

# PERANCANGAN DAN VALIDASI *HORIZONTAL WATER TUBE BOILER* INDUSTRI KECIL TAHU MENGGUNAKAN *SOFTWARE SOLIDWORKS*

---

Muhammad Shofiudin<sup>1</sup>, Dony Hidayat Al-Janani<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang  
Email: shofiudin5212414009@gmail.com

**Abstrak.** Potensi penggunaan boiler untuk industri kecil tahu dinilai baik. Kecelakaan kerja yang diakibatkan boiler juga ditemukan di beberapa wilayah dikarenakan tanpa dilakukan proses perancangan pembuatan boiler. Perancangan bertujuan untuk menghasilkan rancangan water tube boiler industri kecil tahu yang memiliki standar kualitas keamanan. Metode yang digunakan diawali dengan observasi pada industri kecil tahu, melakukan proses perancangan perpindahan panas dan konstruksi sesuai ASME section IV dengan safety factor 3,5, proses Desain 3D dan 2D, serta melakukan validasi perancangan. Validasi perancangan berupa perbandingan performa boiler hasil rancangan dengan kondisi nyata hasil observasi dan analisis statis menggunakan metode elemen hingga dengan software SOLIDWORKS untuk mengetahui kelayakan rancangan. Hasil yang didapat berupa rancangan hitung, desain boiler 3D dan 2D. Validasi 1 yang menunjukkan bahwa rancangan water tube boiler lebih baik dari kondisi nyata hasil observasi dengan indikator lebih hemat bahan bakar 53,947%, waktu pemanasan awal lebih cepat 28,153%, dan waktu memasak lebih cepat 72,993%. Validasi 2 menunjukkan boiler memiliki standar kualitas keamanan dengan safety factor 1,116.

**Kata Kunci :** Perancangan; Boiler; Validasi.

**Abstract.** The Potency in using boiler applied in small tofu industry is rated good. Work accidents caused by boiler are also found in some areas caused without doing the boiler design process. The design aims to produce a small industrial water tube boiler design that has safety quality standards. The method that used began by observation in small tofu industry, process designing heat transfer and construction according to ASME section IV with a safety factor of 3.5, 3D and 2D design processes, as well as conducting design validation. The design validation was comparison of boiler performance of design results with the real condition of observation and static analysis used element methods with SOLIDWORKS software to know the feasibility of design. The results showed that the calculate design, 3D and 2D boiler design. First validation water tube boiler was better than the real condition of observation result with the indicators that more fuel efficient 53.947%, with preheating time was faster of 28.153%, and the cooking

time was faster of 72.993%. The second validation showed that the boiler had safety quality standards with a safety factor of 1.116.

**Keywords :** Design; Boiler; Validation.

## PENDAHULUAN

Potensi penggunaan boiler untuk industri kecil tahu dinilai baik, ditunjukkan Tabel 1.

**Tabel 1. Potensi penggunaan boiler pada industri kecil tahu (Sudarman, et al, 2015: 76).**

Indikator	Belum menggunakan boiler	Sudah menggunakan boiler	Keterangan
Volume panci	4 x 100 liter = 400 liter	2 x 300 liter = 600 liter	Boiler 50% lebih banyak dibanding belum menggunakan boiler
Waktu memasak	60 menit	30 menit	Boiler 50% lebih cepat dibanding belum menggunakan boiler
Jeda waktu pemasakan	60 menit	20 menit	Boiler 66% lebih cepat dibanding belum menggunakan boiler
Jumlah bahan bakar	1m <sup>3</sup>	2/3 m <sup>3</sup>	Boiler 33% lebih hemat dibanding belum menggunakan boiler
Kualitas tahu	Bau asap	Bebas bau asap	Boiler memiliki kualitas tahu lebih baik

Menyadari hal tersebut banyak pemilik industri kecil tahu membuat sendiri boilernya tanpa melalui tahap perancangan sehingga menimbulkan kecelakaan kerja, ditunjukkan tabel 2. Hasil observasi juga ditemukan boiler dengan performa buruk (banyak uap terbuang).

**Tabel 2. Daftar Kecelakaan Kerja Industri Kecil Tahu karena Ledakan Boiler di Indonesia (Fatonni, 2013: 1).**

Lokasi	Waktu	Korban (jiwa)
Wonosegoro, Boyolali	Mei 2005	3
Taman, Sidoarjo	Januari 2005	2
Denpasar, Bali	Juni 2004	1
Seyegan, Kulonprogo	2003	-
Gamping, Sleman	1986	1

Perancangan *water tube boiler* pernah dilakukan Soedjono, *et al.* (2015) dengan metode mengambil data awal berupa jumlah aliran massa uap dan air; temperatur uap, air, dan pempa-

karan; dan tekanan uap. Dari data tersebut dilakukan perancangan hitung secara manual. Hasil yang didapat adalah *boiler* dengan diameter 50 cm dan tinggi 87 cm. Pipa yang digunakan *carbon steel boiler tube* ASME SA-178 GRADE A/SA-214 dengan diameter luar 0,0381 m dan diameter dalam 0,035687 m dengan total panjang pipa 17,02 m sebanyak 25 laluan dengan kemiringan 15°.

Menguji kevalidan sebuah rancangan dengan bantuan *software* pernah dilakukan Santra dan Kumar (2016) dengan menguji hasil rancangan *steam pressure vessel* berbentuk kotak dan silinder dengan ketebalan 4 mm. *Steam pressure vessel* bekerja pada temperatur 398 K dan beban 241 MPa. Pengujian menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software SOLIDWORKS*. Hasil analisis dengan melihat distribusi tegangan von mises, bentuk yang lebih efektif adalah silinder.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang *boiler* tipe *water tube boiler* yang memenuhi kebutuhan industri kecil tahu dan memiliki kualitas keamanan. Perancangan megacu standar ASME *section IV* dan melakukan validasi perancangan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software SOLIDWORKS*. Hasil penelitian diharapkan dapat digunakan pada industri kecil tahu dengan kapasitas produksi yang sama ataupun berbeda. Penelitian ini tidak hanya melakukan perancangan, atau analisis statis saja, perancangan ini menyesuaikan kebutuhan industri kecil tahu sebagai mitra, dilakukan rancangan perpindahan panas dan konstruksi sesuai ASME *section IV*, dan dilakukan validasi rancangan berupa perbandingan performa rancangan dengan realita kondisi industri mitra serta analisis statis untuk mengetahui kualitas keamanan desain.

## METODE

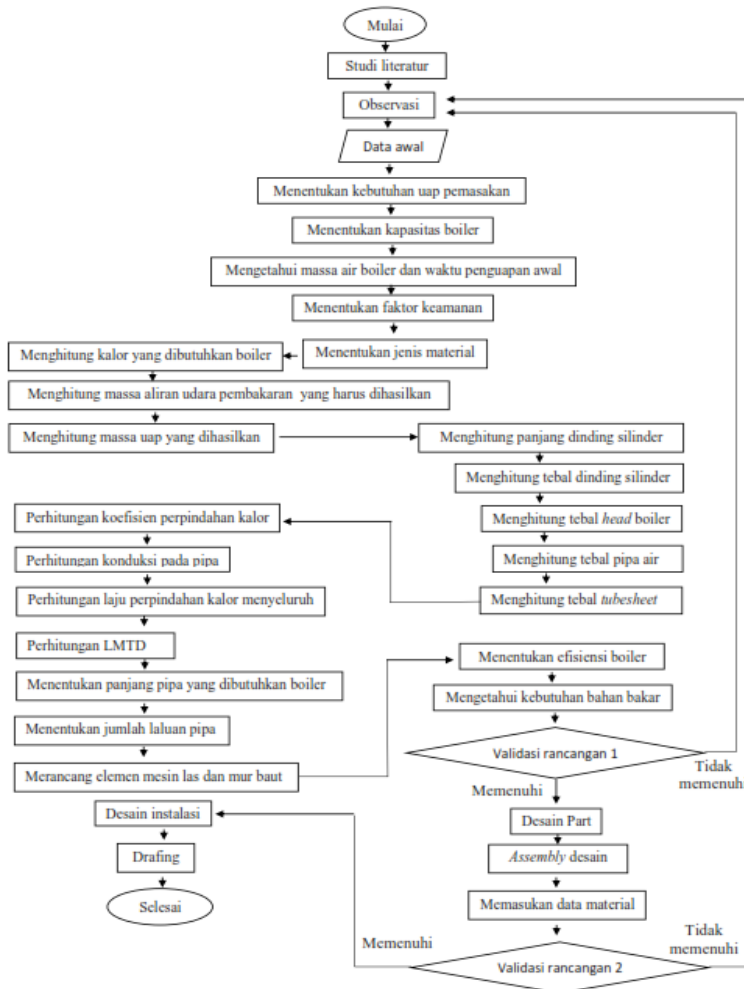
Tahapan Penelitian yang memuat perancangan dan validasi mengikuti diagram alir yang ditunjukkan gambar 1. Observasi telah dilakukan sebelum melakukan perancangan pada dua industri kecil tahu di Gunungpati dan Bandungan, Semarang. Observasi didapat data awal pada tabel 3.

**Tabel 3. Data Awal Perancangan**

Parameter	Keterangan
Temperatur air ( $T_{c_{in}}$ )	303 K
Temperatur uap ( $T_{c_{out}}$ )	393 K
Tekanan operasi ( $P_{uap}$ )	0,15 MPa
Temperatur pembakaran ( $T_{h_{in}}$ )	783 K
Temperatur gas buang ( $T_{h_{out}}$ )	418 K
Waktu memasak	30 menit
Kapasitas produksi	180kg

Perancangan dilakukan dengan mempertimbangkan kebutuhan industri kecil tahu dengan target boiler menggunakan material yang mempunyai permukaan tidak bereaksi, tidak berpori,

dan tahan karat atau *stainless steel* (Hariyadi, 2016: 44). serta memiliki kualitas keamanan dengan angka keamanan minimal untuk boiler = 3,5 (Rutheravan, 2016:1) . Perancangan konstruksi mengacu pada ASME (2004).



**Gambar 1. Diagram Alir Penelitian**

Validasi perancangan 1 menguji boiler harus memiliki waktu pemasakan yang lebih baik dari pada tungku konvensional dan bahan bakar yang dibutuhkan boiler harus lebih sedikit dari tungku konvensional dengan kapasitas produksi yang sama. Validasi Perancangan 2 adalah analisis statis menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software SOLIDWORKS*. Objek pengujian berupa desain 3D boiler pada part yang berpotensi mengalami kegagalan. Potensi kegagalan terjadi pada pipa air dan dinding silinder.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Hasil Perancangan

Boiler pipa air dipilih karena memiliki efisiensi kerja yang lebih tinggi dibanding boiler pipa api (85-90%) serta memiliki kebutuhan inspeksi yang lebih sedikit (Singh, 2009: 441). Material yang digunakan adalah *stainless steel* 18Cr-8Ni tipe 304 dengan spesifikasi pada Tabel 4 karakteristik material ditunjukkan pada Tabel 5 berikut ini

Tabel 4. Spesifikasi material (Halley dan Nordstrom, 2008: 32)

No	Part	Nomor Spesifikasi/ Grade/Bentuk	Nominal Composition
1	Dinding silinder, Cerobong asap, <i>Mounting</i> Cerobong Asap Samping, Pemeliharaan Bagian Samping	SA-213/ TP 304/ Tube	Smls. 18Cr-8Ni
2	<i>Head boiler; tube sheet, flat heads, Tube sheet, Mounting</i> Ceerobong Asap Atas, Pemeliharaan bagian atas, tutup pemeliharaan	SA-240/ 304/ Plate	18Cr-8Ni
3	Pipa air, nosel, dan penghubung	SA 312/ TP 304/ Pipe	Smls. 18Cr-8Ni
4	Mur dan Baut	SA-182/ F304/ Forgings	18Cr-8Ni

Tabel 5. Karakteristik Material *Stainless steel* 304

Parameter	Nilai	Sumber
<i>Tensile Strength Tube</i>	515 Mpa	(ASME, 2010: 492)
<i>Yield Strength</i>	205 Mpa	(ASME, 2010: 609)
<i>Thermal Expansion</i>	$2,4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$	(ASME, 2010: 714)
<i>Modulus Young</i>	$65 \times 10^3 \text{ Mpa}$	(ASME, 2010: 740)
<i>Density</i>	$8030 \text{ kg/m}^3$	(ASME, 2010: 744)
<i>Poisson's Ratio</i>	0,31	(ASME, 2010: 744)

1. Perancangan menyesuaikan metode produksi industri kecil tahu (observasi) dengan perbandingan air: kedelai = 1:2, uap yang dibutuhkan untuk sekali masak,

$$m \times c_{\text{air}} \times \Delta t_{\text{air}} = m_{\text{uap masak}} \times c_{\text{uap}} \times \Delta t_{\text{uap}}$$

$$60 \text{ kg} \times 4200 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times 45^\circ\text{C} = m_{\text{uap masak}} \times 2100 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times 45^\circ\text{C}$$

$$m_{\text{uap masak}} \times 2100 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times 45^\circ\text{C}$$

$$m_{\text{uap masak}} = 120 \text{ kg}$$

2. Proses pemasakan direncanakan berlangsung 0,5 jam, kapasitas boiler sebesar,

$$\dot{m} = \frac{m_{\text{uap}}}{t} = \frac{120 \text{ kg}}{0,5 \text{ jam}}$$

$$\dot{m} = 240 \text{ kg/jam}$$

3. Mengetahui uap yang terbentuk pada waktu 30 menit pemanasan awal, dan berapa air umpan yang harus tersedia,

$$\dot{m} \times \Delta t \times t_{\text{masak}} = m_{\text{air}} \times c_{\text{air}} \times \Delta t$$

$$240 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} \times 2580,26 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 0,5 \text{ jam} = m_{\text{air}} \times 4200 \frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \times 90 ^\circ\text{C}$$

$$m_{\text{air}} = 819,13 \text{ kg} = 819,13 \text{ L}$$

4. Menghitung massa uap yang dihasilkan

$$Q_{\text{air-uap}} = m_{\text{air}} \times c_{\text{air}} \times \Delta t = 819,13 \text{ kg} \times 4200 \text{ J/kg } ^\circ\text{C} \times 90 ^\circ\text{C} = 309.631.200 \text{ J}$$

$$Q_{\text{air-uap}} = m_{\text{uap}} \times u$$

$$309.631.200 \text{ J} = m_{\text{uap}} \times 2,26 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

$$m_{\text{uap}} = 137,005 \text{ kg}$$

5. Perencanaan perpindahan panas mengacu pada Soedjono, *et al*, (2015)

- Menghitung kalor yang dibutuhkan boiler, data enthalpy dari Cengel dan Boles (2006: 916).

$$Q_{\text{boiler}} = \dot{m} (h_{\text{out boiler}} - h_{\text{in boiler}})$$

$$Q_{\text{boiler}} = 0,067 \text{ kg/s} (2706 \text{ kJ/kg} - 125,74 \text{ kJ/kg})$$

$$= 172,877 \text{ kJ/s}$$

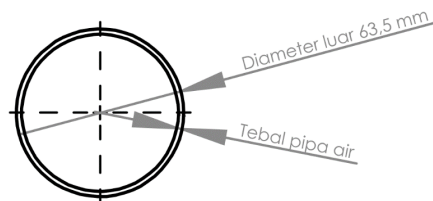
- Menghitung aliran udara pembakaran yang harus dihasilkan, data kapasitas kalor dari Cengel dan Boles (2006: 912).

$$\dot{m}_{\text{fluegas}} = \frac{Q_{\text{fluegas}}}{C_p \times \Delta T_{\text{fluegas}}}$$

$$\dot{m}_{\text{fluegas}} = \frac{172,877 \text{ kJ/s}}{1,101 \text{ kJ/kg} \times (783\text{K} - 418\text{K})}$$

$$\dot{m}_{\text{fluegas}} = 0,43 \text{ kg/s}$$

- Menentukan tebal pipa air



Gambar 2. Ilustrasi Perhitungan Tebal Pipa Air

Perhitungan tebal pipa air mengacu tahapan penentuan tebal pipa boiler ASME section 4 (ASME, 2004: 10)

$$\frac{L}{D_o} = \frac{1.500}{63,5} = 23,622$$

Mengasumsikan  $\frac{D_o}{t_{\text{pipa air}}}$  dengan mengacu pada faktor A dan B *thickness pipe variabel* (ASME, 2010: 791-793), selanjutnya trial and error untuk menentukan tekanan yang dapat diterima pipa harus melebihi tekanan perancangan,

$$P_{\text{pipa}} = \frac{B}{D_o} P_{\text{pipa}} = \frac{B}{D_o} > P_{\text{perancangan}} P_{\text{perancangan}}$$

$$\frac{D_o}{t_{\text{pipa air}}} = 40 \frac{D_o}{t_{\text{pipa air}}} = 40$$

$$\bullet 16,925 \times 10^5 Pa > 5,25 \times 10^5 Pa$$

$$16,925 \times 10^5 Pa > 5,25 \times 10^5 Pa \text{ (dapat digunakan)}$$

$$\frac{D_o}{t_{\text{pipa air}}} = 50 \frac{D_o}{t_{\text{pipa air}}} = 50$$

$$\bullet 8,9 \times 10^5 Pa > 5,25 \times 10^5 Pa \quad 8,9 \times 10^5 Pa > 5,25 \times 10^5 Pa \text{ (sesuai kebutuhan)}$$

$$\frac{D_o}{t_{\text{pipa air}}} = 60 \frac{D_o}{t_{\text{pipa air}}} = 60$$

$$\bullet 5,18 \times 10^5 Pa > 5,25 \times 10^5 Pa \quad 5,18 \times 10^5 Pa > 5,25 \times 10^5 Pa \text{ (tidak dapat digunakan)}$$

$$\frac{D_o}{t_{\text{pipa air}}} = 50$$

$$t_{\text{pipa air}} = \frac{63,5 \text{ mm}}{50} = 1,27 \text{ mm}$$

Tebal minimal pipa air 1,27 mm, perancang menentukan tebal pipa 2 mm karena tersedia di pasaran dan memudahkan proses produksi.

- Air mengalir di dalam pipa (data viskositas dari Incropera, et.al., 2007: 949)

$$Re_{D_{in}} = \frac{4 \times \dot{m}_{\text{air}}}{\pi \times D_i \times \mu_{\text{air}}} = 1.801,523$$

*Internal convection flow*, laminar, T= konstan, sehingga

$$Nu_D Nu_D = 3,66$$

$$hi = Nu_D \frac{K_{\text{air}}}{D_i}$$

$$hi = 3,66 \frac{617 \times 10^{-8} W/mK}{59,5 \times 10^{-3} m} \quad hi = 3,66 \frac{617 \times 10^{-8} W/mK}{59,5 \times 10^{-3} m}$$

$$hi = 37,953 \frac{W}{m^2K} \quad hi = 37,953 \frac{W}{m^2K}$$

- Gas pembakaran di luar pipa (data viskositas dari Incropera, et.al., 2007: 941)

$$Re_{D_{out}} = \frac{4 \times \dot{m}_{fluegas}}{\pi \times D_o \times \mu_{udara}} Re_{D_{out}} = \frac{4 \times \dot{m}_{fluegas}}{\pi \times D_o \times \mu_{udara}} = 236.598,48236.598,48$$

Tabel 6. Karakteristik Bilangan Reynold

$Re_D$	C	M
0,4 – 4		0,330
4 – 40		0,385
40 – 4.000		0,466
4.000 – 40.000		0,618
40.000 –		0,805
400.000		

eksternal convection flow, turbulen, sehingga

$$Nu_D = C \times Re_D^m \times Pr^{1/3} \quad Nu_D = C \times Re_D^m \times Pr^{1/3} = 509,707$$

$$h_o = Nu_D \frac{K_{air}}{D_o}$$

$$h_o = 509,707 \frac{56,5 \times 10^{-3} W/mK}{63,5 \times 10^{-3} m}$$

$$h_o = 453,519 h_o = 453,519 \frac{W}{m^2 K m^2 K}$$

- Konduksi pada pipa (data konduktifitas thermal material dari Incropera, et.al., 2007: 931)

$$K = \frac{r_2}{r_1} \ln \frac{r_2}{r_1} K = \frac{r_2}{r_1} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$K = 9,2 \times 10^{-5} \frac{W}{m^2 K}$$

- Laju perpindahan kalor menyeluruh

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + K + \frac{r_2}{r_1} \times \frac{1}{h_i}}$$

$$U = 29,274 \frac{W}{m^2 K}$$

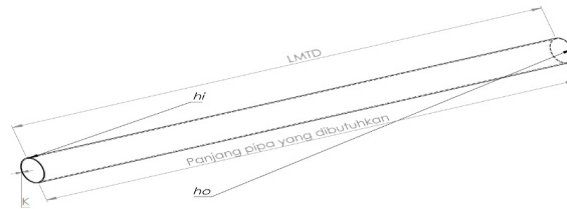
- LMTD

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left[ \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right]}$$

$$LMTD = 225,225^\circ C$$



- Panjang pipa yang dibutuhkan



**Gambar 3. Panjang Pipa yang Dibutuhkan**

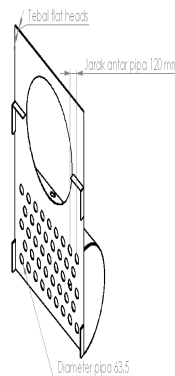
$$L = \frac{Q_{fluegas}}{U \times \pi \times D_i \times LMTD}$$

$$L = 63,443 \text{ m}$$

- Banyak laluan pipa

$$\text{Banyak laluan pipa} = \frac{LL}{pp} = \frac{63,443 \text{ m}}{1,5 \text{ m}} = 43 \text{ pipa}$$

## 6. Menghitung ketebalan *tube sheet*



**Gambar 4. Ilustrasi Perhitungan Tebal *Tube Sheet***

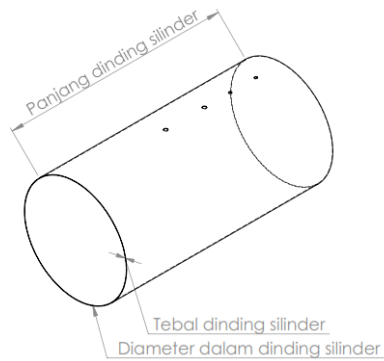
$$t_{tubesheets} = \sqrt{\left(\frac{P}{C \times S}\right) \times \left(p^2 - \frac{\pi \times D_o^2}{4}\right)}$$

$$t_{tubesheets} = \sqrt{\left(\frac{5,25 \times 10^5 \text{ Pa}}{2,7 \times 10^3 \times 10^6 \text{ Pa}}\right) \times \sqrt{\left(120\text{mm}^2 - \frac{3,14 \times 63,5\text{mm}^2}{4}\right)}}$$

$$t_{tubesheets} = 4,74\text{mm}$$

Ketebalan *tube sheet* minimal 4,74 mm, perancang menentukan ketebalan 5 mm.

## 7. Perancangan Dinding Silinder



Gambar 5. Ilustrasi Perhitungan Tebal Dinding Silinder

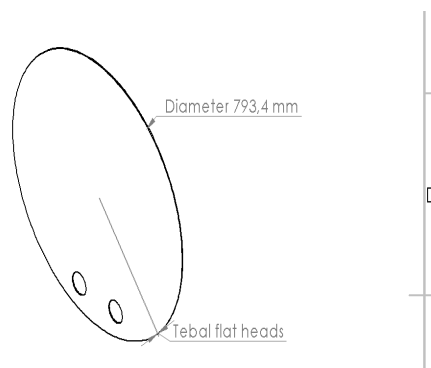
$$t_{shell} = \frac{P \times R_{i\ shell}}{S \times E - 0,6 \times P}$$

$$t_{shell} = \frac{5,25 \times 10^5 Pa \times 393,7 mm}{103 \times 10^6 Pa \times 0,85 - 0,6 \times 5,25 \times 10^5 Pa}$$

$$t_{shell} = 2,449 mm$$

Ketebalan dinding silinder minimal 2,449 mm, perancang menentukan ketebalan 3 mm.

### 8. Perancangan *Flat Heads*



Gambar 5. Ilustrasi Perancangan Tebal Flat Heads

$$t_{flat\ heads} = \frac{PD}{2SE - 0,2P}$$

$$t_{flat\ heads} = \frac{5,25 \times 10^5 Pa \times 793,4 mm}{2 \times 103 \times 10^6 Pa \times 0,85 - 0,2 \times 5,25 \times 10^5 Pa}$$

$$t_{flat\ heads} = 2,38 mm$$

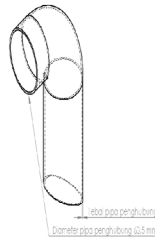
Ketebalan flat heads minimal 2,38 mm, perancang menentukan ketebalan 3 mm.

## 9. Perancangan pipa penghubung dinding silinder dan *tube sheet*

$$t_{\text{pipa ts-ds}} = \frac{P \times R_{\text{nosel}}}{SE - 0,6P} + 1$$

$$t_{\text{pipa ts-ds}} = \frac{5,25 \times 10^5 \text{ Pa} \times 31,75 \text{ mm}}{103 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0,85 - 0,6 \times 5,25 \times 10^5 \text{ Pa}} + 1$$

$$t_{\text{ts-ds}} = 1,191 \text{ mm}$$



Gambar 6. Ilustrasi Perancangan Pipa ds-ts

## 10. Perancangan pipa nosel

Pipa nosel terdapat 3 ukuran 1 inchi, 2 inchi, dan ¾ inchi. Perhitungan sama dengan formula,

$$t_{\text{pipa nosel}} = \frac{P \times R_{\text{nosel}}}{SE - 0,6P} + 1 \quad t_{\text{pipa nosel}} = \frac{P \times R_{\text{nosel}}}{SE - 0,6P} + 1 \text{ mm}$$

$$t_{\text{pipa nosel}} = \frac{5,25 \times 10^5 \text{ Pa} \times 12,7 \text{ mm}}{103 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0,85 - 0,6 \times 5,25 \times 10^5 \text{ Pa}} + 1$$

$$t_{\text{pipa nosel}} = \frac{5,25 \times 10^5 \text{ Pa} \times 12,7 \text{ mm}}{103 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0,85 - 0,6 \times 5,25 \times 10^5 \text{ Pa}} + 1 \text{ mm}$$

$$t_{\text{pipa nosel}} = 1,076 \text{ mm}$$

Nilai ketebalan dibawah 1,5 mm, menurut ASME 2014 section IV penulis dapat menentukan sendiri ketebalan dengan minimum tebal 1,5mm. Tabel 7 menunjukkan kegunaan dan ketebalan pipa nosel.

Tabel 7. Kegunaan dan Tebal Pipa Nosel

Ukuran	Kegunaan	Tebal
2 Inch	Water level gauge dan feed water valve	2 mm
1 Inch	Main steam valve dan safety valve	2 mm
¾ Inch	Pressure gauge, thermometer	2 mm

## 11. Perancangan elemen mesin las

Las butt joint

Pengelasan butt joint memiliki tebal leher sesuai tabel 8.

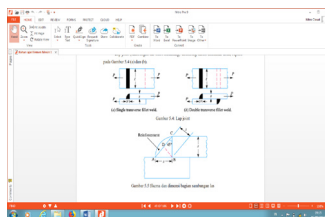
**Tabel 8. Minimum Ketebalan las butt joint (kriswanto dan Widayat, 2015: 52)**

Ketebalan Plat (mm)	3-5	6-8	10-16	18-24	26-55	≥ 58
Ukuran las minimum (mm)	3	5	6	10	14	20

Las butt joint digunakan pada dinding silinder dengan kedua flat heads. Dinding silinder dan flat heads mempunyai ketebalan 3mm. Sehingga ukuran las minimal 3mm.

- Las lap joint

Pengelasan lap joint memiliki skema gambar 8.



**Gambar 8. Skema Pengelasan Lap Joint**

$$t t = \text{Tebal leher (BD)} = s \times \sin 45^\circ = 0,707 \times s \times \sin 45^\circ = 0,707 \times s$$

$$s s = \text{Ukuran las} = \text{Tebal plat}$$

$$l l = \text{Panjang las}$$

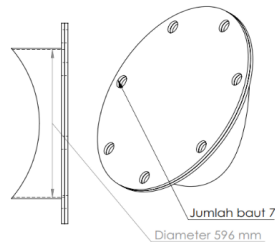
Hasil pengelasan ditunjukkan pada tabel 9.

**Tabel 9. Hasil Pengelasan Lap Joint**

Part 1	Part 2	Tebal leher
Tube sheet depan	Tube sheet samping	3,535 mm
Tube sheet samping	Tube sheet belakang	3,535 mm
Casing atas	Tube sheet depan	4,858 mm
Casing atas	Dinding silinder	2,121 mm
Casing atas	Mounting cerobong asap samping	2,121 mm
Tube sheet depan	Dinding silinder	4,858 mm
Tube sheet depan	Pipa air	7,405 mm
Pipa nosel	Dinding silinder	1,202 mm
Pipa nosel	Tube sheet samping	7,405 mm
Pipa penghubung	Dinding silinder	2,704 mm
Pipa penghubung	Tube sheet belakang	1,185 mm
Maintenance samping	Tube sheet belakang	3,535 mm
Mounting cerobong asap samping	Mounting cerobong asap atas	4,848 mm
Cerobong asap	Mounting Cerobong asap atas	4,848 mm
Maintenance samping	Maintenance atas	5,417 mm
Tube sheet depan	Tube sheet belakang	3,535 mm
Mounting water level	Pipa nosel 2 inci	1,077 mm

## 12. Perancangan elemen mesin mur dan baut (Dahlan, 2012: 84).

- Mur dan baut untuk maintenance boiler



Gambar 9. Maintenance Boiler

$$P_{\epsilon} = P_{baut}$$

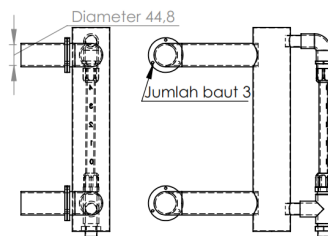
$$\frac{3,14}{4} \times (590\text{mm})^2 \times 5,25 \times 10^5 \text{Pa} = \frac{3,14}{4} \times (0,84d)^2 \times 103 \times 10^6 \text{Pa} \times 7$$

$$\frac{146.393.394.000146.393.394.000}{399.359.016 \text{ Pa} \times (d)^2} = \frac{mm^2 \text{ Pa} mm^2 \text{ Pa}}{399.359.016 \text{ Pa} \times (d)^2}$$

$$d = 17,347 \text{ mm}$$

Major diameter minimal 50,145, perancang menggunakan M18.

- Mur dan baut untuk cerobong asap



Gambar 10. Water Level

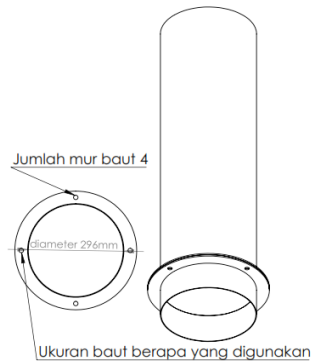
$$P_{\epsilon} = P_{baut}$$

$$\frac{3,14}{4} \times (44,8\text{mm})^2 \times 5,25 \times 10^5 \text{Pa} = \frac{3,14}{4} \times (44,8\text{mm})^2 \times 5,25 \times 10^5 \text{Pa}$$

$$d = 2,198 \text{ mm}$$

Major diameter minimal 2,198, perancang menggunakan M5.

- Mur dan baut untuk water level



Gambar 10. Cerobong Asap

$$P_e = P_{baut}$$

$$\frac{3,14}{4} \times (296\text{mm})^2 \times 5,25 \times 10^5 \text{ Pa} = \frac{3,14}{4} \times (0,84d)^2 \times 103 \times 10^6 \text{ Pa} \times 4$$

$$\frac{3,14}{4} \times (0,84d)^2 \times 103 \times 10^6 \text{ Pa} \times 4$$

$$d = 12,579 \text{ mm}$$

Major diameter minimal 12,579, perancang menggunakan M14.

### 13. Kebutuhan bahan bakar

Bahan bakar yang digunakan adalah kayu bakar dengan nilai HHV 20,589 MJ/kg (Boundy, et al, 2011). Boiler diasumsikan memiliki efisiensi minimal 85%.

$$m_{\text{bahan bakar}} = \frac{\dot{m}(h_{\text{out}} - h_{\text{in}})}{\eta_{\text{boiler}} \times \text{HHV}}$$

$$m_{\text{bahan bakar}} = \frac{240 \text{ kg/jam} (2706 \text{ kJ/kg} - 125,74 \text{ kJ/kg})}{0,85 \times 20.589 \text{ kJ/kg}}$$

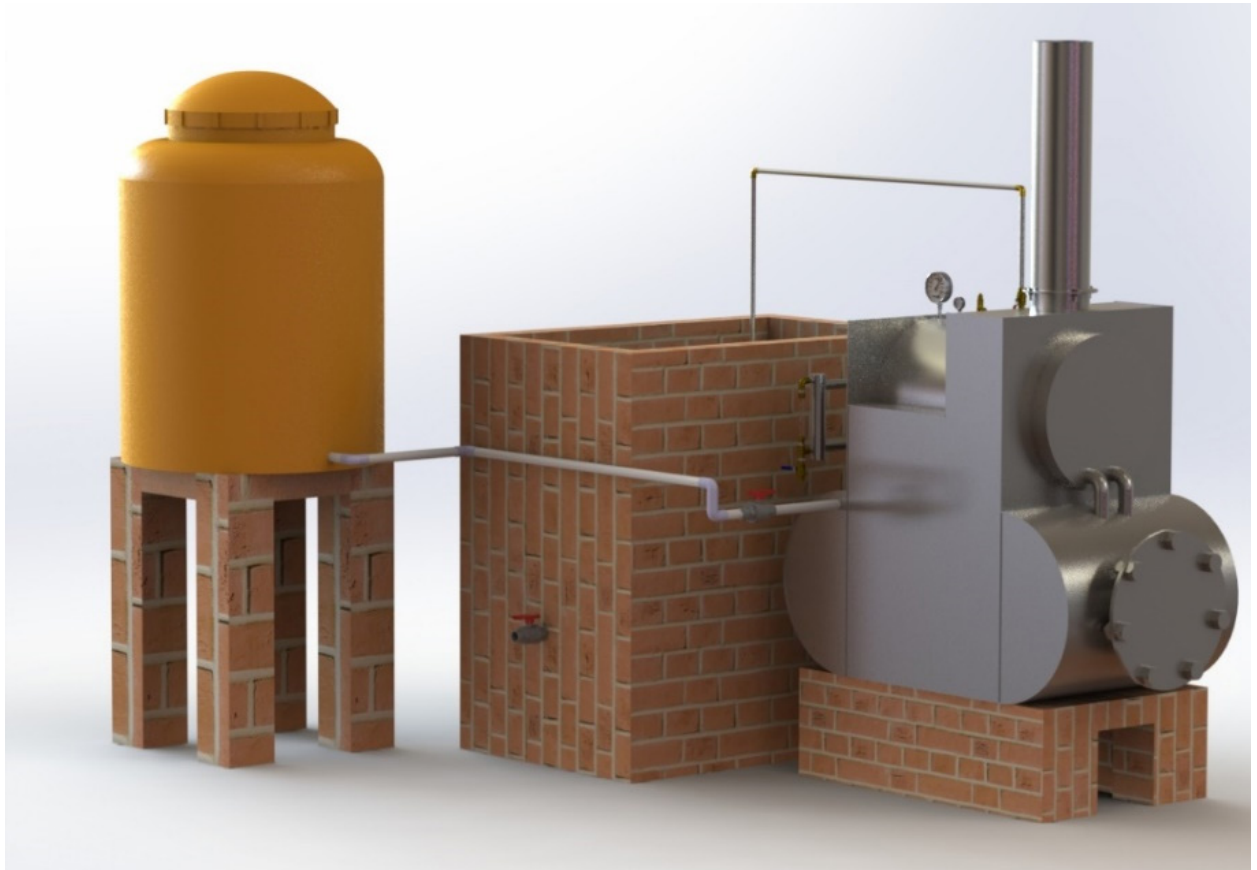
$$m_{\text{bahan bakar}} = 35,385 \text{ kg/jam}$$

### 14. Instalasi Boiler

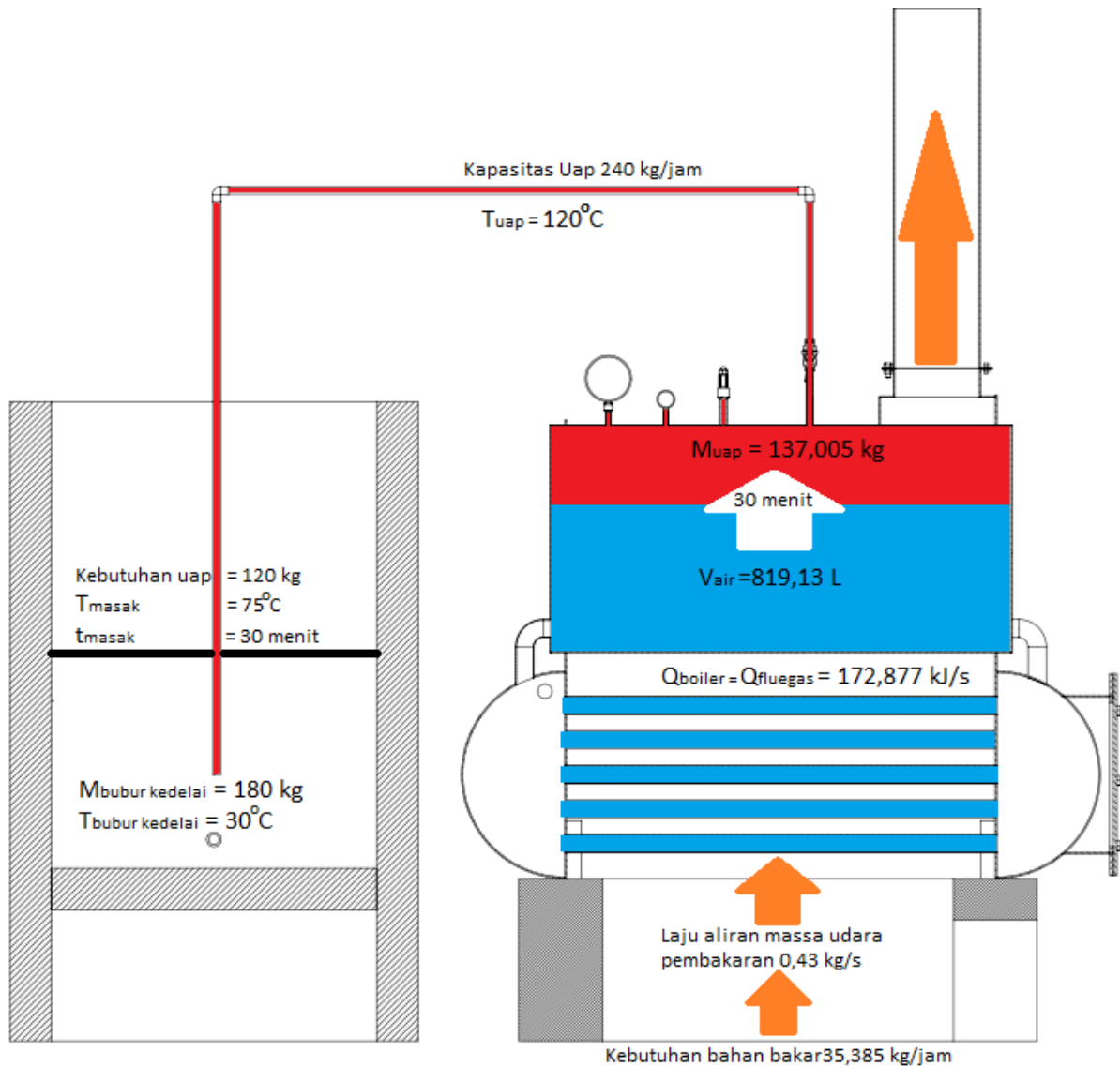
Instalasi boiler terdiri dari tungku, tempat masak, alat ukur (*manometer, thermometer, pressure gauge*), *safety valve*, jalur uap- air, dan tempat penampungan air



Gambar 12. Desain 3D Boiler



**Gambar 13. Desain Instalasi Boiler**



**Gambar 14. Prinsip Kerja Boiler**

### Validasi Rancangan

Validasi rancangan 1 membandingkan rancangan boiler dengan metode pemasakan konvensional di industri kecil tahu hasil observasi di Gunungpati, Semarang. Data awal ditunjukkan tabel 10, dan hasil perbandingan ditunjukkan tabel 11.



**Tabel 10. Data awal hasil observasi**

Indikator	Tungku
Kapasitas kedelai	40kg
Air yang dibutuhkan	Air pemasakan 54,4 L
Waktu pemanasan awal	36 menit 30 detik
Waktu memasak	111 menit 5 detik
Bahan bakar	24 Kg

Kebutuhan industri kecil yaitu kapasitas kedelai 120 kg untuk sekali masak, sehingga digunakan tiga tungku.

**Tabel 11. Perbandingan Desain Boiler dan Tiga Tungku Konvensional pada Proses Produksi Tahu**

Indikator	Tungku	Boiler	Keterangan
Kapasitas kedelai	120 kg	120 kg	Sebanding
Air yang dibutuhkan	Air pemasakan 163,2 L	Air pemasakan 60 L, Fase uap 120 L	10,294% lebih banyak
Waktu pemanasan awal	36,5 menit	Total= 180 L 26,224 menit	Boiler lebih cepat 28,011% dibanding 3 tungku
Waktu memasak	111,083 menit	30 menit	Boiler lebih cepat 72,993% dibanding 3 tungku
Bahan bakar	72 kg	33,158 kg	Boiler lebih hemat 53,947% dibanding 3 tungku

Validasi rancangan 2 (analisis statis) dilakukan dengan metode elemen hingga dengan *software SOLIDWORKS*. Analisis dilakukan pada bagian yang sering mengalami kegagalan (pipa air dan dinding silinder). Luas permukaan dinding silinder 0,28 m<sup>2</sup> dan pipa air 3,956 m<sup>2</sup> diketahui dengan *SOLIDWORKS*. Volume air dalam pipa air diketahui 4,169 L, volume air: uap pada dinding silinder saat proses pemasakan pertama 502,858 L: 137,005 L, pemasakan kedua 365,853 L: 154,01 L, dan pemasakan ketiga 228,848 L: 171,015 L. Beban dan tekanan fluida air dan uap dapat diketahui dengan persamaan berikut,

$$W = W = \rho \times V \times g \rho \times V \times g$$

$$P = \frac{W}{L}$$

$WW$ = Beban fluida (kgm/s<sup>2</sup>)

$\rho\rho$ = Densitas air (1.000 kg/m<sup>3</sup>)

$VV$ = Volume fluida

$gg$ = Percepatan gravitasi (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$P$ = Tekanan fluida (N/m<sup>2</sup>)

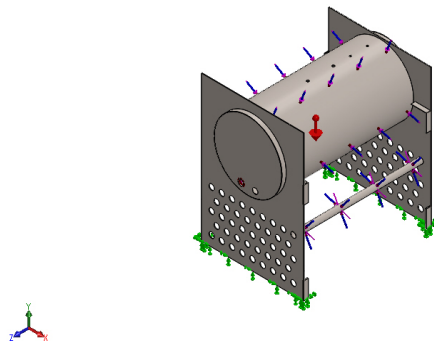
$L$ = Luas permukaan yang dikenai (m<sup>2</sup>)

Beban yang didapat untuk pengujian analisis statis boiler menggunakan metode elemen hingga dengan *software SOLIDWORKS* diambil dengan kondisi beban terbesar (kondisi pemasakan 1), ditunjukkan tabel 12.

**Tabel 12. Beban *Boiler* untuk Analisis Statis**

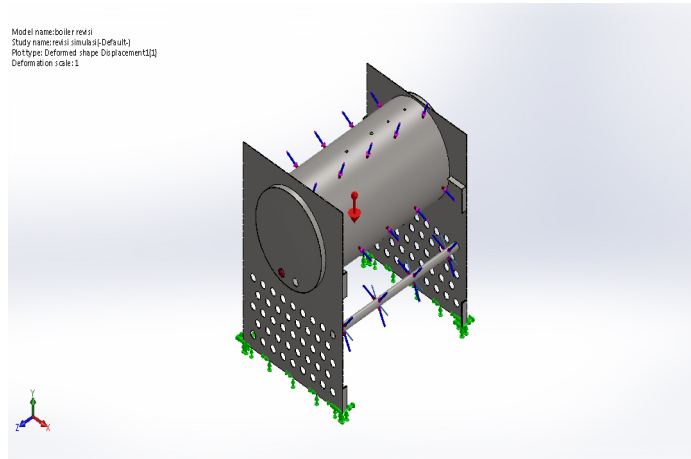
No	Bagian	Beban	Nilai beban
1	Dinding silinder dan pipa air	Gravitasi	9,81 m/s
2	Dinding silinder dan pipa air	Temperatur	393 K
3	Dinding silinder	Beban	Air = 4,944,318 N Uap = 1,233 N
		Tekanan	Air = 1930,62 N/m <sup>2</sup> N/m <sup>2</sup> Uap = 0,877 N/m <sup>2</sup> 0,877 N/m <sup>2</sup>
4	Pipa air	Beban	39,397 N
		Tekanan	140,703 N/m <sup>2</sup>

Model analisis disederhanakan menjadi gambar 13. dengan jumlah pipa 1 karena 42 pipa lainnya menerima beban dan memiliki konstruksi yang sama, sehingga diasumsikan mendapat tegangan yang sama.



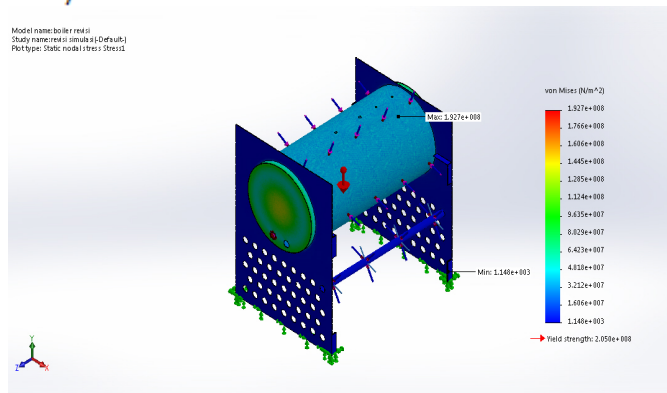
**Gambar 13. Model Analisis**

Hasil pengujian ditunjukkan gambar 14.



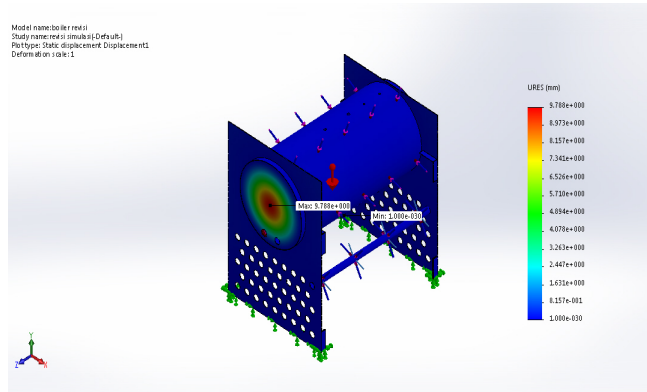
**Gambar 14. Bentuk Deformasi Hasil Analisis**

Tegangan yang terjadi pada boiler (*von mises*) hasil analisis statis ditunjukkan bagan dalam bentuk perbedaan kontur warna pada gambar 15. tegangan terbesar terjadi pada flat heads  $1,927 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ , tegangan terkecil terjadi pada tube sheets  $1 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ .



**Gambar 15. Tegangan Von-mises Hasil Analisis**

Displacement yang terjadi pada boiler hasil analisis juga ditunjukkan melalui bagan dalam bentuk perbedaan kontur warna pada gambar 16. Displacement terbesar terjadi pada tube sheet 9,788 mm, displacement terkecil terjadi pada tube sheet sebesar  $1 \times 10^{-30} \text{ mm}$ .



**Gambar 16. Resultant Displacement Hasil Analisis**

Validasi perancangan memastikan hasil rancangan mempunyai kualitas keamanan melalui analisis statis. Rancangan dinyatakan aman apabila nilai maksimal tegangan *von mises* lebih rendah dari nilai *tensile strength* material. Nilai tegangan *von mises* terbesar  $1,927 \times 10^8 \text{ N/m}^2$  dan *yield strength* material sebesar  $2,15 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ . Sehingga dapat disimpulkan bahwa desain dinyatakan aman dengan angka keamanan sebesar

$$\begin{aligned} SF &= \frac{2,15 \times 10^8 \text{ N/m}^2}{1,927 \times 10^8 \text{ N/m}^2} \\ &= 1,116 \end{aligned}$$

## SIMPULAN

Hasil rancangan *boiler* dengan perhitungan manual perpindahan panas dan konstruksi yang mengacu standar ASME (*American Society of Mechanical Engineering*) *Section IV* untuk boiler pemanas telah dihasilkan dan dilakukan validasi berupa perbandingan performa rancangan boiler dengan kondisi nyata hasil observasi menunjukkan rancangan boiler lebih hemat bahan bakar 53,947%, waktu pemanasan awal lebih cepat 28,011%, dan waktu memask lebih cepat 72,993% sehingga layak untuk digunakan. Validasi kedua berupa analisis statis boiler dengan menggunakan software *SOLIDWORKS* menunjukkan boiler memiliki kualitas keamanan yang baik dengan safety factor 1,116.

## DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Mechanical Engineers. 2004. *Rules for Construction of Heating Boilers*. July I. New York: ASME
- American Society of Mechanical Engineers. 2010. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code an International Code*. July II Part D properties. New York: ASME
- Bundy, B, S.W. Diegel, L. Wright, dan S.C. Davis. 2011. *Biomass Energy Data Book*. 4th ed.

- US Departement of Energy: National Renewable Energy Laboratory
- Cengel, Y.A., dan M.A. Boles. 2006. *Thermodynamics An Engineering Approach*. 5th ed. Boston: McGraw-Hill College
- Dahlan, D. 2012. *Elemen Mesin*. 1st ed. Jakarta: Citra Harta Prima
- Fatoni, R. 2013. Rekomendasi Standar Sistem Keselamatan untuk Steam *Boiler* di Pabrik Tahu. *Prosiding Simposium Nasional Teknologi Terapan (SNTT) 2013*. Universitas Muhammadiyah Surakarta. Solo. 1-6
- Halley, GM. dan EA. Nordstrom. 2004. *Rules for Construction of Heating Boilers*. July I. New York: American Society of Mechanical Engineers
- Hariyadi, P. 2016. Prinsip Kedua Desain Saniter untuk Mesin dan Peralatan di Industri Pangan Terbuat dari Bahan- Bahan yang Sesuai. *Food Review Indonesia* 9(4): 44-47
- Incropera. F.P., D.P. Dewitt, T.L. Bergman, dan A.S. Lavine. 2006. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th ed. USA: Hoboken
- Kriswanto, W. Widayat. 2015. *Bahan Ajar Elemen Mesin 1*. Semarang: UNNES
- Rutheravan. M. 2016. *Summary of Safety Criteria in Design*. Technical Report [https://www.researchgate.net/publication/303517627\\_SUMMARY\\_OF\\_SAFETY\\_CRITERIA\\_IN\\_DESIGN](https://www.researchgate.net/publication/303517627_SUMMARY_OF_SAFETY_CRITERIA_IN_DESIGN) (diakses tanggal 17 Desember 2017)
- Santra, P.K., S. Kumar. Design and Analysis of Horizontal Steam Pressure Vessel. *Jurnal IJEDR* 4(2): 2167-2207.
- Soedjono, DME., J. Sasetiyanto, DZ. Noor, dan HRP. Hapsari. 2015. Analisis Perhitungan dan Perencanaan Watertube *Boiler* Berbahan Bakar LPG pada Industri Kecil Tahu di Mojokerto. *Prosiding Simposium Nasional Teknologi 2015*. Institut Teknologi Malang. Malang. 68-76
- Sudarman, Suwahyo, dan Sunyoto. 2015. Penerapan Ketel Uap (Steam *Boiler*) pada Industri Pengolahan Tahu untuk Meningkatkan Efisiensi dan Kualitas Produk. *Jurnal Sainteknol* 13(1): 71-78.

