

SKRIPSI

**PENGARUH KETEBALAN *TUBE* TERHADAP *HEAT TRANSFER*,
PRESSURE DROP, DAN TEGANGAN PADA *SHELL AND TUBE HEAT*
*EXCHANGER***

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar
Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

RAHMAD KUNCORO ADI

20160130159

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA
2020**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan dibawah ini:

Nama : **Rahmad Kuncoro Adi**

Nomor Mahasiswa : **20160130159**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi saya adalah asli hasil karya saya dan tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau dipublikasikan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu ataupun disebutkan sumbernya dalam naskah dan daftar pustaka.

Yogyakarta, 22 Juli 2020



Rahmad Kuncoro Adi

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

“Hanya kepada Engkaulah kami menyembah dan hanya kepada Engkaulah kami memohon pertolongan”

-Q.S. Al-Fatihah 1: Ayat 5-

“Ingatlah, hanya dengan mengingat Allah hati menjadi tenteram”

-Q.S. Ar-Ra'd 13: Ayat 28-

“Barangsiapa yang menyibukkan dirinya dengan bersandar kepada Allah, maka Allah akan mencukupi kebutuhannya”

-Ibnu Qoyyim-

“Jadilah yang terbaik dimanapun berada. Berikan yang terbaik yang bisa kamu berikan”

-Prof. Dr. Ing. H. BJ Habibie-

KATA PENGANTAR

Assalamu 'alaikum Wa rahmatullahi Wabarakatu.

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan segala nikmat dan karunia-Nya sehingga kita selalu diberikan kesehatan sampai saat ini. Shalawat dan salam kita curahkan kepada rasulullah Muhammad SAW yang telah membawa kita dari zaman jahiliyah hingga Islamiyah. *Alhamdulillahillobbil 'alamin* saya dapat menyelesaikan **Tugas Akhir : Pengaruh Ketebalan Tube terhadap Heat Transfer, Pressure drop, dan Tegangan pada Shell and Tube Heat Exchanger.**

Tugas akhir ini berisi tentang perancangan *heat exchanger* yang terdapat pada penelitian *High-Purity Oxygen Production Using Mixed Ionic-Electronic Conducting Sorbents* dengan pengvariasian ketebalan *tube*. *Datasheet* yang digunakan dalam perancangan didapatkan dari hasil perancangan menggunakan TEMA dan ASME Section VIII div. II.

Penyusun menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini masih jauh dari bentuk sempurna, dikarenakan keterbatasan referensi dan waktu yang tersedia untuk penyusunannya. Oleh karena itu penyusun mengharapkan kritik dan saran guna membangun Tugas Akhir yang lebih baik di masa yang akan datang.

Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan digunakan untuk referensi bagi untuk penelitian selanjutnya. Atas perhatiannya saya mengucapkan terimakasih.

Wassalamu 'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Yogyakarta, 22 Juli 2020

Penyusun,

(Rahmad Kuncoro Adi)

DAFTAR ISI

| | |
|--|------------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| LEMBAR PENGESAHAN | ii |
| SURAT PERNYATAAN | iii |
| MOTTO DAN PERSEMBAHAN | iv |
| KATA PENGANTAR | v |
| DAFTAR ISI | vi |
| DAFTAR GAMBAR | ix |
| DAFTAR TABEL | xii |
| DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN | xiv |
| DAFTAR LAMPIRAN | xvi |
| INTISARI | xv |
| ABSTRACT | xvi |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1. Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2. Rumusan Masalah..... | 2 |
| 1.3. Batasan Masalah | 2 |
| 1.4. Tujuan Penelitian..... | 2 |
| 1.5. Manfaat Penelitian..... | 3 |
| BAB II TINJUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI | 4 |
| 2.1. Tinjauan Pustaka | 4 |
| 2.2. Dasar Teori | 10 |
| 2.2.1. <i>Tube</i> | 13 |
| 2.2.2. Teori Kegagalan Material | 14 |
| 2.2.3. Beban-Beban yang Bekerja pada <i>Heat Exchanger</i> | 16 |
| 2.2.4. Tegangan Maksimum yang Diperbolehkan..... | 16 |
| 2.2.5. Laju Aliran Massa | 17 |
| 2.2.6. Laju Perpindahan Kalor | 17 |
| 2.2.7. Rata-Rata Logaritmik Perbedaan Suhu (LMTD) | 17 |

| | |
|---|------------|
| 2.2.8. Jumlah <i>Tube</i> | 18 |
| 2.2.9. Bundle Diameter | 19 |
| 2.2.10. Diameter <i>Shell</i> | 19 |
| 2.2.11. Ketebalan <i>Shell</i> dan <i>Tube</i> | 20 |
| 2.2.12. Ketebalan <i>Head</i> | 21 |
| 2.2.13. Dimensi <i>Flange</i> | 21 |
| 2.2.14. Desain <i>Saddle</i> | 24 |
| 2.2.15. Efektivitas <i>Heat Exchanger</i> ($\epsilon - NTU$) | 28 |
| 2.2.16. <i>Pressure Drop</i> | 29 |
| 2.2.17. Analisis Tegangan | 32 |
| 2.2.18. <i>Safety Factor</i> | 34 |
| 2.2.19. <i>Overdesign</i> | 34 |
| 2.2.20. Perpindahan Kalor <i>Heat exchanger</i> | 35 |
| 2.3. <i>Software Inventor 2020</i> | 35 |
| 2.3.1. Tampilan Awal <i>Software</i> | 36 |
| 2.3.2. Alur Pengerjaan Autodesk Inventor | 36 |
| 2.4. SimScale | 37 |
| 2.4.1. Tampilan Awal <i>Platform</i> | 37 |
| 2.4.2. Tampilan <i>Workbench</i> | 38 |
| 2.4.3. Tampilan <i>Post-Processing</i> | 38 |
| BAB III METODE PENELITIAN | 39 |
| 3.1. Tahapan Penelitian | 39 |
| 3.2. Alat Penelitian | 41 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | 42 |
| 4.1. Pengaruh Ketebalan <i>Tube</i> terhadap <i>Heat Transfer</i> | 58 |
| 4.2. Pengaruh Ketebalan <i>Tube</i> terhadap <i>Pressure Drop</i> | 65 |
| 4.3. Pengaruh Ketebalan <i>Tube</i> terhadap Tegangan | 75 |
| BAB V PENUTUP | 138 |
| 5.1. Kesimpulan..... | 138 |
| 5.2. Saran | 138 |
| DAFTAR PUSTAKA | 139 |

LAMPIRAN 145

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 1.1. <i>Heat exchanger</i> (Thulukkanam, 2013) | 1 |
| Gambar 2.1. Aliran bolak-balik (Miller, 2018) | 10 |
| Gambar 2.2. Aliran searah (Miller, 2018) | 10 |
| Gambar 2.3. <i>Shell and tube heat exchanger</i> (Kakaç <i>et al.</i> , 2012) | 11 |
| Gambar 2.4. Tipe <i>shell and tube heat exchanger</i> berdasarkan TEMA (TEMA, 2007) | 12 |
| Gambar 2.5. <i>Shell and tube heat exchanger</i> tipe AES (TEMA, 2007) | 13 |
| Gambar 2.6. Pola penyusunan <i>tube</i> : (a) 30° ; (b) 60°; (c) 90°; (d) 45°; (e) <i>square tube pitch</i> ; (f) <i>triangular tube pitch</i> . (Thulukkanam, 2013) | 14 |
| Gambar 2.7. Konstanta yang digunakan pada persamaan 3.4. (Sinnot, 2005) | 19 |
| Gambar 2.8. <i>Shell-bundle clearance</i> (Sinnot, 2005). | 20 |
| Gambar 2.9. Dimensi <i>ellipsoidal head</i> (Megyesy, 1997). | 21 |
| Gambar 2.10. Lambang dimensi <i>saddle</i> (Megyesy, 1997). | 27 |
| Gambar 2.11. Faktor gesek sisi <i>shell</i> (Sinnot, 2005) | 31 |
| Gambar 2.12. <i>Longitudinal stress</i> (Khurmi & Gupta, 2005) | 33 |
| Gambar 2.13. <i>Hoop stress</i> (Khurmi & Gupta, 2005) | 33 |
| Gambar 2.14. Tampilan Awal <i>Software</i> | 36 |
| Gambar 2.15. Lembar kerja 2D | 36 |
| Gambar 2.16. Lembar Kerja <i>Assembly</i> | 37 |
| Gambar 2.17. Tampilan Awal <i>Software</i> | 38 |
| Gambar 2.18. Tampilan <i>Workbench</i> | 38 |
| Gambar 2.19. Tampilan <i>Post Processing</i> | 38 |
| Gambar 3.1. Diagram Alir | 39 |
| Gambar 3.2. Diagram Alir (lanjutan) | 40 |
| Gambar 4.1. <i>Friction factor</i> (Sinnot, 2005) | 53 |
| Gambar 4.2. <i>Heat exchanger shell and tube</i> | 58 |
| Gambar 4.3. Geometri <i>heat exchanger</i> | 59 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.4. Variasi <i>heat transfer</i> hasil simulasi SimScale pada variasi ketebalan <i>tube</i> : (a) 0,5 mm, (b) 0,6 mm, (c) 0,7 mm, (d) 0,8 mm, (e) 0,9 mm, (f) 1,0 mm, (g) 1,1 mm, (h) 1,2 mm, (i) 1,3 mm, (j) 1,4 mm, (k) 1,5 mm | 60 |
| Gambar 4.5. Grafik Hubungan Ketebalan <i>Tube</i> terhadap ε - <i>NTU</i> | 63 |
| Gambar 4.6. Fluida <i>Shell</i> | 65 |
| Gambar 4.7. Fluida <i>Shell</i> | 66 |
| Gambar 4.8. Fluida <i>Tube</i> | 66 |
| Gambar 4.9. Fluida <i>Tube</i> | 66 |
| Gambar 4.10. <i>Pressure shell</i> | 66 |
| Gambar 4.11. Variasi <i>pressure</i> hasil simulasi SimScale pada variasi ketebalan <i>tube</i> : (a) 0,5 mm, (b) 0,6 mm, (c) 0,7 mm, (d) 0,8 mm, (e) 0,9 mm, (f) 1,0 mm, (g) 1,1 mm, (h) 1,2 mm, (i) 1,3 mm, (j) 1,4 mm, (k) 1,5 mm | 71 |
| Gambar 4.12. Grafik Hubungan Ketebalan <i>Tube</i> terhadap <i>Pressure drop Tube</i> | 73 |
| Gambar 4.13. <i>Shell and tube heat exchanger</i> | 75 |
| Gambar 4.14. Kontur tegangan hasil simulasi SimScale pada variasi ketebalan <i>tube</i> : (a) 0,5 mm, (b) 0,6 mm, (c) 0,7 mm, (d) 0,8 mm, (e) 0,9 mm, (f) 1 mm, (g) 1,1 mm, (h) 1,2 mm, (i) 1,3 mm, (j) 1,4 mm, (k) 1,5 mm | 78 |
| Gambar 4.15. Kontur <i>displacement</i> arah sumbu X hasil simulasi SimScale pada variasi ketebalan <i>tube</i> : (a) 0,5 mm, (b) 0,6 mm, (c) 0,7 mm, (d) 0,8 mm, (e) 0,9 mm, (f) 1 mm, (g) 1,1 mm, (h) 1,2 mm, (i) 1,3 mm, (j) 1,4 mm, (k) 1,5 mm | 80 |
| Gambar 4.16. Kontur <i>displacement</i> arah sumbu Y hasil simulasi SimScale pada variasi ketebalan <i>tube</i> : (a) 0,5 mm, (b) 0,6 mm, (c) 0,7 mm, (d) 0,8 mm, (e) 0,9 mm, (f) 1 mm, (g) 1,1 mm, (h) 1,2 mm, (i) 1,3 mm, (j) 1,4 mm, (k) 1,5 mm | 82 |
| Gambar 4.17. Kontur <i>displacement</i> arah sumbu Z hasil simulasi SimScale pada variasi ketebalan <i>tube</i> : (a) 0,5 mm, (b) 0,6 mm, (c) 0,7 mm, (d) 0,8 mm, (e) 0,9 mm, (f) 1 mm, (g) 1,1 mm, (h) 1,2 mm, (i) 1,3 mm, (j) 1,4 mm, (k) 1,5 mm | 85 |
| Gambar 4.18. Titik validasi hasil simulasi SimScale pada variasi ketebalan <i>tube</i> : (a) 0,5 mm, (b) 0,6 mm, (c) 0,7 mm, (d) 0,8 mm, (e) 0,9 mm, (f) 1 mm, (g) 1,1 mm, (h) 1,2 mm, (i) 1,3 mm, (j) 1,4 mm, (k) 1,5 mm | 87 |

| | |
|---|-----|
| Gambar 4.19. Grafik Hubungan Ketebalan <i>Tube</i> terhadap Tegangan Maksimal | 93 |
| Gambar 4.20. Grafik Hubungan Ketebalan <i>Tube</i> terhadap <i>Displacement</i> Maksimal Sumbu X | 94 |
| Gambar 4.21. Grafik Hubungan Ketebalan <i>Tube</i> terhadap <i>Displacement</i> Maksimal Sumbu Y | 95 |
| Gambar 4.22. Grafik Hubungan Ketebalan <i>Tube</i> terhadap <i>Displacement</i> Maksimal Sumbu Z | 96 |
| Gambar 4.23. Grafik Hubungan Ketebalan <i>Tube</i> terhadap Tegangan Rata-Rata | 102 |
| Gambar 4.24. Grafik Hubungan Ketebalan <i>Tube</i> terhadap <i>Displacement</i> Rata-Rata Sumbu X | 103 |
| Gambar 4.25. Grafik Hubungan Ketebalan <i>Tube</i> terhadap <i>Displacement</i> Rata-Rata Sumbu Y | 104 |
| Gambar 4.26. Grafik Hubungan Ketebalan <i>Tube</i> terhadap <i>Displacement</i> Rata-Rata Sumbu Z | 105 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|-----|
| Tabel 2.1. Rangkuman Penelitian Sebelumnya | 7 |
| Tabel 2.2. Produksi oksigen menggunakan sistem VPSA (Dorris et al., 2016) ... | 17 |
| Tabel 2.3. <i>Rating</i> tekanan-suhu untuk material 18Cr-8Ni..... | 22 |
| Tabel 2.4. Dimensi <i>flange rating class</i> #150 (ASME, 2009) | 23 |
| Tabel 2.5. Dimensi <i>saddle</i> (Megyesy, 1997) | 28 |
| Tabel 4.1. Data spesifikasi <i>heat exchanger</i> | 56 |
| Tabel 4.2. <i>Temperature inlet tube</i> | 60 |
| Tabel 4.3. <i>Temperature outlet tube</i> | 61 |
| Tabel 4.4. <i>Temperature inlet shell</i> | 61 |
| Tabel 4.5. Validasi Efektivitas <i>Heat Exchanger</i> dalam Menukar Kalor | 62 |
| Tabel 4.6. Presentase Penurunan Efektivitas <i>Heat exchanger</i> dalam Menukar Kalor | 63 |
| Tabel 4.7. <i>Pressure inlet shell</i> | 66 |
| Tabel 4.8. <i>Pressure outlet shell</i> | 67 |
| Tabel 4.9. Validasi <i>pressure drop shell</i> | 67 |
| Tabel 4.10. <i>Pressure inlet tube</i> | 71 |
| Tabel 4.11. <i>Pressure outlet tube</i> | 72 |
| Tabel 4.12. Validasi <i>pressure drop tube</i> | 73 |
| Tabel 4.13. Presentase Kenaikan <i>Pressure drop</i> | 74 |
| Tabel 4.14. Perbandingan Tegangan..... | 87 |
| Tabel 4.15. Tegangan Maksimal..... | 89 |
| Tabel 4.16. <i>Displacement</i> Maksimal Sumbu X | 90 |
| Tabel 4.17. <i>Displacement</i> Maksimal Sumbu Y | 91 |
| Tabel 4.18. <i>Displacement</i> Maksimal Sumbu Z | 92 |
| Tabel 4.19. Presentase Penurunan Tegangan Maksimal Komponen <i>Tube</i> | 96 |
| Tabel 4.20. Tegangan Rata-Rata..... | 98 |
| Tabel 4.21. <i>Displacement</i> Rata-Rata Sumbu X | 99 |
| Tabel 4.22. <i>Displacement</i> Rata-Rata Sumbu Y | 100 |

| | |
|--|-----|
| Tabel 4.23. <i>Displacement</i> Rata-Rata Sumbu Z..... | 101 |
| Tabel 4.24. Presentase Penurunan Tegangan Rata-Rata Komponen <i>Tube</i> | 105 |
| Tabel 4.25. Presentase Perubahan Tegangan Maksimal..... | 107 |
| Tabel 4.26. Presentase Perubahan <i>Displacement</i> Maksimal Sumbu X | 108 |
| Tabel 4.27. Presentase Perubahan <i>Displacement</i> Maksimal Sumbu Y | 109 |
| Tabel 4.28. Presentase Perubahan <i>Displacement</i> Maksimal Sumbu Z..... | 110 |
| Tabel 4.29. Presentase Perubahan Tegangan Rata-Rata..... | 112 |
| Tabel 4.30. Presentase Perubahan <i>Displacement</i> Rata-Rata Sumbu X | 113 |
| Tabel 4.31. Presentase Perubahan <i>Displacement</i> Rata-Rata Sumbu Y | 114 |
| Tabel 4.32. Presentase Perubahan <i>Displacement</i> Rata-Rata Sumbu Z..... | 115 |
| Tabel 4.33. Perbandingan Tegangan Maksimal Variasi Ketebalan <i>Tube</i> 0,5 terhadap Tegangan Izin | 116 |
| Tabel 4.34. Perbandingan Tegangan Maksimal Variasi Ketebalan <i>Tube</i> 0,6 terhadap Tegangan Izin | 118 |
| Tabel 4.35. Perbandingan Tegangan Maksimal Variasi Ketebalan <i>Tube</i> 0,7 terhadap Tegangan Izin | 120 |
| Tabel 4.36. Perbandingan Tegangan Maksimal Variasi Ketebalan <i>Tube</i> 0,8 terhadap Tegangan Izin | 121 |
| Tabel 4.37. Perbandingan Tegangan Maksimal Variasi Ketebalan <i>Tube</i> 0,9 terhadap Tegangan Izin | 123 |
| Tabel 4.38. Perbandingan Tegangan Maksimal Variasi Ketebalan <i>Tube</i> 1,0 terhadap Tegangan Izin | 125 |
| Tabel 4.39. Perbandingan Tegangan Maksimal Variasi Ketebalan <i>Tube</i> 1,1 terhadap Tegangan Izin | 127 |
| Tabel 4.40. Perbandingan Tegangan Maksimal Variasi Ketebalan <i>Tube</i> 1,2 terhadap Tegangan Izin | 129 |
| Tabel 4.41. Perbandingan Tegangan Maksimal Variasi Ketebalan <i>Tube</i> 1,3 terhadap Tegangan Izin | 131 |
| Tabel 4.42. Perbandingan Tegangan Maksimal Variasi Ketebalan <i>Tube</i> 1,4 terhadap Tegangan Izin | 132 |
| Tabel 4.43. Perbandingan Tegangan Maksimal Variasi Ketebalan <i>Tube</i> 1,5 terhadap Tegangan Izin | 134 |

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

| | |
|-------------------|---|
| CFD | : <i>Computational Fluid Dynamics</i> |
| TEMA | : <i>Tubulur Exchanger Manufacturer Association</i> |
| ASME | : <i>American Society of Mechanical Engineer</i> |
| SS | : Stainless Steel |
| T_d | : Suhu desain ($^{\circ}\text{C}$) |
| T_o | : Suhu operasi ($^{\circ}\text{C}$) |
| Q | : Laju perpindahan kalor (W) |
| C_p | : <i>Specific heat</i> (kJ/kg.K) |
| ΔT | : Perbedaan suhu ($^{\circ}\text{C}$) |
| T_1 | : Suhu fluida masuk sisi <i>tube</i> ($^{\circ}\text{C}$) |
| T_2 | : Suhu fluida keluar sisi <i>tube</i> ($^{\circ}\text{C}$) |
| t_1 | : Suhu fluida masuk sisi <i>shell</i> ($^{\circ}\text{C}$) |
| t_2 | : Suhu fluida keluar sisi <i>shell</i> ($^{\circ}\text{C}$) |
| LMTD | : Rata-rata logaritmik perbedaan suhu ($^{\circ}\text{C}$) |
| N_t | : Jumlah <i>tube</i> |
| A_o | : Asusmsi luas perpindahan kalor (m^2) |
| A_t | : Luas permukaan <i>tube</i> (m^2) |
| U_o | : Asumsi overall <i>heat transfer coefficient</i> ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) |
| d_o | : Diameter luar <i>tube</i> (m) |
| l_t | : Panjang <i>tube</i> (m) |
| t | : Ketebalan dinding (m) |
| P | : Tekanan design (psi) |
| S | : Nilai tegangan dari material (psi) |
| E | : Efisiensi sambungan |
| D_i | : Diameter dalam <i>shell</i> (m) |
| L_s | : Panjang <i>shell</i> (m) |
| ρ_{fluida} | : Massa jenis fluida (kg/m^3) |
| $\rho_{material}$ | : Massa jenis material (kg/m^3) |
| Δp_s | : <i>Pressure drop</i> sisi <i>shell</i> (kPa) |
| f | : Faktor gesek |
| Re_s | : Angka Reynold |
| D_e | : Diameter ekuivalen untuk <i>triangular pitch</i> (m) |
| μ_s | : Viskositas dinamis fluida di sisi <i>shell</i> ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) |
| G_s | : Kecepatan rata-rata terhadap <i>cross area</i> ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) |
| P_T | : <i>Tube pitch</i> (m) |
| D_s | : <i>Shell diameter</i> (m) |
| C | : <i>Clearance</i> antara <i>tube</i> |
| B | : Jarak <i>baffle</i> (m) |
| ε | : Efektivitas <i>heat exchanger</i> dalam menukar kalor |
| m_{tube} | : Laju aliran massa sisi <i>tube</i> (kg/s) |

| | |
|-------------------|--|
| \dot{m}_{shell} | : Laju aliran massa sisi <i>shell</i> (kg/s) |
| C_{tube} | : Kalor jenis fluida <i>tube</i> (W/K) |
| C_{shell} | : Kalor jenis fluida <i>shell</i> (W/K) |
| σ_H | : <i>Hoop stress</i> (MPa) |
| P | : <i>Internal Pressure</i> (MPa) |

DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|--|-----|
| Lampiran 1 <i>Basic Allowable Stress</i> | 145 |
| Lampiran 2 Asumsi Overall <i>Heat transfer Coefficient</i> | 146 |
| Lampiran 3 Drawing <i>Heat exchanger Shell and Tube</i> | 147 |
| Lampiran 4 Simulasi <i>Pressure drop</i> | 157 |
| Lampiran 5 Simulasi <i>Heat transfer</i> | 171 |
| Lampiran 6 Simulasi <i>Stress Analysis</i> | 193 |