

LAMPIRAN II PERHITUNGAN

1. Menghitung Penggunaan Bahan Bakar

a. Menghitung Massa *Fuel Gas* (LPG)

Laju alir *fuel gas* masuk *furnace* = 5 liter/menit

Menghitung densitas *fuel gas*

$$\begin{aligned} T &= 30^{\circ}\text{C} + 273 \\ &= 303 \text{ K} \end{aligned}$$

$$P \text{ abs} = 1 \text{ atm}$$

$$R = 0,0825 \frac{\text{liter} \times \text{atm}}{\text{mol K}}$$

$$\text{BM LPG} = 53,8 \text{ gr/mol}$$

$$pV = nRT \quad (\text{Sumber: Hougen, 1943})$$

$$pV = \frac{gr}{BM} RT$$

$$pV = \frac{\rho \cdot V}{BM} R \cdot T$$

$$p \cdot \text{BM} = \rho \cdot RT$$

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{P \text{ abs} \times \text{BM}}{R \times T} \\ &= \frac{1 \text{ atm} \times 53,8 \text{ gr/mol}}{0,0825 \frac{\text{liter} \times \text{atm}}{\text{mol K}} \times 303 \text{ K}} \end{aligned}$$

$$= 2,152 \text{ gr/liter}$$

$$= 2152,215 \text{ kg/liter}$$

$$= 2152,215 \text{ kg/liter} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ liter}}$$

$$= 2,152 \text{ kg/m}^3$$

$$m = \rho \times \text{laju alir } \textit{fuel gas}$$

$$= 2,152 \text{ gr/liter} \times 5 \text{ liter/menit}$$

$$= 10,76 \text{ gr/menit}$$

$$= 0,01076 \text{ kg/menit} \times 240 \text{ menit}$$

$$= 2,582 \text{ kg/4 jam}$$

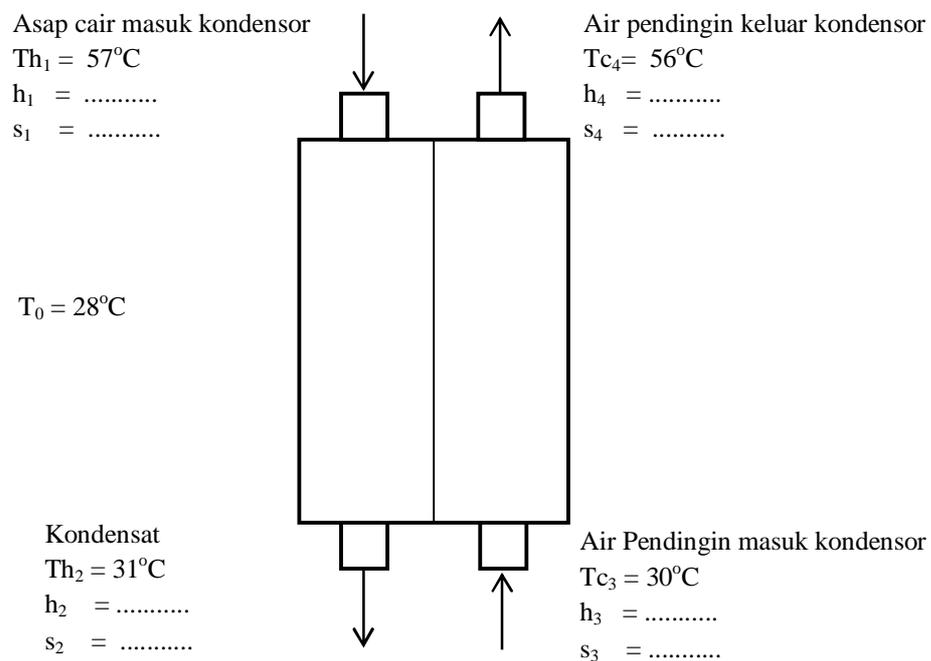
- b. Dengan cara perhitungan yang sama, diperoleh massa *fuel gas* yang digunakan untuk laju alir bahan bakar 6 dan 7 liter/menit dapat dilihat pada Tabel 17.

Tabel 17. Penggunaan Bahan Bakar

Laju Alir Bahan Bakar (Liter/menit)	Massa <i>Fuel Gas</i>	
	(Kg/menit)	(Kg/4 jam)
5	0,01076	2,582
6	0,01290	3,098
7	0,01506	3,615

2. Menghitung Kehancuran Exergi

a. Perhitungan Laju Alir Bahan Bakar 5 liter/menit



Gambar 14. Diagram Alir Kondensor Laju Alir Bahan Bakar 5 liter/menit

Menghitung penghancuran exergi pada kondensor. Adapun tahapan-tahapan menghitung penghancuran exergi pada kondensor pirolisis biomassa, yaitu:

- Menghitung entalpi air pendingin masuk kondensor pada temperatur 30°C. Harga entalpi diperoleh dari tabel uap adalah sebesar 125,79°C.

Tabel 18. *Saturated Water Table*

Temperatur (°C)	Entalpi (kJ/kg) hf	Entropi (kJ/kg.K) sf
30	125,79	0,4369
35	146,68	0,5053
40	167,57	0,5725
45	188,45	0,6387
50	209,33	0,7038
55	230,23	0,7679
60	251,13	0,8312

Sumber: Moran dkk, 2004.

- Menghitung entropi air pendingin masuk kondensor pada temperatur 30°C. Harga entropi diperoleh dari tabel uap adalah sebesar 0,4369 kJ/kg.K.
- Menghitung entalpi air pendingin keluar kondensor pada temperatur 56°C. Temperatur 56°C berada di antara 55°C dan 60°C, sehingga perlu dilakukan interpolasi.

Didapat entalpi dari hasil interpolasi tabel uap termodinamika sebagai berikut:

$$y = y_1 + \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) (y_2 - y_1)$$

(Sumber: Termodinamika Teknik 1, 2012)

$$\begin{aligned} h_f &= h_{f55^\circ\text{C}} + \frac{56-55}{60-55} \times (h_{f60^\circ\text{C}} - h_{f55^\circ\text{C}}) \\ &= 230,23 \text{ kJ/kg} + \frac{56-55}{60-55} \times (251,13 - 230,23) \text{ kJ/kg} \\ h_4 &= 234,44 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

- Menghitung entropi air pendingin keluar kondensor pada temperatur 56°C. Temperatur 56°C berada di antara 55°C dan 60°C, sehingga perlu dilakukan interpolasi.

Didapat entropi dari hasil interpolasi tabel uap termodinamika sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 s_f &= s_{f55}^{\circ C} + \frac{56-55}{60-55} \times (s_{f60}^{\circ C} - s_{f55}^{\circ C}) \\
 &= 0,7679 \text{ kJ/kg} + \frac{56-55}{60-55} \times (0,8312 - 0,7679) \text{ kJ/kg} \\
 s_4 &= 0,780752 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

- Menghitung entalpi asap cair (fenol) masuk kondensor pada temperatur 57°C. Entalpi fenol diperoleh dari Grafik Fenol (Handbook of Thermodynamic Diagrams, 1996) halaman 128. Didapatkan harga entalpi fenol pada temperatur 57°C adalah sebesar -668,5 Btu/lb.

Konversi satuan -668,5 Btu/lb ke kJ/kg:

$$h_1 = -668,5 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \times \frac{1,055}{0,4536} = -1555 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- Menghitung entropi asap cair (fenol) masuk kondensor pada temperatur 57°C. Entropi fenol diperoleh dari hasil perhitungan *software* Aspen Hysys. Sehingga didapatkan harga entropi fenol pada temperatur 57°C adalah sebesar -1,052 kJ/kg K.

Dengan cara yang sama, hasil entalpi dan entropi asap cair (fenol) keluar kondensor dan air pendingin keluar kondensor, dapat dilihat pada Tabel 19 berikut.

Tabel 19. Hasil Perhitungan Entalpi dan Entropi pada Air dan Asap Cair dengan Laju Alir Bahan Bakar 5 liter/menit

Komponen	Temperatur (°C)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg.K)
Asap cair masuk kondensor	57	-1555	-1,052
Kondensat	31	-1601	-1,197
Air pendingin masuk kondensor	30	125,79	0,4369
Air pendingin keluar kondensor	56	234,44	0,780752

- Menghitung laju exergi ke dalam unit penukar kalor melalui aliran uap

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{asap cair}} &= \text{massa asap cair} / \text{volume asap cair} \\
 &= 1,65 \text{ kg} / 1,39 \text{ liter} \\
 &= 1,18705 \text{ kg/liter}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Volume asap cair} &= 1,39 \text{ liter} / 4 \text{ jam} \\
 &= 0,3475 \text{ liter/jam}
 \end{aligned}$$

$$= 0,005791 \text{ liter/menit}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_h &= \text{Volume asap cair} \times \rho_{\text{asap cair}} \\ &= 0,005791 \text{ liter/menit} \times 1,18705 \text{ kg/liter} \\ &= 0,0068742 \text{ kg/menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\text{laju exergi melalui aliran uap}] &= (\dot{m}_h (e_{f1} - e_{f2})) \quad (\text{Sumber: E. John, 1995}) \\ &= \dot{m}_h (h_1 - h_2) - T_0 (s_1 - s_2) \\ &= 0,0068742 \text{ kg/menit} ((-1555) - (-1601)) \text{ kJ/kg} - 301 \text{ K} ((-1,052) - (-1,197)) \\ &\quad \text{kJ/kg.K} \\ &= 0,016188741 \text{ kJ/menit} \end{aligned}$$

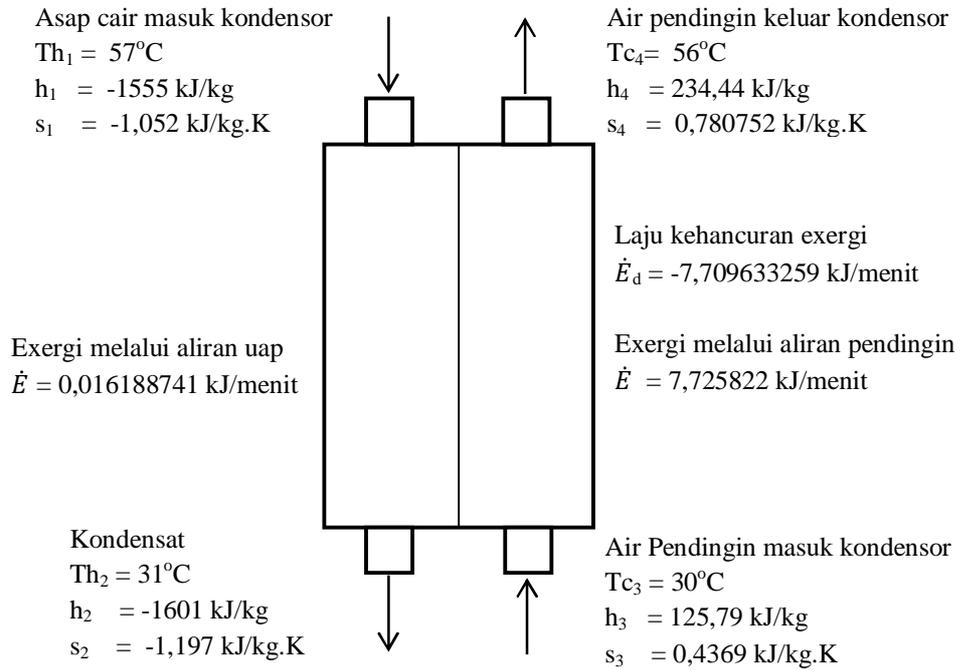
- Menghitung Laju Exergi pada Aliran Pendingin

$$\begin{aligned} [\text{laju exergi melalui aliran pendingin}] &= (\dot{m}_c (e_{f4} - e_{f3})) \quad (\text{Sumber: E. John, 1995}) \\ &= \dot{m}_c (h_4 - h_3) - T_0 (s_4 - s_3) \\ &= 1,5 \text{ kg/menit} (234,44 - 125,79) \text{ kJ/kg} - 301 \text{ K} (0,780752 - 0,4369) \\ &\quad \text{kJ/kg.K} \\ &= 7,725822 \text{ kJ/menit} \end{aligned}$$

- Menghitung Laju Kehancuran Exergi pada Kondensor

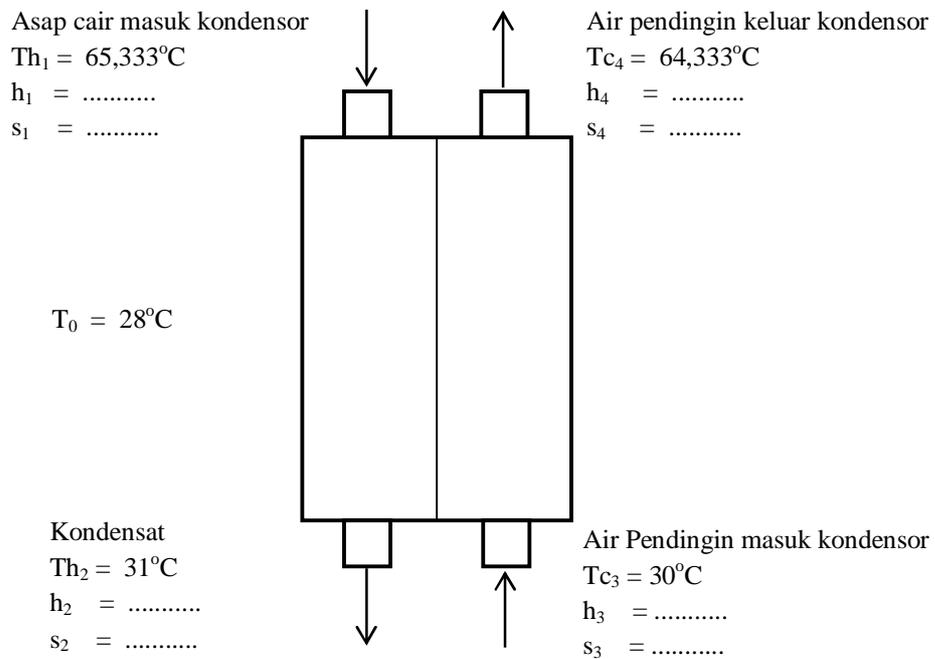
Laju kehancuran exergi dapat dihitung dengan

$$\begin{aligned} E_d &= \dot{m}_h (e_{f1} - e_{f2}) - \dot{m}_c (e_{f4} - e_{f3}) \quad (\text{Sumber: E. John, 1995}) \\ &= 0,016188741 \text{ kJ/menit} - 7,725822 \text{ kJ/menit} \\ &= -7,709633259 \text{ kJ/menit} \end{aligned}$$



Gambar 15. Hasil Perhitungan pada Kondensor Laju Alir Bahan Bakar 5 liter/menit

b. Perhitungan Laju Alir Bahan Bakar 6 liter/menit



Gambar 16. Diagram Alir Kondensor Laju Alir Bahan Bakar 6 liter/menit

Menghitung penghancuran exergi pada kondensor. Adapun tahapan-tahapan menghitung penghancuran exergi pada kondensor pirolisis biomassa, yaitu:

- Menghitung entalpi air pendingin masuk kondensor pada temperatur 30°C. Harga entalpi diperoleh dari tabel uap adalah sebesar 125,79°C.

Tabel 20. *Saturated Water Table*

Temperatur (°C)	Entalpi (kJ/kg) hf	Entropi (kJ/kg.K) sf
30	125,79	0,4369
35	146,68	0,5053
40	167,57	0,5725
50	209,33	0,7038
55	230,23	0,7679
60	251,13	0,8312
65	272,06	0,8935

Sumber: Moran dkk, 2004.

- Menghitung entropi air pendingin masuk kondensor pada temperatur 30°C. Harga entropi diperoleh dari tabel uap adalah sebesar 0,4369 kJ/kg.K.
- Menghitung entalpi air pendingin keluar kondensor pada temperatur 64,333°C. Temperatur 64,333°C berada di antara 60°C dan 65°C, sehingga perlu dilakukan interpolasi. Didapat entalpi dari hasil interpolasi tabel uap termodinamika sebagai berikut:

$$y = y_1 + \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) (y_2 - y_1) \quad (\text{Sumber: Termodinamika Teknik 1, 2012})$$

$$\begin{aligned} h_f &= h_{f60}^{\circ\text{C}} + \frac{64,333-60}{65-60} \times (h_{f65}^{\circ\text{C}} - h_{f60}^{\circ\text{C}}) \\ &= 251,13 \text{ kJ/kg} + \frac{64,333-60}{65-60} \times (272,06 - 251,13) \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$h_4 = 269,322 \text{ kJ/kg}$$

- Menghitung entropi air pendingin keluar kondensor pada temperatur 64,333°C. Temperatur 64,333°C berada di antara 60°C dan 65°C, sehingga perlu dilakukan interpolasi. Didapat entropi dari hasil interpolasi tabel uap termodinamika sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 s_f &= s_{f60}^{\circ\text{C}} + \frac{64,333-60}{65-60} \times (s_{f65}^{\circ\text{C}} - s_{f60}^{\circ\text{C}}) \\
 &= 0,8312 \text{ kJ/kg} + \frac{64,333-60}{65-60} \times (0,8935 - 0,8312) \text{ kJ/kg} \\
 s_4 &= 0,885385 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Menghitung entalpi asap cair (fenol) masuk kondensor pada temperatur 65,333°C. Entalpi fenol diperoleh dari Grafik Fenol (Handbook of Thermodynamic Diagrams, 1996) halaman 128. Didapatkan harga entalpi fenol pada temperatur 65,333°C adalah sebesar -661,9 Btu/lb.

Konversi satuan -661,9 Btu/lb ke kJ/kg:

$$h_1 = -661,9 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \times \frac{1,055}{0,4536} = -1540 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Menghitung entropi asap cair (fenol) masuk kondensor pada temperatur 65,333°C. Entropi fenol diperoleh dari hasil perhitungan *software* Aspen Hysys. Sehingga didapatkan harga entropi fenol pada temperatur 65,333°C adalah sebesar -1,006 kJ/kg K.

Dengan cara yang sama, hasil entalpi dan entropi asap cair (fenol) keluar kondensor dan air pendingin keluar kondensor, dapat dilihat pada Tabel 21 berikut.

Tabel 21. Hasil Perhitungan Entalpi dan Entropi pada Air dan Asap Cair dengan Laju Alir Bahan Bakar 6 liter/menit

Komponen	Temperatur (°C)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg.K)
Asap cair masuk kondensor	65,333	-1540	-1,006
Kondensat	31	-1601	-1,197
Air pendingin masuk kondensor	30	125,79	0,4369
Air pendingin keluar kondensor	64,333	269,322	0,885385

Menghitung laju exergi ke dalam unit penukar kalor melalui aliran uap

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{asap cair}} &= \text{massa asap cair} / \text{volume asap cair} \\
 &= 1,71 \text{ kg} / 1,443 \text{ liter} \\
 &= 1,18503 \text{ kg/liter}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Volume asap cair} &= 1,443 \text{ liter} / 4 \text{ jam} \\
 &= 0,36075 \text{ liter/jam} \\
 &= 0,0060125 \text{ liter/menit}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_h &= \text{Volume asap cair} \times \rho_{\text{asap cair}} \\
 &= 0,0060125 \text{ liter/menit} \times 1,18503 \text{ kg/liter} \\
 &= 0,007125 \text{ kg/menit}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\text{laju exergi melalui aliran uap}] &= (\dot{m}_h (e_{f1} - e_{f2})) \quad (\text{Sumber: E. John, 1995}) \\
 &= \dot{m}_h (h_1 - h_2) - T_0 (s_1 - s_2) \\
 &= 0,007125 \text{ kg/menit} ((-1540) - (-1601)) \text{ kJ/kg} - 301 \text{ K} ((-1,006) - (-1,197)) \\
 &\quad \text{kJ/kg.K} \\
 &= 0,025001625 \text{ kJ/menit}
 \end{aligned}$$

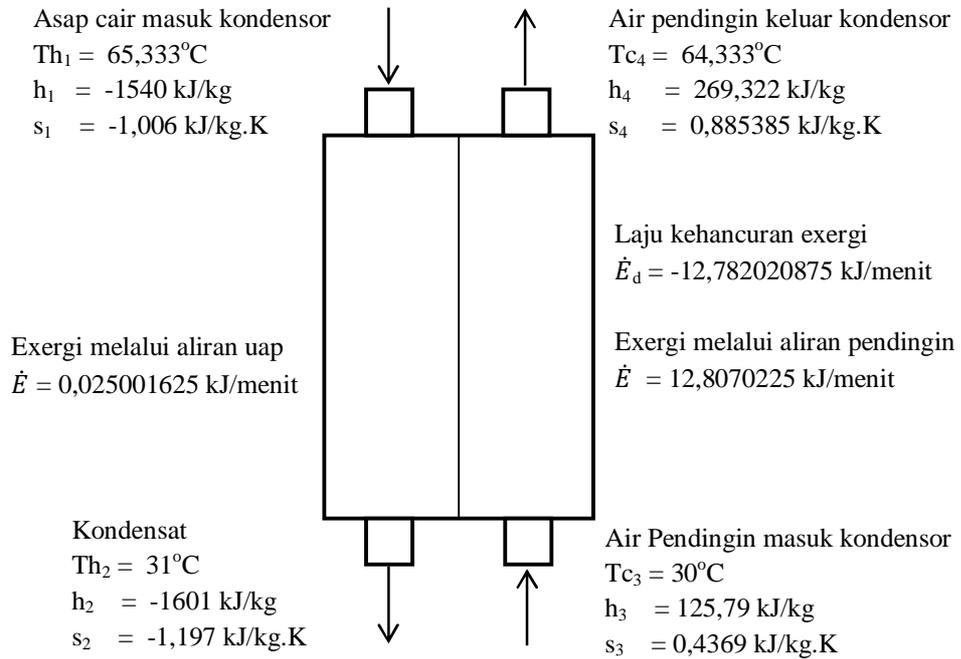
. Menghitung Laju Exergi pada Aliran Pendingin

$$\begin{aligned}
 [\text{laju exergi melalui aliran pendingin}] &= (\dot{m}_c (e_{f4} - e_{f3})) \quad (\text{Sumber: E. John, 1995}) \\
 &= \dot{m}_c (h_4 - h_3) - T_0 (s_4 - s_3) \\
 &= 1,5 \text{ kg/menit} ((269,322 - 125,79) \text{ kJ/kg} - 301 \text{ K} (0,885385 - 0,4369)) \\
 &\quad \text{kJ/kg.K} \\
 &= 12,8070225 \text{ kJ/menit}
 \end{aligned}$$

. Menghitung Laju Kehancuran Exergi pada Kondensor

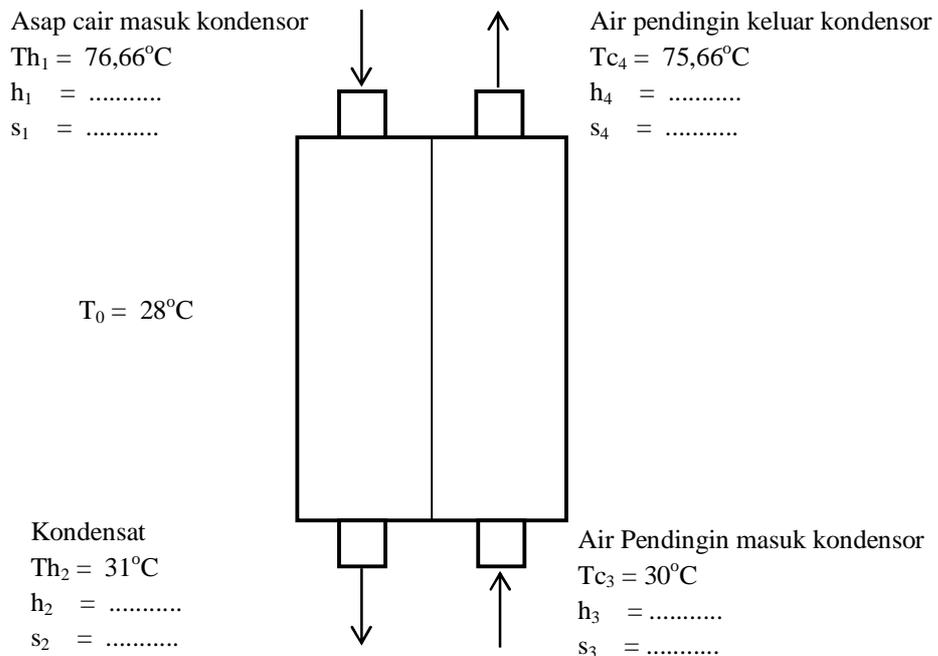
Laju kehancuran exergi dapat dihitung dengan

$$\begin{aligned}
 E_d &= \dot{m}_h (e_{f1} - e_{f2}) - \dot{m}_c (e_{f4} - e_{f3}) \quad (\text{Sumber: E. John, 1995}) \\
 &= 0,025001625 \text{ kJ/menit} - 12,8070225 \text{ kJ/menit} \\
 &= -12,782020875 \text{ kJ/menit}
 \end{aligned}$$



Gambar 17. Hasil Perhitungan pada Kondensor Laju Alir Bahan Bakar 6 liter/menit

c. Perhitungan Laju Alir Bahan Bakar 7 liter/menit



Gambar 18. Diagram Alir Kondensor Laju Alir Bahan Bakar 7 liter/menit

Menghitung penghancuran exergi pada kondensor. Adapun tahapan-tahapan menghitung penghancuran exergi pada kondensor pirolisis biomassa, yaitu:

- Menghitung entalpi air pendingin masuk kondensor pada temperatur 30°C. Harga entalpi diperoleh dari tabel uap adalah sebesar 125,79°C.

Tabel 22. *Saturated Water Table*

Temperatur (°C)	Entalpi (kJ/kg) hf	Entropi (kJ/kg.K) sf
30	125,79	0,4369
40	167,57	0,5725
50	209,33	0,7038
60	251,13	0,8312
70	292,98	0,9549
75	313,93	1,0155
80	334,91	1,0753

Sumber: Moran dkk, 2004.

- Menghitung entropi air pendingin masuk kondensor pada temperatur 30°C. Harga entropi diperoleh dari tabel uap adalah sebesar 0,4369 kJ/kg.K.
- Menghitung entalpi air pendingin keluar kondensor pada temperatur 75,66°C. Temperatur 75,66°C berada di antara 75°C dan 80°C, sehingga perlu dilakukan interpolasi.

Didapat entalpi dari hasil interpolasi tabel uap termodinamika sebagai berikut:

$$y = y_1 + \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) (y_2 - y_1) \quad (\text{Sumber: Termodinamika Teknik 1, 2012})$$

$$\begin{aligned} h_f &= h_{f75^\circ\text{C}} + \frac{75,66-75}{80-75} \times (h_{f80^\circ\text{C}} - h_{f75^\circ\text{C}}) \\ &= 313,93 \text{ kJ/kg} + \frac{75,66-75}{80-75} \times (334,91 - 313,93) \text{ kJ/kg} \\ h_4 &= 316,799 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

- Menghitung entropi air pendingin keluar kondensor pada temperatur 75,66°C. Temperatur 75,66°C berada di antara 75°C dan 80°C, sehingga perlu dilakukan interpolasi. Didapat entropi dari hasil interpolasi tabel uap termodinamika sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 s_f &= s_{f75^\circ\text{C}} + \frac{75,66-75}{80-75} \times (s_{f80^\circ\text{C}} - s_{f75^\circ\text{C}}) \\
 &= 1,0155 \text{ kJ/kg} + \frac{56-55}{60-55} \times (1,0753 - 1,0155) \text{ kJ/kg} \\
 s_4 &= 1,02371 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

- Menghitung entalpi asap cair (fenol) masuk kondensor pada temperatur 76,66°C. Entalpi fenol diperoleh dari Grafik Fenol (Handbook of Thermodynamic Diagrams, 1996) halaman 128. Didapatkan harga entalpi fenol pada temperatur 76,66°C adalah sebesar -652,9 Btu/lb.

Konversi satuan -661,9 Btu/lb ke kJ/kg:

$$h_1 = -652,9 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \times \frac{1,055}{0,4536} = -1519 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- Menghitung entropi asap cair (fenol) masuk kondensor pada temperatur 76,66°C. Entropi fenol diperoleh dari hasil perhitungan *software* Aspen Hysys. Sehingga didapatkan harga entropi fenol pada temperatur 76,66°C adalah sebesar -0,9447 kJ/kg K.

Dengan cara yang sama, hasil entalpi dan entropi asap cair (fenol) keluar kondensor dan air pendingin keluar kondensor, dapat dilihat pada Tabel 23 berikut.

Tabel 23. Hasil Perhitungan Entalpi dan Entropi pada Uap dan Asap Cair dengan Laju Alir Bahan Bakar 7 liter/menit

Komponen	Temperatur (°C)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg.K)
Asap cair masuk kondensor	76,66	-1519	-0,9447
Kondensat	31	-1601	-1,197
Air pendingin masuk kondensor	30	125,79	0,4369
Air pendingin keluar kondensor	75,66	316,799	1,02371

- Menghitung laju exergi ke dalam unit penukar kalor melalui aliran uap

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{asap cair}} &= \text{massa asap cair} / \text{volume asap cair} \\
 &= 1,79 \text{ kg} / 1,511 \text{ liter} \\
 &= 1,18464 \text{ kg/liter}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Volume asap cair} &= 1,511 \text{ liter} / 4 \text{ jam} \\
 &= 0,37775 \text{ liter/jam}
 \end{aligned}$$

$$= 0,0062958 \text{ liter/menit}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_h &= \text{Volume asap cair} \times \rho_{\text{asap cair}} \\ &= 0,0062958 \text{ liter/menit} \times 1,18464 \text{ kg/liter} \\ &= 0,0074583 \text{ kg/menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\text{laju exergi melalui aliran uap}] &= (\dot{m}_h (e_{f1} - e_{f2})) \quad (\text{Sumber: E. John, 1995}) \\ &= \dot{m}_h (h_1 - h_2) - T_0 (s_1 - s_2) \\ &= 0,0074583 \text{ kg/menit} ((-1519) - (-1601)) \text{ kJ/kg} - 301 \text{ K} ((-0,9447) - \\ &\quad (-1,197)) \text{ kJ/kg.K} \\ &= 0,04518014391 \text{ kJ/menit} \end{aligned}$$

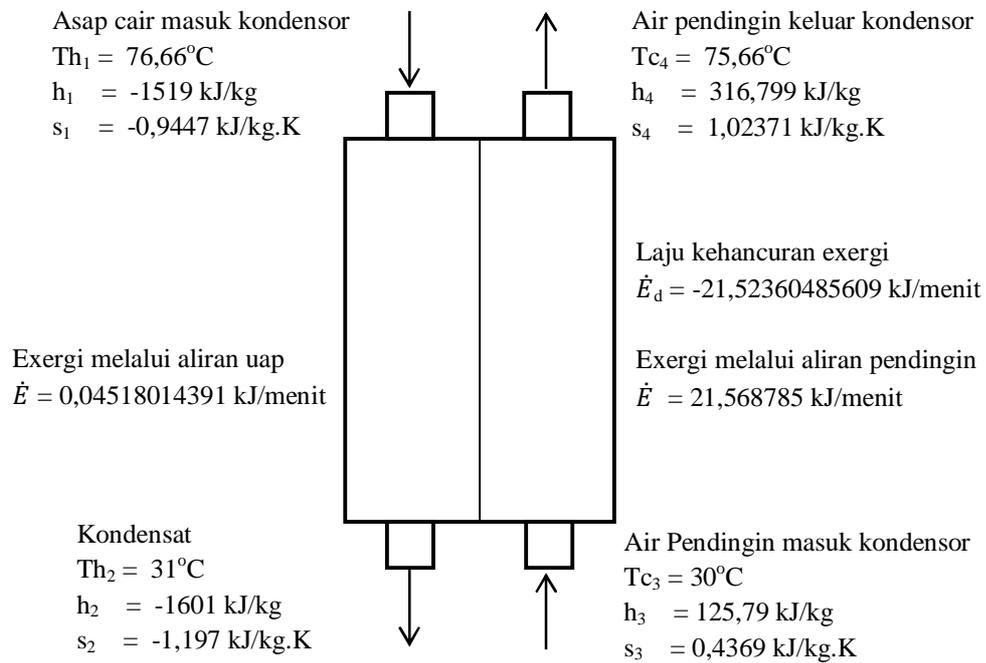
- Menghitung Laju Exergi pada Aliran Pendingin

$$\begin{aligned} [\text{laju exergi melalui aliran pendingin}] &= (\dot{m}_c (e_{f4} - e_{f3})) \quad (\text{Sumber: E. John, 1995}) \\ &= \dot{m}_c (h_4 - h_3) - T_0 (s_4 - s_3) \\ &= 1,5 \text{ kg/menit} ((316,799 - 125,79) \text{ kJ/kg} - 301 \text{ K} (1,02371 - 0,4369) \\ &\quad \text{kJ/kg.K}) \\ &= 21,568785 \text{ kJ/menit} \end{aligned}$$

- Menghitung Laju Kehancuran Exergi pada Kondensor

Laju kehancuran exergi dapat dihitung dengan

$$\begin{aligned} E_d &= \dot{m}_h (e_{f1} - e_{f2}) - \dot{m}_c (e_{f4} - e_{f3}) \quad (\text{Sumber: E. John, 1995}) \\ &= 0,1415848 \text{ kJ/menit} - 0,003017045 \text{ kJ/menit} \\ &= -21,52360485609 \text{ kJ/menit} \end{aligned}$$



Gambar 19. Hasil Perhitungan pada Kondensor Laju Alir Bahan Bakar 7 liter/menit

d. Hasil Perhitungan Laju Kehancuran Exergi di Kondensor

Tabel 24. Hasil Perhitungan Kehancuran Exergi di Kondensor

Laju Alir Bahan Bakar (Liter/menit)	Kehancuran Exergi (kJ/menit)
5	-7,709633259
6	-12,782020875
7	-21,523604856