

BAB IV

HASIL PENELITIAN

4.1. DATA TEKNIS

Dalam mengkaji kelayakan dan umur sisa dari material RFCCU, hasil pengujian akan dibandingkan dengan literatur yang ada. Selain itu, perbandingan terhadap data teknis juga dilakukan untuk analisa dari segi proses, sehingga dapat dilakukan analisis secara menyeluruh. Data teknis RFCCU ini dapat dilihat pada Tabel 4.1, sedangkan kondisi operasi RFCCU dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.1 Data Teknis Shell Plenum RFCCU

Data Teknis Shell Plenum	
Material	A 240-304H (18Cr- 8Ni)
Ketebalan	1/2" atau 12,7 mm
Temperatur Desain	690 °C
Tinggi	25.2 m
Diameter Luar	3.3135 m
<i>Corrosion / Erosion Allowance</i>	Nol

Tabel 4.2 Kondisi Operasi Shell Plenum RFCCU

Case	Kondisi	Temperatur Desain	Tekanan Desain Eksternal		Young's Modulus, E
			1 st (MPa)	2 nd (MPa)	(MPa)
1	Normal	690°C	0.0167	0.0167	131019
2	Emergency	770°C	0.0	0.0	131019
3	Upset	930°C	0.0167	0.0167	109175

4.2. PENGAMATAN VISUAL

Pada gambar 4.1 merupakan tempat masuk untuk melakukan inspeksi pada bagian dalam RFCCU. Sedang gambar 4.2 dan 4.3 merupakan metoda penomoran untuk memudahkan melakukan inspeksi.

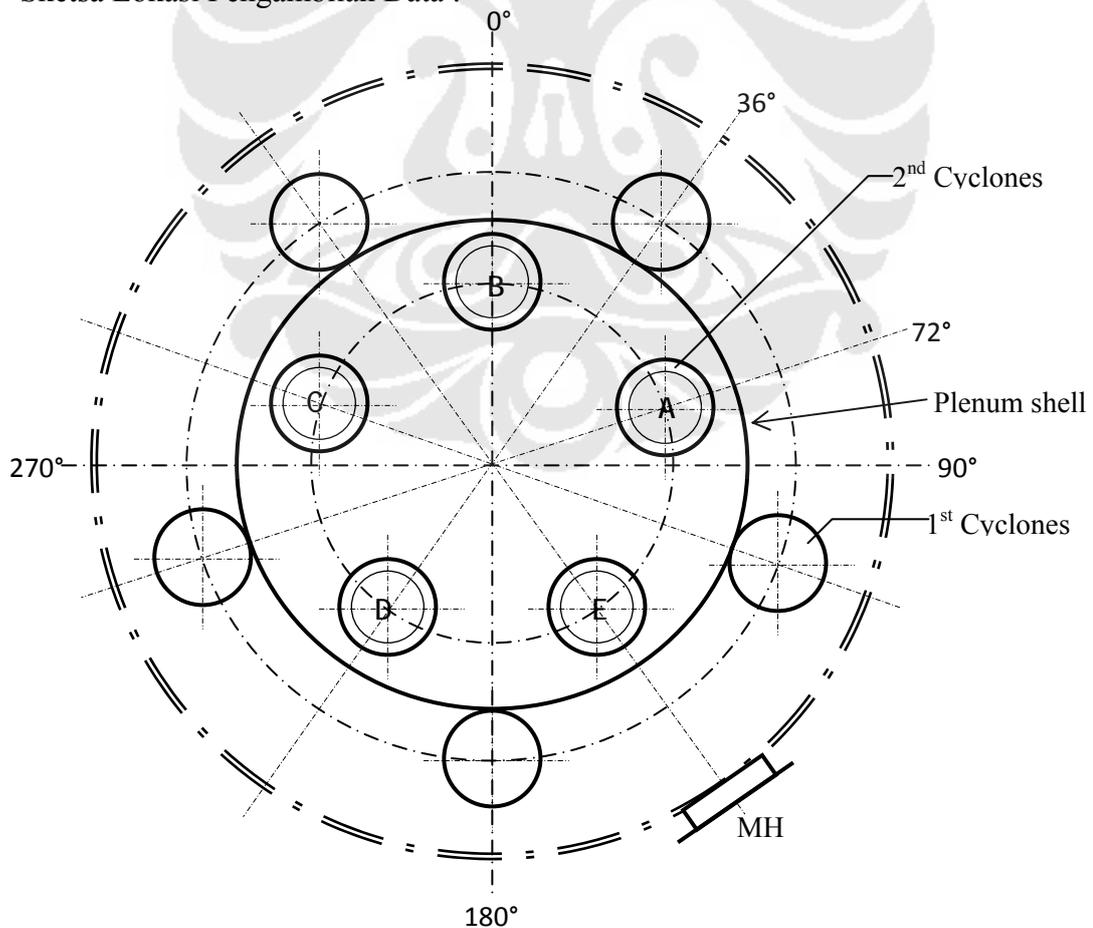


Gambar 4.1. Manhole salah satu access menuju lokasi area cyclone



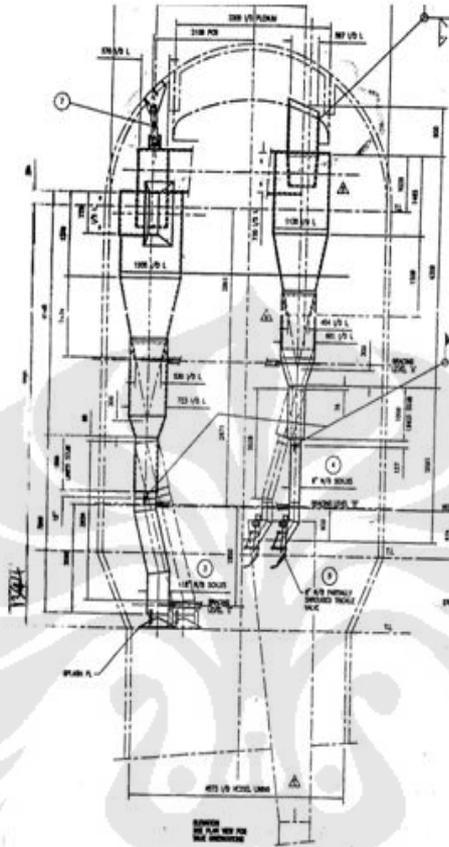
Gambar 4.2. Sistem penomoran abjad pada cyclone

Sketsa Lokasi Pengambilan Data :

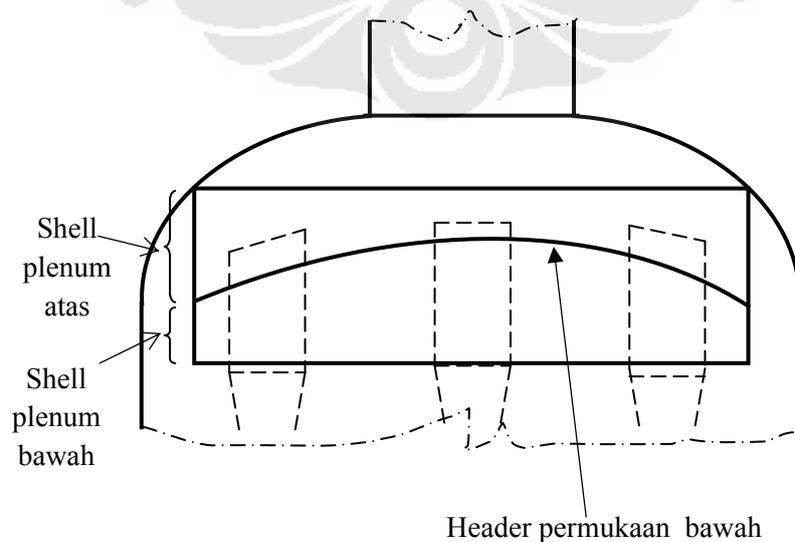


Gambar 4.3. Orientasi 5-2nd Cyclones of Plenum of FCC

Sketsa keseluruhan RFCCU dapat dilihat pada Gambar 4.4, sedangkan sketsa tampak samping dari shell plenum RFCCU dapat dilihat pada Gambar 4.6

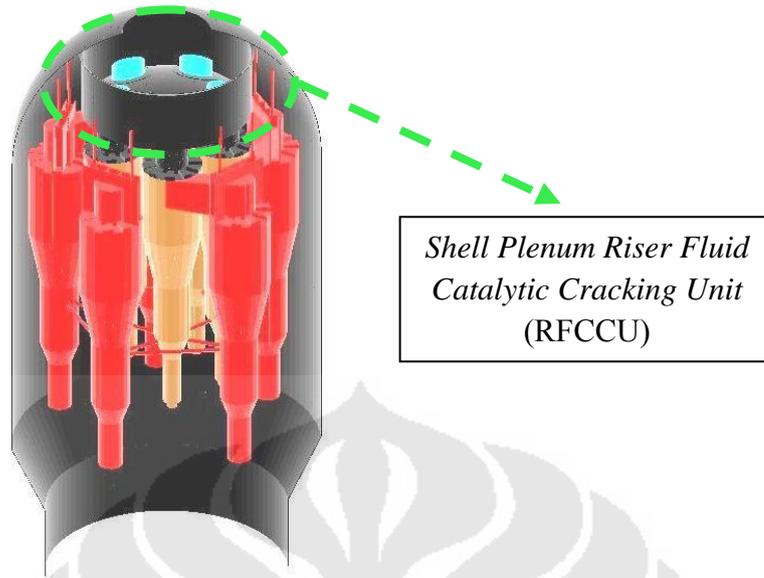


Gambar 4.4. Sketsa *Regenerator Fluid Cracking Catalytic Unit* (RFCCU)



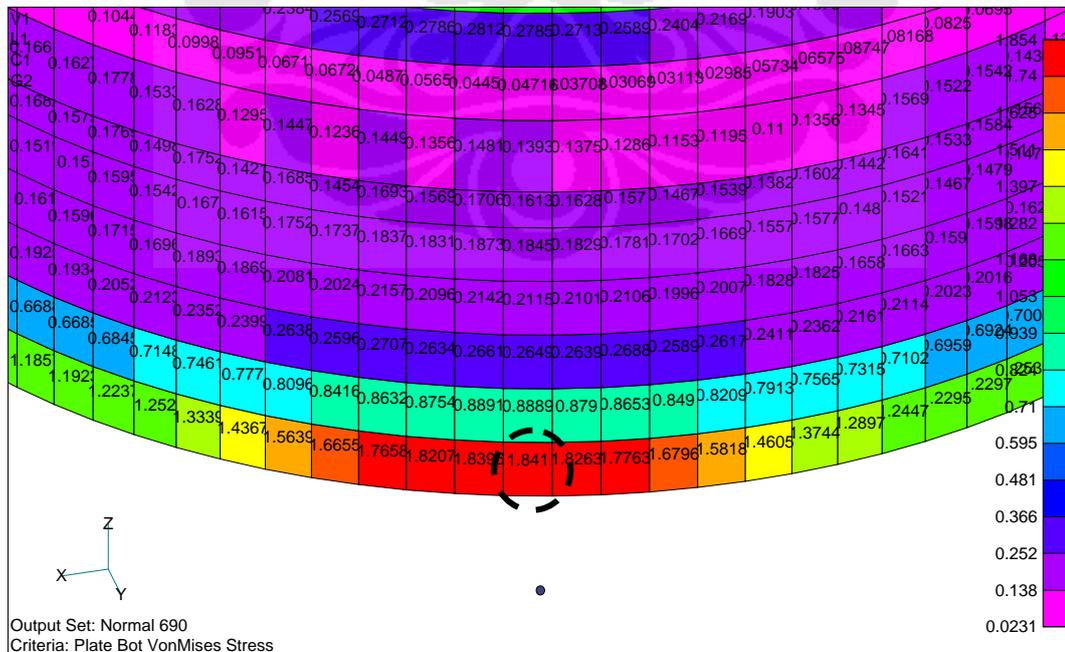
Gambar 4.5 Sketsa Plenum yang dilakukan pengujian *dye penetrant*

4.3. ANALISA TEGANGAN



Gambar 4.6. Model Regenerator Fluid Catalytic Cracking Unit (RFCCU).

Perhitungan analisa tegangan dengan metoda *finite element*, menggunakan software NASTRAN. Didapatkan nilai tegangan yang juga akan menunjukkan letak daerah kritis dengan tegangan yang tinggi. Gambar 4.7 dibawah merupakan nilai perhitungan tegangan dengan satuan kgf/mm^2 . Sedangkan Gambar 4.6 merupakan sketsa daerah yang dilakukan perhitungan tegangan (*Shell Plenum*)



Gambar 4.7. Distribusi tegangan pada Shell Plenum RFCCU menggunakan program Nastran untuk temperatur 690°C (operasi normal)

4.4. PENGUJIAN TANPA MERUSAK

4.4.1. *Penetrant Testing*

Pada pengujian tak merusak ini, hal yang pertama dilakukan adalah *penetrant testing*. Pada pengujian penetran ini dilakukan pemilihan beberapa daerah saja dengan kondisi tegangan yang tinggi, yang diketahui dengan menggunakan software NASTRAN.

Didapatkan 14 titik pada *shell plenum* dengan tegangan kritis, yang harus dilakukan pengecekan dengan menggunakan *penetrant testing* (Tabel 4.3). Sketsa posisi pengambilan titik untuk dilakukan pengujian *penetrant testing* dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan 4.5. Pada pengujian *dye penetrant* ini didapatkan 1 titik yang mempunyai retak dengan panjang 12 mm di lokasi E-A / 108° (Posisi No.2).

Tabel 4.3 Hasil *Penetrant Testing*

No	Lokasi	Retak	
		Ada/ Tidak	Ukuran (mm)
	Bagian atas <i>shell plenum</i> (Outside);		
1	<i>Replica No.1</i> (A / 72°)	Tidak	-
2	<i>Replica No.2</i> (E - A / 108°)	Ada	12
3	<i>Replica No.3</i> (E / 144°)	Tidak	-
4	<i>Replica No.4</i> (D / 216°)	Tidak	-
5	<i>Replica No.5</i> (D / 216°)	Tidak	-
6	<i>Replica No.6</i> (D / 216°)	Tidak	-
7	<i>Replica No.7</i> (D / 216°)	Tidak	-
8	<i>Replica No.8</i> (D / 216°)	Tidak	-
9	<i>Replica No.9</i> (D / 252°)	Tidak	-
	Bagian bawah <i>shell plenum</i> (Inside);		
10	<i>Replica No.10</i> (C-D / 252°)	Tidak	-
11	<i>Replica No.11</i> (B-C / 324°)	Tidak	-
12	<i>Replica No.12</i> (A-B / 364°)	Tidak	-
13	<i>Replica No.13</i> (E-A / 108°)	Tidak	-
14	<i>Replica No.14</i> (D-E / 180°)	Tidak	-

4.4.2. *Ultrasonic Testing*

Setelah dilakukan *Penetrant Testing* dan mendapatkan daerah yang mempunyai retak, maka selanjutnya dilakukan *Ultrasonic Testing*. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan ketebalan dari *shell plenum* RFCCU. Untuk masing-masing titik dilakukan beberapa kali pengambilan data ketebalan,

tujuannya agar mendapatkan data ketebalan yang representatif. Kondisi material yang dilakukan pengujian mempunyai suhu yang sama dengan suhu lingkungan. Dan *couplant* yang digunakan adalah *Aquasonic/Grease*.

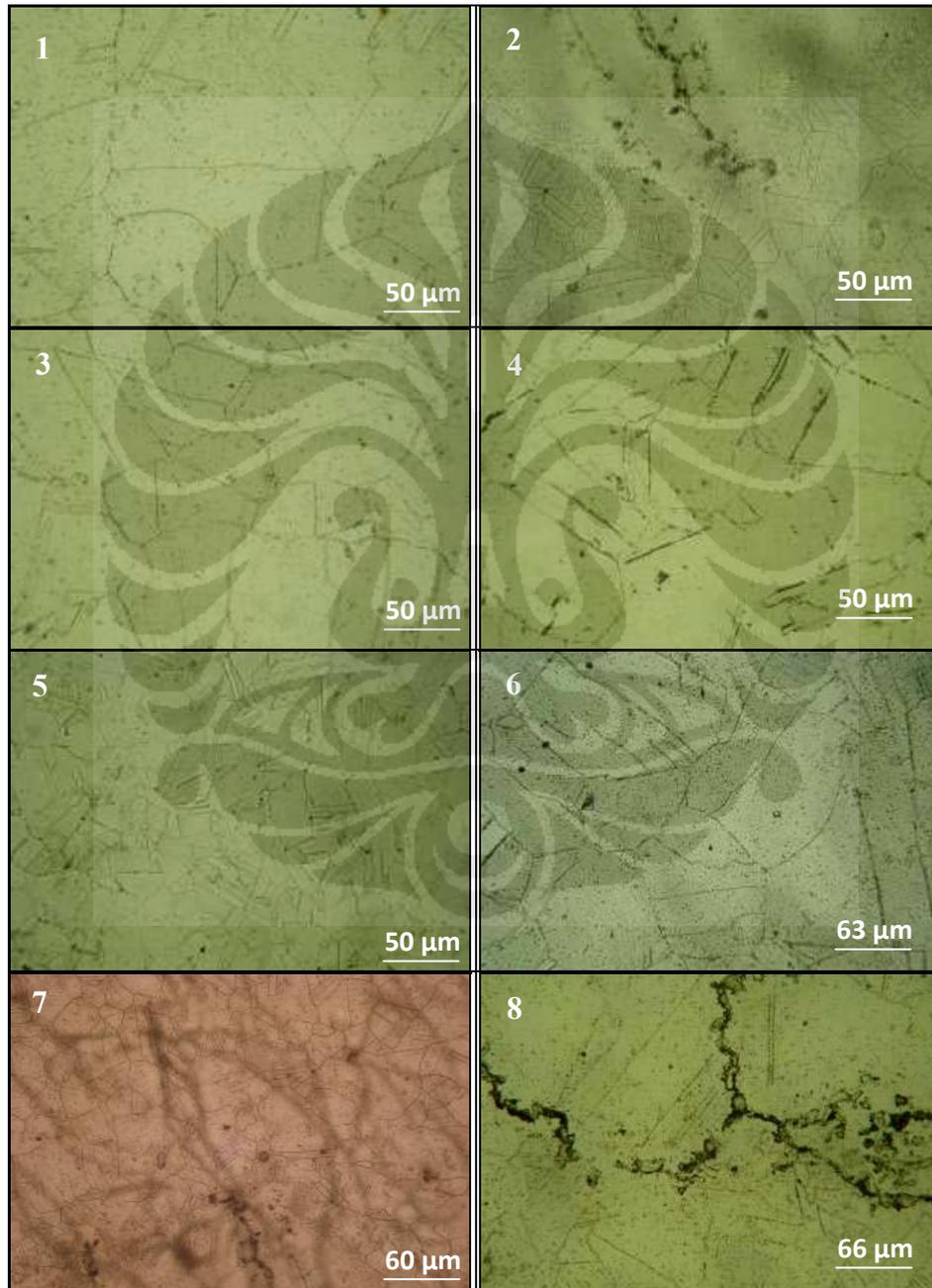
Dari hasil pengujian ketebalan didapatkan nilai ketebalan komponen dengan range 11,40 – 14, 44 mm. Dari hasil pengujian penetran diatas daerah yang ditemukan retak mempunyai ketebalan rata-rata 12.63 mm. Lebih jelasnya hasil pengujian ketebalan masing-masing posisi dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Ketebalan Shell Plenum hasil pengujian Tak Merusak Ultrasonik

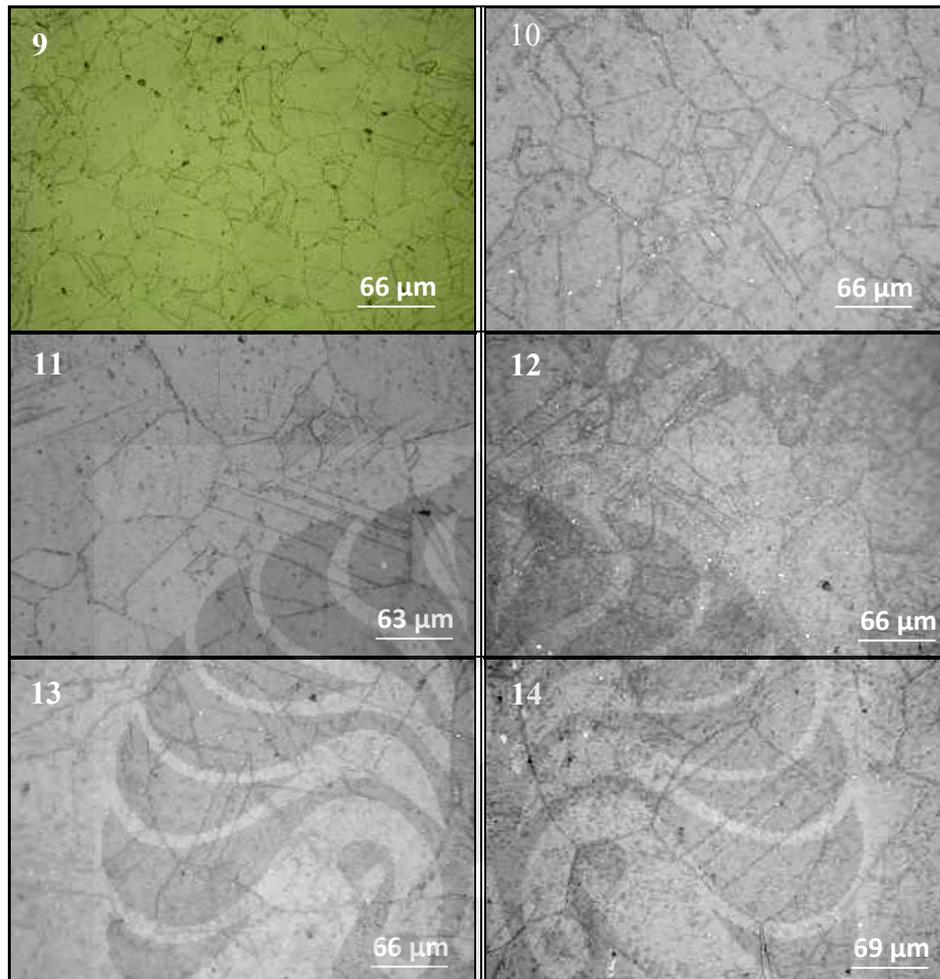
No	Lokasi	Tebal (mm)	No	Lokasi	Tebal (mm)
1	Replika No. 1	13.32	11	Replika No. 3	13.82
2	Replika No. 1	13.42	12	Replika No. 3	13.73
3	Replika No. 1	13.55	13	Replika No. 3	13.21
4	Replika No. 1	13.12	14	Replika No. 3	13.52
5	Replika No. 1	13.27	15	Replika No. 3	13.57
6	Replika No. 1	13.19	16	Replika No. 4	13.12
7	Replika No. 2	12.55	17	Replika No. 4	13.35
8	Replika No. 2	12.79	18	Replika No. 4	13.36
9	Replika No. 2	12.57	19	Replika No. 5	11.87
10	Replika No. 3	13.65	20	Replika No. 5	11.73
21	Replika No. 5	11.95	38	Replika No. 12	13.11
22	Replika No. 9	11.40	39	Replika No. 12	12.94
23	Replika No. 9	11.44	40	Replika No. 12	13.28
24	Replika No. 9	11.61	41	Replika No. 12	13.39
25	Replika No. 10	12.86	42	Replika No. 12	13.64
26	Replika No. 10	12.91	43	Replika No. 13	13.69
27	Replika No. 10	13.11	44	Replika No. 13	13.63
28	Replika No. 10	13.47	45	Replika No. 13	13.60
29	Replika No. 10	13.61	46	Replika No. 13	13.10
30	Replika No. 10	13.56	47	Replika No. 13	12.98
31	Replika No. 11	13.56	48	Replika No. 13	12.70
32	Replika No. 11	13.18	49	Replika No. 14	13.45
33	Replika No. 11	13.31	50	Replika No. 14	13.59
34	Replika No. 11	13.26	51	Replika No. 14	13.54
35	Replika No. 11	13.18	52	Replika No. 14	13.46
36	Replika No. 11	13.30	53	Replika No. 14	13.51
37	Replika No. 12	13.00	54	Replika No. 14	13.24

4.5. PENGUJIAN INSITU METALOGRAFI

Pengujian metalografi ini dilakukan di 14 lokasi untuk mengetahui mikrostruktur dari material *austenitic stainless steel*. Pengambilan foto mikrostruktur ini dilakukan dengan metoda insitu metalografi. Foto mikrostruktur dari 14 titik pengambilan dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan 4.9, sedangkan untuk keterangan dari foto mikrostruktur tersebut dapat dilihat di Tabel 4.5.



Gambar 4.8 Foto Mikrostruktur Shell Plenum RFCCU pada posisi 1- 8



Gambar 4.9 Foto Mikrostruktur Shell Plenum RFCCU pada posisi 9 - 14

Pada foto mikrostruktur diatas terlihat terdapat berbagai macam kondisi dan ukuran besar butir. Keterangan fasa, klasifikasi jenis creep void, dan ada atau tidaknya retak mikro terlihat pada Tabel 4.5 dibawah.

Table 4.5. Keterangan Foto Mikrostruktur Gambar 4.8 dan 4.9 posisi No. 1-14

No	Posisi	Klasifikasi Kelas Creep	Fasa	Retak Mikro
1	Replika No. 1	A	Austenit	Tidak ada
2	Replika No.2	C	Austenit	Ada
3	Replika No.3	A	Austenit	Tidak ada
4	Replika No.4	A	Austenit	Tidak ada
5	Replika No.5	A	Austenit, butiran relatif lebih kecil,	Tidak ada
6	Replika No.6	A	Austenit	Tidak ada
7	Replika No.7	A	Austenit	Tidak ada
8	Replika No.8	C	Austenit	Ada
9	Replika No.9	B	Austenit	Tidak ada

10	Replika No.10	A	Austenit	Tidak ada
11	Replika No.11	A	Austenit	Tidak ada
12	Replika No.12	A	Austenit	Tidak ada
13	Replika No.13	A	Austenit	Tidak ada
14	Replika No.14	A	Austenit	Tidak ada

4.6. PENGUJIAN KEKERASAN

Pengujian kekerasan dilakukan pada dua sisi Shell Plenum yaitu pada bagian dalam (inside) dan bagian luar (outside). Pengujian dilakukan sama seperti pengujian metalografi yaitu pada 14 titik. (Lihat Tabel 4.6)

Tabel 4.6. Hasil Uji Kekerasan Pada Shell Plenum

No	Lokasi	BHN	No	Lokasi	BHN
1	Plenum out side No. 1 (Cy A) (72°)	122	8	Plenum out side No. 8 (D) (216°)	131
2	Plenum out side No. 2 (A – E) (108°)	129	9	Plenum out side No. 9 (C) (252°)	140
3	Plenum out side No. 3 (Cy E) (144°)	126	10	Plenum inside No. 10 (C) (252°)	119
4	Plenum out side No. 4 (D) (216°) Material Asli	130	11	Plenum inside No. 11 (B-C) (324°)	132
5	Plenum out side No. 5 (D) (216°)	141	12	Plenum inside No. 12 (B-A) (36°)	119
6	Plenum out side No. 6 (D) (216°)	130	13	Plenum inside No. 13 (A – E) (108°)	117
7	Plenum out side No. 7 (D) (216°)	140	14	Plenum inside No. 14 (D – E) (180°)	122

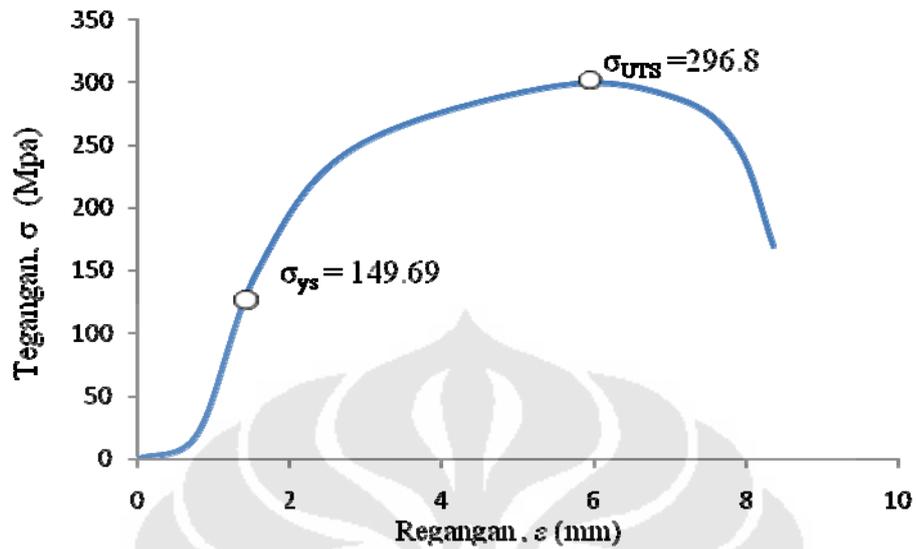
4.7. PENGUJIAN TARIK

Pengujian dilakukan pada mesin uji tarik RME 100 pada temperatur 695°C dan 680°C. Sampel uji tarik dengan material AISI 304H ini dipanaskan didalam tanur yang merupakan salah satu bagian dari mesin uji tarik tersebut. Sehingga didapatkan kurva tegang-regang yang mempunyai nilai *yield stress* (σ_{ys}) dan *Ultimate Tensile Stress* (σ_{UTS}) seperti yang terlihat pada Tabel 4.7.

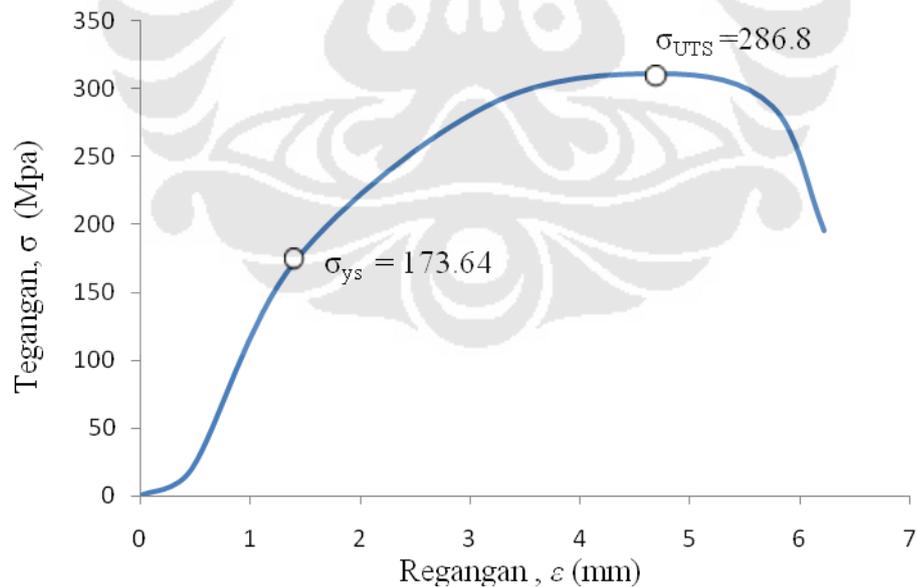
Table 4.7. Nilai *yield stress* (σ_{ys}) dan *Ultimate Tensile Stress* (σ_{UTS}) untuk setiap temperatur uji.

No	Temperatur Uji (°C)	σ_{ys} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)
1	680	149.69	296.8
2	695	173.64	286.8

Sedangkan untuk kurva tegang - regangannya sendiri dapat terlihat pada Gambar 4.10 dan 4.11 sebagai berikut :



Gambar 4.10 Kurva Tegang-Regang Baja Tahan Karat 304H pada temperatur 680°C



Gambar 4.11 Kurva Tegang-Regang Baja Tahan Karat 304H pada temperatur 695°C

BAB V

PEMBAHASAN

5.1. KARAKTERISITIK MATERIAL

5.1.1. Analisa Kekuatan Tarik Temperatur Tinggi

Pada pembuatan diagram FAD dibutuhkan nilai dari kurva tegang-regangan material aktual dari komponen yang akan dilakukan pengkajian kelayakan. Namun menurut literatur^[1] jika tidak terdapat material aktual yang dapat digunakan sebagai sampel uji tarik, maka material dengan spesifikasi sama dapat digunakan sebagai sampel uji tarik untuk menghasilkan kurva tegang-regangan yang akan digunakan untuk mengkonstruksi diagram FAD.

Pada pengujian tarik pada temperatur 695°C dan 680°C ini didapatkan kurva tegang-regang dari material 304H. dari kurva tersebut didapatkan nilai *yield stress* (σ_{ys}), *ultimate tensile stress* (σ_{UTS}), regangan (ϵ), dan modulus elastisitas (E). Nilai-nilai kekuatan material A 304H ini selanjutnya akan digunakan dalam pengkajian kelayakan dari komponen RFCCU.

Perbandingan hasil pengujian dengan literatur seperti pada Tabel 5.1 menunjukkan bahwa nilai *tensile* dan *yield strength* dari material Shell Plenum RFCCU masih sesuai dengan standar. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa material mempunyai kekuatan tarik yang cukup tinggi.

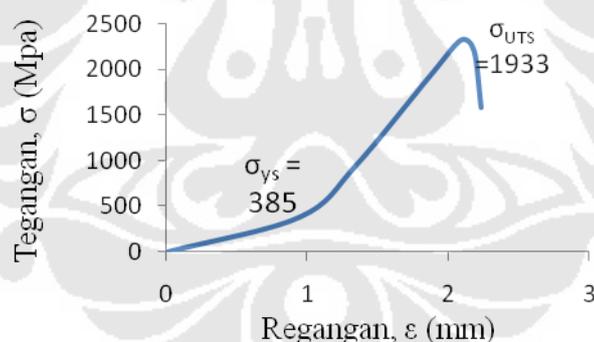
Tabel 5.1. Perbandingan Uji Tarik Temperatur Tinggi material AISI 304H

No	Uji Tarik	Temperatur (°C)	<i>Tensile Strength</i> (MPa)
1	Literatur (minimum) ^[17]	700	270
2	Sampel I	680	297
3	Sampel II	695	287

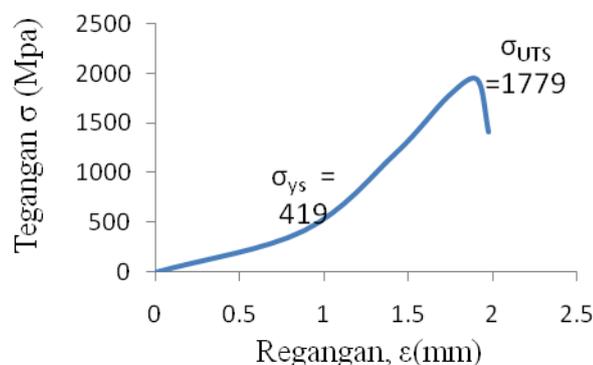
Dari perbandingan hasil uji tarik temperatur tinggi diatas terlihat bahwa temperatur yang digunakan berbeda-beda. Hal tersebut terjadi karena ketika dilakukan pengujian tarik, mesin uji tarik yang digunakan mencapai temperatur 695°C dan 680°C, walau temperaturnya telah diatur untuk mencapai temperatur 690°C.

Namun apabila diamati pada perbandingan diatas (Tabel 5.1), terlihat bahwa kekuatan material uji tarik tersebut sesuai dengan literatur. Karena kekuatan tariknya (*tensile strength*) diatas dari kekuatan minimum literatur.

Kurva yang didapatkan pada pengujian tarik ini adalah kurva tegang-regang rekayasa (*engineering stress-strain*), sedangkan kurva yang dibutuhkan untuk melakukan pengkajian kelayakan komponen ini adalah kurva tegang – regang sejati (*true stress-strain curve*). Oleh karena itu, kurva tegang-regang rekayasa ini akan dikonversi dengan menggunakan persamaan (2.9) dan (2.10). Kurva tegang – regang rekayasa dapat diamati pada Gambar 4.10 dan 4.11, sedangkan kurva tegang regang sejati dapat diamati pada Gambar 5.1 dan 5.2



Gambar 5.1. Kurva True Stress – Strain Temperatur 680°C

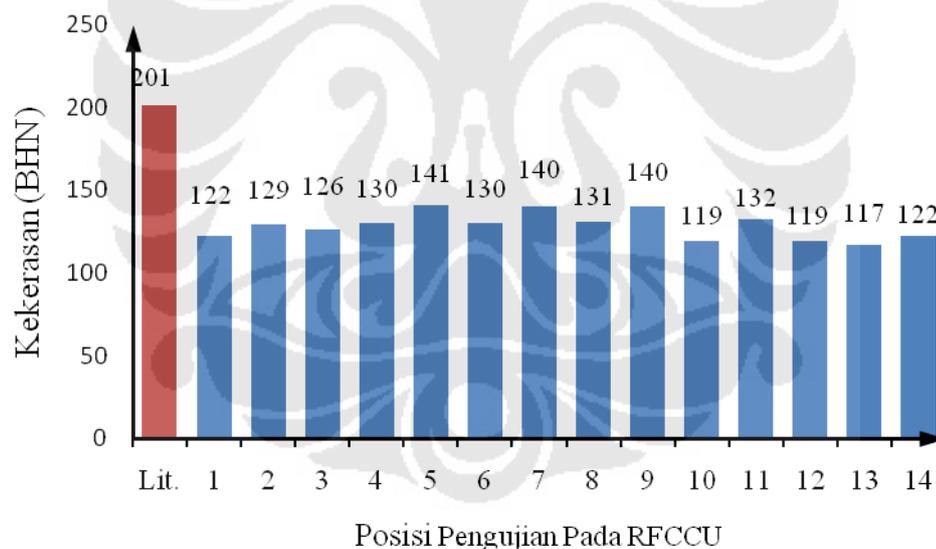


Gambar 5.2. Kurva True Stress – Strain Temperatur 695°C

5.1.2. Analisa Mikrostruktur (Metalografi) dan Analisa Kekerasan

Foto mikrostruktur pada Gambar 4.8 dan 4.9 menunjukkan bahwa fasa yang dimiliki oleh material RFCCU adalah adalah fasa austenit. Hal ini sesuai dengan materialnya yaitu *austenitic stainless steel* yang mempunyai fasa austenit. Baja tahan karat austenit, dengan kandungan kromium dan nikel yang tinggi membuat membuat material berfasa fully austenit. (paduan nikel yang merupakan *austenite former* sedangkan kromium merupakan ferrite former, sehingga untuk mencapai fully austenit kandungan kromium tidak lebih dari 8%^[10])

Menurut literatur, austenit mempunyai kekerasan sekitar 201 BHN^[17]. Namun dari hasil pengujian kekerasan, tidak ditemukan kekerasan yang mencapai nilai 210 BHN pada shell plenum. Pada diagram batang dibawah (Gambar 5.3) terlihat bahwa kekerasan hasil pengujian (berwarna biru) tidak ada yang mencapai kekerasan literatur (berwarna merah).



Gambar 5.3. Perbandingan kekerasan dari berbagai macam posisi pada RFCCU dengan literatur

Pada Gambar 4.8 dan 4.9 terlihat pada foto bahwa besar butir material *shell plenum*, telah mengalami perbesaran butir. Pembesaran butir yang terjadi diakibatkan karena adanya proses *Secondary Recrystallization*^[11]. Pada proses ini akan terjadi pertumbuhan butir yang abnormal perbesarannya tersebut akan mempengaruhi kekerasan dari material^[16].

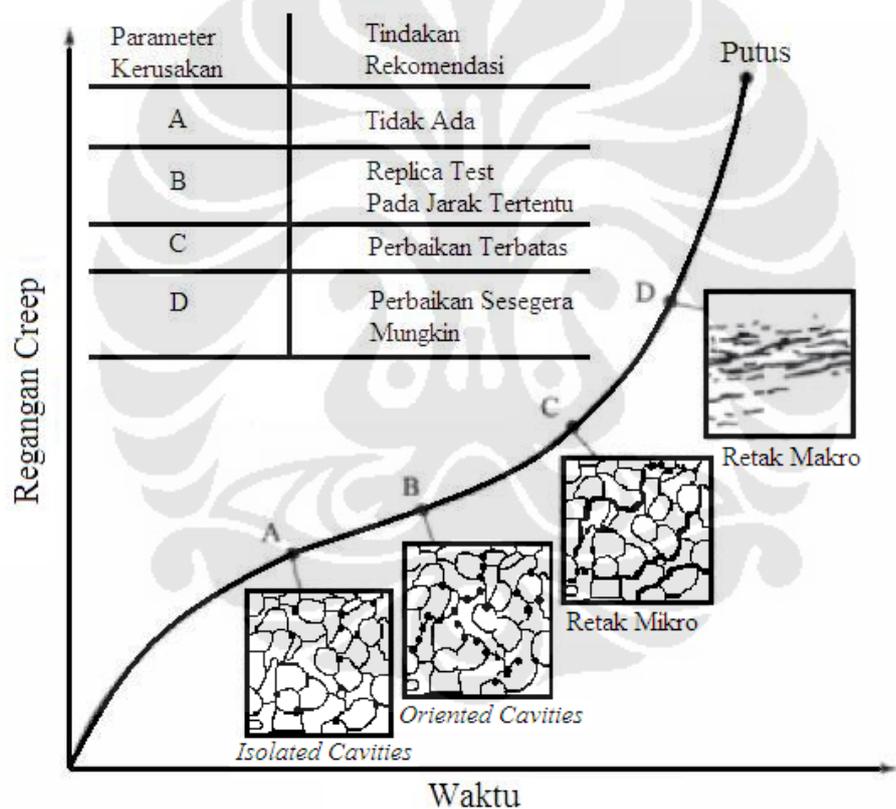
Pada proses perlakuan panas terhadap baja tahan karat Austenitik, proses annealing mempunyai temperatur minimal adalah 900 °C^[11]. Pemanasan dengan kondisi dibawah temperatur minaimal tersebut dapat menyebabkan terjadinya *secondary recrystallization*. Dimana proses rekritstalisasi tersebut harus dihindari^[11]. Selain itu disebutkan juga bahwa baja tahan karat dengan kandungan kadar karbon yang tinggi dapat menyebabkan meningkatnya temperatur minimum annealing^[11], oleh karena itu untuk stainless steel jenis 304H yang mempunyai kandungan karbon yang tinggi maka akan mempunyai temperatur minimal *annealing* yang lebih tinggi. Sehingga dengan temperatur operasi RFCCU pada temperatur 690°C memungkinkan terjadinya *secondary recrystallization*.

Dapat diamati pada foto mikrostruktur Gambar 4.8 dan 4.9, dengan perbesaran yang sama yaitu 200X, bahwa setiap miksrostruktur mempunyai besar butir yang berbeda-beda. Hal tersebut menjelaskan mengapa kekerasan yang didapatkan berbeda-beda pula. Seperti yang dijelaskan pada literatur bahwa semakin besar butir maka kekerasannya akan semakin menurun dan begitu juga sebaliknya^[16]. Jika diamati pada data kekerasan pada Tabel 4.6, lokasi yang mempunyai kekerasan yang paling tinggi adalah lokasi 5. Kemudian jika kita tinjau pada foto mikrostruktur posisi 5 maka terlihat bahwa besar butir pada foto no.5 tersebut mempunyai besar butir yang lebih kecil dibandingkan dengan besar butir di posisi yang lain. Hal ini menerangkan bahwa perbedaan kekerasan pada komponen RFCCU tersebut disebabkan adanya perbedaan besar butir. Sedangkan perbedaan perbesaran butir tersebut disebabkan oleh proses *secondary recrystallization*, yang menurut literatur proses *secondary recrystallization* tersebut akan menyebabkan perbesaran butir yang berbeda – beda dan abnormal^[11].

5.2. PENGKAJIAN UMUR SISA *SHELL PLENUM* RFCCU

5.2.1 Pengkajian Umur Sisa Berdasarkan Investigasi Mikrostruktur

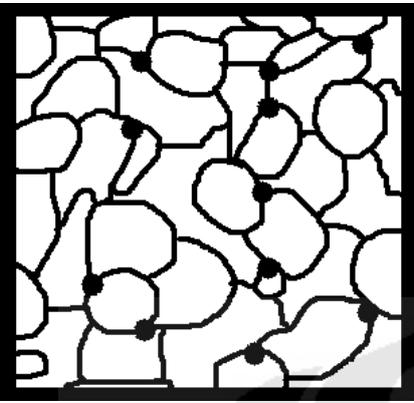
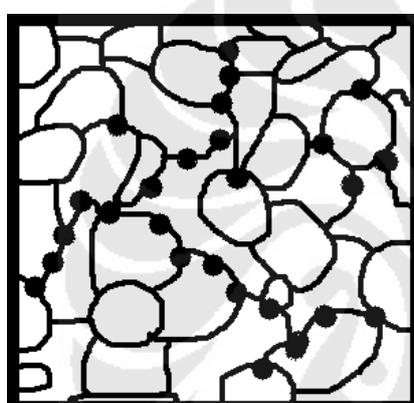
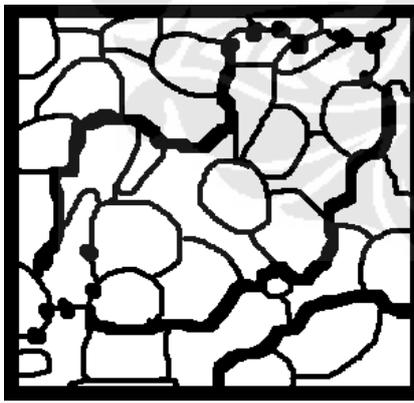
Metalografi dilakukan pada 14 titik pengambilan dan ditemukan adanya retak mikro yang berarti menunjukkan bahwa pada lokasi tersebut telah terjadi creep dengan jenis void yaitu kelas C pada 2 lokasi titik. Dan untuk sisanya terlihat pada mikrostrukturnya bahwa telah terjadi indikasi creep dengan jenis void yaitu kelas B dan kelas A. Indikasi kondisi creep dengan klasifikasi jenis void kelas B terdapat hanya pada 1 titik. Sedangkan sisanya yaitu titik terdapat 11 titik berada dalam kondisi void dengan klasifikasi kelas A.



Gambar 5.4. Pengkajian umur creep berdasarkan klasifikasi void^[3]

Berdasarkan penelitian Neuber dan Wedel^[3], bahwa dengan dibaginya klasifikasi dari kelas void tersebut maka rekomendasi tindakan untuk masing - masing kelas pun berbeda – beda pula. Berikut dibawah ini merupakan tindakan yang perlu dilakukan berdasarkan pembagian klasifikasi jenis kelas void.

Tabel 5.2. Klasifikasi kelas creep void dan tindakan yang perlu dilakukan^[3]

No	Jenis Creep Void	Kelas	Posisi	Tindakan rekomendasi
1		A	<ul style="list-style-type: none"> - No 1 - No 3 - No 4 - No 5 - No 6 - No 7 - No 10 - No 11 - No 12 - No 13 - No 14 	Belum perlu adanya tindakan perbaikan
2		B	<ul style="list-style-type: none"> - No. 9 	dilakukan tindakan inspeksi kembali dalam waktu 1.5 - 3 tahun mendatang
3		C	<ul style="list-style-type: none"> - No.2 - No.8 	Perbaikan dan pergantian dalam waktu 6 bulan mendatang.

Kelas A belum memerlukan tindakan perbaikan, karena menurut Neuber dan Wedel creep yang terjadi belum membahayakan, dan material komponen masih dapat menerima keadaan tersebut. Pada kelas B dilakukan tindakan inspeksi kembali dalam jangka waktu 1.5 sampai 3 tahun selanjutnya, karena creep yang terjadi menunjukkan kondisi yang memungkinkan creep dapat bertambah. Oleh

karena itu tindakan pencegahan yang dilakukan adalah menginspeksi kembali komponen tersebut. Sedangkan untuk kelas C tindakan yang perlu dilakukan adalah perbaikan dan pergantian dalam waktu 6 bulan mendatang, karena dengan adanya retak mikro tersebut, bila tidak dilakukan tindakan perbaikan maka retak akan segera membesar dan dapat menjadi awal terjadinya kegagalan (*fracture*) pada RFCCU.

5.2.2 Pengkajian Pengkajian Umur Sisa Berdasarkan Akumulasi Kerusakan Material

Pada metoda ini sebelum kita melakukan perhitungan umur sisa pada shell plenum RFCCU dilakukan terlebih dahulu perhitungan terhadap akumulasi kerusakan yang telah terjadi pada material Shell Plenum. Selama penggunaannya tentunya material pada Shell Plenum RFCCU akan mengalami degradasi yang disebabkan bekerja pada temperatur yang tinggi dan juga adanya tegangan. Dengan begitu kemampuan material akan menurun, dan hal tersebutlah yang akan dapat mengurangi umur dari suatu komponen. Oleh karena itu dibutuhkan sejarah penggunaan yang lengkap, dan beberapa data pendukung yang akan dalam analisis untuk menentulan umur sisa dari komponen. Penentuan umur sisa dilakukan berdasarkan API 530^[19].

Komponen RFCCU ini telah mulai bekerja sejak tahun 1969. Dengan temperatur operasi sekitar 690°C. Namun dalam perjalanannya, komponen ini tidak selalu berjalan sesuai pada temperatur operasi. Tercatat terdapat up-set temperatur sekitar 930°C selama 200 jam. Dari kejadian tersebut maka akan mempengaruhi umur sisa dari komponen. Oleh karena itu dengan menyertakan up-set temperatur pada analisis maka umur sisa nantinya akan dapat ditentukan. Berikut adalah merupakan data sejarah operasi komponen RFCCU yang tercatat oleh operator komponen tersebut (Tabel 5.3).

Tabel 5.3. Sejarah Operasi Komponen RFCCU

Periode Operasi	Durasi (Jam)	Stress Rata – Rata (Mpa)	Temperatur (°C)	Do (mm)	Ketebalan Minimum (mm)	
					Awal	Akhir
1	342400	18.41	690	3313.5	11.73	11.73
2	200	18.41	930	3313.5	11.73	11.73

- **Estimasi umur sisa berdasarkan akumulasi kerusakan dengan hanya mempertimbangkan faktor creep.**

Perhitungan akumulasi kerusakan yang telah terjadi pada material dilakukan dengan cara mengitung fraksi umur dari komponen untuk setiap masing-masing kondisi temperatur dan tekanan. Langkah pertama adalah menentukan Larsson Miller Parameter (LMP) berdasarkan tegangan aktual dari komponen. LMP didapatkan dengan memproyeksikan tegangan pada garis kekuatan rata – rata atau garis kekuatan minimum pada kurva LMP.

Perhitungan dilakukan berdasarkan 2 jenis pertimbangan kekuatan yaitu, Kekuatan putus rata-rata (*Average Rupture Strength*) dan Kekuatan putus minimum (*Minimum Rupture Strength*). Kekuatan putus minimum merupakan kekuatan yang 95% sampel pada pengujian mempunyai kekuatan putus yang lebih besar dari nilai ini. Sedangkan kekuatan putus rata-rata merupakan kekuatan dimana 50% sampelnya mempunyai kekuatan putus yang lebih besar dari suatu nilai.

Setelah didapatkan LMP maka perhitungan terhadap fraksi umur berdasarkan akumulasi kerusakan dapat dilakukan. Berikut dibawah ini sebagai contoh salah satu perhitungan pada kondisi fraksi umur periode 1 berdasarkan kekuatan rata-rata (dalam satuan SI) pada Tabel 5.4.

$$\begin{aligned}
 \text{LMP} &= (T_{\text{operasi}} + 273) \times (15 + \log Lr) \times 10^{-3} \\
 21.7 &= (690 + 273) \times (15 + \log Lr) \times 10^{-3} \\
 \text{Log } Lr &= 7.533748702 \\
 Lr &= 34178161.84 \text{ Jam} \\
 &= 3955.805769 \text{ Tahun}
 \end{aligned}$$

Lr merupakan nilai umur total dari komponen. Dari umur keseluruhan komponen tersebut pada temperatur 690°C maka didapatkan Fraksi Umur^[19]:

$$\begin{aligned}
 \text{Fraksi Umur Terpakai} &= \text{Umur Telah Berjalan} / \text{Umur Keseluruhan} \\
 \text{Fraksi Umur Terpakai} &= 342400 \text{ Jam} / 34178161.84 \text{ Jam} \\
 &= 0.01002
 \end{aligned}$$

Dari nilai fraksi umur terpakai ini untuk masing-masing periode keseluruhannya akan dijumlahkan sehingga akan didapatkan fraksi umur terpakai total. Namun fraksi tersebut hanya akan mempunyai nilai ≤ 1 .

Pada API 530 ini analisa yang dilakukan adalah penentuan umur sisa pada suatu komponen dengan mempertimbangkan hanya ada proses creep yang terjadi pada material sesuai dengan kondisi temperatur dan tegangan yang di operasikan pada komponen. Dari pengujian didapatkan tegangan aktual pada komponen adalah 18.41 MPa. Dengan tegangan tersebut akan diperkirakan umur sisa dari komponen dengan mempertimbangan faktor creep. Tabel 5.4 dan 5.5 merupakan perhitungan fraksi akumulasi kerusakan dari komponen berdasarkan kekuatan putus rata-rata dan kekuatan putus minimum.

Tabel 5.4. Fraksi Umur Berdasarkan Kekuatan Putus Rata - Rata

Periode Operasi	Tegangan Aktual (MPa)	Suhu (°C)	Larson Miller Parameter	Umur Komponen Berdasarkan Kekuatan Rata - Rata	
				Lr (jam)	Fraksi Umur
1	18.41	690	21.7	34178161.8	0.01002
2	18.41	930	21.7	1092.0	0.18314
Fraksi Akumulasi Kerusakan Total					0.19316

Tabel 5.5. Fraksi Umur Berdasarkan Kekuatan Putus Minimum

Periode Operasi	Tegangan Rata - Rata (MPa)	Temperatur (°C)	Larson Miller Parameter	Umur Komponen Berdasarkan Kekuatan Rata - Rata	
				Lr (jam)	Fraksi Umur
1	18.41	690	20.9	5046745.7	0.06785
2	18.41	930	20.9	236.2	0.84683
Fraksi Akumulasi Kerusakan Total					0.91468

Dari tabel diatas ditemukan fraksi kerusakan berdasarkan kekuatan putus rata-rata total adalah **0.19316**, sedangkan fraksi kerusakan kekuatan putus minimum total adalah **0.91468**.

Setelah diketahui fraksi kerusakan dari komponen RFCCU, maka selanjutnya kita dapat menentukan umur sisa dari komponen tersebut. Umur sisa didapatkan dengan menghitung sisa fraksi. Fraksi umur sisa didapatkan dari persamaan 5.1.

1 - Fraksi Kerusakan = Fraksi Umur Sisa (5.1)
--

Setelah didapatkan fraksi umur sisa maka kita akan dapat mengestimasi umur sisa komponen sesuai dengan kondisi operasi yang akan dioperasikan pada komponen di waktu yang akan mendatang. Estimasi umur sisa yang dilakukan berdasarkan kekuatan putus rata-rata dan kekuatan putus minimum.

Perhitungan fraksi akumulasi kerusakan berdasarkan kekuatan rata-rata didapatkan nilai sebesar **0.19316**. sedangkan fraksi akumulasi kerusakan berdasarkan kekuatan minimum didapatkan nilai sebesar **0.91468**. Maka dari kedua nilai fraksi akumulasi kerusakan tersebut didapatkan fraksi umur sisa sebesar:

Fraksi umur sisa berdasarkan berdasarkan kekuatan rata – rata:

$$1 - 0.19316 = 0.80684$$

Dari nilai fraksi umur sisa dari atas maka selanjutnya dilakukan perhitungan umur sisa berdasarkan fraksi umur sisa komponen (Tabel 5.6).

Tabel 5.6. Estimasi Umur Sisa Berdasarkan fraksi umur sisa berdasarkan kekuatan putus rata-rata.

Waktu	Tebal Min. (mm)	Teg. Rata-Rata (MPa)	Larson Miller Parameter	Lr (jam)	Fraksi	Fraksi Sisa
0	11.73					0.8068
1	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0003	0.8066
2	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0005	0.8061
3	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0008	0.8053
4	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0010	0.8043
5	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0013	0.8030
6	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0015	0.8015
7	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0018	0.7998
8	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0020	0.7977
9	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0023	0.7955
10	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0025	0.7929
11	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0028	0.7902
12	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0030	0.7871
13	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0033	0.7838
14	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0035	0.7803
15	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0038	0.7765

Waktu	Tebal Min. (mm)	Teg. Rata-Rata (MPa)	Larson Miller Parameter	Lr (jam)	Fraksi	Fraksi Sisa
16	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0040	0.7725
17	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0043	0.7682
18	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0046	0.7636
19	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0048	0.7588
20	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0051	0.7538
21	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0053	0.7484
22	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0056	0.7429
23	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0058	0.7371
24	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0061	0.7310
25	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0063	0.7247
26	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0066	0.7181
27	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0068	0.7113
28	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0071	0.7042
29	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0073	0.6969
30	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0076	0.6893
31	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0078	0.6815
32	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0081	0.6734
33	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0083	0.6650
34	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0086	0.6564
35	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0088	0.6476
36	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0091	0.6385
37	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0094	0.6291
38	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0096	0.6195
39	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0099	0.6097
40	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0101	0.5995
41	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0104	0.5892
42	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0106	0.5786
43	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0109	0.5677
44	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0111	0.5566
45	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0114	0.5452
46	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0116	0.5336
47	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0119	0.5217
48	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0121	0.5096
49	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0124	0.4972
50	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0126	0.4845
51	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0129	0.4716

Waktu	Tebal Min. (mm)	Teg. Rata-Rata (MPa)	Larson Miller Parameter	Lr (jam)	Fraksi	Fraksi Sisa
52	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0131	0.4585
53	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0134	0.4451
54	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0137	0.4314
55	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0139	0.4175
56	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0142	0.4034
57	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0144	0.3890
58	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0147	0.3743
59	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0149	0.3594
60	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0152	0.3442
61	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0154	0.3288
62	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0157	0.3131
63	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0159	0.2972
64	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0162	0.2810
65	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0164	0.2646
66	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0167	0.2479
67	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0169	0.2310
68	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0172	0.2138
69	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0174	0.1963
70	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0177	0.1786
71	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0179	0.1607
72	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0182	0.1425
73	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0185	0.1240
74	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0187	0.1053
75	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0190	0.0864
76	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0192	0.0672
77	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0195	0.0477
78	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0197	0.0280
79	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0200	0.0080
80	11.73	18.41	21.7	34178161.8	0.0202	-0.0122

Dari perhitungan, didapatkan bahwa sisa umur komponen berdasarkan kekuatan putus rata-rata adalah **80 tahun**. Pada waktu tersebut fraksi umur sisa akan habis sehingga komponen tersebut sudah tidak mempunyai umur sisa (Tabel 5.6).

Fraksi umur sisa berdasarkan kekuatan minimum:

$$1 - 0.91468 = 0.08532$$

Dari nilai fraksi umur sisa dari atas maka selanjutnya dilakukan perhitungan umur sisa berdasarkan fraksi umur sisa komponen (Tabel 5.7).

Tabel 5.7. Estimasi Umur Sisa Berdasarkan fraksi umur sisa berdasarkan kekuatan putus minimum

Waktu	Tebal Min. (mm)	Teg. Rata-Rata (MPa)	Larson Miller Parameter	Lr (jam)	Fraksi	Fraksi Sisa
0	11.73	-	-	-	-	0.0853
1	11.73	18.41	20.9	5046745.7	0.0017	0.0836
2	11.73	18.41	20.9	5046745.7	0.0034	0.0802
3	11.73	18.41	20.9	5046745.7	0.0051	0.0751
4	11.73	18.41	20.9	5046745.7	0.0068	0.0682
5	11.73	18.41	20.9	5046745.7	0.0086	0.0596
6	11.73	18.41	20.9	5046745.7	0.0103	0.0494
7	11.73	18.41	20.9	5046745.7	0.0120	0.0374
8	11.73	18.41	20.9	5046745.7	0.0137	0.0237
9	11.73	18.41	20.9	5046745.7	0.0154	0.0083
10	11.73	18.41	20.9	5046745.7	0.0171	- 0.0088

Perhitungan yang dilakukan berdasarkan kekuatan putus minimum didapatkan nilai umur sisa dari komponen tersebut adalah **10 tahun**.

Dari perhitungan diatas pada Tabel 5.8 dan 5.9, pada estimasi umur sisa dari komponen RFCCU dengan hanya mempertimbangkan faktor creep maka didapatkan nilai umur sisa untuk kekuatan putus rata-rata dan kekuatan putus minimum adalah masing-masing 80 tahun dan 10 tahun.

- **Estimasi umur sisa berdasarkan akumulasi kerusakan dengan mempertimbangkan faktor lain selain creep.**

Pada perhitungan sebelumnya, estimasi terhadap akumulasi kerusakan komponen hanya mempertimbangkan adanya faktor creep karena perhitungan menggunakan kurva Larson Miller Parameter (LMP) dimana LMP tersebut didapatkan dari perhitungan temperatur dan umur desain.

Namun pada kondisi aktual banyak faktor yang dapat mempengaruhi kerusakan dari komponen yang juga akan meningkatkan fraksi kerusakan

komponen, dan akhirnya juga akan mengurangi umur sisa dari komponen. Faktor-faktor yang terjadi pada kondisi operasi tertentu (korosi, karburisasi, dekarburisasi, sulfidasi atau nitridisasi yang terjadi pada temperatur tinggi), juga merupakan faktor yang dapat menyebabkan kerusakan pada komponen. Sedangkan pada perhitungan dengan menggunakan kurva LMP yang menggunakan material baru faktor – faktor penyebab kerusakan diatas kurang diperhitungkan. Oleh karena itu selanjutnya akan digunakan *safety factor* pada perhitungan tegangan untuk mempertimbangkan faktor – faktor penyebab kerusakan tersebut. Pada perhitungan kali ini *safety factor* yang digunakan adalah 1.6 ^[18]. Dibawah ini (Tabel 5.8 dan 5.9) merupakan perhitungan menggunakan *safety factor* berdasarkan kekuatan putus rata-rata & kekuatan putus minimum.

Tabel 5.8. Fraksi Umur Berdasarkan Kekuatan Putus Rata - Rata

Periode Operasi	1.6 x Tegangan Rata - Rata (MPa)	Suhu (°C)	Larson Miller Parameter (LMP)	Umur Komponen Berdasarkan Kekuatan Rata - Rata	
				Lr (jam)	Fraksi Umur
1	29.456	690	20.7	3128434.8	0.1094
2	29.456	930	20.7	161.1	1
Fraksi Umur Terpakai Total					1

Dari perhitungan umur total komponen berdasarkan kekuatan putus rata-rata pada temperatur 930°C ditemukan bahwa nilai umur total dari komponen adalah 161.1 jam sedangkan pada kondisi aktualnya bahwa dengan kondisi temperatur tersebut (930°C) komponen tetap dijalankan selama 200 jam (Tabel 5.3). Oleh karena itu pada perhitungan fraksi akumulasi kerusakan, dengan adanya kondisi komponen yang dijalankan pada waktu operasi lebih lama dari umur total komponen maka fraksi akumulasi komponen adalah 1 (Tabel 5.8).

Tabel 5.9. Fraksi Umur Berdasarkan Kekuatan Putus Minimum

Periode Operasi	1.6 x Tegangan Rata - Rata (MPa)	Temperatur (°C)	Larson Miller Parameter (LMP)	Umur Komponen Berdasarkan Kekuatan Rata - Rata	
				Lr (jam)	Fraksi Umur
1	29.456	690	19.8	363703.7	0.9414
2	29.456	930	19.8	28.8	1
Fraksi Umur Terpakai Total					1

Pada perhitungan umur total komponen berdasarkan kekuatan putus minimum pada temperatur 930°C (Tabel 5.9) ditemukan pula bahwa nilai umur total dari komponen adalah 28.8 jam, yaitu berarti umur tersebut lebih pendek dari lamanya waktu operasi komponen yang telah terjadi. Dengan demikian fraksi akumulasi kerusakan total berdasarkan kekuatan putus minimum adalah 1.

Dari perhitungan diatas untuk kedua jenis kekuatan putus (*rupture strength*) ditemukan fraksi akumulasi kerusakan adalah 1. Hal ini dikarenakan pada temperatur 930°C waktu operasi yang berjalan (200 jam) lebih lama dari umur total komponen itu sendiri pada kondisi operasi temperatur tersebut (161 jam untuk kekuatan rata-rata dan 28.8 jam untuk kekuatan minimum). Hal tersebut sebenarnya tidak boleh terjadi, karena dengan membiarkan komponen beroperasi lebih lama dari umur pakai komponen tersebut pada kondisi temperatur tertentu, maka akan dapat menyebabkan terjadinya kegagalan. Dan dari hal tersebut juga dapat disimpulkan bahwa komponen RFCCU pada kondisi operasi tersebut *sudah tidak memiliki umur sisa*.

Terdapat perbedaan hasil penentuan umur sisa metoda akumulasi kerusakan pada kondisi dengan hanya mempertimbangkan faktor creep dan dengan mempertimbangkan berbagai macam mode degradasi material. Diantara dua penentuan umur sisa ini, penentuan umur sisa dengan mempertimbangkan berbagai degradasi material merupakan hasil yang lebih realistis. Karena pada kondisi aktual, degradasi dapat disebabkan oleh berbagai macam hal, tidak hanya disebabkan oleh proses creep saja. Seperti yang telah dijelaskan diatas, degradasi material dapat berbentuk korosi, karburisasi, dekarburisasi, sulfidasi, atau nitridisasi. Berbagai macam jenis degradasi tersebut umumnya sulit oleh kita untuk diketahui kapan timbulnya. Oleh karena itu dalam melakukan penentuan umur sisa hal tersebut sebaiknya juga dipertimbangkan.

Sehingga kesimpulan dari keseluruhannya adalah bahwa Shell Plenum RFCCU ini **sudah tidak mempunyai umur sisa**, dengan kata lain sudah saatnya dilakukan perbaikan atau pergantian terhadap komponen tersebut. Hal ini menjelaskan bahwa adanya retak yang terjadi pada *Shell Plenum* RFCCU, akibat sudah habisnya umur operasi dari komponen tersebut.

5.3. PENGKAJIAN KELAYAKAN OPERASI (*FITNESS FOR SERVICE*) SHELL PLENUM RFCCU

Pada Shell Plenum RFCCU telah ditemukan sebuah retak sebesar 12 mm (Tabel 4.3). Menurut literatur^[1] apabila retak dibiarkan dapat memungkinkan retak tersebut menjadi awal retak, walaupun terkadang retak dengan ukuran tertentu masih dapat diterima untuk tetap berjalannya operasi. Oleh karena itu perlu dilakukan uji kelayakan operasi dari shell plenum RFCCU tersebut. Dengan menggunakan API 579 *section 9* yang merupakan metoda pengkajian kelayakan operasi terhadap adanya retak, diharapkan akan memberikan jawaban apakah plenum RFCCU ini masih layak dioperasikan atau tidak. Berikut dibawah merupakan pengkajian kelayakan operasi terhadap komponen plenum RFCCU.

- ***Kondisi operasi***

Kondisi operasi dari komponen RFCCU dapat diamati pada Tabel 4.2

- ***Distribusi Tegangan***

Distribusi tegangan pada daerah retak biasanya terdiri dari tegangan primer (σ_{primary}) dan tegangan sekunder dan residual (σ_{SR}). Namun pada perhitungan kali ini σ_{SR} tidak ditentukan, karena tegangan diperoleh dari perhitungan metoda *finite element* dengan menggunakan software NASTRAN, dimana tegangan yang didapatkan dengan menggunakan software ini merupakan tegangan yang sudah mencakup seluruh jenis tegangan. Maka tegangan sekunder yang berada pada shell plenum ini dianggap tidak ada karena telah termasuk pada perhitungan tegangan primer tersebut.

Dari perhitungan tegangan dengan metoda *finite element* menggunakan software NASTRAN didapatkan tegangan primer (σ_{primary}) sebesar **18.41 Mpa** (lihat Gambar 4.7).

- ***Sifat Material***

Sifat material yang akan digunakan dalam perhitungan uji kelayakan terdiri dari tegangan yield (σ_{ys}), kekuatan tarik (σ_{uts}), dan ketangguhan (K_{mat}). Untuk nilai tegangan yield (σ_{ys}) dan kekuatan tarik (σ_{uts}) didapatkan dari kurva tegang – regangan hasil pengujian tarik material RFCCU. Sedangkan nilai ketangguhan material didapatkan dari literatur^[1]. Nilai sifat mekanis material didapat dilihat pada Tabel 5.10.

Tabel 5.10. Sifat mekanis material komponen RFCCU

No	Sifat Material	Nilai
1	Tegangan Yield (σ_{ys})	161,355 (MPa)
2	Kekuatan Tarik (σ_{uts})	304 (MPa)
3	Ketangguhan (K_{mat})	220 (MPa√mm)

- **Dimensi Retak**

Dimensi retak yang ditemukan pada shell plenum RFCCU merupakan retak yang terdapat dipermukaan luar dinding plenum RFCCU, namun tidak sampai menembus dinding plenum tersebut. Sehingga sesuai berdasarkan dengan Gambar 5.5^[1], maka dimensi retak untuk c (setengah panjang retak) dan a (kedalaman retak) mempunyai ukuran :

$$c = 6 \text{ mm}, \quad a = 3 \text{ mm}$$



Gambar 5.5. Retak jenis *surface-wall* yang telah yang terjadi pada RFCCU^[1]

- **Tegangan Referensi Primer (σ_{ref}^F)**

Tegangan referensi untuk tegangan primer dihitung berdasarkan faktor distribusi tegangan primer dan faktor dimensi retak.

Tegangan referensi primer didapatkan dari persamaan (5.2)^[1]:

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + (P_b^2 + 9\{ZP_m\}^2)^{0.5}}{3} \quad (5.2)$$

σ_{ref} = Tegangan Referensi Primer (MPa)

P_b = Tegangan Bending (MPa)

P_m = Tegangan Membran (MPa)

Z = Faktor Pengali

Tegangan Membran (P_m) dalam hal ini bernilai sama dengan tegangan primer (σ_{primary}). Sedangkan tegangan bending dapat diabaikan. Hal ini seperti yang telah dijelaskan pada bagian distribusi tegangan, bahwa tegangan dihitung dengan menggunakan software NASTRAN, sehingga tegangan bending yang ada pada komponen telah termasuk dalam perhitungan tegangan primer (σ_{primary}).

$$P_m = 18.41 \text{ MPa}$$

$$P_b = 0 \text{ MPa}$$

Untuk nilai Z , didapatkan dari persamaan^[1]:

$$Z = \left[\frac{2\alpha}{\pi} - \frac{x\theta}{\pi} \left(\frac{2 - 2\tau + x\tau}{2 - \tau} \right) \right]^{-1} \quad (5.3)$$

Dimana untuk nilai x , τ , θ , α , dan A didapatkan dari persamaan dibawah ini^[1]:

$$x = \frac{a}{t} \quad (5.4)$$

$$= 0.2557545$$

$$\tau = \frac{f}{Ro} \quad (5.5)$$

$$= 0.0070801$$

Untuk mendapatkan θ , pada retak eksternal maka digunakan persamaan^[1]:

$$\theta = \frac{\pi c}{4Ro} \quad (5.6)$$

$$= 0.002843$$

Untuk mendapatkan luas area retak (A), maka digunakan persamaan^[1]:

$$A = \pi \left[\frac{(1 - \tau)(2 - 2\tau + x\tau) + (1 - \tau + x\tau)^2}{2[1 + (2 - \tau)(1 - \tau)]} \right] \quad (5.7)$$

$$= 0.127201$$

Untuk mendapatkan nilai α , maka digunakan persamaan^[1]:

$$\alpha = \arccos (A \sin \theta) \quad (5.8)$$

$$= 1.570435$$

Setelah didapatkan nilai x , τ , θ , α , dan A , maka dapat dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai Z . Dengan menggunakan persamaan (5.3) diatas, maka didapatkan nilai $Z = 0.999954065$

Kemudian setelah nilai-nilai untuk persamaan 5.2 (P_m , P_b , dan Z) diketahui maka nilai Tegangan Referensi Primer (σ_{ref}) dapat diketahui. Dengan menggunakan persamaan (5.2) maka nilai Tegangan Referensi Primer (σ_{ref}) didapatkan sebesar **18.409 MPa**

- **Rasio Pembebanan (L_r^P)**

Rasio Pembebanan atau *Load Ratio* akan digunakan sebagai titik absis pada FAD. Rasio pembebanan ini dapat dihitung dengan menggunakan tegangan primer referensi dan tegangan yield.

$$\begin{aligned} L_r^P &= \frac{\sigma_{ref}^P}{\sigma_{ys}} \\ &= \mathbf{0.113863} \end{aligned} \quad (5.9)$$

- **Intensitas Tegangan Primer (K_I^P)**

Intensitas Tegangan Primer (K_I^P) dihitung dengan menggunakan faktor distribusi tegangan primer dan faktor ukuran retak. Dibawah ini merupakan persamaan yang digunakan untuk menghitung *Intensitas tegangan primer* (K_I^P)^[1].

$$K_I = G_o \left(\frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \right) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (5.10)$$

Karena,

$$P_m = \left(\frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \right)$$

Maka

$$K_I = G_o P_m \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

Keterangan:

- K_I = Intensitas Tegangan Primer (MPa)
- G_o = *influence coefficients*
- a = Kedalaman Retak (mm)

Nilai Q didapatkan dari persamaan dibawah ini^[1]:

$$Q = 1.0 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad \cdot \quad a/c \leq 1.0 \quad (5.11)$$

$$Q = 1.0 + 1.464 \left(\frac{c}{a} \right)^{1.65} \quad \cdot \quad a/c > 1.0 \quad (5.12)$$

Karena $\frac{a}{c} = 0.5$ maka Q yang didapatkan dengan menggunakan persamaan (5.11) dan hasil yang didapat untuk nilai Q adalah **1.466489**. Untuk nilai *influence coefficients* (G_o) didapatkan dengan menggunakan persamaan^[1]:

$$G_o = A_{0,0} + A_{1,0}\beta + A_{2,0}\beta^2 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6 \quad (5.13)$$

Sedangkan untuk nilai β didapatkan dari persamaan dibawah ini^[1]:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{2a}{\pi} \\ &= 1 \end{aligned} \quad (5.14)$$

Sehingga nilai G_o yang didapat adalah **1.093223**. Sedangkan untuk nilai P_m telah didapatkan pada tahap sebelumnya yaitu **18.41 MPa**. Setelah mendapatkan nilai Q, G_o , dan P_m dapat dilakukan perhitungan terhadap nilai Intensitas Tegangan Primer. Nilai *Intensitas Tegangan Primer* yang didapat adalah **81.61 MPa**

- ***Intensitas Tegangan Sekunder (K_I^{SR})***

Seperti penjelasan diatas bahwa tegangan sekunder dianggap tidak ada, karena keberadaannya sudah diperhitungkan didalam tegangan primer dengan menggunakan metoda *finite element* software NASTRAN. Maka K_I^{SR} juga dianggap tidak ada atau nol.

- ***Faktor Interaksi Plastis (Φ)***

Perhitungan terhadap faktor interaksi plastisitas pada pengujian kelayakan kali ini tidak dilakukan. Hal tersebut dikarenakan pada perhitungan ini ditemukan bahwa $K_I^{SR} = 0.0$ maka perhitungan dapat lanjutkan pada tahap selanjutnya dengan menganggap *faktor intreksi plastisitasnya* (Φ) adalah **1**^[1].

- **Rasio Ketangguhan (K_r)**

Pada tahap akhir penentuan kelayakan RFCCU adalah menentukan rasio ketangguhan (K_r) atau ordinat dari titik penentuan FAD. Dimana K_I^P tegangan intensitas yang diaplikasikan sebagai distribusi tegangan primer. Sedangkan K_I^{SR} tegangan intensitas yang diaplikasikan sebagai distribusi tegangan sekunder dan residual. K_{mat} merupakan ketangguhan material dan Φ_0 merupakan faktor koreksi. Perhitungan K_r dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (5.15)^[1].

$$K_r = \frac{K_1^P + \Phi K_1^{SR}}{K_{mat}} \quad (5.15)$$

Dari persamaan (5.15) maka didapatkan nilai *rasio ketangguhan* sebesar **0.370976**

- **Pembuatan diagram FAD**

Setelah ditemukan titik koordinat untuk dilakukan penentuan kelayakan RFCCU, sesuai dengan *assessment* level 3 pada API 579 *section 9* ini maka perlu dilakukan pula pembuatan diagram FAD berdasarkan material yang dikaji. Dimana FAD disusun dengan berdasarkan sifat material aktual. Sifat material aktual tersebut didapatkan dengan melakukan pengujian tarik terhadap material yang dikaji namun bila tidak ada maka material dengan spesifikasi yang sama juga dapat digunakan.

Berikut dibawah ini merupakan langkah-langkah dalam pembuatan FAD berdasarkan material aktual^[1]:

1. Data *engineering stress-strain* didapatkan dari uji tarik temperatur tinggi (lihat Gambar 4.10 dan 4.11), berdasarkan material aktual yang pada komponen pada temperatur operasi, dimana pada pengkajian kali ini temperatur operasinya adalah 690°C
2. Setelah itu nilai *engineering stress-strain* tersebut dikonversi menjadi nilai *true stress-strain* dengan menggunakan persamaan:

$$\sigma = (1 + s)\sigma_e \quad (2.9)$$

$$s = \ln(1 + \epsilon_e) \quad (2.10)$$

- σ = true stress (MPa)
- σ_e = tegangan rekayasa/ *engineering stress* (MPa)
- ε = true strain (mm)
- ε_e = regangan rekayasa/ *engineering strain* (mm)

Setelah dilakukan konversi maka sifat material yang didapatkan dari kurva *true stress-strain* (Gambar 5.1 dan 5.2) dapat dilihat pada tabel 5.11.

Tabel 5.11. Sifat Material diambil dari kurva *true stress-strain*

No	Sifat Material	Nilai
1	Modulus Elastisitas (E)	441.28
2	Regangan yield (ε_{ys})	46 (mm)
3	Tegangan Yield (σ_{ys})	402.65 (MPa)
4	Kekuatan Tarik (σ_{UTS})	1860.33 (MPa)

Selanjutnya untuk menentukan nilai L_r^{max} , sebagai batas akhir kurva pada FAD dapat cari dengan menggunakan persamaan (2.6)^[14].

$$L_r^{max} = \frac{\sigma_f}{\sigma_{ys}} \quad (2.6)$$

Sedangkan nilai *flow stress* (MPa) pada persamaan (2.6) untuk *austenitic stainless steel*^[14] didapatkan dengan menggunakan persamaan (2.8)^[1].

$$\sigma_f = \frac{1.15 (\sigma_{ys} + \sigma_{UTS})}{2} \quad (2.8)$$

Setelah dilakukan perhitungan terhadap nilai *flow stress* (σ_f) yaitu sebesar **1301.21 (MPa)**. Maka nilai L_r^{max} yang didapatkan adalah **3.23159**. nilai tersebut merupakan nilai yang akan digunakan sebagai *cut-off* atau nilai batas akhir kurva pada FAD.

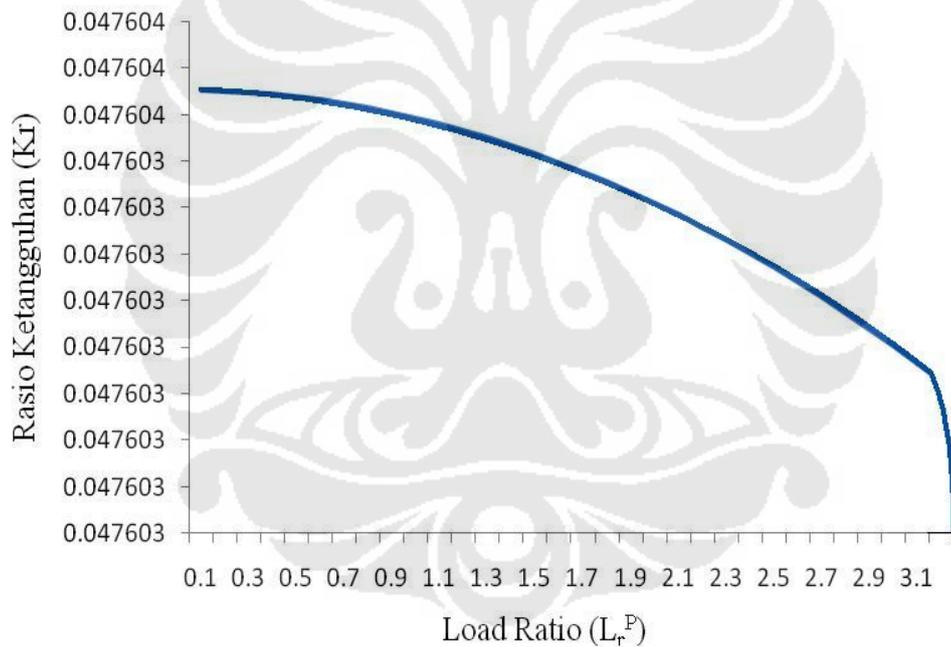
3. Lalu dengan menggunakan persamaan (2.4) dibawah maka selanjutnya dapat dibuat FAD. Dengan menggunakan jarak interval sebesar 0.1, maka nilai L_r^P dimulai dari angka 0.1 sampai nilai *cut-off* atau dengan kata lain nilai L_r^P ($L_{r(max)}$) yaitu 3.23159 dimasukkan pada persamaan (2.4)^[1].

$$Kr = \left[\frac{E \epsilon_{ref}}{L_r \sigma_{ys}} + \frac{L_r^3 \sigma_{ys}}{2E \epsilon_{ref}} \right]^{-1/2} \quad (2.4)$$

Dimana :

- E = Modulus Young (MPa)
- ϵ_{ref} = Regangan referensi (*Referance Strain*)
- σ_{ys} = Tegangan luluh (*Yield stress*) (MPa)
- L_r = Rasio pembebanan / *Load ratio* / *Collapse Ratio*
- L_r^{max} = nilai maksimum dari L_r

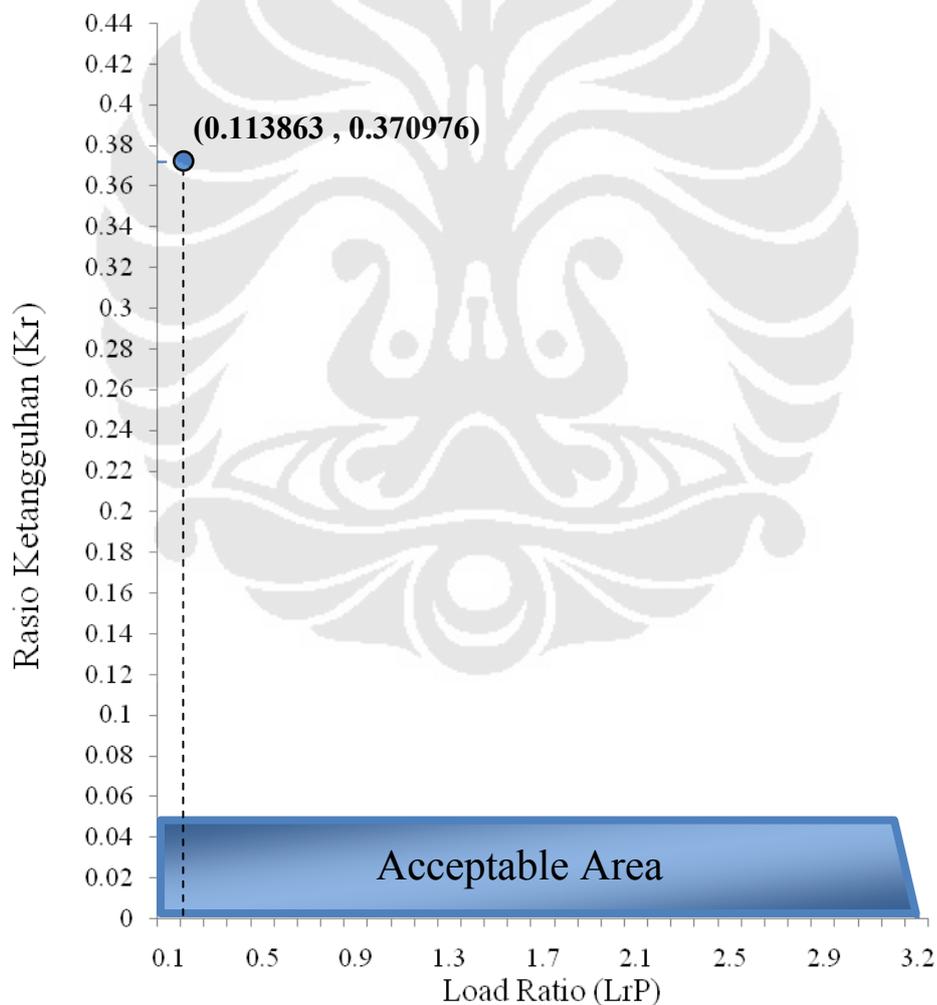
Setelah dimasukkannya nilai tersebut maka akan terbentuk diagram FAD seperti yang terlihat pada grafik dibawah (Gambar 5.6).



Gambar 5.6. *Failure Assessment Diagram* dari Komponen RFCCU

- **Evaluasi Akhir**

Pada tahap akhir dilakukan mengevaluasi hasil setelah ditemukan titik penentuan FAD berdasarkan ukuran retak dan kondisi operasi didefinisikan sebagai (L_r^P, K_r) . Baik nilai K_r maupun L_r^P telah didapatkan berdasarkan perhitungan diatas yaitu dengan nilai masing-masing $K_r = 0.370976$ dan $L_r^P = 0.113863$. Jadi dari diagram FAD (Gambar 5.7) terlihat bahwa titik tersebut berada diluar/diatas dari diagram FAD, maka dapat disimpulkan berdasarkan API 579 section 9 kondisi shell plenum tersebut **tidak dapat diterima** (*unacceptable*^[1]).



Gambar 5.7. *Failure Assessment Diagram* dari Komponen Shell Plenum RFCCU dengan titik penentuan berada diluar *acceptable area*