

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat serta waktu penelitian yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.1.1. Tempat Penelitian

Proses perancangan, fabrikasi ruang pengering serta pengambilan data eksperimen pada penelitian ini dilakukan pada Laboratorium Termodinamika di Jurusan Teknik Mesin. Sedangkan, pengujian kadar air dari biji kopi dilakukan pada Laboratorium Analisis Hasil Pertanian di Jurusan Teknologi Hasil Pertanian.

3.1.2. Waktu Penelitian

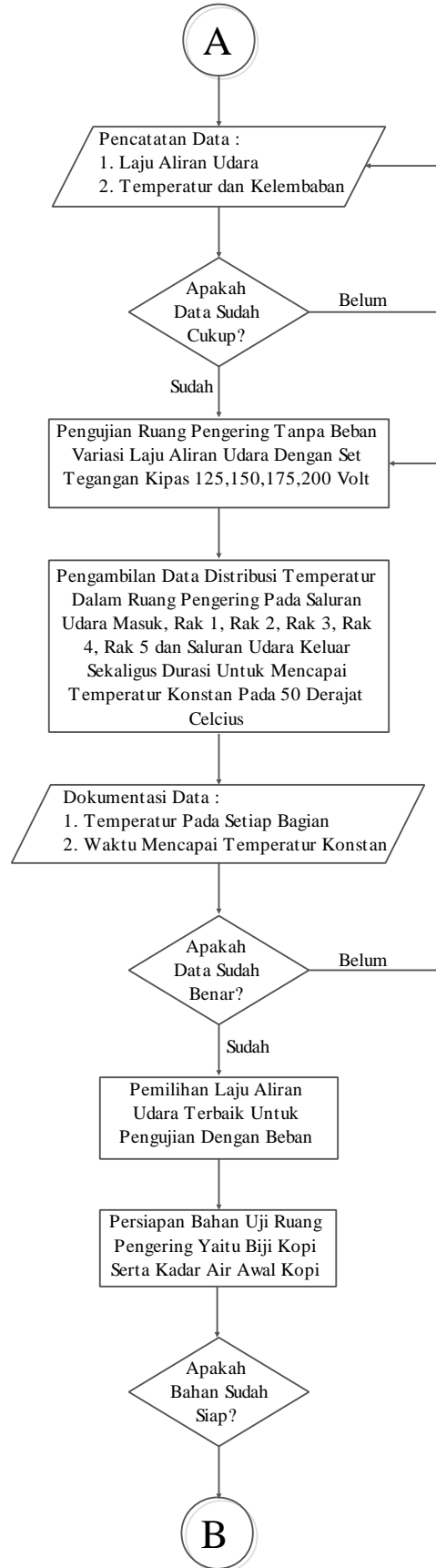
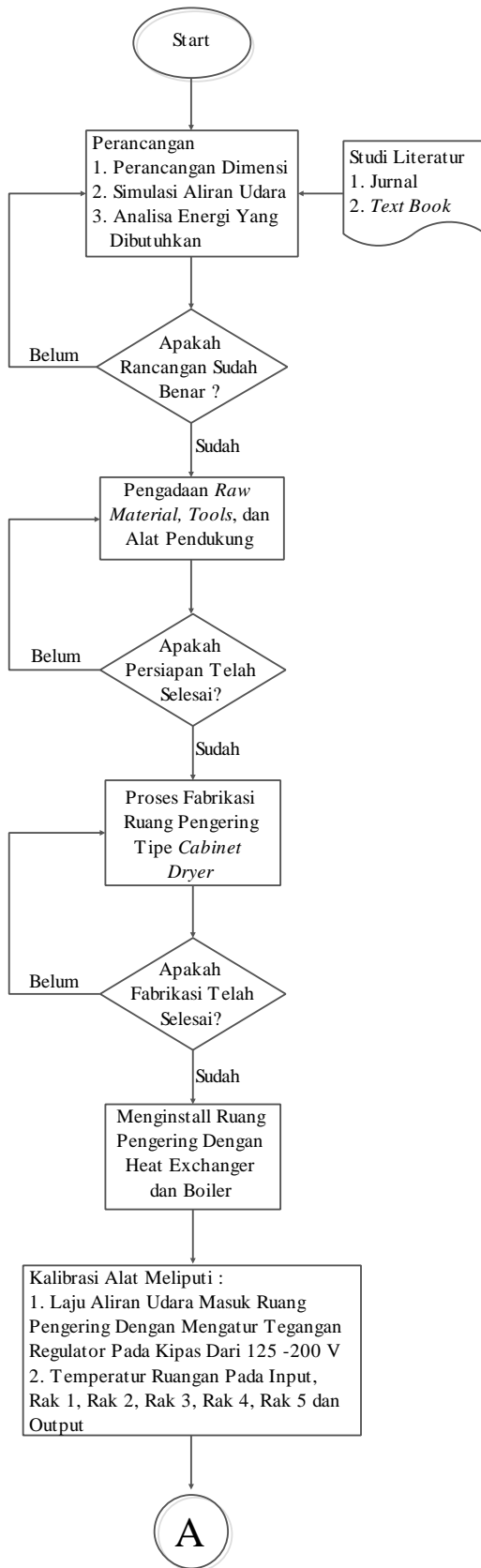
Penelitian akan dilakukan pada bulan Juli hingga November 2014 dengan jadwal kegiatan tersusun pada Tabel 3.1.

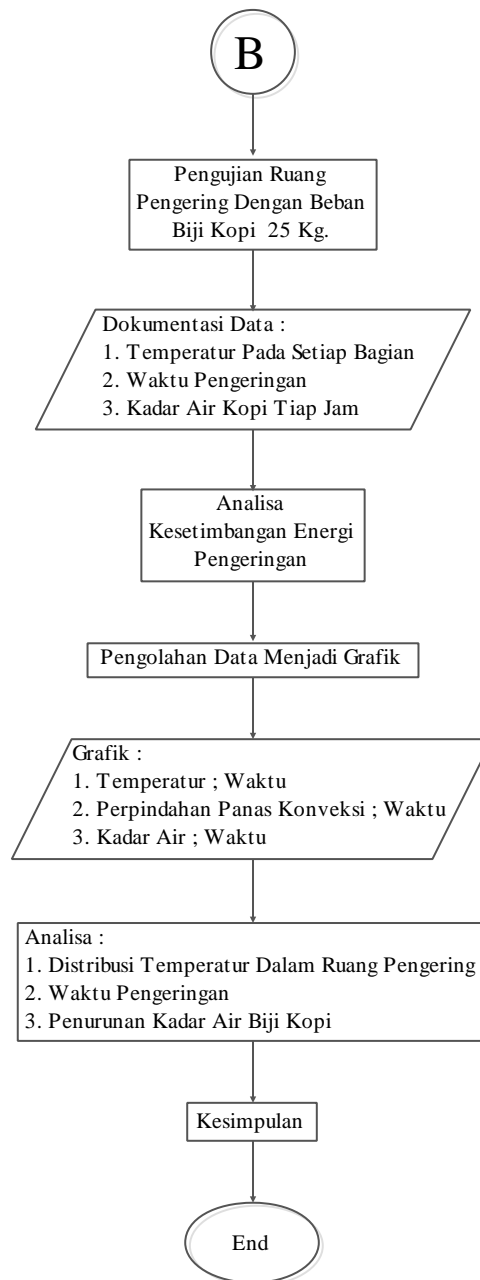
Tabel 3.1 Jadwal kegiatan penelitian

	Kegiatan	Juli				Agustus				September				Oktober				November			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi Literatur	■	■	■																	
2	Perancangan & Simulasi		■	■	■	■	■														
3	Pembelian alat dan bahan					■	■	■	■	■											
4	Pembuatan Ruang Pengering						■	■	■	■	■	■	■	■							
5	Eksperimen													■	■	■	■	■	■		
6	Pembuatan laporan akhir																	■	■	■	■

3.2. Alur Penelitian

Secara makro, pelaksanaan penelitian dijabarkan melalui *flowchart* dibawah





Gambar 3.1. *Flowchart* penelitian

3.3 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini terbagi dalam tiga tahap yaitu : perancangan ruang pengering (perancangan dimensi ruang pengering dan analisa energi yang dibutuhkan ruang pengering), pembuatan ruang pengering dan pengujian ruang pengering dengan beberapa parameter uji.

3.3.1. Perancangan Ruang Pengering

Terdapat tiga tahap dalam melakukan penrancangan ruang pengering yaitu: perancangan dimensi dari ruang pengering, analisa energi yang dibutuhkan selama proses pengeringan dan perhitungan perpindahan panas konveksi yang terjadi selama proses pengeringan.

a. Perancangan dimensi ruang pengering

Ruang pengering dirancang untuk kapasitas kopi sebanyak 25 kg, dan massa jenis biji kopi adalah 721 kg/m^3 . Perancangan dilakukan untuk menentukan dimensi ruang pengering.

Langkah pertama adalah mengasumsikan beberapa parameter awal perancangan. Parameter awal perancangan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3.2 Parameter awal perancangan

No	Data yang ditentukan	Nilai	Keterangan
1	Kelembapan relatif udara masuk ke ruang pengering	70 %	Diasumsikan
2	Kelembapan relatif udara keluar dari ruang pengering	75 %	Diasumsikan
3	Temperatur udara lingkungan	27 °C	
4	Temperatur udara masuk ruang pengering	50 °C	
4	Temperatur udara keluar dari ruang pengering	40 °C	Direncanakan
5	Kandungan air biji kopi awal	53-55%	SNI biji kopi
6	Kandungan air biji kopi akhir	11-12%	SNI biji kopi
7	Ketinggian ruang pengering dari tanah	0.3 m	Direncanakan
8	Ketinggian saluran udara keluar dari ruang pengering	0.3 m	Direncanakan

Asumsi ini di ditujukan agar menjadi acuan pada perhitungan perancangan dimensi ruang pengering. Sifat sifat dari biji kopi diasumsikan seragam, dan kadar air yang diperhitungkan hanya pada awal dan akhir saja.

Langkah selanjutnya adalah menentukan massa jenis udara (ρ) pada ketinggian H_1 , H_2 , dan ΔH dari setiap kondisi temperatur.

$$\begin{aligned}
 \rho_{\infty} &= \frac{p}{RT_{\infty}} \\
 &= \frac{101325 \text{ J} / \text{m}^3}{287 \text{ kJ} / \text{kg.K} \times 300 \text{ K}} \\
 &= 1.176829268 \text{ kg/m}^3 \\
 \rho_1 &= \frac{p}{RT_1} \\
 &= \frac{101325 \text{ J} / \text{m}^3}{287 \text{ kJ} / \text{kg.K} \times 323 \text{ K}} \\
 &= 1.09303028 \text{ kg/m}^3 \\
 \rho_2 &= \frac{p}{RT_2} \\
 &= \frac{101325 \text{ J} / \text{m}^3}{287 \text{ kJ} / \text{kg.K} \times 313 \text{ K}} \\
 &= 1.127951375 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

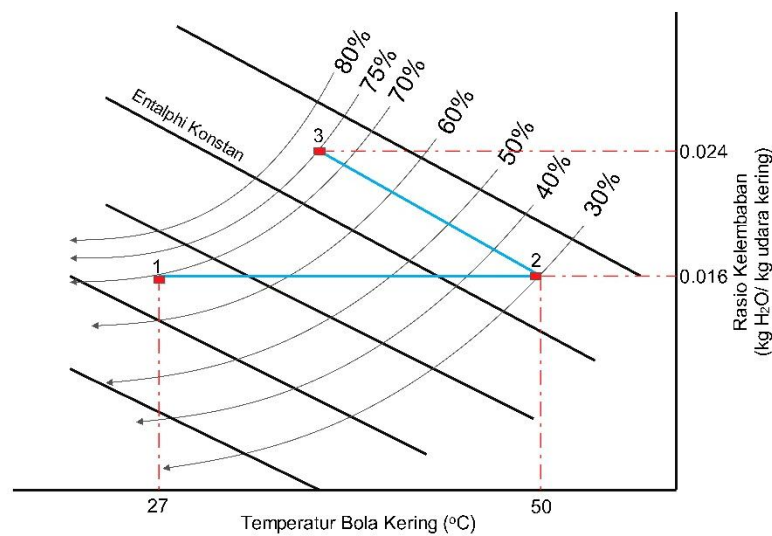
Setelah mendapatkan massa jenis udara pada setiap ketinggian, maka besar penurunan tekanan Δp dalam ruang pengering dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan yaitu:

$$\begin{aligned}
 \Delta p &= [H_1(\rho_{\infty} - \rho_1) + H_2(\rho_{\infty} - \rho_2)]g \\
 &= [0.3(1.176829268 - 1.09303028) + 0.3(1.176829268 - 1.127951375)]9.81 \\
 &= 0.390468061 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Dengan kapasitas pengeringan sebesar 25 kg, maka jumlah air yang harus diuapkan (m_w) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.19 yaitu:

$$\begin{aligned}
 m_w &= \frac{w_i (mc_1 - mc_2)}{100\% - mc_2} \\
 &= \frac{25 \text{ kg} (55\% - 12\%)}{100\% - 12\%} \\
 &= 12.21590909 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Langkah selanjutnya adalah menentukan rasio kelembapan udara awal (W_1) dan rasio kelembapan akhir (W_2) menggunakan bagan psikrometrik.



Gambar 3.2 Menentukan rasio kelembapan udara

Dengan menggunakan diagram psikometrik, untuk kelembapan udara masuk $\Phi_1 = 70\%$ dengan temperatur udara sekitar adalah 27°C maka didapat perbandingan kelembapan udara (*humidity ratio*) $W_1 = 0.016$ kg air/ kg udara kering, dan meningkat dengan kelembapan udara keluar $\Phi_2 = 75\%$ yaitu $W_2 = 0.024$ kg air/ kg udara kering. Sehingga massa udara kering yang dibutuhkan (m_a) untuk menguapkan kandungan air biji kopi dapat ditentukan dengan:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{m_w}{m_a} (\text{kg}_{air} / \text{kg}_{udara\text{kering}})$$

$$\begin{aligned}
 m_a &= \frac{m_w}{W_2 - W_1} \\
 &= \frac{12.21590909 \text{ kg}}{0.024 - 0.016} \\
 &= 1526.988636 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Apabila massa udara kering yang dibutuhkan untuk menguapkan kandungan air dari biji kopi telah didapat, maka laju aliran massa (m) dapat ditentukan dengan membagi massa udara kering (m_a) dengan lamanya waktu pengeringan (t).

$$\begin{aligned}
 m &= \frac{m_a}{t \times 60 \text{ menit}} \\
 &= \frac{1526.988636 \text{ kg}}{10 \times 3600 \text{ s}} \\
 &= 0.042416351017 \text{ kg/s}
 \end{aligned}$$

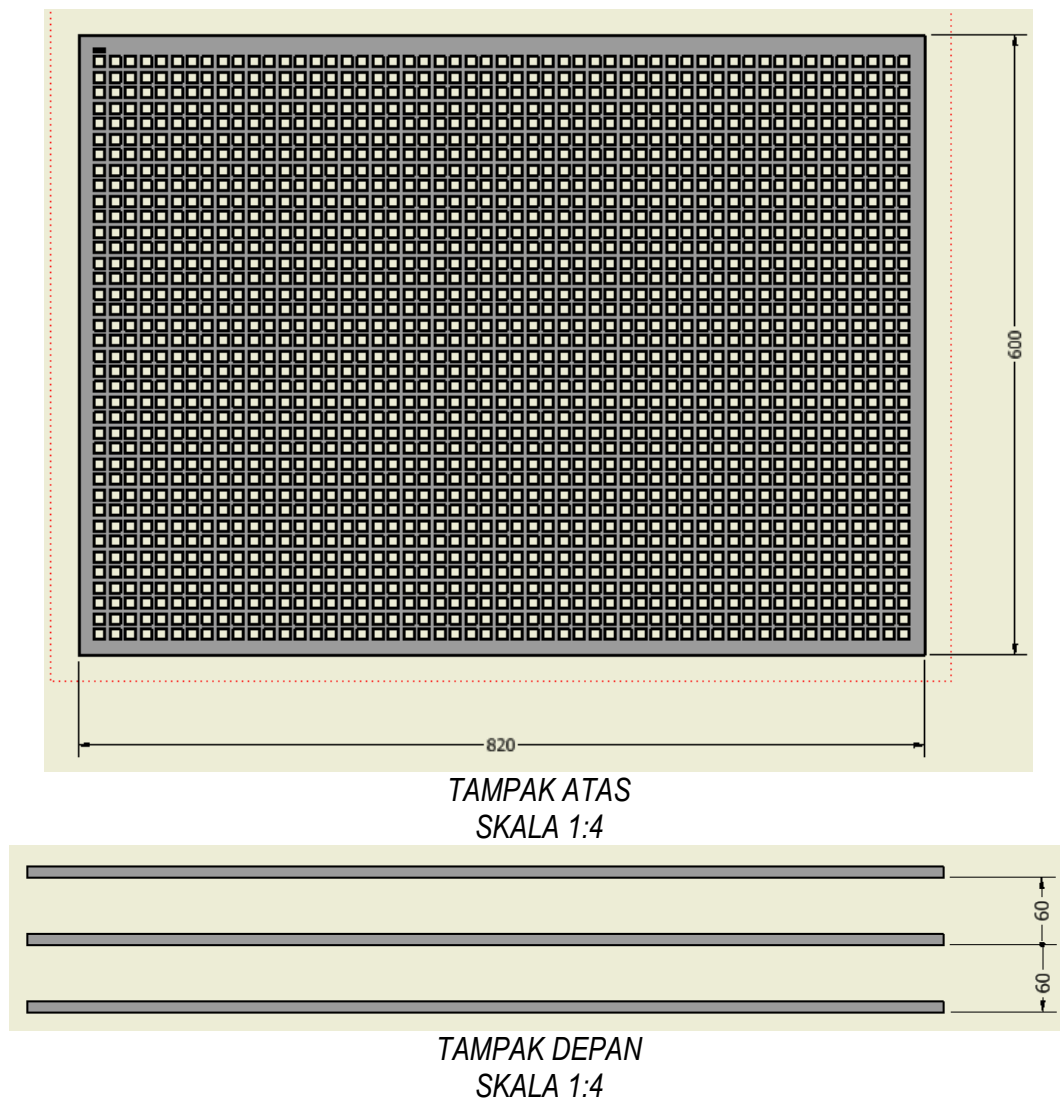
Menentukan perbandingan jarak antara rak pengering (ΔH) dengan luas ruang pengering (A) menggunakan persamaan 2.21 :

$$\begin{aligned}
 \blacksquare \quad \frac{\Delta H}{A} &= \frac{\Delta p \cdot K_{kopi} \cdot \rho_{\infty}}{m} \\
 \frac{\Delta H}{A} &= \frac{0.390468061 \times 0.517819 \times 1.176829268}{2.544981061} \\
 \frac{\Delta H}{A} &= 0.093495797 \quad \text{dan.} \\
 \blacksquare \quad A \Delta H &= \frac{w_i}{\rho_{kopi}} \\
 A \Delta H &= \frac{25 \text{ kg}}{721 \text{ kg/m}^3} \\
 A \Delta H &= 0.034674064
 \end{aligned}$$

Dengan metode substitusi didapat nilai A dan ΔH yaitu:

- $A = 0.608984623 \text{ m}^2 = 6089.84623 \text{ cm}^2$
- $\Delta H = 0.056937503 \text{ m} = 5.6937503 \text{ cm} = 6 \text{ cm}$

Seluruh dimensi tersebut diubah menjadi geometri seperti yang terlihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.3 Geometri Rak Pengering

Apabila dimensi dan jarak dari *tray* telah diketahui maka langkah selanjutnya adalah menentukan jenis material yang dipakai pada dinding ruang

pengering. Parameter yang dibutuhkan untuk ruang pengering adalah material yang mampu mengisolasi dan menahan panas agar tetap terjaga didalam ruang pengering. Sifat dari material yang dipilih dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 3.3 *Properties* material dinding

No	Jenis Material	Konduktifitas Thermal	Tebal
1	Wood (Cypress)	0.097 W/m.K	18 mm
2	Alumunium	237 W/m.K	0.2 mm

Pemilihan material kayu jenis *cypress* karena memiliki konduktifitas thermal yang kecil, sehingga dapat menjadi isolator yang baik. Sedangkan pemilihan alumunium bertujuan agar panas yang ada tetap terjaga didalam ruang pengering. Dimensi dari tebal material bergantung pada ketersediaannya di pasaran. Analisa energi yang mampu ditahan dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{\Delta x_1}{k_1}\right) + \left(\frac{\Delta x_2}{k_2}\right)}$$

$$U = \frac{1}{\left(\frac{0.002}{273}\right) + \left(\frac{0.018}{0.097}\right)}$$

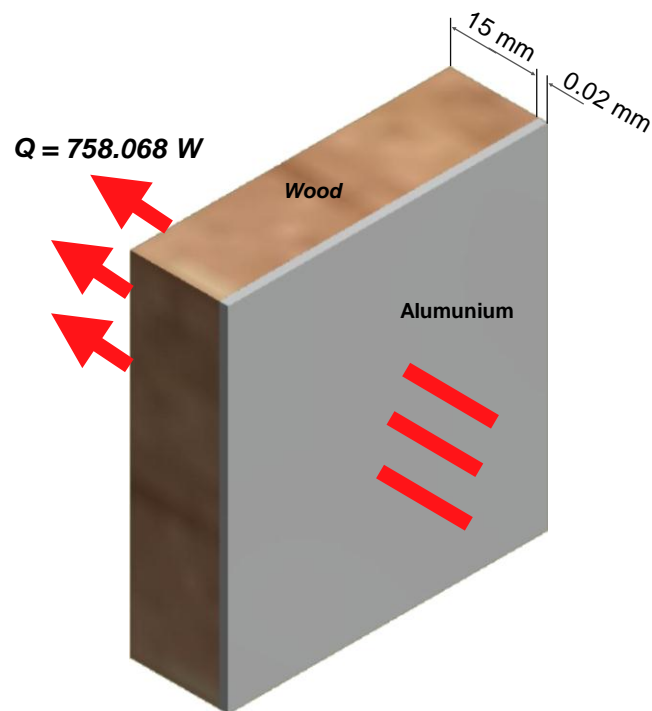
$$= 5.388644 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Maka,

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{\text{menyeluruh}}$$

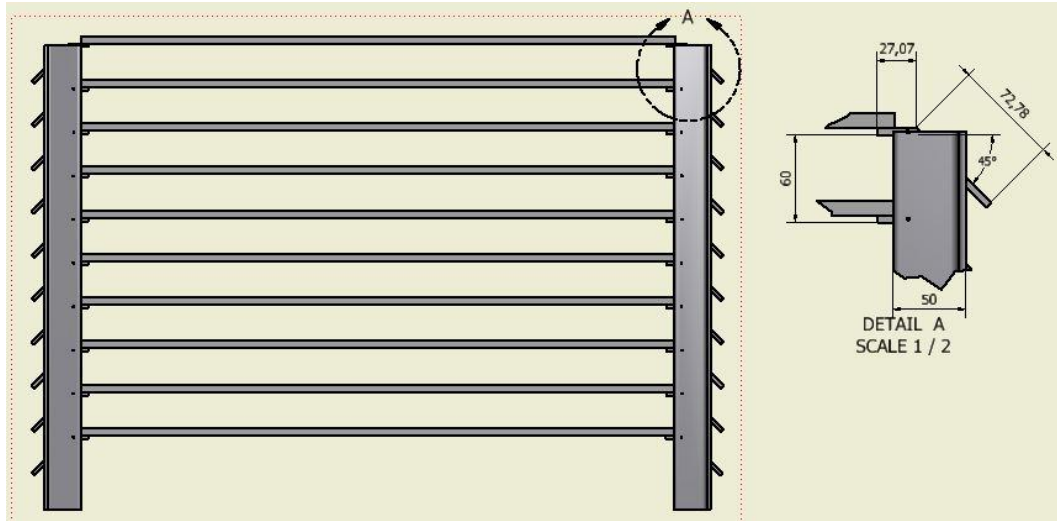
$$= 5.388644 \text{ W/m}^2 \text{ K} \cdot 5.417866 \text{ m}^2 \cdot 26 \text{ K}$$

$$= 759.0687 \text{ W}$$



Gambar 3.4 Skema dinding ruang pengering

Arah aliran udara dalam ruang pengering harus ditentukan. Parameter yang harus diketahui adalah perbedaan tekanan Δp pada setiap ketinggian H . Mengacu pada perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya, maka arah aliran udara adalah dari bawah menuju ke atas. Setelah didapat arah aliran udara, tahap selanjutnya adalah membuat pengarah udara panas. Hal itu bertujuan agar distribusi aliran udara panas dapat merata ke seluruh bagian dari ruang pengering. Bentuk pengarah udara panas adalah separator pengarah udara dan sirip yang diletakan pada setiap rak. Bentuk sirip pengarah udara ditunjukkan pada gambar 3.5. Untuk pemilihan bentuk separator dapat menggunakan cara simulasi dengan software Autodesk Simulation CFD 2014. Langkah langkah yang harus dilakukan untuk melakukan simulasi dapat dilihat pada subbab selanjutnya.



Gambar 3.5 Dimensi sirip pengarah udara

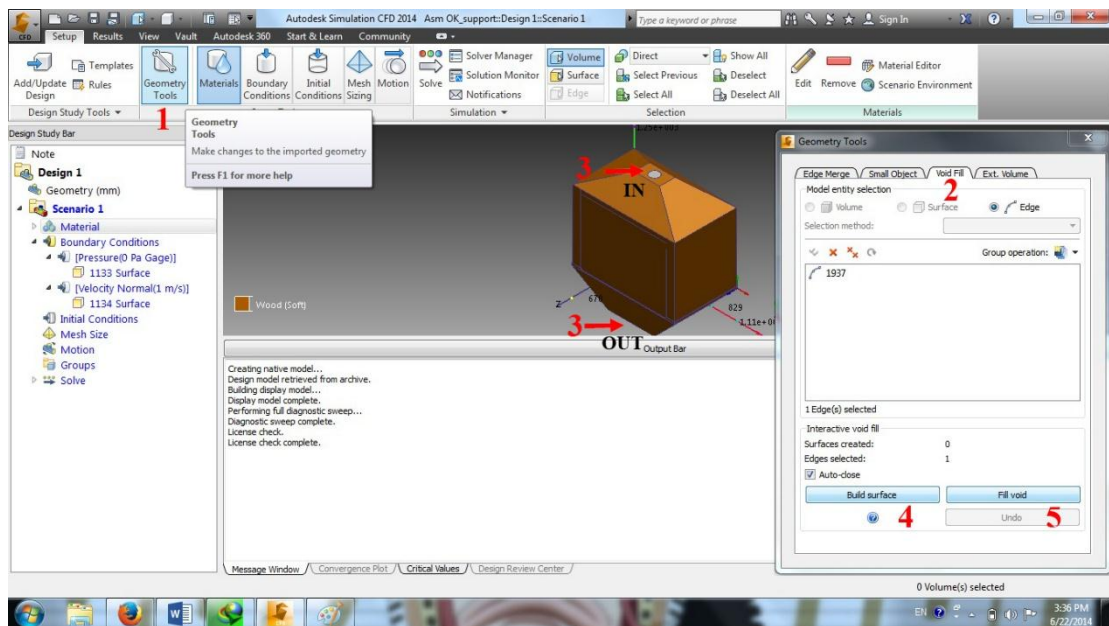
b. Simulasi Aliran Udara Panas

Metode simulasi aliran udara panas pada penelitian ini adalah:

1. Membuat modelling dari ruang pengering dengan menggunakan *software Autodesk Inventor 2013 Professional™* dengan lisensi produk **Student Version**. Dimensi serta bentuk dari ruang pengering didapat dari hasil perhitungan serta perancangan ruang pengering.
- 2 Melakukan simulasi aliran serta temperatur udara panas dengan menggunakan *software Autodesk Simulation CFD 2014™* dengan lisensi produk **Student Version**. Simulasi aliran udara panas di dalam ruang pengering dilakukan untuk mengetahui aliran udara terbaik dari rancangan. Distribusi temperatur dalam ruang pengering dapat diketahui dengan melakukan simulasi. Sehingga didapat hasil yang optimal dari aliran udara serta distribusi temperaturnya. Variasi yang digunakan pada simulasi aliran ini adalah pada bentuk separator dan laju aliran udara.

Proses yang dilakukan untuk simulasi aliran dan temperatur adalah sebagai berikut:

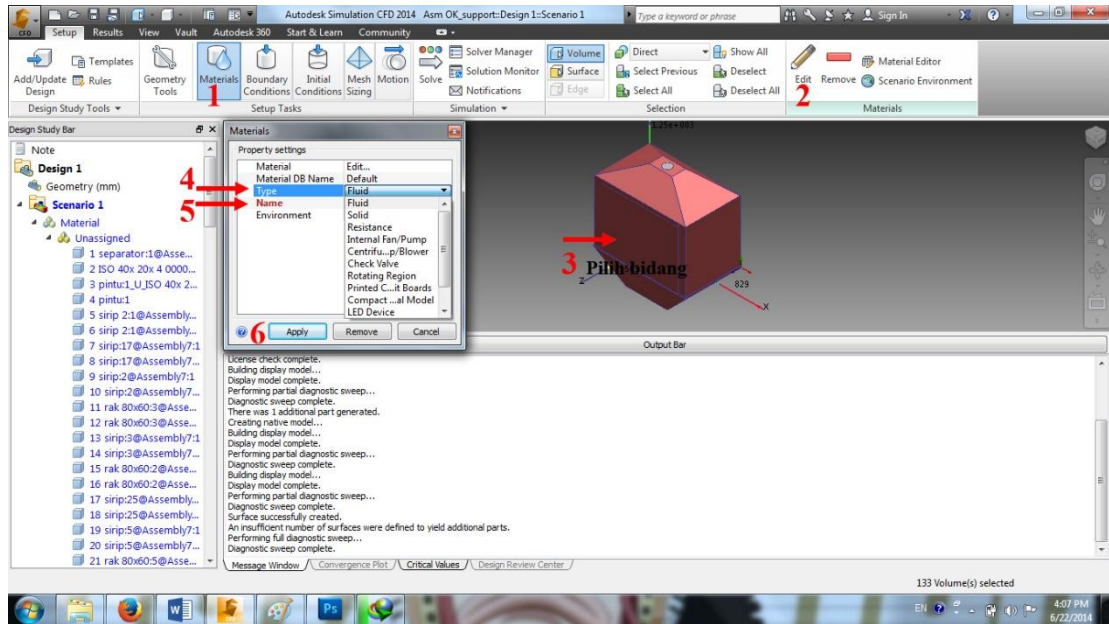
- a. Membuka model 3D dari ruang pengering yang akan dilakukan simulasi. Langkahnya adalah menggunakan toolbar **Open**, pilih model 3D yang akan dilakukan simulasi.
- b. Menentukan bagian masuk serta bagian keluar dari aliran udara panas dengan menggunakan *toolbar* **Geometry Tools**, **Void Fill**, pilih bidang masuk dan keluar dari ruang pengering, lalu **Build Surface** dan **Fill Void**. Selain itu langkah ini bertujuan untuk menentukan volume fluida berada didalam ruang pengering.



Gambar 3.6 Menentukan bagian masuk dan keluar dari aliran udara

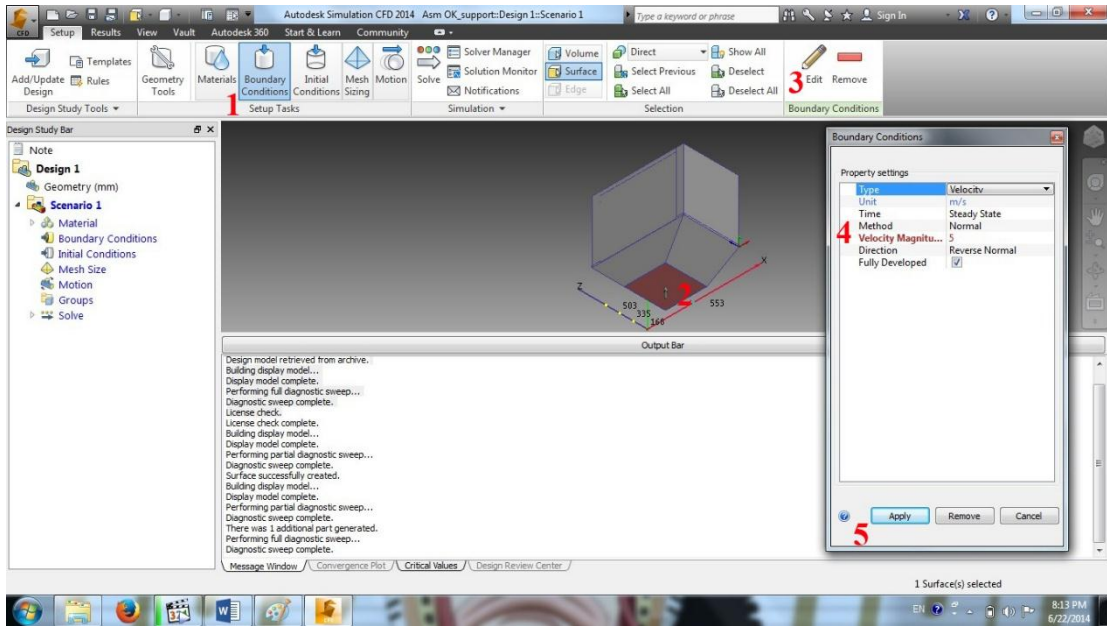
- c. Menentukan jenis material dari ruang pengering serta jenis fluida yang berada di dalam ruang pengering. Langkahnya adalah menggunakan *toolbar*

Material, lalu kita menentukan Type materialnya, dan jenis materialnya dan pilih **Apply**.(lihat gambar 3.7)



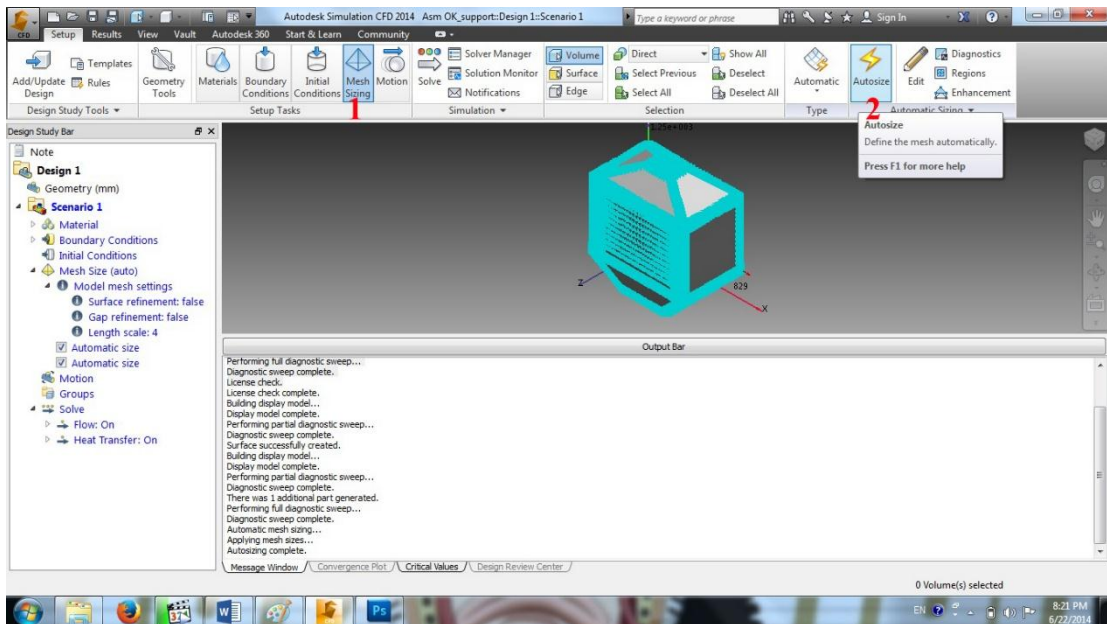
Gambar 3.7 Menentukan material yang dipakai

d. Menentukan arah aliran udara panas yang terjadi di dalam ruang pengering. Langkahnya yang pertama adalah menggunakan *toolbar Boundary Conditions*, lalu pilih bidang masuk dari udara panas, setelah itu tentukan kondisi yang diinginkan seperti, Type kondisi batas, satuan yang dipakai, waktu yang dibutuhkan, besar nilai kondisi yang diinginkan (untuk setiap kondisi batas berbeda beda), lalu pilih **Apply**. Setelah itu pilih bidang keluar udara panas dari ruang pengering, kondisikan pada bagian keluar ruang pengering tekanan atmosfer. (lihat gambar 3.8)



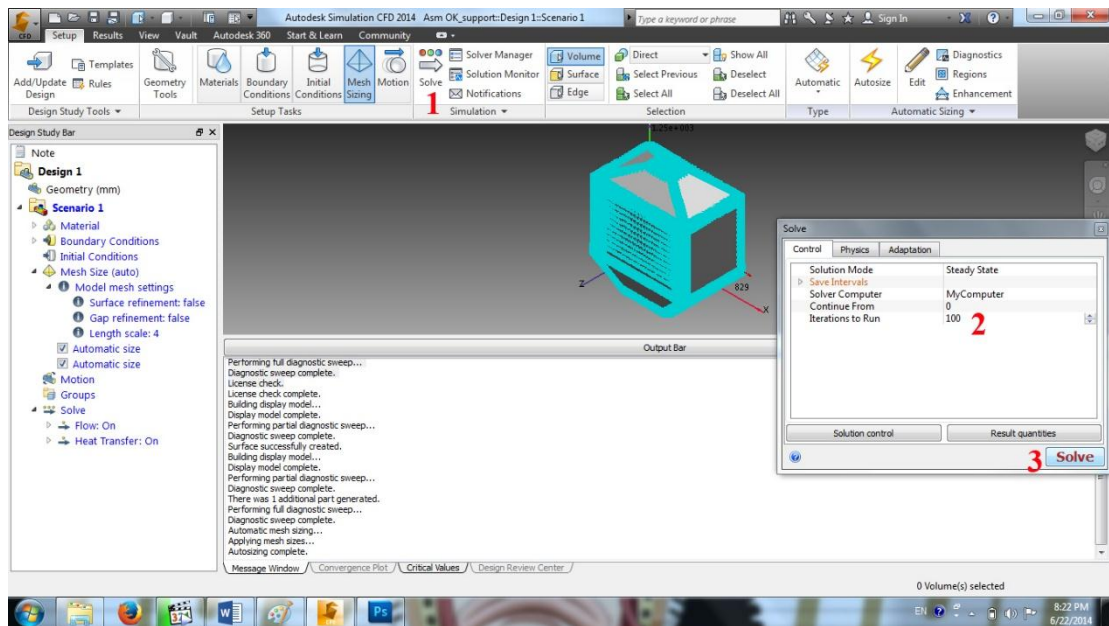
Gambar 3.8 Menentukan kondisi batas

- e. Melakukan meshing pada dimensi ruang pengering. Langkahnya adalah menggunakan *toolbar Mesh Sizing* dan pilih *Autosize*. (lihat gambar 3.9)



Gambar 3.9 Menentukan Mesh Sizing

- f. Setelah kondisi simulasi telah dilakukan maka proses solving dapat dilakukan dengan cara: menggunakan *toolbar Solve*, lalu tentukan nilai iterasinya dan pilih **Solve**. (lihat gambar 3.10)



Gambar 3.10 Proses *Solving*

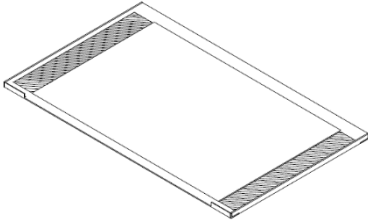
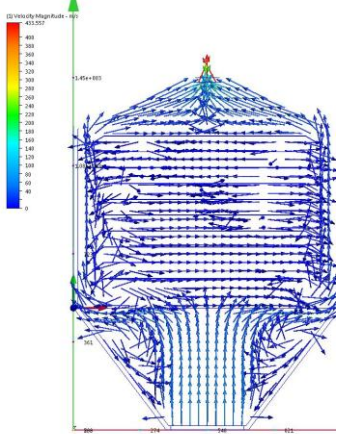
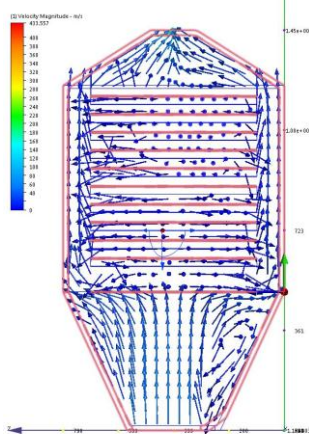
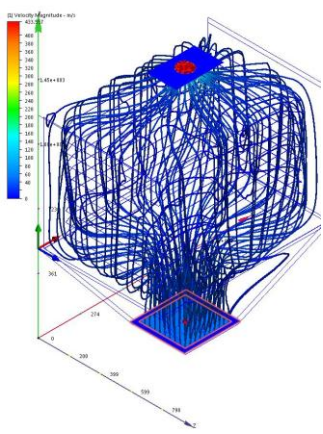
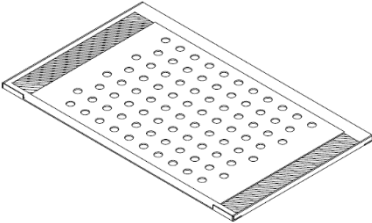
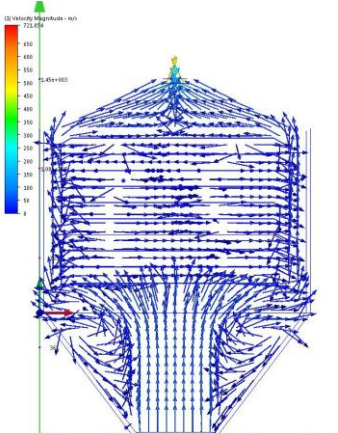
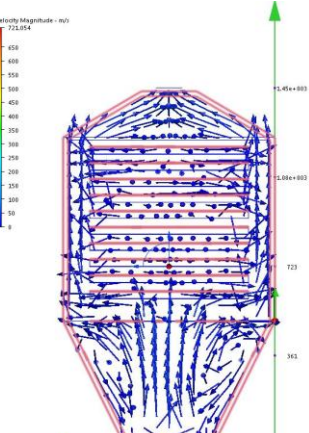
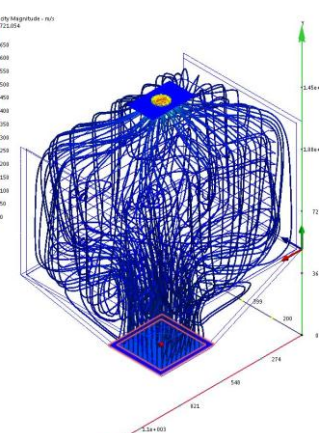
Proses simulasi aliran udara pada ruang pengering dilakukan dengan memasukan nilai nilai parameter pengujian. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui kondisi yang terjadi dalam ruang pengering pada batas nilai yang ditentukan. Parameter yang digunakan pada proses simulasi ditunjukkan pada tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.4 Kondisi simulasi aliran udara

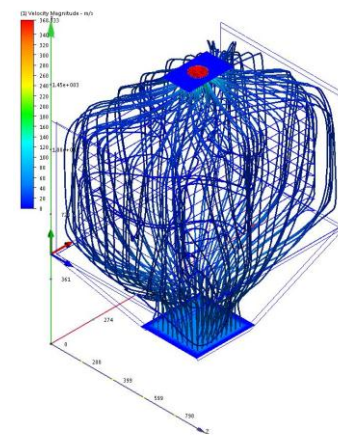
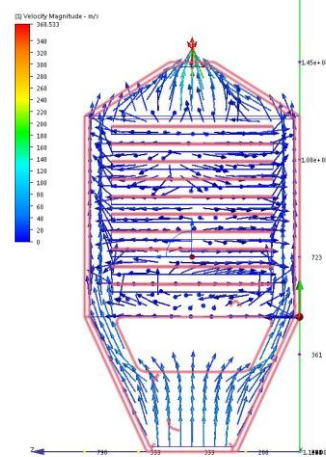
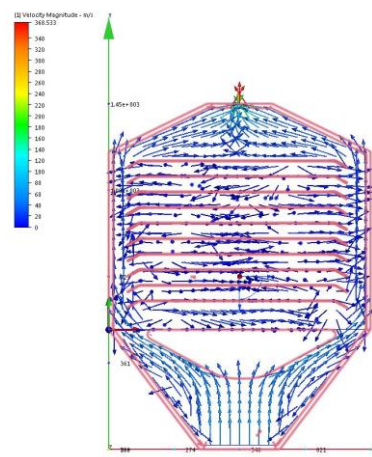
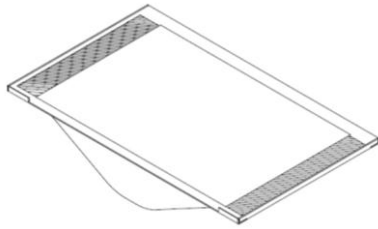
<i>Material</i>	<i>Fluid</i>	<i>Boundary Condition</i>		<i>Mesh</i>	<i>Iteration</i>
		<i>Velocity</i>	<i>Pressure</i>		
<i>Wood</i>	<i>Air</i>	0.5 m/s	1 atm	<i>Auto Mesh</i>	100

Simulasi dilakukan dengan variasi bentuk separator pengarah udara. Bentuk dan hasil dari proses simulasi dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

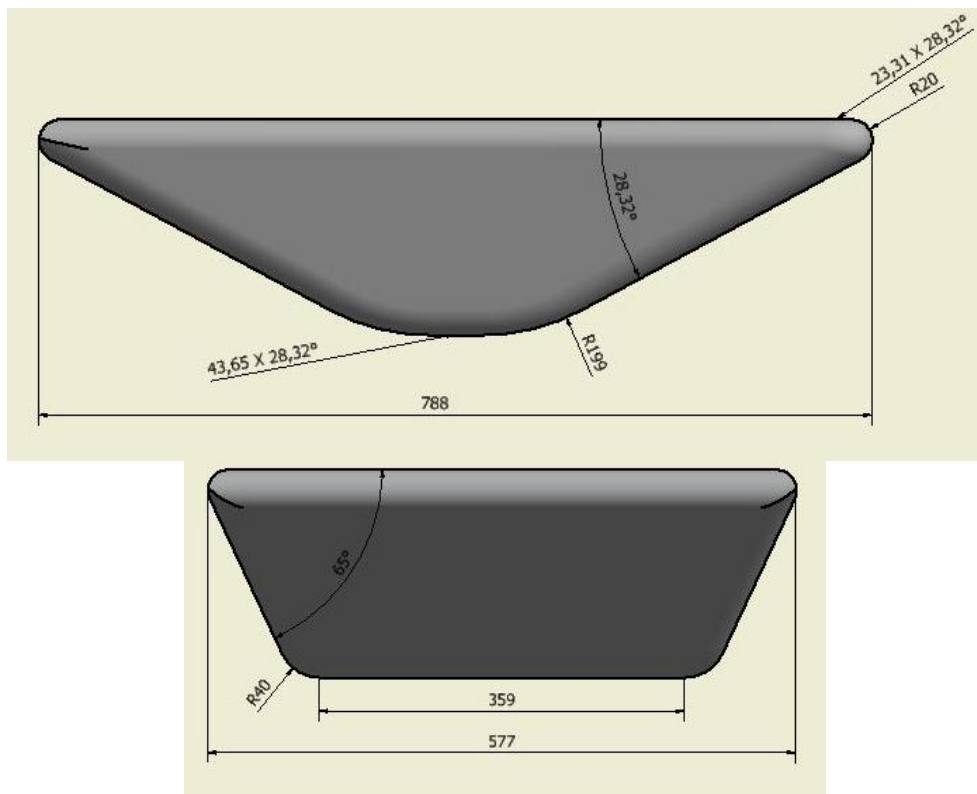
Tabel 3.5 Hasil simulasi aliran udara

Bentuk Separator	Result			
	Front	Left	Isometric	
1				
2				

3

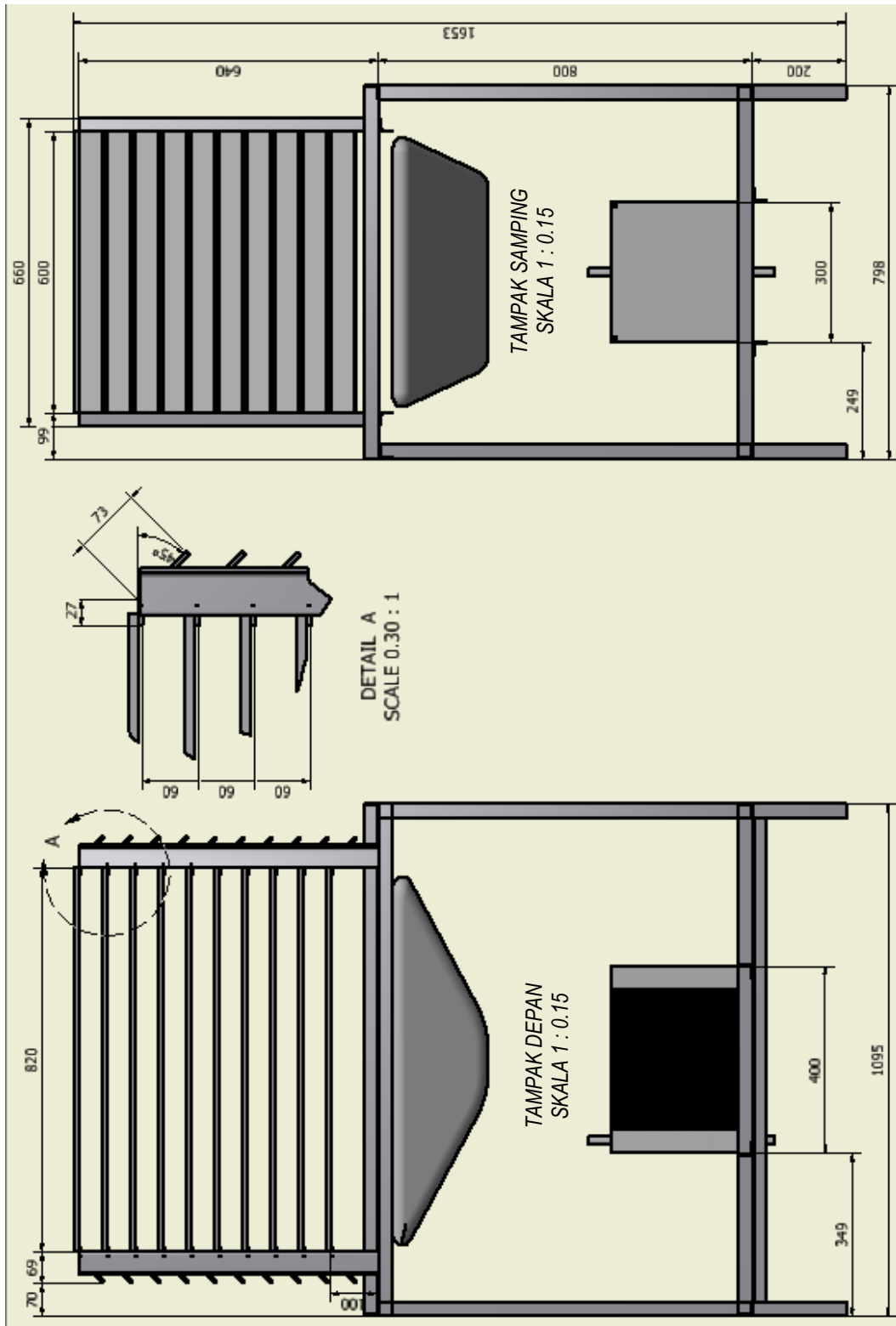


Simulasi aliran udara panas didalam ruang pengering bertujuan untuk mencari kondisi optimal dalam ruang pengering. Menurut Cristiana Brasil Maia dkk, karakteristik aliran udara panas dalam ruang pengering adalah dalam keadaan udara turbulen [24]. Melihat hasil dari hasil simulasi yang telah dilakukan pada tabel 3.5 separator pengarah udara berbentuk *cone* lah yang paling optimal. Dilihat dari aliran udara pada setiap rak, separator berbentuk cone yang memperlihatkan udara aliran udara turbulen yang merata. Maka separaotor bentuk cone yang dipilih untuk ruang pengering. Dimensi dan bentuk dari pengarah udara dapat dilihat pada gambar 3.11.

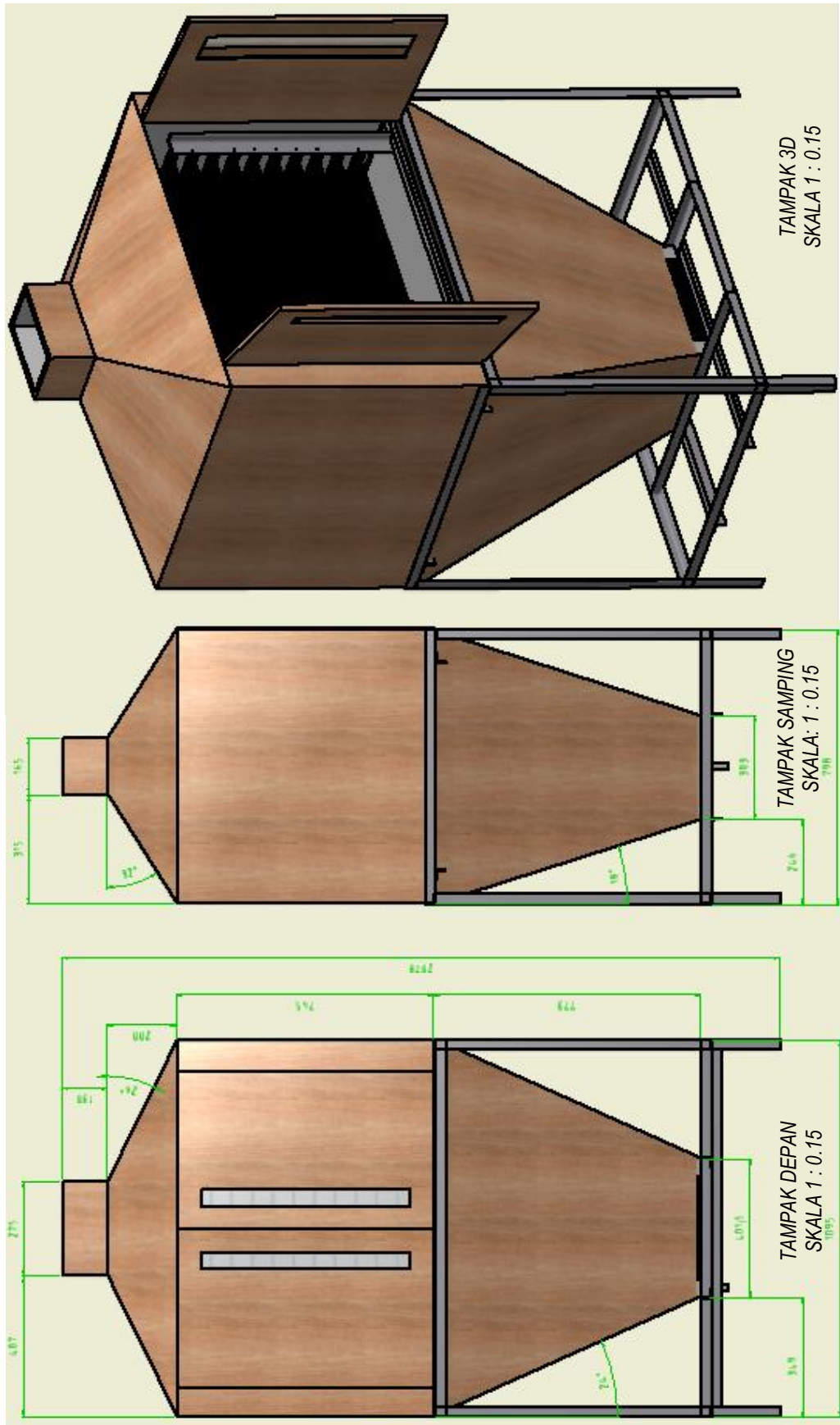


Gambar 3.11 Dimensi pengarah aliran udara

Setelah data hasil perancangan ruang pengering didapat, tahap selanjutnya adalah visualisasi bentuk 3D dari ruang pengering. Bentuk dan dimensi dari bagian bagian ruang pengering ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



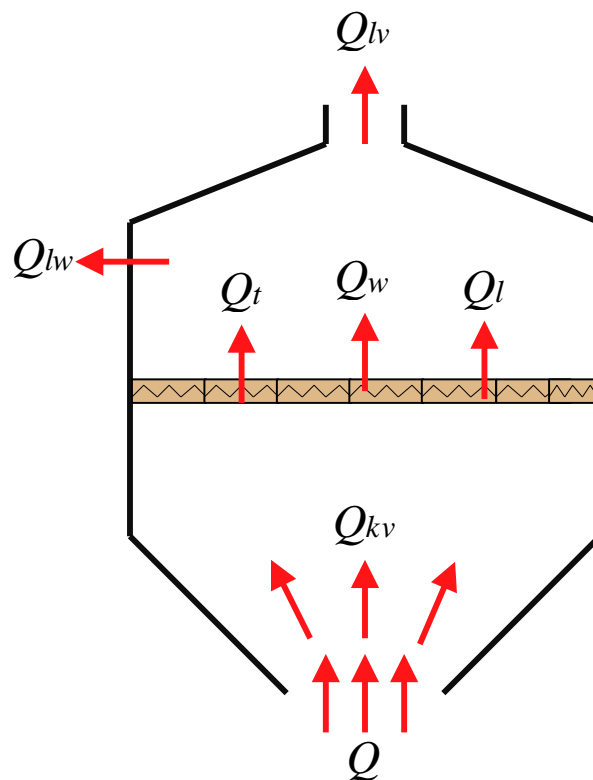
Gambar 3.12 Dimensi dan bentuk rangka ruang penering



Gambar 3.13 Dimensi rancangan ruang pengering

c. **Analisa Energi Yang Dibutuhkan Selama Proses Pengeringan**

Untuk menghitung kebutuhan energi selama proses pengeringan dapat diperoleh melalui metode neraca kesetimbangan energi. Pada prinsipnya energi total (Q_T) yang dibutuhkan pada proses pengeringan digunakan untuk: pemanasan bahan (Q_t), pemanasan kandungan air (Q_w) dan energi untuk menguapkan air dalam bahan ditambah energi yang terbuang dari dinding (Q_{lw}). Energi total (Q_T) yang dibutuhkan untuk mengeringkan kopi satu siklus seperti yang diperlihatkan pada gambar berikut.



Gambar 3.14 Neraca Kesetimbangan Energi

1. Perhitungan kadar air

Kadar air kopi yang telah dikeringkan dapat dihitung melalui beberapa tahapan berikut ini.

- a. Tahap awal untuk mengetahui energi yang dibutuhkan selama proses pengeringan adalah menghitung kadar air kopi kering (W_{kk}) yang direncanakan. Kapasitas yang direncanakan untuk alat pengering biji kopi (W_{kb}) adalah 25 kg. Sedangkan asumsi awal kadar air dari biji kopi (w_f) adalah 55%. Nilai dari kadar air kopi kering yang direncanakan dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$w_f = \frac{W_{kk} - W_{ko}}{W_{kk}} \times 100\%$$

$$55\% = \frac{W_{kk} - 11.25}{W_{kk}} \times 100\%$$

$$55\% = 1 - \frac{11.25}{W_{kk}} \times 100\%$$

$$1 = \frac{11.25}{W_{kk}} + 55\%$$

$$0.945 = \frac{11.25}{W_{kk}}$$

$$W_{kk} = 11.90476 \text{ kg}$$

- b. Setelah berat air kopi kering di dapat, maka tahap selanjutnya adalah menentukan berat dari air biji kopi (W_i) yang akan dikeringkan. Langkah ini bertujuan untuk mengetahui besar energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air pada biji kopi. Menghitung berat air kopi awal dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} W_i &= W_{kb} - W_{kk} \\ &= 25 \text{ kg} - 11.90476 \text{ kg} \\ &= 13.09524 \text{ kg} \end{aligned}$$

- c. Nilai total kadar air (W_f) setelah biji kopi dikeringkan berguna untuk mengetahui berat air yang harus dipindahkan pada proses pengeringan.

Hal tersebut dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$W_f = W_{kk} \times w_f$$

$$W_f = W_{kk} \times 55\%$$

$$\begin{aligned} W_f &= 11.90476 \text{ kg} \times 55\% \\ &= 6.547619 \text{ kg} \end{aligned}$$

- d. Maka berat air yang dipindahkan selama proses pengeringan didapat dari persamaan berikut:

$$\begin{aligned} W_r &= W_i - W_f \\ &= 13.09524 \text{ kg} - 6.547619 \text{ kg} \\ &= 6.547619 \text{ kg} \end{aligned}$$

2. Kebutuhan Energi Selama Proses Pengeringan

Kebutuhan energi untuk pengeringan kopi Q_d dapat didapat dari mengkalkulasi energi untuk pemanasan kopi, energi pemanasan air kopi dan energi untuk penguapan air kopi.

- a. Energi untuk pemanasan kopi (Q_t) didefinisikan sebagai panas yang dibutuhkan untuk meningkatkan temperatur biji kopi ke temperatur udara pengeringan.

$$\begin{aligned} Q_t &= W_{kb} \times cp_{kopi} \times (T_d - T_a) \\ &= 25 \text{ kg} \times 4.19 \text{ kJ/kg} \times (50 - 24)^\circ\text{C} \\ &= 2723.5 \text{ kJ} \end{aligned}$$

- b. Energi pemanasan air kopi (Q_w) didefinisikan sebagai panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur air yang terkandung dalam biji kopi ke temperatur udara pengeringan.

$$\begin{aligned} Q_w &= W_i \times cp_{air} \times (T_d - T_a) \\ &= 13.09524 \text{ kg} \times 4,17856 \text{ kJ/kg K} \times (50 - 24) \\ &= 1422.7 \text{ kJ} \end{aligned}$$

- c. Energi penguapan air kopi (Q_l) didefinisikan sebagai panas yang dibutuhkan untuk menguapkan air yang terkandung pada biji kopi ke udara. Energi ini dapat diketahui dengan mengalikan berat air yang akan ipindahkan dengan entalpi udara pada temperatur udara pengeringan.

$$\begin{aligned} Q_l &= W_r \times h_{fg} \\ &= 6.547619 \text{ kg} \times 2382.0 \text{ kJ/kg} \\ &= 15596.43 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Maka energi yang dibutuhkan untuk mengeringkan biji kopi kapasitas 25 kg adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} Q_d &= Q_t + Q_w + Q_l \\ &= 2723.5 \text{ kJ} + 1422.7 \text{ kJ} + 15596.43 \text{ kJ} \\ &= \mathbf{19742.63 \text{ kJ}} \end{aligned}$$

Energi total (Q_T) yang dibutuhkan selama proses pengeringan biji kopi dalam ruang pengering adalah akumulasi dari panas yang dibutuhkan untuk mengeringkan biji kopi, perpindahan panas konveksi ruang pengering serta rugi rugi yang ada pada ruang pengering. Ada beberapa rugi rugi yang terjadi dalam ruang pengering diantaranya rugi panas pada dinding dan ventilasi. Energi yang

hilang dari dinding dan ventilasi ruang pengering dapat diketahui dengan langkah langkah dibawah ini.

- d. Kehilangan energi melalui dinding ruang pengering didefinisikan sebagai panas yang hilang melalui dinding yang ada. Koefisien perpindahan panas menyeluruh dan luas penampang dinding merupakan faktor yang mempengaruhi besarnya panas yang hilang.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{\Delta x_1}{k_1}\right) + \left(\frac{\Delta x_2}{k_2}\right)}$$

$$U = \frac{1}{\left(\frac{0.002}{273}\right) + \left(\frac{0.018}{0.097}\right)}$$

$$= 5.388644 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Maka energi yang hilang dari dinding adalah:

$$Q_{lw} = U \cdot A \cdot \Delta T_{\text{menyeluruh}}$$

$$= 5.388644 \text{ W/m}^2 \text{ K} \cdot 5.417866 \text{ m}^2 \cdot 26 \text{ K}$$

$$= 759.0687 \text{ W}$$

$$= 0.7590687 \text{ kJ/s}$$

$$= 2732.64732 \text{ kJ/h}$$

- e. Energi yang hilang dari saluran pembuangan (Q_{lv}) didefinisikan sebagai panas yang hilang melalui saluran keluar ruang pengering. Faktor yang mempengaruhi hilangnya energi pada saluran udara keluar adalah laju aliran massa udara pada suhu pengeringan.

$$m = \rho \times v \times A$$

$$= 1.237949 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.5 \text{ m/s} \cdot 0.079796 \text{ m}^2$$

$$= 0.049392 \text{ kg/s}$$

Setelah laju aliran massa udara diketahui, maka energi yang hilang melalui saluran udara keluar dapat ditentukan.

$$\begin{aligned} Q_{lv} &= m \times h_g \\ &= 0.049392 \text{ kg/s} \cdot 2591.3 \text{ kJ/kg} \\ &= 127.9894 \text{ kJ/s} \\ &= 460761.84 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

Laju aliran energi konveksi dalam ruang pengering merupakan salah satu faktor dari energi total yang dibutuhkan selama proses pengeringan. Sifat sifat uap dievaluasi pada temperatur rata rata.

$$T_f = \frac{50 + 24}{2} = 37^\circ\text{C} = 310\text{K}$$

Dengan temperatur 310 K, pada tabel A-4 diperoleh data sebagai berikut:

$$\rho = 1.02828 \text{ kg/m}^3$$

$$Cp = 1.0086 \text{ kJ/kg.K}$$

$$k = 29.26 \times 10^{-3} \text{ kJ/kg.K}$$

$$Pr = 0.7014$$

$$\nu = 19.754 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\mu = 185.672 \times 10^{-7} \text{ Ns/m}^2$$

$$\beta = 1/T_f = 1/310\text{K} = 0.003225866452$$

Data diatas digunakan untuk menghitung perkalian bilangan *Grashoft Prandl* dengan jarak antara plat adalah 1.1 m (δ). Maka dapat dihitung dengan persamaan 2.7.

$$Gr_{\delta} Pr = \frac{g\beta(T_2 - T_1)\delta^3}{\nu^2} Pr$$

$$Gr_{\delta} Pr = \frac{9.81 \text{ m/s} \times 0.003225866452 \times (50 - 24) \times 0.752^3}{(19.754 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2} \times 0.7014$$

$$Gr_{\delta} Pr = 628923644.3 > 3,2 \times 10^5$$

Dari hasil perkalian bilangan *Grashof Prandl* didapat nilai C , n dan m dengan melihat tabel 2.5

$$C = 0.061$$

$$n = \frac{1}{3}$$

$$m = 0$$

Setelah didapat nilai dari diatas maka langkah selanjutnya adalah menghitung konduktivitas termal efektif (k_e) dengan menggunakan persamaan 2.12.

$$\frac{k_e}{k} = C(Gr_{\delta} Pr)^n \left(\frac{L}{\delta}\right)^m$$

$$k_e = C(Gr_{\delta} Pr)^n \left(\frac{L}{\delta}\right)^m k$$

$$k_e = 0.061 \times (628923644.3)^{1/3} \times (29.26 \times 10^{-3})$$

$$k_e = 1.518928269$$

Maka perpindahan panas konveksi dalam ruang pengering dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.11.

$$Q_{kv} = \frac{k_e A (T_2 - T_1)}{\delta}$$

$$Q_{kv} = \frac{1.518928269 \times 5.417866 \times (50 - 24)}{0.752}$$

$$Q_{kv} = 284.5263929 \text{ kJ}$$

Maka perancangan energi yang dibutuhkan untuk mengeringkan biji kopi dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan :

$$\begin{aligned} Q_T &= Q_d + Q_{kv} + (Q_{lw} \times 1 \text{ hour}) + (Q_{lv} \times 1/4 \text{ hour}) \\ &= 19742.63 \text{ kJ} + 284.526 \text{ kJ} + (2732.647 \text{ kJ/h} \times 1 \text{ h}) + (460761.84 \text{ kJ/h} \times 1/4 \text{ h}) \\ &= 137950.263 \text{ kJ} \end{aligned}$$

d. Perhitungan Perpindahan Panas Konveksi Perancangan

Setelah dimensi ruang pengering didapat dari perhitungan, maka nilai perpindahan panas konveksi perancangan yang terjadi didalam ruang pengering dapat dihitung dengan langkah sebagai berikut:

1. Menentukan sifat sifat udara yang melalui rak pengering dihitung pada suhu udara rata rata ruang pengering (T_f), massa jenis udara pada temperatur T_f (ρ_f) dan β .

$$T_f = \frac{60 + 30}{2} = 45^\circ\text{C} = 318\text{K}$$

$$\rho = \frac{p}{RT_f} = \frac{101325}{287 \times 318} = 1.11 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{318} = 0.003145 \text{ K}^{-1}$$

2. Setelah sifat sifat udara diketahui maka dapat diperoleh nilai (μ), (k), dan bilangan Prandl (Pr) dari melihat tabel A-4

$$\mu = 1.93 \times 10^{-5} \text{ kg} / \text{m.s}$$

$$k = 0.0276 \text{ W} / \text{m}.\text{C}$$

$$Pr = 0.704$$

3. Dengan menggunakan persamaan dibawah ini diperoleh angka Rayleigh.

$$Ra = Gr.Pr$$

$$Ra = \frac{g\rho^2\beta(T_{\infty} - T_{out})(\Delta H)^3}{\mu^2} Pr$$

$$Ra = \frac{9.81 \times 1.11^2 \times 0.003145 \times (60 - 30) \times 0.056^3}{(1.93 \times 10^{-5})^2} \cdot 0.704$$

$$Ra = 537658.2727$$

4. Menentukan angka Nusselt dengan menggunakan persamaan

$$Nu = C(Ra)^n \left(\frac{L}{\Delta H} \right)^m$$

$$Nu = 0.197 \times (537658.2727)^{1/4} \times \left(\frac{0.8}{9 \times 0.056} \right)^{-1/9}$$

$$Nu = 5.067541397$$

5. Sehingga perpindahan panas konveksi dapat ditentukan dengan persamaan:

$$q = \frac{Nu k}{\Delta H} A \Delta T$$

$$q = \frac{5.067541397 \times 0.0267}{0.056} \times (0.8 \times 0.6) \times (60 - 30)$$

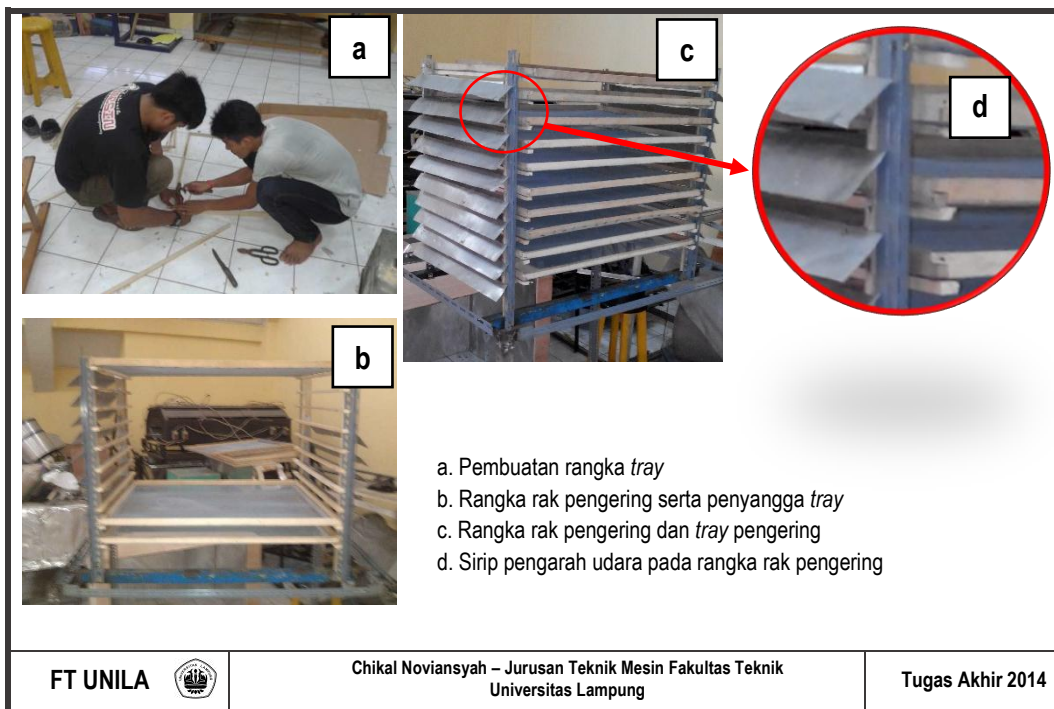
$$q = 35.1832159.W$$

3.3.2 Fabrikasi Ruang Pengering

Proses pembuatan ruang pengering dilakukan menggunakan dimensi yang telah diperoleh dalam perancangan. Setelah didapat dimensi, maka dilakukan proses visualisasi dengan menggunakan *software* gambar yaitu **Autodesk Inventor Profesional 2014™** dengan lisensi produk **Student Version**. Proses visualisasi dilakukan dengan cara membuat bentuk 3D dari ruang pengering.

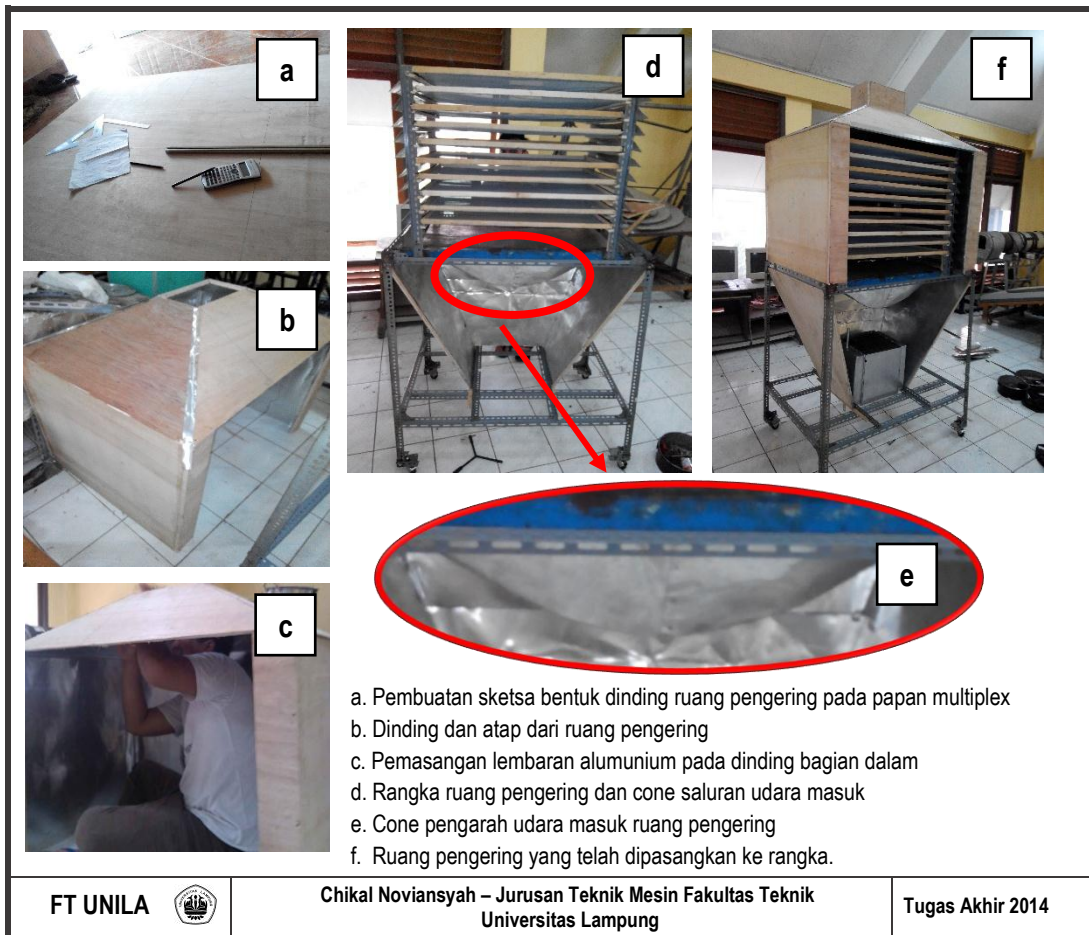
Setelah model 3D dari ruang pengering selesai, maka dibuat *blueprint* dari gambit tersebut untuk proses fabrikasi alat.

Tahap pertama dari proses fabrikasi ini adalah pembuatan *tray* . Dimensi yang telah didapat dari hasil perancangan dan mengacu pada gambar 3.3 untuk membuat *tray* rak pengering. *Tray* dibuat dengan menggunakan kayu profil ukuran 30 x 10 mm sebagai rangkanya, sedangkan untuk lapisan penampungnya digunakan kawat jala dengan dengan ukuran mesh 5 mm. Setelah *tray* selesai dibuat, maka langkah selanjutnya adalah membuat rangka rak pengering. Rangka rak pengering dibuat dengan menggunakan besi siku ukuran 30x30x5 mm sebagai tiang. Sedangkan penyangga dari *tray* adalah kayu profil yang dipasang dengan jarak yang mengacu pada gambar 3.3 . Selain itu, pada rangka rak pengering dipasangkan juga sirip sirip pengarah udara yang berguna untuk mengarahkan udara agar distribusi aliran udara dapat merata. Secara jelas tahap ini dapat dilihat pada gambar 3.15 dibawah ini.



Gambar 3.15 Pembuatan rak pengering.

Tahap selanjutnya adalah membuat dinding dan atap dari ruang pengering. Bahan material yang digunakan adalah papan multiplek dengan ukuran tebal 18 mm. Selain itu digunakan pula lembaran alumunium dengan tebal 0.2 mm sebagai lapisan dalam ruang pengering. Hal tersebut dilakukan agar heat loss pada dinding ruang pengering tidak terlalu besar. Sedangkan pada atap ruang pengering dibuat saluran udara keluar. Dimensi dan bentuk dari dinding ruang pengering mengacu pada gambar 3.13. Langkah langkah pada tahap ini dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.16 Pembuatan dinding dan rangka ruang

Langkah selanjutnya adalah membuat rangka ruang pengering. Rangka ruang pengering dibuat dengan menggunakan besi siku berlubang dengan ukuran 30x30x3 mm. Pemilihan besi siku berlubang untuk memudahkan dalam sambungan antar besi rangka. Struktur dari rangka pun diperkuat dengan menggunakan besi lempengan pada setiap sambungan rangka. Pada rangka ruang pengering dibuat pula dudukan untuk *heat exchanger* serta cone pengarah udara masuk. Dimensi dan bentuk dari bagian yang dibuat mengacu pada gambar 3.12..

Langkah terakhir dari proses fabrikasi ruang pengering adalah tahap *finishing*. Pada tahap ini dibuat pintu dan pengecatan ruang pengering. Pintu dibuat dengan menambahkan jendela di bagian tengahnya. Jendela ini berfungsi untuk memudahkan dalam pemantauan biji kopi pada saat proses pengeringan. Selain itu, dinding ruang pengering dicat dengan menggunakan cat *politur*. Hal ini bertujuan agar dinding tahan terhadap gangguan rayap. Langkah ini dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

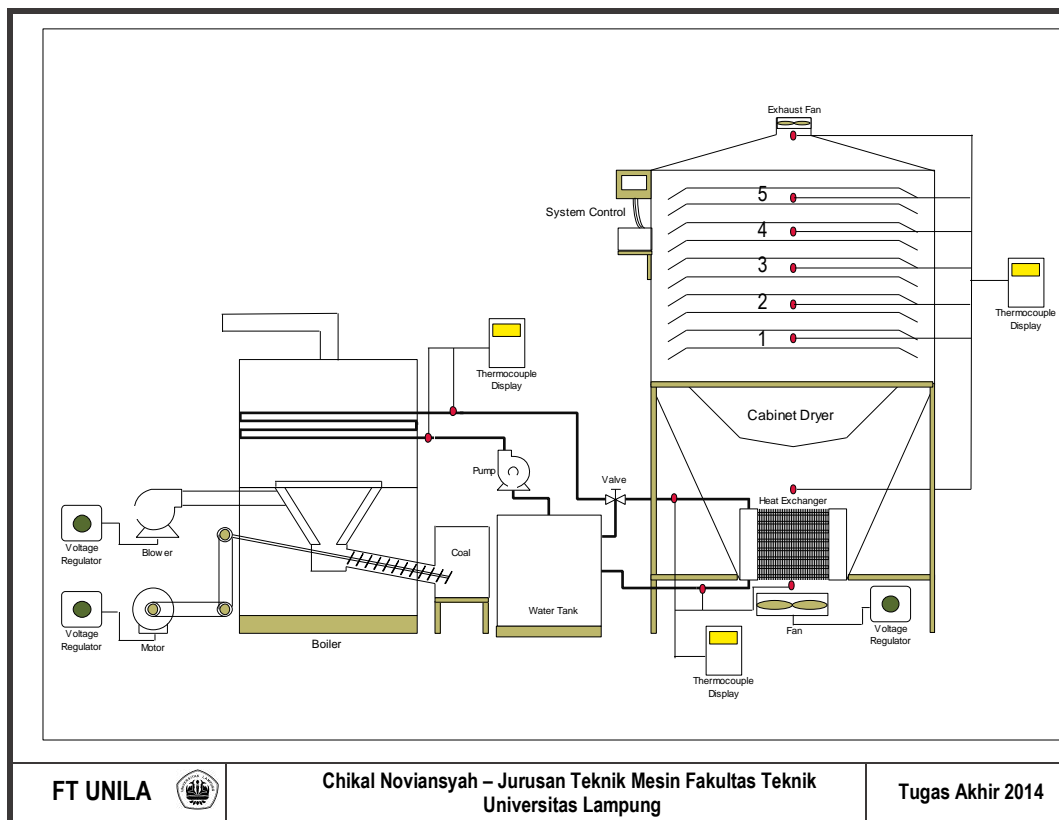


Gambar 3.17 *Finishing* ruang pengering

3.3.3 Instalasi Peralatan

Setelah fabrikasi selesai, dilanjutkan ke tahap instalasi peralatan yang harus dilakukan sebelum pengujian. Kegiatan ini antara lain :

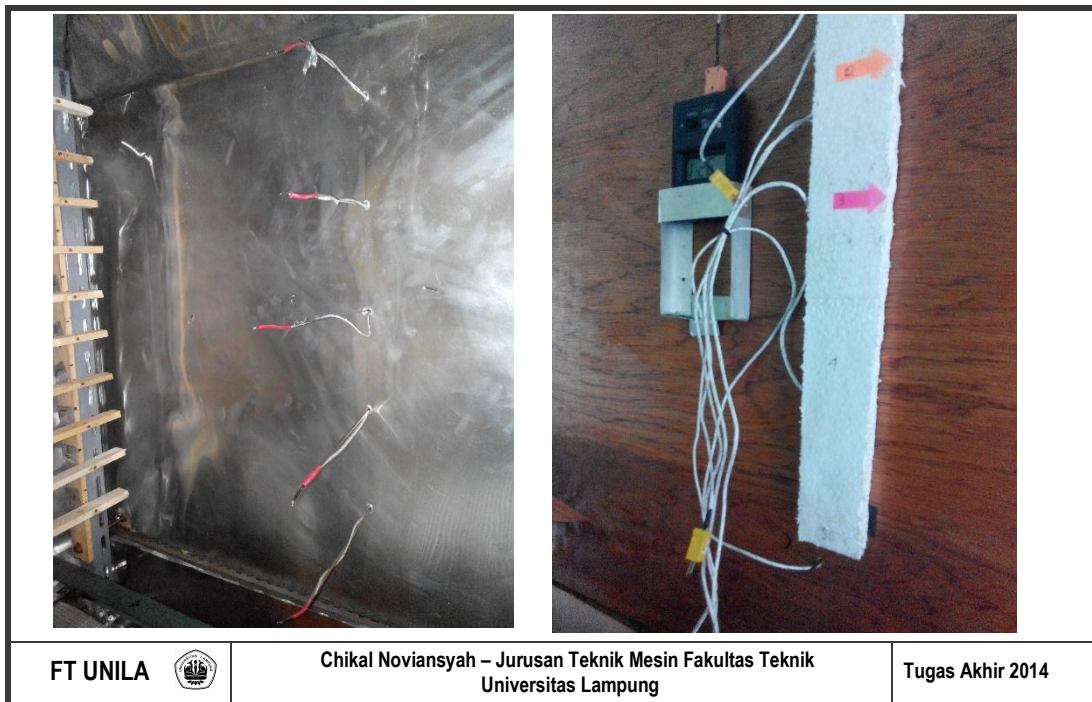
- a. Perakitan dan penyambungan komponen utama alat pengering kopi yaitu: *heat exchanger – fan – exhaust fan*, *voltage regulator* untuk *fan*, dan perangkat *boiler* sebagai pengganti air geothermal.
- b. Pemasangan selubung isolator pada setiap celah bagian yang ada. Hal ini dilakukan agar rugi rugi panas yang terjadi tidak terlalu besar.



Gambar 3.18 Instalasi pengujian ruang pengering.

- c. Untuk memvariasikan laju aliran udara masuk ruang pengering digunakan *voltage regulator* 3 kVa

- d. Menghubungkan termokopel yang digunakan untuk mengukur distribusi temperatur di setiap zona pengukuran pada *display*



Gambar 3.19 Pemasangan kabel termokopel pada ruang pengering.

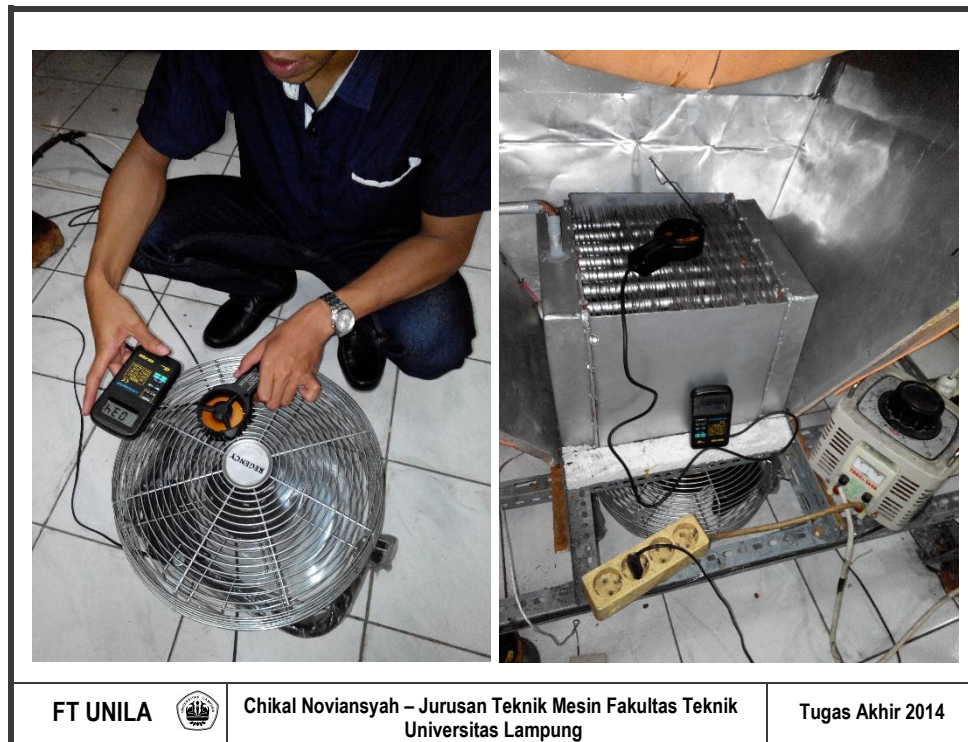
3.3.4 Kalibrasi

Persiapan selanjutnya adalah kalibrasi sistem menggunakan instrumentasi pengukuran. Fenomena yang perlu dikalibrasi adalah laju aliran udara masuk ruang pengering dan temperatur awal ruangan rata rata.

a. Laju Aliran Udara

Untuk efektifitas waktu, pengukuran laju aliran udara masuk ruang pengering dilaksanakan sebelum pengujian. *Anemometer* jenis AM-4200 Lutron digunakan untuk mengukur *flowrate* tersebut, melalui celah *heat exchanger* berdasarkan fungsi kecepatan aliran (m/s). Mengacu buku petunjuk alat, satuan kecepatan pada *anemometer* dapat diubah menjadi

ft/min atau km/jam. Selain itu *range* kecepatan aliran yang dapat diukur adalah 0,8-30 m/s. Berikut adalah hasil kalibrasi *flowrate* suplai udara masuk ruang pengering.



Gambar 3.20 Kalibrasi *flowrate* udara masuk

Tabel 3.6 Hasil kalibrasi *flowrate*

No.	Beda Potensial (V)	Kecepatan aliran (m/s)	Debit (m ³ /s)	Massa Jenis (kg/m ³)	Laju aliran massa udara (kg/s)
1	200	4.8	4.14	1.14476	0.494536
2	175	4.4	3.96	1.14476	0.453325
3	150	3.7	3.33	1.14476	0.381205
4	125	2.2	1.98	1.14476	0.226662
5	100	-	-	-	-

b. Temperatur udara ruangan dengan termokopel

Agar data temperatur yang didapat pada proses pengujian akurat, maka kabel termokopel yang digunakan dalam ruang pengering harus pada kondisi yang seragam. Cara untuk mengetahuinya adalah dengan

mencobanya pada air mendidih dan pada es batu. Apabila temperatur yang ditunjukkan pada *display* sama, maka temokopel dalam keadaan yang seragam.

3.3.5 Pengujian Ruang Pengering

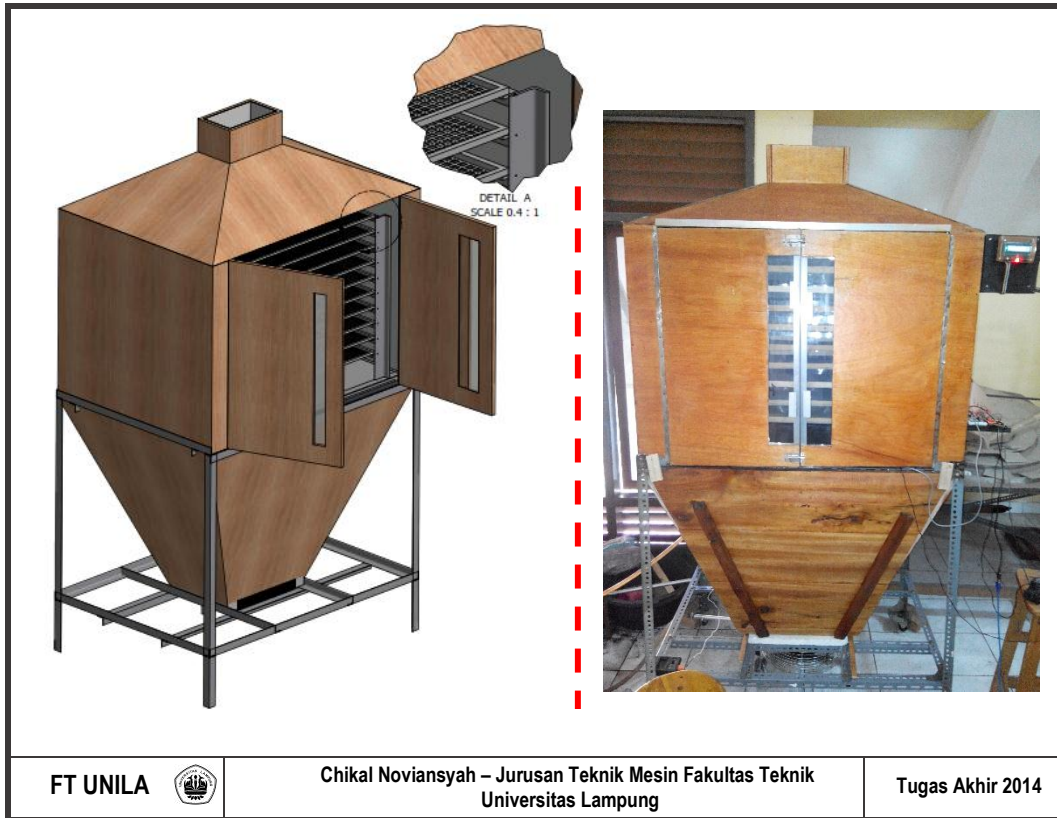
Secara makro, pengujian terbagi dalam 2 tahap. Tahap pertama adalah, pengujian distribusi suhu di dalam ruang pengering dalam keadaan kosong. Selain itu waktu yang diperlukan untuk mencapai suhu konstan pada 50°C. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui karakteristik ruang pengering, dan kondisi terbaik untuk pengujian dengan menggunakan beban biji kopi.

Berikutnya dilanjutkan pada pengujian ruang pengering dengan menggunakan beban biji kopi. Pengujian ini bertujuan untuk mengurangi kadar air dari biji kopi yang awalnya 55% menjadi 12%. Acuan waktu yang digunakan dalam pengujian ini adalah dari hasil perhitungan kesetimbangan energi,. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui distribusi temperatur dalam ruang pengering, dan hasil dari proses pengeringan.

3.3.6 Peralatan dan Bahan

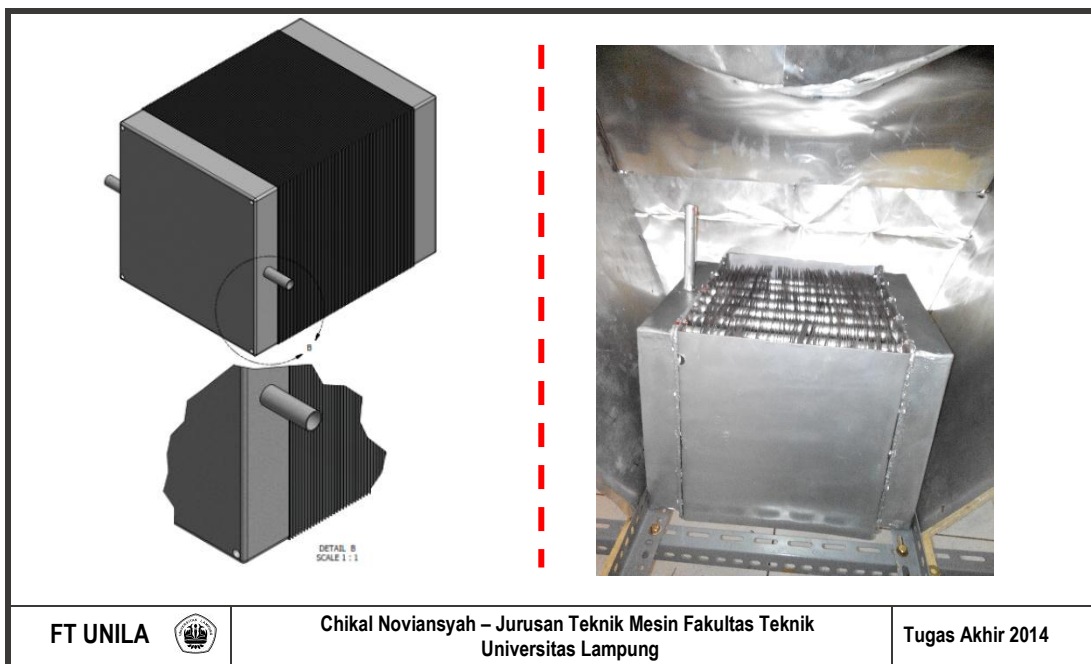
a. Ruang Pengering (*Cabinet Dryer*)

Ruang pengering yang digunakan untuk pengujian adalah tipe *cabinet dryer*. Ruang pengering ini terdiri dari sepuluh buah rak pengering yang disusun secara vertikal, dinding, atap, pintu, *cone* pengarah udara dan rangka penyangga ruang pengering. Kapasitas maksimal dari ruang pengering adalah 25 kg pada keseluruhan rak.



Gambar 3.21 Rancangan ruang pengering dan yang telah jadi

b. Heat Exchanger (Type Compact)



Gambar 3.22 Heat Exchanger

Heat exchanger digunakan sebagai alat penukar panas air ke udara. Pada prinsipnya, alat ini menukar panas air yang dihasilkan dari boiler ke udara yang dihembuskan menggunakan kipas, sehingga temperatur dari udara meningkat. Udara panas ini yang digunakan untuk mengeringkan biji kopi.

c. Kipas

Kipas digunakan untuk menghembuskan udara melewati heat exchanger masuk kedalam ruang pengering. Kecepatan putaran kipas diatur menggunakan voltage regulator untuk memvariasikan laju aliran udara.

d. *Regulator* Tegangan

Untuk pengambilan data, digunakan *voltage regulator* yang tersambung pada dua kipas. *Regulator* berfungsi untuk memvariasikan laju aliran udara masuk ruang pengering. Tujuannya adalah, guna mengetahui karakteristik pengeringan yang terbaik pada ruang pengering.

e. Termokopel Tipe K dan Display

Termokopel dengan spesifikasi *range* : $-50^{\circ}\text{C} - 1300^{\circ}\text{C}$ dipergunakan untuk mengukur temperatur pada setiap bagian rak, saluran masuk serta saluran keluar udara pengering Untuk membaca sinyal dari termokopel, alat ini disambungkan pada *display*. Nilai temperatur yang tertera pada *display* juga dapat diubah dalam satuan fahrenheit maupun kelvin dengan ketelitian satu digit dibelakang koma.

f. Sensor Kelembaban Udara

Sensor kelembaban udara digunakan untuk mengetahui kelembaban udara di dalam ruang pengering.

g. Timbangan

Timbangan digunakan untuk mengetahui berat awal dan berat akhir dari biji kopi pada proses pengeringan. Maka dari itu, nilai dari kadar air biji kopi dapat ditentukan

h. *Stopwatch*

Dalam pengambilan data, alat ini dipakai untuk mengukur durasi pengeringan pada variasi laju aliran udara dan pada saat pengeringan biji kopi.

i. *Anemometer*

Nilai laju aliran udara panas yang masuk ruang pengering diperoleh dengan mengukur kecepatan aliran udara menggunakan *anemometer* yang selanjutnya dikalikan dengan massa jenis udara dan ukuran saluran yang dilaluinya.



Gambar 3.23 Peralatan Pengujian

j. Grain Moisture Content

Kadar air biji kopi dapat diketahui dengan menggunakan alat *grain moisture content*. Alat ini dapat mengukur kadar air dari beberapa hasil pertanian yang berbentuk biji bijian. Kapasitas ukur dari alat ini adalah 7 - 40 % dari bahan yang akan diukur.



Gambar 3.24 *Grain moisture content*