

## BAB VI

### TROUBLESHOOTING

#### 6.1 Troubleshooting Pada Unit Penyimpanan

Salah satu unit penyimpanan pada pabrik furfural ini terdapat Tangki Penyimpanan Furfural (T-06) dengan tipe *Flat Bottom Vessel Conical Roof* berbahan *Carbon Steel SA-283M Grade C*, berkapasitas menyimpan produk furfural ( $C_5H_4O_2$ ) cair selama 7 hari pada suhu  $30^\circ C$  dan tekanan 1 atm. Analisis troubleshooting unit penyimpanan disajikan pada Tabel 6.1 berikut.

**Tabel 6.1. Troubleshooting pada Unit Penyimpanan (T-06)**

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
1	Tangki Penyimpanan Furfural (T-06)	Menyimpan produk furfural ( $C_5H_4O_2$ ) cair selama 7 hari pada suhu $30^\circ C$ dan tekanan 1 atm (tipe: <i>Flat Bottom Conical Roof, Carbon Steel SA-283M</i> )	<i>High Level (Overflow)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Valve inlet</i> gagal menutup</li> <li>- Kegagalan sensor <i>level (ATG)</i></li> <li>- Aliran masuk berlebih dari unit sebelumnya</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Furfural tumpah ke sekitar tangki</li> <li>- Risiko kebakaran (furfural mudah terbakar)</li> <li>- Kerugian produk dan finansial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang <i>Level Indicator (LI)</i> dan <i>High Level Alarm</i></li> <li>- Pasang <i>Automatic Tank Gauge (ATG)</i></li> <li>- Inspeksi <i>valve inlet</i> secara berkala</li> <li>- Sediakan tangki cadangan untuk <i>bypass</i> aliran</li> </ul>

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
			<i>Low Level</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Valve outlet</i> gagal menutup (bocor)</li> <li>- Pompa transfer terlalu cepat menguras tangki</li> <li>- Tidak ada pasokan dari unit pemisah</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasokan furfural ke unit pengemasan terganggu</li> <li>- Pompa transfer mengalami <i>dry running</i> dan rusak</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang <i>Low Level Alarm</i> dan <i>interlock</i> otomatis pompa</li> <li>- Kalibrasi sensor level secara berkala</li> <li>- Periksa <i>valve outlet</i> dan sistem perpipaan secara rutin</li> </ul>
			<i>High Pressure (Overpressure)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Free vent</i> tersumbat (kotoran, karat)</li> <li>- <i>Pressure vacuum valve</i> gagal bekerja</li> <li>- Akumulasi uap furfural berlebih akibat suhu siang</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tangki meledak atau mengalami deformasi</li> <li>- Risiko kebakaran dari uap furfural yang keluar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang <i>Pressure Relief Valve (PRV)</i> dan <i>Pressure Vacuum Valve (PVV)</i></li> <li>- Pasang <i>Pressure Indicator (PI)</i> beserta alarm</li> <li>- Periksa dan bersihkan <i>free vent</i> secara rutin</li> <li>- Pasang <i>flame arrester</i> pada ventilasi tangki</li> </ul>
		Kebocoran pada <i>Shell</i> Tangki		- Korosi pada dinding <i>Carbon</i>	- Furfural terbuang,	- Pasang <i>Water Sprinkler</i> dan <i>Foam Chamber Fire Hydrant</i> di area tangki

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
				<ul style="list-style-type: none"> <li>Steel akibat paparan furfural</li> <li>- Kegagalan seal atau gasket pada <i>nozzle/manhole</i></li> <li>- <i>Overpressure</i> menyebabkan retakan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>kerugian finansial besar</li> <li>- Bahaya toksisitas dan kebakaran di area tangki</li> <li>- Pencemaran lingkungan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inspeksi ketebalan dinding tangki secara berkala (<i>thickness gauging</i>)</li> <li>- Pasang gas detector untuk deteksi uap furfural</li> <li>- Lakukan prosedur <i>Lock Out/Tag Out (LOTO)</i> saat perbaikan</li> </ul>
			<i>No Flow</i> (Tidak ada aliran keluar)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Valve outlet</i> tersumbat atau gagal membuka</li> <li>- Pompa transfer tidak berfungsi</li> <li>- Pipa tersumbat endapan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proses pengemasan dan distribusi furfural terhenti</li> <li>- Produksi terganggu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Periksa dan bersihkan <i>valve outlet</i> serta pipa secara rutin</li> <li>- Sediakan pompa cadangan (<i>standby pump</i>)</li> <li>- Pasang <i>Flow Indicator (FI)</i> pada jalur outlet</li> </ul>

### 6.2 Troubleshooting Pada Unit Pemindah

Salah satu unit pemindah pada pabrik furfural adalah pompa (P-01) yang berfungsi untuk mengalirkan asam sulfat dari tangki penyimpanan menuju unit proses (*mixer*). Pompa yang digunakan adalah jenis *centrifugal pump, single stage*, yang beroperasi secara kontinyu pada kondisi tekanan rendah ( $\pm 1$  atm) dan suhu operasi mendekati suhu lingkungan. Fluida yang dipompa berupa asam sulfat 98% yang bersifat sangat korosif, sehingga keandalan operasi pompa menjadi sangat krusial. Analisis *troubleshooting* pada unit pompa disajikan pada Tabel berikut.

**Tabel 6.2. Troubleshooting pada Unit Pemisah (P-01)**

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
1	Pompa <i>Transfer</i> (P-01)	Memindahkan asam sulfat (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 98%) dari tangki penyimpanan ke mixer menggunakan <i>centrifugal pump, single stage</i> , material SS 316	<i>No Flow</i> (Tidak ada aliran)	Pompa gagal start (kerusakan motor/listrik) - Impeller rusak atau aus - <i>Suction line</i> tersumbat (endapan/kotoran) - <i>Valve inlet</i> tertutup - Terjadi <i>vapor lock</i>	- Proses pencampuran terhenti - Gangguan kontinuitas produksi - Potensi <i>overheating</i> pada pompa	- Pasang <i>flow indicator</i> (FI) dengan alarm - <i>Interlock</i> pompa dengan level tangki - Inspeksi rutin impeller dan <i>suction line</i> - Pastikan <i>valve</i> dalam posisi benar sebelum operasi
			<i>Low Flow</i> (Aliran rendah)	- Keausan impeller - Kebocoran pada seal - <i>Head</i> pompa tidak mencukupi - Viskositas fluida meningkat - Terjadi kavitasi ringan	- Laju reaksi terganggu - Efisiensi proses menurun - Produk tidak sesuai spesifikasi	- Kalibrasi dan <i>monitoring flow</i> secara berkala - Gunakan pompa dengan <i>safety margin</i> kapasitas - Perawatan mechanical seal - Pasang <i>pressure gauge</i> di <i>suction &amp; discharge</i>

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
			<i>High Flow</i> (Aliran berlebih)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kontrol <i>valve</i> terbuka penuh</li> <li>- Tidak ada pengaturan <i>flow</i> control</li> <li>- Kesalahan operasi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Overfeeding</i> ke unit mixer</li> <li>- Reaksi tidak terkendali</li> <li>- Potensi <i>overheating</i> atau <i>runaway</i> reaction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang <i>control valve</i> otomatis</li> <li>- Gunakan <i>flow controller</i> (FC)</li> <li>- <i>Training</i> operator</li> </ul>
			<i>High Pressure</i> ( <i>Overpressure</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Discharge line</i> tersumbat</li> <li>- <i>Valve outlet</i> tertutup</li> <li>- <i>Scaling</i>/penyumbatan pada pipa</li> <li>- Fluida terjebak</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kerusakan pipa dan pompa</li> <li>- Risiko kebocoran asam sulfat</li> <li>- Bahaya keselamatan kerja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang <i>Pressure Relief Valve</i> (PRV)</li> <li>- <i>Pressure indicator</i> (PI) dengan alarm</li> <li>- Pembersihan pipa secara berkala</li> </ul>
			<i>Low Pressure</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kebocoran pada sistem</li> <li>- Pompa kehilangan efisiensi</li> <li>- <i>Suction</i> tidak optimal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aliran tidak stabil</li> <li>- Gangguan operasi <i>downstream</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Monitoring</i> tekanan secara <i>real-time</i></li> <li>- Perbaiki kebocoran segera</li> </ul>

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
			Kavitasi ( <i>Cavitation</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- NPSH tidak mencukupi</li> <li>- Suhu fluida terlalu tinggi</li> <li>- Tekanan suction rendah</li> <li>- Pipa <i>suction</i> terlalu panjang/berbelok</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kerusakan impeller (<i>pitting</i>)</li> <li>- Getaran dan <i>noise</i> tinggi</li> <li>- Penurunan performa pompa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desain <i>suction line</i> optimal</li> <li>- Kurangi <i>losses</i> pada <i>suction</i></li> <li>- Pasang vibration monitoring</li> </ul>

### 6.3 Troubleshooting Pada Unit Perekasi

Salah satu unit reaktor kimia pabrik furfural menggunakan Reaktor Pra-Hidrolisis (R-220) yang merupakan *pressure vessel* vertikal dilengkapi agitator dan *steam jacket*. Reaktor ini berfungsi mereaksikan *slurry* campuran TKKS, air, dan katalis H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3% pada kondisi operasi suhu 150-160°C dan tekanan 6-8 bar selama 45-60 menit dengan *liquid-to-solid* ratio 4-5:1. Pada kondisi ini, terjadi reaksi hidrolisis katalitik yang memecah struktur hemiselulosa (pentosan/xylan) dalam TKKS menjadi monomer xylose (pentosa) terlarut sebagai bahan baku tahap dehidrasi berikutnya, dengan target yield hidrolisis 75-85%. Agitasi pada kecepatan 30-50 rpm digunakan agar panas merata dan kontak antara katalis dengan biomassa berlangsung optimal. Analisis *troubleshooting* unit reaktor pra-hidrolisis disajikan pada Tabel 6.2 berikut.

**Tabel 6.3. Troubleshooting pada Unit Reaktor Pra-Hidrolisis (R-220)**

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
1	Reaktor Pra-Hidrolisis (R-220)	<p><i>Pressure vessel vertikal</i> + agitator + <i>steam jacket</i>; mereaksikan slurry TKKS + air + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3% pada suhu 150-160°C, tekanan 6-8 bar, waktu 45-60 menit, rasio <i>liquid-to-solid</i> 4-5:1; mengkonversi hemiselulosa menjadi xylose terlarut; target yield 75-85%</p>	<p><i>High Temperature</i> (Suhu Melebihi Rentang 150-160°C)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tekanan <i>steam</i> pada <i>jacket</i> terlalu tinggi</li> <li>- Kegagalan <i>Temperature Controller</i> (TC)</li> <li>- Dinding isolasi <i>jacket</i> tidak bekerja optimal</li> <li>- Waktu tinggal (<i>residence time</i>) melebihi 60 menit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reaksi dehidrasi xylose berlanjut menghasilkan furfural berlebih yang kemudian terdegradasi menjadi residu tar/humins</li> <li>- Yield xylose menurun di bawah 75%</li> <li>- Risiko <i>overpressure</i> pada <i>pressure vessel</i> (&gt;8 bar)</li> <li>- Kerusakan agitator akibat peningkatan viskositas <i>slurry</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang <i>Temperature Controller</i> (TC) dengan High Temperature Alarm pada rentang 150-160°C</li> <li>- Pasang <i>Pressure Controller</i> (PC) dan <i>Safety Relief Valve</i> (SRV) pada batas 8 bar</li> <li>- Lakukan <i>preventive maintenance</i> terjadwal pada <i>steam jacket</i> dan sensor suhu</li> <li>- Pasang alarm darurat untuk evakuasi operator apabila suhu &gt;165°C</li> </ul>

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
			<p><i>Low Temperature</i> (Suhu di Bawah 150°C)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aliran <i>steam</i> ke <i>jacket</i> berkurang atau tersumbat</li> <li>- Kebocoran pada <i>steam jacket (steam loss)</i></li> <li>- Suhu umpan <i>slurry</i> masuk terlalu rendah</li> <li>- Kegagalan sistem pemanas boiler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hidrolisis hemiselulosa (pentosan/xylan) tidak sempurna</li> <li>- Yield xylose turun di bawah target 75%, banyak oligosakarida yang belum terhidrolisis</li> <li>- Konsentrasi xylose dalam hidrolisat di bawah 4% (target 4-6%)</li> <li>- Waktu <i>batch</i> harus diperpanjang, kapasitas produksi berkurang</li> </ul>	<p><i>Pasang Temperature Controller (TC)</i> dan <i>Low Temperature Alarm</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Periksa integritas <i>steam jacket</i> dan pipa <i>steam</i> secara berkala</li> <li>- Pastikan isolasi termal pada <i>jacket</i> berfungsi baik</li> <li>- Lakukan pengecekan rutin pada boiler dan sistem distribusi <i>steam</i></li> </ul>

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
			<p><i>High Pressure</i> (Tekanan Melebihi 8 Bar)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Akumulasi gas CO2 hasil dekarboksilasi tidak tervent dengan baik</li> <li>- Suhu berlebih menyebabkan peningkatan tekanan uap air</li> <li>- Kegagalan sistem vent atau <i>pressure relief valve</i></li> <li>- Reaksi berjalan lebih cepat dari desain</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risiko ledakan atau deformasi <i>pressure vessel</i></li> <li>- Kemungkinan <i>backflow</i> ke pipa <i>feed slurry</i></li> <li>- Bahaya keselamatan operator di sekitar reaktor</li> </ul>	<p><i>Safeguard Pressure Controller (PC)</i> dan <i>Safety Relief Valve (SRV)</i> pada set point 8 bar</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang <i>Pressure Indicator (PI)</i> dan <i>High Pressure Alarm</i></li> <li>- Periksa sistem vent gas (CO2) secara berkala</li> <li>- Pasang <i>rupture disc</i> sebagai pengamanan lapis kedua</li> <li>- Pasang alarm darurat dan prosedur <i>emergency shutdown</i></li> </ul>
		<p><i>No Flow / Less Flow</i> (Umpan <i>Slurry</i> Tidak Masuk atau Kurang)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pompa <i>feed slurry</i> gagal atau kapasitas kurang</li> <li>- <i>Control valve</i> pada jalur <i>feed</i> gagal membuka</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tidak ada reaksi pra-hidrolisis berlangsung</li> <li>- <i>Liquid-to-solid ratio</i> di reaktor menyimpang dari 4-5:1, konversi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang <i>Flow Control (FC)</i> dan <i>Level Control (LC)</i> pada jalur <i>feed slurry</i></li> <li>- Pasang <i>Low Flow Alarm</i> pada jalur masuk reaktor</li> </ul>	

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
				<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pipa <i>feed</i> tersumbat oleh padatan TKKS</li> <li>- Rasio <i>liquid-to-solid</i> pada tangki pencampuran tidak sesuai (terlalu kental)</li> </ul>	<p>hemiselulosa turun</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Agitator bekerja tidak optimal karena <i>slurry</i> terlalu kental atau terlalu encer</li> <li>- Kapasitas produksi terganggu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sediakan pompa cadangan (<i>standby pump</i>) untuk <i>feed slurry</i></li> <li>- Pasang <i>filter/screen</i> pada jalur <i>feed</i> untuk mencegah penyumbatan padatan TKKS</li> <li>- Monitor rasio <i>liquid-to-solid</i> secara <i>real-time</i></li> </ul>
			<p>Kegagalan Agitasi (Agitator Berhenti atau Kecepatan di Bawah 30 rpm)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Motor agitator rusak atau daya terputus</li> <li>- <i>Shaft</i> agitator bengkok akibat beban padatan TKKS berlebih</li> <li>- <i>Slurry</i> terlalu kental (<i>rasio liquid-to-solid</i> rendah) sehingga membebani agitator</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distribusi panas tidak merata dalam reaktor (<i>hot spot</i>)</li> <li>- Kontak antara katalis H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dan biomassa TKKS tidak optimal</li> <li>- Yield hidrolisis turun signifikan dari target 75-85%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang kecepatan agitator <i>indicator</i> dan <i>alarm</i> (<i>set point</i> minimum 30 rpm)</li> <li>- Lakukan inspeksi berkala pada motor, <i>shaft</i>, <i>bearing</i>, dan <i>impeller</i> agitator</li> <li>- Pastikan rasio <i>liquid-to-solid</i> dijaga pada 4-5:1 agar beban agitator sesuai desain</li> <li>- Sediakan prosedur pembersihan reaktor (CIP) setelah setiap <i>batch</i> untuk</li> </ul>

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
				<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Bearing</i> agitator aus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pengendapan padatan TKKS di dasar reaktor (<i>settling</i>)</li> </ul>	<p>mencegah penumpukan endapan</p>
			<p>Konsentrasi H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Menyimpang dari 3%</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kesalahan pada sistem dosing H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ke tangki pencampuran</li> <li>- Sensor konsentrasi asam tidak terkalibrasi</li> <li>- Variasi kualitas/konsentrasi stok H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dari tangki T-01</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Konsentrasi H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> terlalu tinggi (&gt;3%): korosi pada material reaktor meningkat, reaksi degradasi xylose menjadi furfural berlangsung berlebihan sehingga terbentuk tar/humins</li> <li>- Konsentrasi H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> terlalu rendah (&lt;3%): hidrolisis hemiselulosa tidak sempurna,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang pH/konsentrasi <i>analyzer on-line</i> pada tangki pencampuran dan jalur <i>feed</i> reaktor</li> <li>- Kalibrasi sensor konsentrasi asam secara berkala</li> <li>- Lakukan pengecekan manual konsentrasi H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sebelum setiap <i>batch</i> dimulai</li> <li>- Pasang <i>interlock</i> yang mencegah <i>feed</i> masuk reaktor jika konsentrasi H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> di luar rentang 2.5-3.5%</li> </ul>

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
					yield xylose jauh di bawah 75%	

#### 6.4 Troubleshooting Pada Unit Pemisah

Unit pemisah pada pabrik furfural menggunakan *Extractive Dividing Wall Column Distillation (EDWC) Vacuum* (D-310), pressure vessel (kolom distilasi vakum) material SS 304 yang dioperasikan pada tekanan rendah (vakum) dengan tekanan desain 0,6 bar (8,7 psi), dilengkapi sambungan las dengan efisiensi 0,80 serta corrosion allowance 0,125 in.

Kolom memiliki jari-jari dalam 70,85 in dan tebal dinding 0,166 in, digunakan untuk proses pemisahan komponen berdasarkan perbedaan volatilitas pada kondisi operasi terkontrol.

**Tabel 6.4. Troubleshooting Pada Unit Pemisah**

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
1	Kolom Distilasi (D-310)	Memisahkan furfural dari campuran menggunakan <i>extractive distillation</i> dengan <i>dividing wall</i> pada kondisi vakum (~0,5	<i>High Pressure (Loss of Vacuum)</i>	- Kebocoran udara - <i>Vacuum pump/steam ejector</i> gagal - Kondensor tidak efektif - <i>Fouling</i> pada <i>heat exchanger</i>	- Titik didih naik - Degradasi furfural - Penurunan kemurnian produk	- Pasang <i>pressure indicator</i> (PI) & alarm - Sistem deteksi kebocoran - <i>Maintenance vacuum system</i> rutin - <i>Backup vacuum</i> unit

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
		bar), material SS 304				
			<i>Low Pressure (Excessive Vacuum)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Vacuum system</i> terlalu kuat</li> <li>- Kontrol tekanan tidak stabil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kolom mengalami stress mekanik</li> <li>- Potensi <i>implosion</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang <i>pressure control valve (PCV)</i></li> <li>- <i>Relief system</i> untuk vakum</li> </ul>
			<i>High Temperature (Overheating)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Reboiler duty</i> terlalu tinggi</li> <li>- Kontrol temperatur gagal</li> <li>- <i>Fouling</i> pada <i>tray/packing</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Degradasi <i>furfural</i></li> <li>- Produk <i>off-spec</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Temperature controller (TC)</i></li> <li>- <i>Monitoring</i> temperatur tiap <i>tray</i></li> </ul>
			<i>Low Temperature</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Reboiler</i> kurang panas</li> <li>- <i>Steam supply</i> rendah</li> <li>- <i>Heat loss</i> tinggi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pemisahan tidak optimal</li> <li>- Banyak impurities terbawa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kontrol steam otomatis</li> <li>- Insulasi kolom</li> </ul>
			<i>Flooding (Banjir kolom)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Laju alir cair terlalu tinggi</li> <li>- <i>Reflux</i> berlebih</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Pressure drop</i> tinggi</li> <li>- Efisiensi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Flow control feed &amp; reflux</i></li> <li>- Desain tray optimal</li> <li>- <i>Monitoring ΔP</i> kolom</li> </ul>

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
				- Tray/packing tersumbat	separasi turun drastis	
			<i>Weeping/Dumping</i>	- Laju uap terlalu rendah - Reboiler duty kecil	- Kontak fase tidak optimal - Efisiensi pemisahan turun	- Optimasi beban reboiler - Monitoring <i>vapor flow</i>

### 6.5 Troubleshooting Pada Unit Penukar Panas

Salah satu unit penukar panas pada pabrik furfural menggunakan *Heat Exchanger HE-01* berjenis *Shell & Tube 1-2 Exchanger (1 shell pass, 2 tube pass)* berbahan *Stainless Steel 316L*. Fungsinya adalah sebagai *preheater* yang memanaskan filtrat hidrolisat (*H2SO4*) dari suhu 50°C hingga 95°C menggunakan *bottom product R-02* sebagai fluida panas. *HE-01* memiliki 676 tubes dengan panjang 16 ft, *shell* ID 27 in, dan luas perpindahan panas aktual sebesar 2123.72 ft<sup>2</sup>. Analisis troubleshooting unit penukar panas disajikan pada Tabel 6.5 berikut.

Tabel 6.5. *Troubleshooting* pada Unit Penukar Panas (*HE-01*)

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
1	<i>Heat Exchanger (HE-01)</i>	<i>Preheater</i> asam sulfat dari 34°C → 90°C; tipe <i>Shell &amp; Tube</i>	<i>High Temperature (Overheating)</i>	- Laju alir air panas ( <i>bottom R-02</i> ) pada <i>shell side</i> terlalu tinggi	- Asam sulfat masuk reaktor pada suhu terlalu tinggi (>90°C)	- Pasang <i>Temperature Controller (TC)</i> dan <i>High Temperature Alarm</i> pada <i>outlet tube side</i>

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
		1-2, material <i>Stainless Steel</i> 316L; shell ID 27 in; 676 tubes, panjang 16 ft, <i>pitch triangular</i> 1 in		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kegagalan <i>Temperature Controller</i> (TC) pada sisi <i>tube</i></li> <li>- <i>Fouling</i> pada dinding <i>tube</i> menghambat transfer panas sehingga suhu sisi <i>shell</i> naik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reaksi di R-220 tidak terkendali, risiko ledakan</li> <li>- Kerusakan material <i>Stainless Steel</i> 316L akibat thermal stress</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang <i>Flow Control</i> (FC) pada jalur <i>shell side</i> (fluida panas)</li> <li>- Bersihkan <i>tube</i> dari <i>fouling</i> secara berkala (chemical/mechanical cleaning)</li> <li>- Pasang indikator suhu sebelum dan sesudah HE-01</li> </ul>
			<i>Low Temperature</i> (Suhu keluaran terlalu rendah)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Laju alir fluida panas (<i>shell side</i>) terlalu kecil</li> <li>- <i>Fouling</i> tebal mengurangi efisiensi perpindahan panas (koefisien UD turun)</li> <li>- Suhu masuk <i>bottom R-02</i> lebih rendah dari desain</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asam sulfat masuk reaktor di bawah suhu target 90°C</li> <li>- Reaksi hidrolisa berjalan lebih lambat, konversi furfural turun</li> <li>- Waktu <i>batch</i> bertambah, kapasitas produksi berkurang</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang <i>Temperature Indicator</i> (TI) pada <i>outlet tube side</i> dengan <i>Low Temperature Alarm</i></li> <li>- Monitor dan optimalkan laju alir <i>shell side</i> secara berkala</li> <li>- Jadwalkan pembersihan <i>tube bundle</i> secara rutin (sesuai <i>fouling factor</i> RD = 0.007845)</li> <li>- Evaluasi kondisi <i>bottom R-02</i> sebagai sumber panas</li> </ul>

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
			<p><i>Less Flow</i> (Aliran <i>tube side</i> berkurang)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Penyumbatan parsial pada <i>tube (scale, endapan)</i></li> <li>- <i>Valve inlet tube side</i> gagal membuka penuh</li> <li>- Pompa P-03 beroperasi di bawah kapasitas (0.0381 ft<sup>3</sup>/s)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Penurunan laju alir H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ke reaktor R-220</li> <li>- Waktu tinggal di dalam HE-01 lebih lama, risiko <i>overheating</i> lokal pada <i>tube</i></li> <li>- <i>Pressure drop tube side</i> meningkat melebihi batas desain (0.022 psi)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang <i>Flow Indicator</i> (FI) dan <i>Flow Controller</i> (FC) pada jalur <i>tube side</i></li> <li>- Periksa kondisi pompa P-03 dan bersihkan pipa secara berkala</li> <li>- Ukur <i>pressure drop tube side</i> secara periodik; jika &gt;0.022 psi, lakukan pembersihan <i>tube</i></li> <li>- Pasang <i>filter Y-strainer</i> sebelum masuk HE-01</li> </ul>
		<p><i>No Flow</i> (Tidak ada aliran)</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pompa P-03 berhenti total</li> <li>- <i>Valve inlet tube side</i> atau <i>shell side</i> tertutup penuh</li> <li>- Penyumbatan total pada salah satu sisi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tidak ada pemanasan asam sulfat, reaktor tidak dapat dioperasikan</li> <li>- <i>Overheating</i> lokal pada sisi <i>shell (dead leg)</i> berisiko merusak material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang <i>Flow Alarm (low flow)</i> pada kedua sisi HE-01</li> <li>- Pastikan pompa P-03 dalam kondisi operasional dengan pengecekan rutin</li> <li>- Pasang <i>bypass line</i> pada HE-01 untuk kondisi darurat</li> </ul>

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
						<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lakukan inspeksi <i>valve inlet/outlet</i> sebelum setiap siklus operasi</li> </ul>
			<p><i>Reverse Flow</i> (Aliran terbalik)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kegagalan <i>valve check</i> pada jalur <i>tube side</i></li> <li>- Tekanan di sisi <i>outlet</i> lebih tinggi dari <i>inlet</i> akibat penyumbatan <i>downstream</i></li> <li>- Pompa P-03 berhenti mendadak (<i>pressure surge</i>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asam sulfat mengalir balik ke tangki T-01</li> <li>- Kontaminasi silang antar fluida proses</li> <li>- Produk tidak sesuai spesifikasi yang direncanakan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasang <i>check valve (non-return valve)</i> pada jalur <i>outlet tube side</i></li> <li>- Pasang indikator suhu sebelum dan sesudah operasi HE-01</li> <li>- Pasang alat ukur aliran (<i>flow meter</i>) untuk mendeteksi <i>reverse flow</i></li> <li>- Monitor <i>pressure differential</i> (<math>\Delta P</math>) secara <i>real-time</i></li> </ul>
		<p><i>Fouling &amp; Penurunan Efisiensi Perpindahan Panas</i></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pengendapan <i>scale</i> (kerak mineral) pada permukaan <i>tube</i></li> <li>- Asam sulfat bersifat korosif menyebabkan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Koefisien <i>overall UD</i> menurun dari desain 94.43 BTU/hr.ft<sup>2</sup>.°F</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jadwalkan pembersihan kimia/mekanis <i>tube bundle</i> secara periodik</li> <li>- Monitor <i>fouling factor</i> (RD) dan bandingkan dengan nilai desain 0.007845</li> </ul>

No.	Komponen	Deskripsi	Deviasi	Penyebab	Konsekuensi	Safeguard & Rekomendasi
				<p>korosi lokal di <i>tube Stainless Steel 316L</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Fouling factor</i> RD aktual melampaui batas desain 0.003</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suhu keluaran <i>tube side</i> tidak mencapai 90°C</li> <li>- Peningkatan <i>pressure drop</i> pada kedua sisi (<i>shell</i>: &gt;0.392 psi; <i>tube</i>: &gt;0.022 psi)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gunakan material <i>Stainless Steel 316L</i> (tahan asam) sesuai spesifikasi desain</li> <li>- Pasang sistem monitoring performa (<math>\Delta T</math> dan <math>\Delta P</math>) secara berkelanjutan</li> </ul>