

ANALISIS IMPLEMENTASI PROSES *EXPAND TUBE* PADA *SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER* SESUAI STANDAR API 660 UNTUK MENINGKATKAN KEANDALAN SAMBUNGAN *TUBE-TUBESHEET* DI PT X

Gilang Nurul Mutaqien¹, Susilo Handoko¹, Ferro Aji^{1*}

¹Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No.38 Cepu, Blora, 58315

*E-mail: ferro.aji@gmail.com

ABSTRAK

Industri minyak dan gas membutuhkan sistem perpindahan panas dengan tingkat keandalan ekstrem tinggi, dimana kegagalan sambungan *tube-tubesheet* pada *shell and tube heat exchanger* dapat mengakibatkan konsekuensi serius berupa kebocoran fluida dan degradasi efisiensi operasional. Penelitian ini bertujuan menganalisis implementasi proses *expand tube* sesuai standar API 660 di PT X melalui pendekatan observasi langsung dan eksperimental. Metodologi penelitian mencakup evaluasi prosedur *expand tube* berdasarkan *Tube Expanding Procedure* E-673-A3-Rev.C, kalkulasi diameter dalam *tube* teoritis menggunakan formula API 660, serta verifikasi integritas sambungan melalui pengujian tekanan komprehensif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh 700 *tube* pada proyek *Hydrogen Cooler* E-673 A3 berhasil mencapai diameter dalam pasca ekspansi berkisar 16,66-16,70 mm dengan persentase reduksi dinding maksimum 2,73% yang berada dalam toleransi material SA-179. Pengujian *hydrostatic test* pada tekanan 90 bar, *pneumatic test* pada 75 bar, dan *leak test* lokal menghasilkan tingkat keberhasilan 100% tanpa indikasi kebocoran. Konsistensi hasil antara *mini test rolling* dan ekspansi massal memvalidasi efektivitas parameter operasional yang ditetapkan, mengkonfirmasi bahwa metodologi *expand tube* yang diimplementasikan mampu menghasilkan sambungan *tube-tubesheet* yang memenuhi standar internasional dengan tingkat keandalan optimal.

Kata kunci: API 660, *Expand tube*, Pengujian tekanan, Sambungan *tube-tubesheet*, *Shell and tube heat exchanger*

1. PENDAHULUAN

Kompleksitas operasional dalam sektor minyak dan gas bumi mengharuskan penerapan standar keandalan serta keamanan yang ekstrem tinggi, khususnya dalam pengoperasian sistem perpindahan panas yang menjadi jantung dari berbagai proses industri. Permasalahan *fundamental* yang kerap mengancam integritas operasional *shell and tube heat exchanger* terletak pada kegagalan sambungan antara *tube* dan *tubesheet*, dimana fenomena ini dapat memicu konsekuensi serius berupa kebocoran fluida kerja, degradasi efisiensi termal secara signifikan, serta potensi ancaman keselamatan personel yang tidak dapat diabaikan. Manifestasi kebocoran pada titik sambungan kritis ini tidak semata-mata mengakibatkan penurunan performa perpindahan kalor, melainkan juga berpotensi menimbulkan kontaminasi silang antar fluida proses yang dapat mengakibatkan kerugian finansial dalam skala besar [1].

Metodologi *expand tube* merepresentasikan tahapan fundamental dalam proses fabrikasi *shell and tube heat exchanger* yang dirancang khusus untuk menghasilkan sambungan kedap udara antara komponen *tube* dan *tubesheet* melalui aplikasi deformasi mekanis yang terkendali secara presisi. Implementasi teknik ini melibatkan ekspansi *tube* hingga mencapai batas plastisitas materialnya, sementara *tubesheet* dipertahankan dalam kondisi elastis optimal, sehingga menghasilkan kontak *residual* yang mampu mencegah kebocoran secara efektif. Regulasi internasional yang ditetapkan oleh organisasi standar seperti TEMA (*Tubular Exchanger*

Manufacturers Association) dan ASME *Section VIII* memberikan parameter ekspansi yang wajib dipatuhi untuk menjamin integritas struktural sambungan yang dihasilkan [2].

Setelah implementasi proses *expand tube*, pelaksanaan pengujian tekanan menjadi prosedur verifikasi final yang menentukan apakah sambungan *tube-tubesheet* telah mencapai tingkat kedapapan yang diharuskan. Standar ASME *Section VIII Division 1* mengatur secara komprehensif prosedur *hydrostatic test* yang harus dilakukan pada tekanan 1,3 kali *Maximum Allowable Working Pressure* (MAWP) dan *pneumatic test* pada tekanan 1,1 kali MAWP sebagai protokol pengujian standar industri [2]. Keberhasilan implementasi proses *expand tube* memiliki korelasi langsung dengan hasil pengujian ini, dimana sambungan yang tidak optimal akan teridentifikasi sebagai titik kebocoran dan memerlukan tindakan perbaikan segera [3,4].

Berdasarkan latar belakang diatas dengan fokus pada proses *expand tube shell and tube heat exchanger*, maka penelitian ini menekankan pada analisa *proses expand tube* di PT X mulai dari persiapan *tube* hingga pengecekan pasca ekspansi. Analisa juga dilakukan menyangkut parameter yang mempengaruhi kedapapan sambungan *tube* dan *tubesheet*, dan hasil uji tekanan (*hydrostatic* dan *pneumatic*) mencerminkan keberhasilan proses *expand tube* dalam menjamin integritas dan keandalan sambungan.

2. METODE

Penelitian ini dilaksanakan di *workshop* yang tersdia pada fasilitas PT X yang berlokasi di Cikarang, Bekasi, Jawa Barat. PT X merupakan perusahaan yang bergerak di bidang *engineering*, manufaktur, instalasi, dan pemeliharaan *heat exchanger*, dengan sertifikat ASME *U-stamp* dan *R-stamp* untuk pembuatan *pressure vessel* dan pemeliharaan. Penelitian ini berlangsung selama empat minggu, dimulai pada 1 Juli hingga 31 juli 2025, dengan jadwal operasional dari hari Senin hingga hari Jum'at, pukul 08.00 hingga 17.00 WIB, dan waktu istirahat pada pukul 12.00 hingga 13.00 WIB. Penelitian ini difokuskan pada Departemen *Quality Control* yang bertanggung jawab atas pengawasan kualitas produk, inspeksi material, dan pengujian sesuai dengan standar ASME dan TEMA.

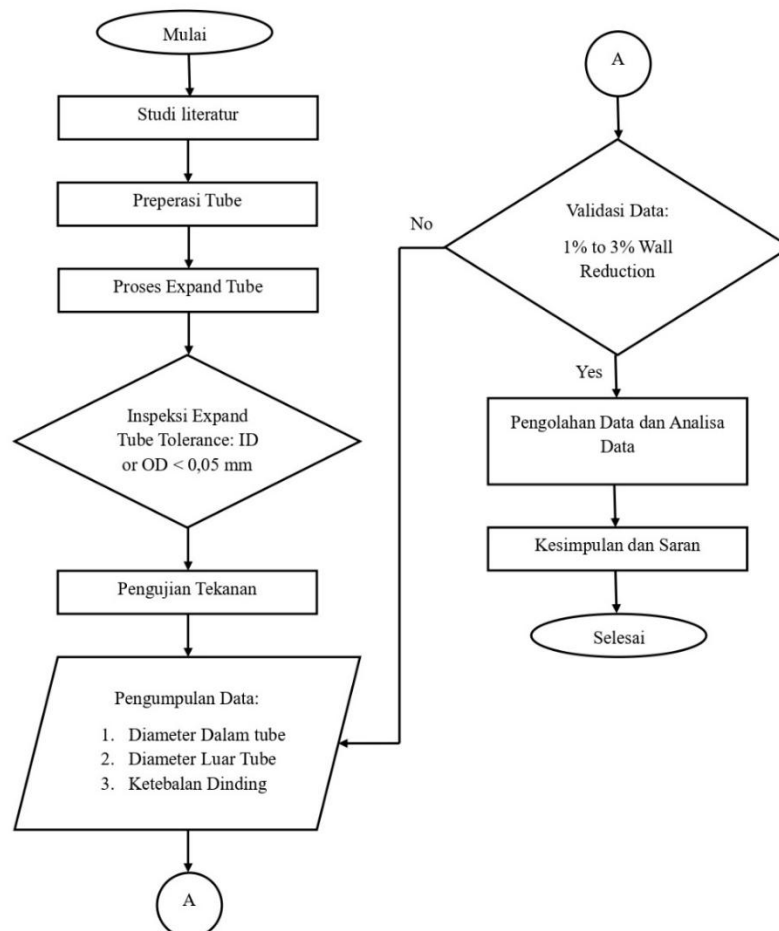
Pemilihan bahan dan peralatan penelitian didasarkan pada standar API 660-2020 dan spesifikasi internal perusahaan untuk menjamin akurasi dan validitas hasil penelitian [2]. Tabel 1 merangkum komponen utama yang digunakan beserta spesifikasi teknisnya. Komponen utama penelitian meliputi *tube carbon steel SA-179* sebagai objek ekspansi dan *tubesheet SA-516-70N* sebagai media sambungan. Sistem ekspansi menggunakan *electric torque rolling motor* dan 3 *roller expander set* untuk deformasi mekanis terkontrol, sementara sistem pengujian mencakup *hydrostatic pump* dan *pneumatic test manifold* untuk validasi kedapapan sambungan [5].

Tabel 1. Bahan dan Peralatan Penelitian

No.	Bahan/Alaat	Spesifikasi Utama	Fungsi Penelitian
1.	Alat Pelindung Diri (APD)	Helm, kacamata <i>safety</i> , sarung tangan, <i>ear plug</i>	Menjamin keselamatan peneliti selama pengamatan di <i>workshop</i>
2.	<i>Tube Carbon Steel SA-179</i>	OD 20.0 mm, ID 17.0 mm, L 7,000 mm	Objek utama proses <i>expand tube</i>
3.	<i>Tubesheet SA-516-70N</i>	Ø 1,600 mm × 130 mm, 700 <i>hole</i> , std. fit RCB-7.2.1	Media sambungan <i>tube to tubesheet</i>

4.	<i>Electric Torque Rolling Motor</i>	<i>Range 200 - 250 N.m</i>	Menggerakkan <i>roller expander</i> dengan pengendalian <i>torsi</i>
5.	<i>3 Roller Expander Set (Krais)</i>	<i>Cage 280 mm, pin type H, lubricant Lube A Tube</i>	Melakukan deformasi mekanis <i>tube</i> secara terkontrol
6.	<i>Digital Tube ID Gauge</i>	Akurasi ± 0.01 mm, <i>probe</i> 150 mm	Mengukur ID setelah ekspansi untuk verifikasi % <i>reduction</i>
7.	<i>Hydrostatic Pump Set</i>	0-125 bar, <i>reservoir</i> 1,000 L	Uji kebocoran pada tekanan 1,3 kali MAWP
8.	<i>Pneumatic Test Manifold</i>	0-15 bar, N2 99.9%	Uji kebocoran alternatif pada 1,1 kali MAWP
9.	<i>Laptop & Software</i>	<i>Microsoft Office</i>	Dokumentasi data dan perhitungan
10.	Literatur Standar	API 660-2020, API 661-2023, TEMA 2019, ASME VIII-2023	Rujukan desain dan kriteria penerimaan

Metodologi penelitian dirancang secara sistematis untuk memastikan pelaksanaan yang sesuai dengan standar yang berlaku dalam industri *heat exchanger*. Pendekatan penelitian menggunakan metode observasi langsung dan eksperimental untuk menganalisis proses *expand tube* pada *shell and tube heat exchanger*. Diagram alir metodologi penelitian disajikan dalam Gambar 1 untuk memberikan gambaran komprehensif tentang tahapan pelaksanaan penelitian.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian

Tahapan penelitian dimulai dengan studi literatur terhadap standar API 660-2020, API 661-2023, TEMA 2019, dan ASME VIII-2023 sebagai rujukan desain dan kriteria penerimaan [6]. Proses ekspansi *tube* dilakukan dengan variasi parameter tekanan ekspansi, jumlah putaran *roll-er*, dan torsi untuk mengidentifikasi kombinasi optimal [5]. Setiap tahap ekspansi dimonitor dan di dokumentasikan, termasuk pengukuran diameter *internal tube* untuk menghitung persentase *reduction*. Verifikasi keberhasilan dilakukan melalui pengujian tekanan *hydrostatic* dan *pneumatic* sesuai standar ASME untuk memvalidasi integritas sambungan *tube-tubesheet*.

Dalam melakukan analisis proses *expand tube*, perhitungan untuk menghitung diameter dalam tube setelah ekspansi berdasarkan API 660 edisi ke-9 tahun 2020 [7] dapat dihitung menggunakan Persamaan 1 dibawah ini.

$$ID_{rolled\ tube} = (h - OD_{tube}) + ID_{tube} + (2 \times W) \times f \quad (1)$$

Setelah melakukan perhitungan diameter dalam *tube*, maka berapa ketebalan dinding *tube* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2 dibawah ini.

$$w = \frac{OD_{tube} - ID_{tube}}{2} \quad (2)$$

Untuk memnetukan presentase *reduction* aktual dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3 berikut ini.

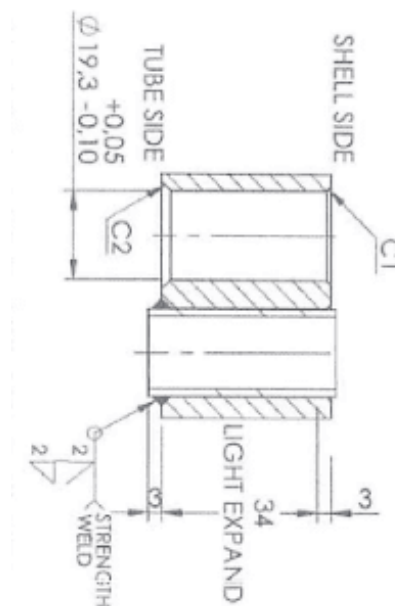
$$R(\%) = \frac{(OD-ID)-(H-ID1)}{(OD-ID)} \times 100\% \quad (3)$$

Presentase reduksi dinding merupakan faktor yang menentukan seberapa besar tube yang akan mengembang. Nilai maksimum presentase reduksi dinding *tube* untuk berbagai material dapat dilihat pada Tabel 2 faktor reduksi dinding maksimal sebagai berikut.

Tabel 2. Faktor Reduksi Dinding Maksimal

Material	Presentase Reduksi Dinding Maksimal
<i>Carbon steel dan low alloy steel</i> (maksimal 9% chromium)	8%
<i>Stainless steel dan high alloy steel</i>	6%
<i>Duplex stainless steel</i>	Disepakati antara pembeli dan vendor
<i>Titanium dan work hardening nonferrous</i>	5%
<i>Nonferrous non-work hardening</i> (seperti brass)	8%

Untuk melakukan pemeriksaan hasil *expand tube* telah sesuai atau tidak, maka semua tabung yang diperluas harus diperiksa selama proses fabrikasi. Gambar 2 berikut ini adalah gambaran mengenai dari sambungan antara *tube* dengan *tubesheet*.



Gambar 2. Tube to Tubesheet joint

3. PEMBAHASAN

Penelitian ini membahas proses *expand* tube pada *shell and tube heat exchanger* dengan fokus pada kesesuaian hasil pengujian dengan standar API 660. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh [1], yang menggunakan pendekatan elemen hingga untuk memprediksi distribusi tekanan kontak dalam sambungan *tube-tubesheet*. Penelitian mereka menunjukkan bahwa distribusi tekanan yang merata pada sambungan sangat penting untuk menghindari kebocoran, yang juga menjadi fokus utama dalam penelitian ini.

Investigasi terhadap pengaruh persen ekspansi dan inklusi *groove* terhadap performa sambungan *tube-tubesheet* telah dilakukan dan ditemukan bahwa ekspansi yang lebih besar batas toleransi dapat menurunkan integritas sambungan [2]. Hasil penelitian kami, yang menunjukkan kisaran reduksi dinding antara 1,52% hingga 2,73% mendukung temuan mereka, yang menyatakan bahwa terlalu banyak reduksi dinding yang dapat menyebabkan potensi kegagalan sambungan.

A. Prosedur *Expand Test*

Implementasi *proses expand test* di PT X mengikuti prosedur terstandarisasi berdasarkan *Tube Expanding Procedure* (Dokumen No. E-673-A3-Rev.C) dengan penerapan metodologi sistematis yang mengacu pada standar API 660 [7]. Tahapan inisiasi dimulai dengan verifikasi toleransi lubang tubesheet dan pembersihan permukaan menggunakan *swab cloth* serta udara bertekanan untuk memastikan kondisi optimal sebelum instalasi. Pemasangan *tube carbon steel* SA-179 dilakukan dengan proyeksi 1,5-10 mm sesuai spesifikasi teknik yang ditetapkan. Pengaturan *set-point torsi motor rolling* didasarkan pada kalkulasi diameter dalam minimum-maksimum menggunakan formula API 660 untuk mencapai hasil yang sesuai standar. *Mini test rolling* dilakukan pada lima *tube* sampel dengan torsi awal 30 N·m hingga mencapai rentang ID target sebagai validasi parameter operasional [7]. Ekspansi massal seluruh *tube* mengimplementasikan torsi optimal yang diperoleh dari tahap pengujian awal, dengan *monitoring roller* dan dokumentasi aktivitas pada *Expansion Report Sheet* setiap dua lubang yang diuji untuk menjamin konsistensi proses.

B. Data Perhitungan *Expand Test*

Perhitungan teoritis untuk mencapai sambungan optimal antara *tube* dan *tubesheet* mengikuti formula API 660 edisi ke-9 tahun 2020 dengan parameter aktual hasil pengukuran lapangan. Kalkulasi diameter dalam *tube* setelah ekspansi (ID_{rolled}) untuk *Tube* No. 1 sebagai sampel menghasilkan nilai 16,66 mm berdasarkan persamaan yang mengintegrasikan diameter lubang *tubesheet* (19,35 mm), diameter luar *tube* (19,05 mm), diameter dalam *tube* awal (16,10 mm), dan faktor reduksi dinding 8% untuk material *carbon steel*. Ketebalan dinding *tube* dihitung menggunakan formula standar menghasilkan nilai 1,65 mm, sementara persentase reduksi dinding aktual mencapai 1,52% yang berada dalam rentang *acceptable* 1-3% sesuai API 660 untuk sambungan *strength weld* [8]. Hasil dari perhitungan dapat dilihat pada Tabel 3 sebagai berikut.

Tabel 3. Hasil Mini Test Rolling

No	ID <i>Tubesheet</i> (mm)	OD <i>Tube</i> (mm)	ID <i>Tube</i> (mm)	ID Aktual (mm)	% <i>Reduction</i>	Status
A1	19,35	19,05	15,75	16,10	1,52	ACC
A2	19,35	19,05	15,75	16,13	2,42	ACC
A3	19,35	19,05	15,75	16,12	2,12	ACC
A4	19,35	19,05	15,75	16,13	2,42	ACC
A5	19,35	19,05	15,75	16,14	2,73	ACC

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa presentase reduksi dinding yang optimal berkisaran antara 1,52% hingga 2,73%. Menurut API 660, nilai ini berada dalam rentang yang diterima, mengindikasikan bahwa sambungan *tube-tubesheet* cukup kuat untuk menahan tekanan kerja tanpa resiko kebocoran. Persentase reduksi dinding yang lebih tinggi dari 3% dapat menyebabkan kerusakan pada material *tube* atau *tubesheet*, yang akan menurunkan kekuatan sambungan dan berisiko menyebabkan kebocoran pada sistem perpindahan panas [4].

Dari sudut pandang teknis, kisaran ini dianggap optimal karena menghasilkan kekuatan sambungan yang cukup untuk menahan tekanan operasional yang tinggi, sambil mempertahankan integritas material. Implikasi terhadap performa jangka panjang adalah bahwa sambungan dengan reduksi dinding dalam kisaran tersebut dapat bertahan lebih lama dalam kondisi operasi yang berat, mengurangi frekuensi pemeliharaan, dan memperpanjang usia pakai *heat exchanger* secara keseluruhan. Selain itu, sambungan yang kedap udara dapat mengurangi risiko kebocoran fluida yang dapat merusak peralatan lain dan menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

C. Hasil Pengujian Tekanan

Verifikasi integritas sambungan *tube-tubesheet* dilakukan melalui tiga metode pengujian komprehensif sesuai standar ASME untuk memastikan kekedapan *system*. *Hydrostatic test* pada tekanan $1,3 \times \text{MAWP}$ (90 bar) selama 30 menit menunjukkan hasil optimal dengan seluruh 700 sambungan berhasil melewati uji tanpa indikasi kebocoran. *Pneumatic test* pada tekanan 75 bar dan *leak test* lokal menggunakan air sabun pada tekanan 15 bar menghasilkan tingkat keberhasilan 100% untuk seluruh sambungan yang diuji, dari hasil pengujian tekanan dapat dilihat pada Tabel 4 di bawah ini [9].

Tabel 4. Rangkuman Hasil Pengujian Tekanan

Jenis Pengujian	Tekanan (bar)	Jumlah Tube	Success Rate (%)
<i>Hydrostatic Test</i>	90	700	100
<i>Pneumatic Test</i>	75	700	100
<i>Leak Test Lokal</i>	15	700	100

Analisis persentase *reduction* berkisar 1,52-2,73% memenuhi kriteria API 660 untuk target 1-3%, mengonfirmasi validitas metodologi *expand tube* yang diimplementasikan [9]. Konsistensi hasil antara *mini test rolling* dan ekspansi massal memvalidasi efektivitas *set point torsi* yang didasarkan pada perhitungan teoritis matang, menghasilkan sambungan *tube-tubesheet* yang memenuhi standar internasional dengan tingkat keandalan maksimal [10].

4. SIMPULAN

Implementasi proses *expand tube* pada *shell and tube heat exchanger* di PT X, khususnya pada proyek 1st *Hydrogen Cooler* E-673 A3, menunjukkan efektivitas metodologi yang diterapkan sesuai dengan API 660 edisi ke-9, TEMA 10th *Edition*, dan dokumen internal *Tube Expanding Procedure* E-673-A3-Rev.C. Proses ini melibatkan perhitungan diameter dalam *tube* teoritis, *mini rolling test rolling*, pengaturan torsi, inspeksi pasca ekspansi, dan pengujian tekanan yang komprehensif. Hasil dari perhitungan menunjukkan diameter dalam *tube* pasca ekspansi berkisar anatara 16,66 mm hingga 16,70 mm, dengan presentase reduksi dinding maksimum mencapai 2,73%, yang berada dalam batas aman untuk material SA-179.

Seluruh 700 tube yang diuji berhasil melewati pengujian *hydrostatic test* (90 bar), *pneumatic test* (75 bar), dan *leak test local* tanpa indikasi kebocoran, yang mengonfirmasi keberhasilan implementasi proses ekspansi. Keberhasilan ini didukung oleh pengendalian yang tepat terhadap parameter operasional seperti *torsi* motor, pelumasan, inspeksi kondisi *roller*, serta akurasi pengukuran diameter dalam *tube* yang dilakukan secara teliti dan sesuai dengan kriteria penerimaan yang telah ditetapkan dalam prosedur. Proses ekspansi ini tidak hanya memnuhi standar teknis yang berlaku tetapi juga memastikan kualitas dan keandalan sambungan *tube-tubesheet*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] U. A. Abdelsalam and M. A. Dokainish, "Finite element prediction of the contact pressure distribution in a hydraulically expanded tube-to-tubesheet joint," *Trans. Model. Simul.*, vol. 10, 1995, [Online]. Available: www.witpress.com,
- [2] B. S. E. N. Iso, "Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Plate-type heat exchangers —," vol. 3, pp. 2006–2008, 2013.
- [3] "336766670-TEMA-Standards-Ed-7-1988.pdf."
- [4] ASME Section VIII Division 1, "ASME Boilers and Pressure Vessel Code," *ASME Sect. VIII Div. I*, p. 717, 2019.
- [5] D. T. Thekkuden, A. H. I. Mourad, A. H. Bouzid, and M. M. Sherif, "Investigation of expansion percentages and groove inclusions on the performance of welded, expanded, welded-expanded tube-to-tubesheet joints," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 22, pp. 2078–2092, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.12.045.
- [6] R. C. Byrne, "Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association 8th Edition," *TEMA - Tubul. Exch. Manuf. Assoc.*, vol. 298, 1999.
- [7] N. Edition, "Shell-and-Tube Heat Exchangers," 2015.

- [8] R. K. Shah, "Classification of heat exchangers.," no. (eds.), Washington, U.S.A., Hemisphere Publishing Corp., 1983, pp.9-14. (ISBN 0-89116-254-2), pp. 1-77, 1983, doi: 10.1201/9780429469862-1.
- [9] S. Yokell, "Pressure testing feedwater heaters and power plant auxiliary heat exchangers," *Am. Soc. Mech. Eng. Power Div. POWER*, pp, pp. 153-161, 2010.
- [10] S. Yorkell, "Heat-Exchanger Tube-To-Tubesheet Conncections," *Chem. Eng. (New York)*, vol. 89, no. 3, pp. 78-94, 1982.

Daftar Simbol

h	= diameter lubang tubesheet (aktual sebelum ekspansi), (mm)
OD_{tube}	= diameter luar tube (aktual sebelum ekspansi), (mm)
ID_{tube}	= diameter dalam tube (aktual sebelum eskpansi), (mm)
W	= ketebalan dinding tube, (mm)
f	= reduksi dinding tube, (%)
R	= presentase reduksi dinding tube, (%)
H	= <i>hole tubesheet</i> , (mm)
$ID1$	= diameter dalam tube setelah ekspansi, (mm)