

LAJU ALIRAN KONDUKSI KONVEKSI MELALUI PIPA API DAN EVAPORATOR PADA KETEL UAP DI PT. PERKEBUNAN NUSANTARA ARSO - JAYAPURA

Thomas Kbarek

Dosen Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Kebumian
Universitas Sains Dan Teknologi Jayapura

Abstrak

Perpindahan kalor ialah ilmu yang mempelajari tentang perpindahan energi yang terjadi karena perbedaan suhu di antara benda atau material. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya perpindahan kalor secara konduksi dan konveksi pada api boiler dan evaporator dari boiler.

Penelitian ini dilakukan dengan cara mengamati dan mencatat perubahan temperatur melalui panel instrumen temperatur, mengukur diameter dalam dan diameter luar pipa api boiler serta mengukur panjang pipa. Hasil pengambilan data lapangan kemudian dianalisa untuk mendapatkan data tentang perpindahan panas yang terjadi pada boiler.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perpindahan kalor pada pipa api boiler secara konduksi sebesar 1028,625 Watt, secara konveksi 469,2 Watt. Sedangkan pada evaporator besarnya panas uap superheated sebesar 2917,6 Watt, pemanas sekunder 4917,5 Watt dan pemanas udara sebesar 7095,25 Watt.

Kata kunci : Perpindahan kalor, Konduksi, Konveksi, pipa api, evaporator, boiler.

1. PENGANTAR

Boiler berfungsi sebagai pesawat energi yang mengkonversikan energi potensial dan bahan bakar menjadi energi panas yang melalui alat penguap (evaporator). Pada pipa api, Fluida yang mengalir dalam pipa adalah gas hasil pembakaran yang membawa energi panas, yang segera mentransfernya ke air ketel melalui bidang pemanas. Fungsi dari pipa api ini adalah untuk memindahkan distribusi aliran panas ke air di dalam ketel.

Sebagai salah satu contoh penerapan dan penggunaan ilmu perpindahan panas adalah instalasi tenaga uap yang terdiri dari : Boiler, turbin uap, kondensor dan pompa.

Boiler akan mengubah air menjadi uap bertekanan dan bertemperatur tinggi, uap meninggalkan Boiler menuju turbin kemudian energi ini diubah menjadi usaha / kerja. Sekeluarnya dari turbin, upa akan terkondensasi pada tekanan tetap, transfer panas dalam hal ini dilakukan oleh air pendingin kemudian di pompa kembali ke Boiler untuk disirkulasikan kembali.

Untuk mengetahui besarnya perpindahan kalor konduksi dan konveksi pada pipa api boiler.

Dari penjelasan diatas maka tujuan penelitian untuk mengetahui besarnya perpindahan kalor pada alat penguap (superheated, pemanas sekunder, pemanas udara) boiler pada PT. Perkebunan Nusantara Arso.

Perkebunan Nusantara Arso. Berkaitan dengan penjelasan diatas maka tujuan dari penelitian ini adalah menganalisa besarnya perpindahan kalor konduksi dan konveksi pada pipa api boiler, dan perpindahan kalor pada alat penguap (superheated, pemanas sekunder, pemanas udara) boiler pada PT. Perkebunan Nusantara Arso.

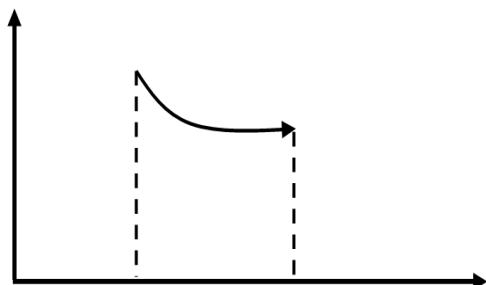
2. Landasan Teori

2.1. Perpindahan Kalor Konduksi

Jika suatu benda terdapat gradien suhu, maka akan terjadi perpindahan energi dari bagian bersuhu tinggi ke bagian yang bersuhu rendah, peristiwa ini disebut perpindahan kalor konduksi. Ini adalah bentuk perpindahan kalor yang terjadi apabila panas mengalir melalui bahan akibat perbedaan suhu. Jadi jika salah satu ujung batang logam dipanasi, maka suhu batang akan bertambah akibat getaran molekul-molekul logam. Laju perpindahan kalor yang disalurkan tiap satuan waktu secara konduksi berbanding lurus pada luas penampang batang dan selisih temperatur dan berbanding terbalik pada jalan lintasan.

Makin besar luas dan selisih temperatur, makin besar pula perpindahan kalor, karena perpindahan kalor berbanding lurus pada luas dan selisih temperatur. Pada pihak lain makin

tebal bahan makin kurang perpindahan kator karena perpindahan kalor berbanding terbalik pada tebal bahan.



Keterangan gambar :

- = temperatur bidang yang dilalui kalor
- _____ = Luas bidang panas yang mengadakan pemindahan atau arah aliran kalor, q

Gambar 1. Arah aliran kalor

2.2. Perpindahan Kalor Konveksi

Untuk dapat menghitung perpindahan panas secara konveksi dengan menggunakan konduktifitas thermal fluida dan gradien suhu bergantung pada laju fluida yang membawa kalor dari situ. Kecepatan yang tinggi akan menyebabkan gradien suhu pada dinding bergantung pada medan aliran. Untuk menyatakan pengaruh konduksi secara menyeluruh kita gunakan persamaan :

$$q = h \cdot A (T_w - T_\infty)$$

Dari persamaan di atas disimpulkan bahwa perpindahan kalor secara konveksi tergantung pada viscositas fluida di samping ketergantungannya kepada sifat-sifat thermal fluida (konduktifitas thermal, kalor spesifik, densitas). Hal ini dapat dimengerti bahwa viscositas mempengaruhi profil kecepatan dan karena itu mempengaruhi laju energi di daerah dinding.

Bila suatu plat panas dibiarkan berada di udara bebas tanpa ada sumber gerakan dari luar maka udara itu akan bergerak, sebagai akibat terjadinya gradien densitas di dekat plat itu. Peristiwa itu disebutkan konveksi aiamiah. Fenomena pendidihan dan pengembunan termasuk dalam kelompok masalah perpindahan kalor konveksi.

a. Perpindahan Kalor Pada Evaporator

Apabila ingin mengetahui jumlah panas yang diperlukan untuk membuat air mendidih dari 0°C hingga pada $T_{d1}^\circ\text{K}$ maka dapat diselesaikan dengan persamaan.

$$q_{d1} = \text{Panas jenis air} \times (T_{d1} - T_0)$$

b. Perpindahan Kalor pada Super heater

Penghangat lanjut dibedakan atas dua :

1. Super heater Konveksi

- Super heater Konveksi Arus searah
- Super heater Konveksi Berlawanan
- Super heater Konveksi Arus kombinasi

2. Super heater Pancaran atau Radiant Super heater.

Super heater konveksi terdiri dari pipa-pipa (elemen), super heater dipanaskan oleh gas yang mengalir secara konveksi. Panas yang diterima secara konveksi dari gas asap sebanyak.

$$q_K = G_{\text{gas}} \times P J_{\text{gas}} (t_{\text{gas masuk}} - t_{\text{gas keluar}}) \text{ KJ/hr}$$

Dengan,

G_{gas} = Jumlah asap yang lewat Kg/hr

P_{gas} = Panas jenis asap gas KJ/Kg $^\circ\text{C}$

t = Temperatur $^\circ\text{C}$

Panas jenis gas asap dalam hal ini adalah "Konstan"

c. Perpindahan Kalor Melalui Bidang Pemanas Sekunder

Bidang pemanas sekunder memperoleh panas dari gas asap menyerahkan sebagian panasnya ke bidang pemanas primer.

Panas yang diserap.

$$q_{\text{eko}} = S.P. J_{\text{air}} (t_{a2} - t_{a1})$$

Panas yang diserahkan :

$$q_{\text{eko}} = S.P. J_{\text{gas}} (t_{g2} - t_{gl})$$

d. Pemanas Udara (air preheater)

Manfaat dari memanaskan udara pembakar terlebih dahulu sebelum masuk ke dapur, ialah udara yang telah dalam keadaan panas masuk ke dalam dapur, membantu untuk mempercepat penguapan air yang terkandung di dalam bahan bakar (khususnya bahan bakar padat) sehingga akan mempercepat berlangsungnya pembakaran bahan bakar di dalam dapur. Pada pesawat pemanas udara, udara menyerap panas dari gas asap. Sedang gas asap menyerahkan panas pada udara :

$$q_{\text{eh}} = S.P. J_{\text{air}} q_{\text{ah}} = S.P.J_{\text{udara}} (t_{u2} - t_{u1})$$

Panas yang diserahkan :

$$Q_{\text{ah}} = S.P.J_{\text{gas}} (t_{g1} - t_{g2})$$

e. Boiler

Boiler merupakan pesawat energi yang mengkonversikan energi potensial dari bahan bakar menjadi energi panas yang melalui alat penguap (evaporator). Disamping sebagai

pesawat energi boiler mengubah air menjadi uap bertekanan dan bertemperatur tinggi.

Pada pipa api, fluida yang mengalir dalam pipa adalah gas hasil pembakaran yang membawa energi panas, yang segera mentransfernya ke air ketel melalui bidang pemanas.

Boiler diklasifikasikan sebagai berikut :

- Natural Circulation Boiler* (Sirkulasi alam)
- Forced Circulation Boiler* (Sirkulasi paksa)
- Once Through type of boiler*

3. Metode Penelitian

a. Prosedur pengambilan data

- Mencatat temperatur dan debit air yang dimasukkan ke dalam ketel melalui panel instrumen.
- Mencatat temperatur gas yang masuk ke dalam ketel melalui panel instrumen temperatur
- Mencatat temperatur air keluar ketel melalui panel instrumen temperatur
- Mencatat temperatur uap pans lanjut melalui panel instrumen temperatur

- Mencatat temperatur air masuk ekonomiser melalui panel instrumen temperatur
- Mencatat jumlah udara yang dibaca melalui *pressure gauge*
- Mencatat temperatur udara masuk pemanas udara melalui panel instrumen
- Mengukur diameter dalam pipa api dengan menggunakan jangka sorong.
- Mengukur diameter luar pipa api dengan menggunakan jangka sorong.
- Mengukur panjang pipa api dengan menggunakan rol meter.
- Setelah mengetahui data dari hasil penelitian kemudian dilakukan analisis data.

4. Analisa Data Dan Pembahasan

4.1. Data Penelitian Dan Perhitungan

Tabel. 1. Data Penelitian

- Working pressure	: 7,0 Bar
- Design pressure	: 8,5 Bar
- Test pressure	: 12,75 Bar
- Safety valve pressure	: 7,24 Bar
- Temperatur gas masuk	: 300°C
- Temperatur gas keluar	: 150°C
- Kapasitas gas masuk	: 1250°C
- Temperatur air masuk	: 60°C
- Temperatur air keluar	: 120°C
- Produksi uap	: 3100 Kg/hr
- Temperatur dinding	: 80°C
- Panas jenis air	: 1,863 KJ/kg°C
- Jumlah air yang masuk ke ketel	: 5500 kg/hr
- Temperatur gas masuk super heater	: 600°C
- Temperatur gas keluar super heater	: 400°C
- Temperatur uap panas lanjut temperatur uap kenyang	: 77°C
- Temperatur uap panas lanjut keluar	: 550°C
- Temperatur gas asap masuk superheater	: 400°C
- Temperatur gas asap keluar superheater	: 120°C
- Temperatur uap kenyang masuk	: 1170°C
- Temperatur api dalam tungku	: 80°C
- Temperatur pipa-pipa superheater	: 1,25 m ²
- Luas bidang superheater yang dipanaskan	: 0,25 kg/hr
- Jumlah gas yang lewat	: 250°C
- Panas jenis gas asap	: 60°C
- Temperatur air masuk ekonomiser	: 120°C
- Temperatur air keluar ekonomiser	: 250°C
- Temperatur gas masuk ekonomiser	: 320°C
- Temperatur gas keluar ekonomiser	: 20 kg/hr
- Jumlah udara yang ditekan	: 0,24 KJ/kg°C
- Panas jenis udara	: 20°C
- Temperatur udara masuk pesawat pemanas udara	: 100°C
- Temperatur udara keluar pesawat pemanas udara	: 180°C
- Temperatur gas masuk pemanas udara	: 281°C
- Temperatur gas keluar pemanas udara	: Besi tuang
- Jenis bahan pipa api	: 50,8 mm
- Diameter luar pipa	: 42 mm
- Diameter dalam pipa	: 8 m
- Panjang pipa	

a. Perhitungan Dan Pembahasan

$$T_{\text{mgas}} = \frac{573 + 423}{2} = 498^{\circ}\text{K}$$

1. Menghitung Perpindahan Kalori Secara Konduksi

Dari data spesifikasi boiler PT. Perkebuna Nusantara Arso diketahui :

- ✓ Temperatur gas masuk $t_1 = 300^{\circ}\text{C} = 573^{\circ}\text{K}$
- ✓ Temperatur gas keluar $t_2 = 150^{\circ}\text{C} = 423^{\circ}\text{K}$
- ✓ Koefesien konduksi panas (besi tuang) = $52\text{W/m}^2\text{K}$
- ✓ Panjang lintasan (L) = 8 m
- ✓ Diameter dalam pipa = 42 mm = 0,042 m

Menentukan luas permukaan (A)

$$q = \frac{K.A. (t_1 - t_2)}{L}$$

$$q = \frac{1.028,625}{1.028,625}$$

$$A = \pi \cdot D \cdot L$$

$$A = \pi \cdot 0,042 \text{ m} \cdot 8 \text{ m}$$

$$A = 1,055 \text{ m}^2$$

Jadi perpindahan kalor secara konduksi adalah

4.2. Menghitung Perpindahan Kalor Konveksi

Untuk menghitung perpindahan kalor secara konveksi pada pipa api boiler PT. Perkebunan Nusantara diperlukan data-data sebagai berikut :

Koefesien perpindahan kalor konveksi (h) = $5555,42 \text{ W/m}^2\text{K}$

Luas permukaan (A) = $1,055 \text{ m}^2$

Suhu permukaan plat (T_w) = 358°K

Suhu fluida (T_{oo}) = 333°K

Dengan :

Luas permukaan :

$$A = \pi \cdot D \cdot L$$

$$A = \pi \cdot 0,042 \text{ m} \cdot 8 \text{ m}$$

$$A = 1,055 \text{ m}^2$$

Menentukan temperatur rata-rata untuk gas adalah :

$$T_{\text{mgas}} = \frac{573 + 423}{2} = 498^{\circ}\text{K}$$

dengan sifat-sifat gas pada $T_{\text{mgas}} = 498^{\circ}\text{K}$
adalah

$$\begin{aligned} M &= 169.684 \cdot 10^{-7} \text{ N.S/m}^2 \\ K &= 33,74 \cdot 10^{-3} \text{ w/m.K} \\ Pr &= 0,99848 \end{aligned}$$

Menentukan koefesien konveksi kalor dengan persamaan :

$$RED = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot D \cdot \mu}$$

$$Re_d = 502463 \text{ (Aliran turbulen)}$$

$$\begin{aligned} NUD &= 836,27 \\ &= 555,42 \text{ w/m}^2\text{K}, \end{aligned}$$

Jadi perpindahan kalor secara konveksi, $q = 1469,2 \text{ Watt}$

4.3. Menghitung Perpindahan Kalor pada Alat-Alat Penguap

• Super heater konveksi arus searah

Untuk menghitung perpindahan kalor pada *super heater* konveksi arus searah diperlukan data-data sebagai berikut :

Temperatur gas masuk (t_{gas1}) = $450^{\circ}\text{C} = 723^{\circ}\text{K}$

Temperatur uap kenyang (t_k) = $77^{\circ}\text{C} = 350^{\circ}\text{K}$

Temperatur gas keluar (t_{gas2}) = $600^{\circ}\text{C} = 873^{\circ}\text{K}$

Temperatur uap panas lanjut (t_u) = $400^{\circ}\text{C} = 673^{\circ}\text{K}$

Maka selisih antara temperatur gas masuk ke *super heater* dengan temperatur uap kenyang yang masuk ke *super heater* adalah :

$$\Delta_1 = t_{\text{gas1}} - t_k$$

$$\Delta_1 = 723^{\circ}\text{K} - 350^{\circ}\text{K}$$

$$\Delta_1 = 373^{\circ}\text{K}$$

Selisih temperatur antara gas keluar dari *super heater* dengan temperatur uap yang dipanaskan lanjut keluar dari *super heater* adalah :

$$\Delta_2 = t_{\text{gas2}} - t_k$$

$$\Delta_2 = 873^{\circ}\text{K} - 673^{\circ}\text{K}$$

$$\Delta_2 = 200^{\circ}\text{K}$$

Selisih antara temperatur gas rata-rata pada *super heater* dengan temperatur uap rata-rata di dalam *super heater* ialah :

$$\Delta_2 = t_{\text{gas rata-rata}} - t_{\text{uap rata-rata}}$$

$$\Delta_t = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{1n(\Delta_1 - \Delta_2)}$$

$$\Delta_t = \frac{373^{\circ}\text{K} - 200^{\circ}\text{K}}{1n(373/200)}$$

$$\Delta_t = 160,4^{\circ}\text{K}$$

• Super heater konveksi arus berlawanan

Untuk menghitung perpindahan kalor pada alat penguap (*super heater*) konveksi arus berlawanan diperlukan data-data sebagai berikut :

✓ Temperatur gas masuk *super heater* (t_{gas1}) = $550^{\circ}\text{C} = 823^{\circ}\text{K}$

✓ Temperatur uap panas lanjut keluar (t_u) = $500^{\circ}\text{C} = 773^{\circ}\text{K}$

- ✓ Temperatur gas keluar *super heater* (t_{gas2}) = $400^{\circ}\text{C} = 673^{\circ}\text{K}$
- ✓ Temperatur uap kenyang masuk (t_k) = $120^{\circ}\text{C} = 393^{\circ}\text{K}$

Maka selisih antara temperatur gas asap masuk ke *super heater* dengan temperatur uap yang dipanaskan lanjut keluar adalah :

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= t_{gas1} - t_k \\ \Delta_1 &= 823^{\circ}\text{K} - 773^{\circ}\text{K} \\ \Delta_1 &= 50^{\circ}\text{K}\end{aligned}$$

Selisih antara temperatur gas keluar dari *super heater* dengan temperatur uap kenyang masuk adalah :

$$\begin{aligned}\Delta_2 &= t_{gas2} - t_k \\ \Delta_2 &= 673^{\circ}\text{K} - 393^{\circ}\text{K} \\ \Delta_2 &= 280^{\circ}\text{K}\end{aligned}$$

Selisih antara temperatur gas rata-rata pada *super heater* dengan temperatur uap rata-rata di dalam *super heater* ialah :

$$\begin{aligned}\Delta_t &= t_{gas\ rata-rata} - t_{uap\ rata-rata} \\ \Delta_t &= \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ln(\Delta_1 / \Delta_2)} \\ \Delta_t &= \frac{50^{\circ}\text{K} - 280^{\circ}\text{K}}{\ln(50/280)} \\ \Delta_t &= 49,98^{\circ}\text{K}\end{aligned}$$

• Super heater pancaran

Dari data spesifikasi boiler PT. Perkebunan Nusantara Arso diketahui:

- ✓ Konstanta Stefan boltmann = $5,67 \times 10^{-8}$ $\text{W/m}^2\text{K}^4$
- ✓ Luas bidang *super heater* yang dipanaskan (F) = $1,25 \text{ m}^2$
- ✓ Temperatur api di dalam tungku (Tapi) = $1170^{\circ}\text{C} = 1443^{\circ}\text{K}$
- ✓ Temperatur pipa-pipa *super heater* = $80^{\circ}\text{C} = 353\text{K}$

Maka perpindahan kalor pada *super heater* pancaran adalah :

$$\begin{aligned}qp &= C \times F \times (0,01 \times Tapi)^4 - (0,01 \times Tpip) \\ qp &= 5,67 \times 10^{-8} \times 1,25 (0,01 \times 1443)^4 - (0,01 \times 353)^4\end{aligned}$$

$$qp = 2917,6 \text{ Watt}$$

• Perpindahan kalor melalui bidang pemanas sekunder (ekonomiser)

Untuk menghitung perpindahan kalor yang melalui bidang pemanas sekunder diperlukan data-data sebagai berikut :

- Jumlah air yang masuk ke ketel (s) = $5500 \text{ kg/hr} = 1,52 \text{ kg/s}$
- Panas jenis air (P.J) = $1,863 \text{ KJ/kg}^{\circ}\text{C}$
- Jumlah gas yang lewat (S) = 28 kg/hr
- Panas jenis gas asap (P.J.gas) = $0,25 \text{ KJ/kg}^{\circ}\text{C}$
- Suhu air masuk ekonomiser (tal) = $60^{\circ}\text{C} = 333^{\circ}\text{K}$
- Suhu air keluar ekonomiser (ta2) = $120^{\circ}\text{C} = 393^{\circ}\text{K}$
- Suhu gas masuk ekonomiser (tg1) = $250^{\circ}\text{C} = 523^{\circ}\text{K}$
- Suhu gas keluar ekonomiser (tg2) = $320^{\circ}\text{C} = 593^{\circ}\text{K}$

Jadi panas yang diserap :

$$q_{eko} = S.P.J\ air (ta2 - ta1)$$

$$q_{eko} = 1,52 \cdot 1,863 (393 - 333)$$

$$q_{eko} = 169,90 \text{ Watt}$$

Dan panas yang diserahkan :

$$q_{eko} = S.P.J\ gas (tg2 - tg1)$$

$$q_{eko} = 281 \cdot 0,25 (593 - 523)$$

$$q_{eko} = 4917,5 \text{ Watt}$$

• Pemanas udara (*air preheater*)

Untuk menghitung perpindahan kalor yang melalui pemanas udara diperlukan data-data sebagai berikut :

- Jumlah air yang masuk ditekan (s) = 20 kgls
- Panas jenis udara (P.J) = $0,24 \text{ KJ/kg}^{\circ}\text{C}$
- Jumlah gas yang lewat dalam pipa (S) = 281 kg/hr
- Panas jenis gas {P.J.gas} = $0,25 \text{ kg/hr}$
- Temperatur udara masuk pesawat Pemanas udara (tu 1) = $20^{\circ}\text{C} = 293^{\circ}\text{K}$
- Temperatur udara keluar Pesawat pemanas udara = $100^{\circ}\text{C} = 373^{\circ}\text{K}$
- Temperatur gas masuk ke pemanas udara = $180^{\circ}\text{C} = 453^{\circ}\text{K}$
- Temperatur gas keluar pesawat pemanas udara = $281^{\circ}\text{C} = 554^{\circ}\text{K}$

Jadi panas yang diserap :

$$q_{ah} = S.P.J\ udara (tu2 - tu1)$$

$$q_{ah} = 20 \cdot 0,24 (373 - 293)$$

$$q_{ah} = 384 \text{ Watt}$$

Dan panas yang diserahkan :

$$q_{ah} = S.P.J\ gas (tg2 - tgl)$$

$$q_{ah} = 281 \cdot 0,25 (554 - 453)$$

$$q_{ah} = 7095,25 \text{ Watt}$$

5. Kesimpulan

- a. Perpindahan kalor secara konduksi pada pipa api boiler sebesar 1028,625 Watt.
- b. Perpindahan kalor secara konveksi pada pipa api boiler sebesar 1469,2 Watt.
- c. Perpindahan kalor yang terjadi pada alat penguap boiler :
 - a. Superheated sebesar 2917,6 Watt
 - b. Pemanas sekunder sebesar 4917,5 Watt
 - c. Pemanas udara sebesar 7092,25 Watt.
- d. Uap panas yang dihasilkan dari ketel dapat digunakan untuk merebus kelapa sawit, memanaskan minyak kelapa sawit agar tidak membeku dan dapat digunakan untuk menggerakkan turbin uap.
- e. Uap yang dihasilkan dapat juga digunakan sebagai acuan untuk menentukan luas bidang pemanas (*Heating surface*) yang sangat berguna dalam perencanaan ketel uap atau alat penukar kalor.

6. Daftar Pustaka

- J. P Holman, 1998. *Perpindahan Kalor*, Erlangga,
- Thamrin Rais, 1985. *Turbin Uap dan Mesin Uap*, Tarsito Bandung.
- Daryanto, 1984. *Rangkuman Bahasan Ketel Uap*, Tarsito Bandung.
- Thamrin Rais, 1985. *Teori dan Penyelesaian Soal Ujian Negara Ketel Uap*, Tarsito Bandung.
- NIT Djokosetyardjo, 1987 *Keter Uap*, Cet.1 Pradnya Patamita.
- Surbakty, 1985. *Pesawat Tenaga Uap*, Mutiara Solo.
- Syamsir A. Muin, 1988. *Pesawat-Pesawat Konversi Energi*, I, RajaWali Pers Jakarta,
- R. Artono, 2002. *Perpindahan Kalor*, Salemba Teknika.