4.2. Analisis Distribusi Temperatur Alat Penukar Kalor 53 EA -1001

Fouling adalah peristiwa terakumulasinya padatan yang tidak dikehendaki di permukaan Heat Exchanger yang berkontak dengan fluida kerja, termasuk permukaan heat transfer. Peristiwa tersebut adalah pengendapan, pengerakan, korosi, polimerisasi dan proses biologi.

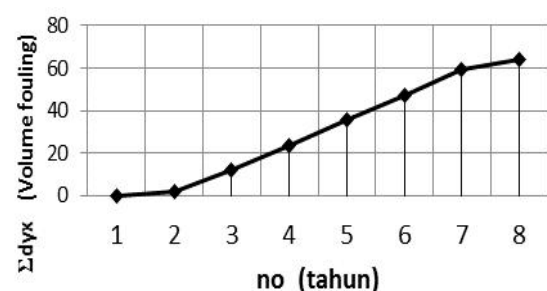
Dengan mengasumsikan bahwa volume itu sama dengan panjang (X_d) x lebar (X_d) x tinggi (X_d) disimbolkan dengan dengan (X_d)³ sehingga (X_d)³ = 0,0066 (dalam tabel 3.5), maka diperoleh tebal kerak

deposit: 668 ,36 Btu / Hr . ft² F . Alat penukar panas setelah dioperasikan dalam waktu yang cukup lama maka akan timbul deposit endapan pada permukaan transfer panas. Deposit endapan tersebut yang antara lain berupa kerak dari kesadahan tetap, merupakan penghambat transfer panas dari uap ke cairan, biasa disebut tahanan transfer panas pengotor.

Tabel 1. Hubungan laju penumpukkan fouling terhadap waktu

No	years (y)	day (d)	$\Sigma d.y$	x (tebal)	$\Sigma d.y.x$
1	0	360	0	0	0
2	1	360	360	0,0066	0,0066
3	2	360	720	0,0066	2,376
4	5	360	1800	0,0066	11,88
5	10	360	3600	0,0066	23,76
6	15	360	5400	0,0066	35,64
7	20	360	7200	0,0066	47,52
8	25	360	9000	0,0066	59,4
9	27	360	9720	0,0066	63,585

Cukup banyak kerugian yang dapat ditimbulkan oleh kerak tersebut. Sehingga apabila terjadi perpindahan panas yang besar maka penting untuk dapat mendeteksi kerak atau boleh juga dibuat analisis fouling untuk memperediksi fouling yang terbentuk pada alat penukar panas. Hal ini seperti ditunjukkan pada gambar 8 berikut ini:



Gambar 8. Grafik hubungan laju penumpukkan fouling terhadap waktu.

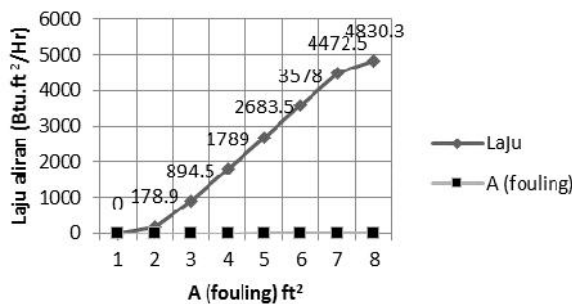
4.3. Analisis Distribusi Kecepatan Aliran Alat Penukar Kalor 53 EA -1001

Semakin banyak *fouling* oleh korosi menyebabkan luas penampang aliran menjadi semakin kecil (menyempit) yang menimbulkan tenaga hilang karena friksi semakin besar atau beda tekanan yang melintasi penukar panas jadi naik.

Namun semakin tinggi kecepatan aliran berarti waktu kontak kedua fluida semakin singkat.

Tabel 2. Hubungan penumpukkan fouling dengan laju aliran fluida

No	A (fouling) ft ²	Laju (Btu.ft ² /Hr)	Tahun
1	0	0	0
2	0,00022	178,9	1
3	0,0011	894,5	5
4	0,0022	1789	10
5	0,0033	2683,5	15
6	0,0044	3578	20
7	0,0055	4472,5	25
8	0,00594	4830,3	27



Gambar 9. Grafik hubungan penumpukkan fouling dengan laju aliran fluida

Untuk aliran laminar $Re \leq 2100$ maka nilai friksi adalah $f = 64 / Re$, sebab Re yang diperoleh adalah 950, maka dapat diasumsikan bahwa aliran yang mengalir pada tube alat penukar kalor 53 EA-1001 adalah aliran laminar.

5. Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa, sebagai berikut :

- Hasil analisis penulis sesuai dengan data desain pabrik alat temperatur 399 °C, yaitu temperatur 61°C. Hal ini menandakan bahwa semakin hari beroperasi alat penukar kalor semakin menurun kapasitas temperaturnya. Alat penukar kalor beroperasi secara terus menerus selama 8640 jam, (Rd;jam = 0.0012;720, terendah pada tahun awal dan mencapai maksimum pada Rd;jam = 0.0082; 8640) faktor foulingnya pun meningkat dengan diikuti meningkatnya tahanan panas yang terdapat pada alat penukar kalor
- Alat penukar kalor beroperasi maka akan terjadi penumpukkan fouling semakin besar, penumpukkan fouling akan mengikuti sama volume alat penukar kalor 63,585 m³ selama dalam kurun waktu 27 tahun bila tidak

dibersihkan. Awal tahun pertama minimum yaitu ($v;V= 0;0, 1$ dan mencapai maximum 59,4, 27;64.152)

- Penumpukkan volume fouling awal tahun 0,0066 m³ hingga maximal mencapai 63,59 m³, sehinggalapadat sama dengan volume tube bila tidak dilakukan perawatan. Dan laju aliran fluida yang semula 178,910 Btu.ft²/Hr, hingga mencapai 4830,3 Btu.ft²/Hr, maka semakin lama semakin kencang lajunya akan terjadi penyempitan volume tube selama 27 tahun.

Daftar Pustaka

- [1] M. Ali, 2012, Analisis Aliran pada Sisi Shell Reboiler 61-105 C dengan Menggunakan CFD, *Thesis Magister Teknik Mesin*, Unsyiah.
- [2] Susanto, 2012, Pengembangan Metode Deteksi Fouling pada Scondary Reformer Waste Heat Boiler 101-C, *Thesis Magister Teknik Mesin*, Unsyiah.
- [3] Y. A. Cengel and Robert H. Turner, 2005, *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*. McGraw Hill, 2 edition.
- [4] Gonzales Garcia G, 2009, *Ph.D. Thesis*, FIMEE, Universidad de Guanajuato.
- [5] Oddgeir G, 2009, *Detection of Fouling in Heat Exchangers*, University of Iceland.
- [6] Wahyu S. Nugroho, 2001, Analisa Fouling Factor Pada Heat Exchanger Di Pembangkit Listrik Tenaga Uap Sektor Muara Karang Dengan Menggunakan Program Visual Basic 5.0, *Tugas Akhir Teknik Mesin*, Universitas Trisakti, Jakarta.
- [7] Ekadewi A. Handoyo, 2000, Pengaruh Kecepatan Aliran Terhadap Efektivitas Shell and Tube Heat Exchanger, *Jurnal Teknik Mesin*, Universitas Kristen Petra, Jakarta.
- [8] Holman, JP. Alih bahasa E. Jasifi, 1995, *Perpindahan Kalor*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- [9] Rudi Hartono, 2008, *Penukar Kalor modul-1.07*, Lab. OTK, Unsultengtirta, Banten.
- [10] M.C. Cabe, W.L. Smith, J.C. Harriot, P, 1985, *Unit Operation of Chemical Engineering*, 4th ed, Mc.Graw-Hill, New York, Chapter 11, 12, 15.
- [11] S. Lalot, O.P. Palsson, G.R. Jonsson, & B. Desmet, 2005, Comparison of neural networks and kalman filters performances for fouling detection in a heat exchanger, *International Journal of Heat Exchangers*, VII.
- [12] Roetzel W. & Spang B., 1989, Thermal calculations in multi-pass shell and tube heat exchangers, *Chem. Eng. Res. Des.*, 67, 115-120.
- [13] Turaikha, M. 1984, *Fouling of Heat Exchanger Surface*, Heat Transfer Engineering, Washington D.C, Vol 5, No. 1-2,

- [14] Bryers, R.W., 2009, *Proceedings of the International Conference on the Fouling of Heat Exchanger Surfaces*, Engineering Foundation, New York, (In Press).
- [15] Polley G.T., Wilson D.I., Pugh S.J. & Petitjean E., 2007, Extraction of crude oil fouling data parameters from plant monitoring, *Heat Transfer Engineering*, 28 (3), 1-8.
- [16] R. B. Dooley, 1991, Boiler Tube Failures-A Perspective and a Vision, *presented at the EPRI International Boiler Tube Failure Conference*, La Jolla, CA (1991).
- [17] B. Bansal & X. D. Chen, 2005, *Fouling on heat exchanger by dairy fluids- a review*, [http:// services.bepress.com/eci/heatexchanger](http://services.bepress.com/eci/heatexchanger).
- [18] DeAnda, E., 1981, *Heat Exchanger Fouling and Corrosion Evaluation*,” Report No. 81- 18003, AiResearch Manufacturing Company of California, Torrance, California.
- [19] Warren M. Rohsenow, 1998, *Handbook Heat Transfer*, Mc Graw-Hill Handbook, New York.
- [20] Richard C. Byrne, 1999, *Standards of The Turbular Exchanger Manufactures Association*, Standards of The Turbular Exchanger Manufactures Association, Inc., New York.
- [21] Aquino B., zderouin C. & Polley G. T., 2007, Towards an understanding of how tube inserts mitigate fouling in heat exchangers, *Engineering Foundation Conference*, Tomar.
- [22] CP. Kothandaraman, 1977, *Heat and Mass Transfer Data Book*, Wiley Eastern Limited, New Delhi.