

Simulasi Dinamik Kondenser Elektrohodinamik R-134a Pada Pipa Tunggal

Jotje Rantung

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik
Universitas Sam Ratulangi
e-mail: jrantung@yahoo.com

Abstrak

Peningkatan perpindahan kalor kondensasi dapat dilakukan secara aktif atau secara dinamis yaitu dengan menggunakan teknik Elektrohodinamik (EHD), dimana dalam pengaturannya tergantung pada besar kecil tegangan yang diaplikasikan. Model matematika dinamik kondenser EHD yang diturunkan adalah model pipa tunggal. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan simulasi dinamik model matematika kondenser Elektrohodinamik pipa tunggal berbahan pendingin R-134a, dan penyelesaiannya menggunakan *MatLab*. Simulasi dilakukan untuk empat kasus dimana sistem simulasi digunakan untuk mensimulasikan respon *step* dari kenaikan *step* aliran massa air dan kenaikan *step* tegangan listrik, kenaikan *step* tegangan listrik dan kenaikan *step* aliran massa air, penurunan *step* aliran massa air dan kenaikan *step* tegangan listrik, penurunan *step* aliran massa air, kenaikan *step* tegangan listrik, dan kenaikan *step* aliran massa air.

Suatu observasi yang menarik dari hasil simulasi studi kasus ini menunjukkan bahwa kapasitas perpindahan kalor dapat dikontrol dengan mengontrol koefisien perpindahan kalor refrigeran melalui variasi tegangan listrik yang diterapkan. Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa besar tegangan listrik sangat berpengaruh pada temperatur air dan temperatur dinding pipa. Temperatur air dan dinding pipa akan lebih besar jika tegangan listrik dinaikkan. Ini berarti bahwa panas yang dipindahkan dari refrigeran ke air akan terjadi lebih cepat dan lebih besar.

Kata kunci: Pemodelan, simulasi dinamik, kondenser elektrohodinamik.

1 Pendahuluan

Berbagai upaya meningkatkan perpindahan kalor kondensasi baik aktif atau pasif telah dikembangkan. Peningkatan perpindahan kalor kondensasi dapat dilakukan secara aktif yaitu dengan menggunakan teknik EHD, dimana dalam pengaturannya tergantung pada besar kecil tegangan yang diaplikasikan.

Penelitian ini menyangkut pemodelan dan simulasi dinamik kondenser EHD pipa tunggal dimana kondensasi terjadi pada bagian luar pipa, serta menggunakan properti termodinamis refrigeran R-134a. Spesifikasi kondenser yang dimodelkan sesuai dengan spesifikasi penelitian dari Da Silva (1). Pelaksanaan simulasi dinamik dilakukan dengan menyelesaikan persamaan diferensial non linier dan persamaan aljabar menggunakan *MatLab* versi 6.5 Release 13.

2 Penurunan Persamaan Model Dinamik

2.1 Persamaan Dinamik Kondenser

Diferensial keseimbangan massa adalah

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (1)$$

dimana untuk kasus satu dimensi dapat ditulis

$$\frac{\partial A\rho}{\partial t} + \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

diferensial keseimbangan energi adalah

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \bar{v}) = -\nabla \cdot \bar{q}'' - q''' + \frac{Dp}{Dt} + \Phi \quad (3)$$

yang dapat disederhanakan dengan mengabaikan konduktivitas arah aksial, radiasi dan tegangan *viscous* serta mengasumsikan aliran satu dimensi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(A\rho h - A\rho)}{\partial t} + \frac{\partial \dot{m}h}{\partial x} \\ = \pi D \alpha (T_w - T_{a,o}) \end{aligned} \quad (4)$$

Penyederhanaan persamaan diferensial keseimbangan energi dinding pipa diperoleh dengan menetapkan aliran pada persamaan (3) sama dengan nol dan mengabaikan konduktivitas arah aksial.

$$\begin{aligned} C_w \rho_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \alpha_o \pi D_o (T_r - T_w) \\ + \alpha_i \pi D_i (T_{a,o} - T_w) \end{aligned} \quad (5)$$

Persamaan (2), (4) dan (5) adalah persamaan keseimbangan diferensial, yang akan diintegrasikan sepanjang pipa kondenser.

2.2 Keseimbangan Massa dan Energi Sisi Air

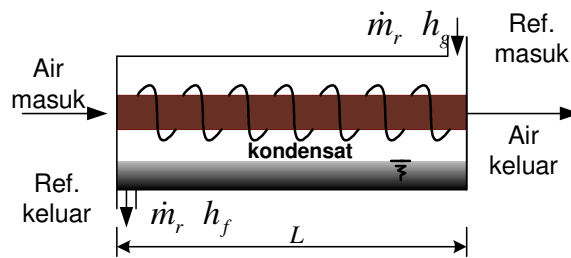
Persamaan keseimbangan massa untuk sisi fluida yang mengalir dalam pipa pada kondenser (Gambar-2) dapat ditulis

$$A \left\{ (\bar{\rho} - \rho) \frac{dL}{dt} + L \frac{d\bar{\rho}}{dt} \right\} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (6)$$

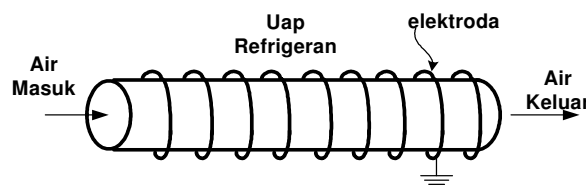
Untuk fluida *incompressible* (ρ konstan) dan aliran satu dimensi maka persamaan (6) dapat ditulis

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (7)$$

Persamaan keseimbangan energi sisi fluida yang mengalir dalam pipa dapat ditulis



Gambar 1. Model sistem kondenser pipa tunggal



Gambar 2. Skematik diskritisasi kondenser EHD

$$\frac{\partial(A\rho h - Ap)}{\partial t} + \frac{\partial \dot{m}h}{\partial x} = \pi D \alpha (T_w - T_{a,o}) \quad (8)$$

dimana ρ adalah massa jenis fluida, x adalah variabel koordinat dengan titik awal bagian inlet dan arah parallel pipa, \dot{m} adalah laju aliran massa fluida, p adalah tekanan, h entalpi, A luas penampang melintang, dan q adalah laju perpindahan kalor persatuan panjang dari kondenser. Integrasikan persamaan 8 dari $x = 0$ ke $x = L$ menghasilkan

$$\int_0^L \frac{\partial(A\rho h - Ap)}{\partial t} + \int_0^L \frac{\partial(\dot{m}h)}{\partial x} dx = \int_0^L \pi D \alpha (T_w - T_r) dx \quad (9)$$

atau

$$m_a C_a \frac{dT_a}{dt} = \dot{m}_a C_{pa} (T_{a,i} - T_{a,o}) + \alpha_a A_i (T_w - T_{a,o}) \quad (10)$$

2.3 Keseimbangan Energi Dinding Pipa.

Keseimbangan energi dinding pipa dapat diperoleh dengan mengintegrasikan persamaan (5) dari α ke β memberikan

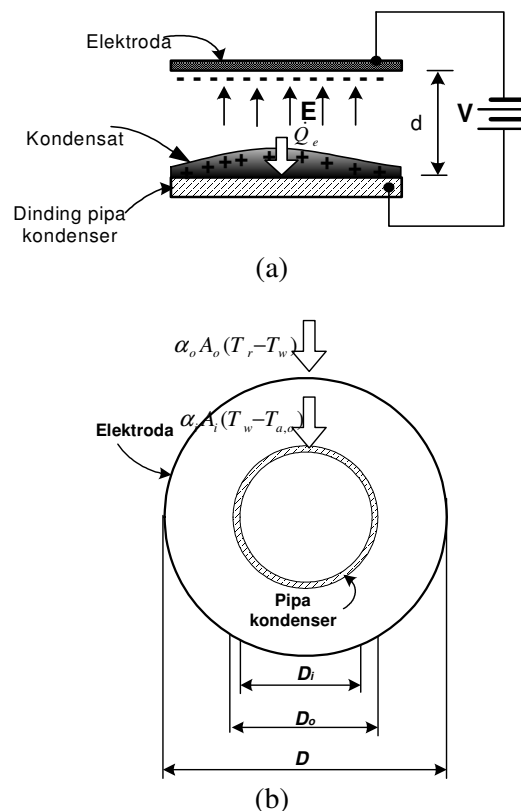
$$m_w C_w \frac{dT_w}{dt} = \alpha_o A_o (T_r - T_w) - \alpha_i A_i (T_w - T_{a,o}) \quad (11)$$

2.4 Keseimbangan Energi Sisi Refrigeran

Diskritisasi ekstraksi cairan kondensat oleh medan listrik dan penampang aksial pipa kondenser yang dimodelkan di tunjukkan pada Gambar 3.

Dari penurunan lengkap., Rantung J. [2], maka keseimbangan energi pada sisi refrigeran dapat ditulis

$$\rho_r C_r V_r \frac{dT_r}{dt} = \dot{m}_r h_f - \dot{m}_r h_g + \alpha_o A_o (T_r - T_w) + 12.5 e^{-6} T_r E^2 A_e L \quad (12)$$



Gambar 3. (a). Diskritisasi ekstraksi cairan kondensat oleh medan listrik. (b). Penampang aksial pipa kondenser dan arah perpindahan kalor

3 Simulasi Dinamik dan Pembahasan

Simulasi dinamik dilakukan dengan maksud untuk mempelajari karakteristik dinamik sistem. Untuk kasus ini, simulasi dinamik kondenser elektrohidrokinamik siklus kompresi uap dilakukan dengan empat percobaan. Percobaan simulasi dinamik dilakukan dengan menggunakan data parameter dan hasil steady state yang terdapat pada Rantung J. [2]. Studi kasus tersebut adalah sebagai berikut:

- Kasus 1.** Kenaikan *step* aliran massa air dan kenaikan *step* tegangan listrik. Kenaikan *step* \dot{m}_i sebesar 50% yang dimulai pada $t = 0.05$ detik dari *steady state*, kemudian kenaikan *step* tegangan listrik sebesar 5 kV ke 15 kV . dimulai dari $t = 0.2$ detik
- Kasus 2.** Kenaikan *step* tegangan listrik dan kenaikan *step* aliran massa air. Kenaikan *step* tegangan listrik sebesar 5 kV ke 15 kV yang dimulai pada $t = 0.05$ detik dari *steady state*, kemudian kenaikan *step* \dot{m}_i sebesar 50% dimulai dari $t = 0.2$ detik

Kasus 3. Penurunan *step* aliran massa air dan kenaikan *step* tegangan listrik. Penurunan *step* \dot{m}_i sebesar 50% yang dimulai pada $t = 0.05$ detik dari *steady state*, kemudian kenaikan *step* tegangan listrik sebesar 5 kV ke 15 kV . dimulai dari $t = 0.2$ detik

Kasus 4. Penurunan *step* aliran massa air, kenaikan *step* tegangan listrik, dan kenaikan *step* aliran massa air. Penurunan *step* \dot{m}_i sebesar 50% yang dimulai pada $t = 0$ detik dari kondisi stedi state, kemudian kenaikan *step* tegangan listrik sebesar 5 kV ke 15 kV . dimulai dari $t = 0.1$ detik, dan kenaikan *step* \dot{m}_i sebesar 50% yang dimulai pada $t = 0.2$ detik.

Tujuan dari studi kasus ini adalah untuk menguji kemampuan simulasi sistem yang secara kualitatif mewakili dinamika plant. Kondisi operasi simulasi sistem awalnya berada pada kondisi stedi sebelum langkah-langkah manipulasi variabel dilakukan.

3.1 Kasus 1: Kenaikan *step* aliran massa air dan kenaikan *step* tegangan listrik.

Untuk menjaga profil temperatur yang sesuai pada volume atur, temperatur air keluar pipa kondenser EHD harus dikontrol. Variabel yang dapat dimanipulasi adalah aliran massa air dan besar tegangan listrik. Gambar 4.1 menunjukkan respons hasil simulasi terhadap temperatur dinding pipa, temperatur air keluar, dan aliran massa refrigeran untuk temperatur refrigeran 20 °C.

Temperatur dinding pipa dan temperatur air keluar menurun sehubungan dengan meningkatnya aliran massa air. Sedangkan laju aliran massa refrigeran meningkat dengan meningkatnya aliran massa air. Dinamika sistem umumnya diberikan oleh massa termal dan tahanan perpindahan kalor, tapi juga dengan kontribusi temperatur refrigeran dan air pendingin, aliran massa dan tegangan listrik.

3.2 Kasus 2: Kenaikan *step* tegangan listrik dan kenaikan *step* aliran massa air.

Gambar 4.2 menunjukkan kenaikan *step* tegangan listrik dari 5 kV ke 15 kV pada $t = 0.05$ dan kenaikan *step* \dot{m}_i sebesar 50 % pada $t = 0.2$ detik. Disini dapat dilihat bahwa baik temperatur dinding pipa dan temperatur air keluar atau aliran massa refrigeran pada *steady state* $t = 0.3$ detik memiliki nilai yang sama dengan yang ada pada Gambar 4.1. Dengan menganggap temperatur refrigeran dan tekanan kondenser adalah konstan, maka perubahan nilai aliran massa refrigeran merupakan perubahan *discharge* kompresor untuk siklus kompresi uap. Perubahan *discharge* kompresor sama artinya dengan perubahan kecepatan putar kompresor dan ini merupakan variabel yang dapat berubah. Untuk simulasi kondenser, katub ekspansi tidak diperhitungkan karena cairan kondensat refrigeran akan melewati tangki penampung cairan.

Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 menunjukkan respons transien dari perubahan *step* aliran massa air dan perubahan *step* tegangan listrik untuk temperatur refrigeran 20 °C. Suatu observasi yang menarik dari studi kasus ini bahwa kapasitas perpindahan kalor dapat dikontrol dengan mengontrol koefisien perpindahan kalor refrigeran melalui variasi tegangan listrik yang diterapkan. Gambar 5 sampai dengan Gambar 7 adalah simulasi dinamik untuk temperatur refrigeran 30°C. Dapat dilihat disana bahwa respons dinamikanya sama dengan yang ada pada temperatur refrigeran 20 °C, gambar 4a untuk selang waktu 0 – 0.1 detik.

3.3 Efek Tegangan Listrik pada Perpindahan Kalor

Dapat dilihat bahwa efek perpindahan kalor naik dengan meningkatnya laju aliran massa air dan tegangan listrik. Meningkatnya perpindahan kalor oleh karena peningkatan *step* aliran massa air ditandai dengan perubahan temperatur keluar air dan laju aliran massa refrigeran.

Peningkatan perpindahan kalor apabila tegangan listrik ditingkatkan ditandai dengan kenaikan temperatur air keluar dan perubahan laju aliran massa refrigeran. Dari hasil simulasi dinamik yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 sampai Gambar 4.4 bahwa peningkatan perpindahan kalor dengan metode *EHD* memiliki keuntungan yang sangat baik. Apabila tegangan listrik diterapkan maka

temperatur air keluar akan naik tapi laju aliran refrigeran menurun, dan ini baik untuk siklus kompresi uap secara keseluruhan dan konsisten dengan yang diharapkan.

Dari hasil eksperimen yang dilakukan oleh Da Silva, L.W (1), tegangan listrik yang mereka terapkan terbatas sampai pada 25 kV. Koefisien perpindahan kalor paling tinggi terjadi pada 20 kV, tetapi pada 25 kV justru mulai menurun. Dari simulasi yang dilakukan untuk temperatur refrigeran 20 °C terlihat bahwa pada 25 kV dinding pipa lebih besar dari 20 °C. Ini berarti bahwa peningkatan koefisien perpindahan kalor pada tegangan listrik lebih besar dari 20 kV tidak efektif lagi. Hasil simulasi transien untuk temperatur refrigeran 20 °C pada tegangan 15 kV dan tegangan 25 kV dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.

4 Kesimpulan

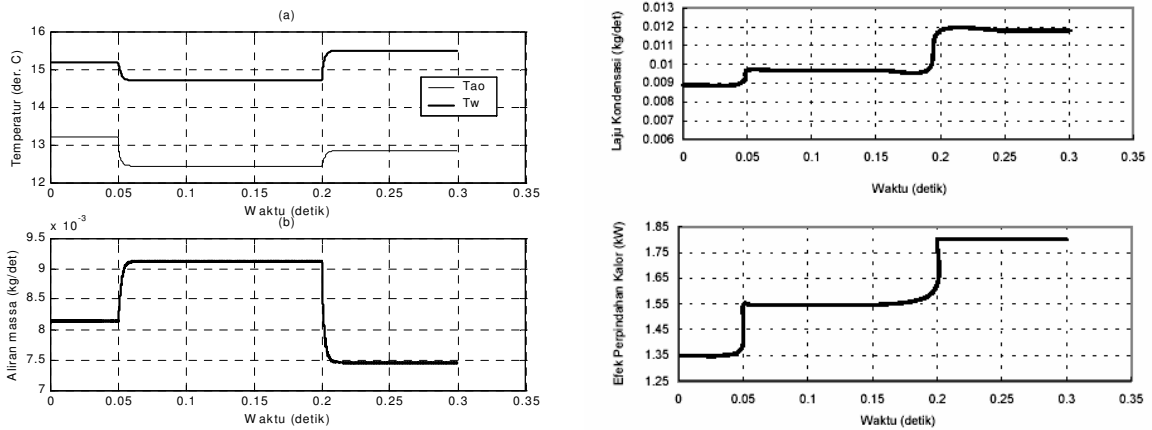
Dari hasil simulasi dinamik yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 sampai Gambar 4.4 menunjukkan bahwa peningkatan perpindahan kalor dengan metode *EHD* memiliki keuntungan yang sangat baik. Apabila tegangan listrik diterapkan maka temperatur air keluar akan naik tapi laju aliran refrigeran menurun, dan ini baik untuk siklus kompresi uap secara keseluruhan dan konsisten dengan yang diharapkan.

5 Daftar Pustaka

- Da Silva, L.W., Molki, M., and Ohadi, M.M., (2000), “*Electrohydrodynamic Enhancement of R-134a Condensation on Enhanced Tubes*,” 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy, Oct 08-Oct 12 2000, Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society) Rome, Italy, Vol. 2, pp. 757-764.
- Rantung, J., (2004), “*Pemodelan dan Simulasi Kondenser Elektrohodinamik untuk Siklus Kompresi Uap*”, Tesis Magister ITB.
- Castellanos, A. (ed.), (1998), *Electrohydrodynamic*, Springer Verlag Wien, New York.
- Jensen, J.M. and Knudsen H.J.H., July, (2002), *Moving Boundary Models for Dynamic Simulations of Two-Phase Flows*, Proceedings of the 15th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems.
- Bequette, B. W., (1998), *Process Dynamics: Modeling, Analysis, and Simulation*, Prentice Hall, Inc.,

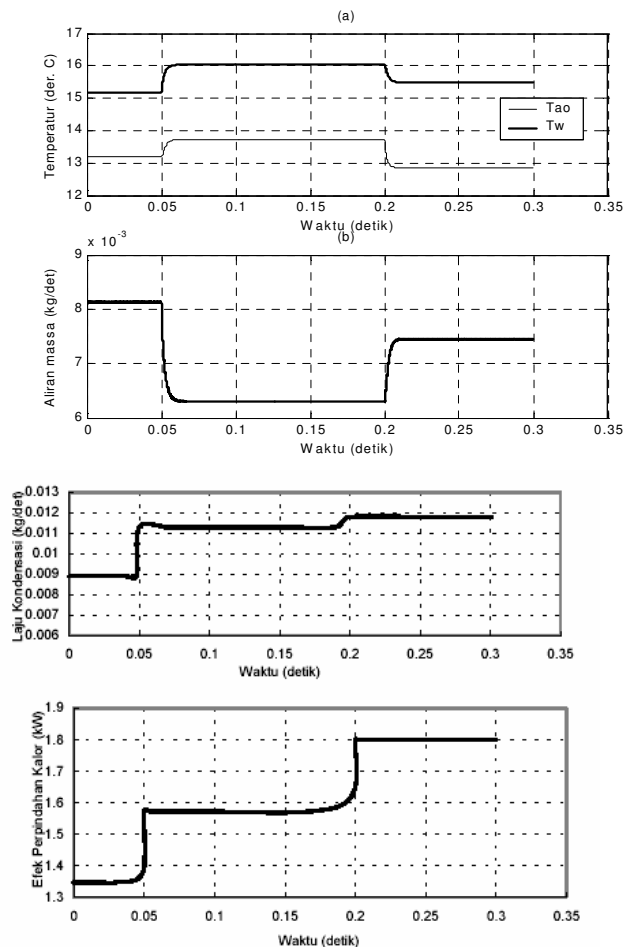
Lampiran

Kasus 1: Kenaikan *step* \dot{m}_i sebesar dari 0.1 ke 0.15 kg/det yang dimulai pada $t = 0.05$ detik dari *steady state*, kemudian kenaikan *step* tegangan listrik sebesar 5 kV ke 15 kV . dimulai dari $t = 0.2$ detik



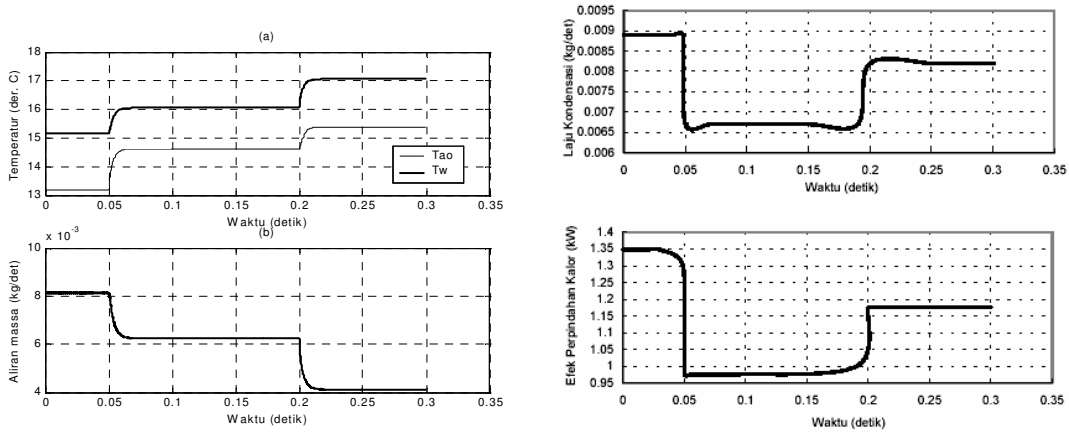
Gambar 4.1 (kasus 1 $T_r = 20^\circ\text{C}$). (a). Profil T_{ao} dan T_w pada $T_r = 20^\circ\text{C}$, (b). Laju aliran massa refrigeran, (c). Laju kondensasi, (d). Efek perpindahan kalor

Kasus 2: Kenaikan *step* tegangan listrik sebesar 5 kV ke 15 kV yang dimulai pada $t = 0.05$ detik dari *steady state*, kemudian kenaikan *step* \dot{m}_i sebesar 50% dimulai dari $t = 0.2$ detik



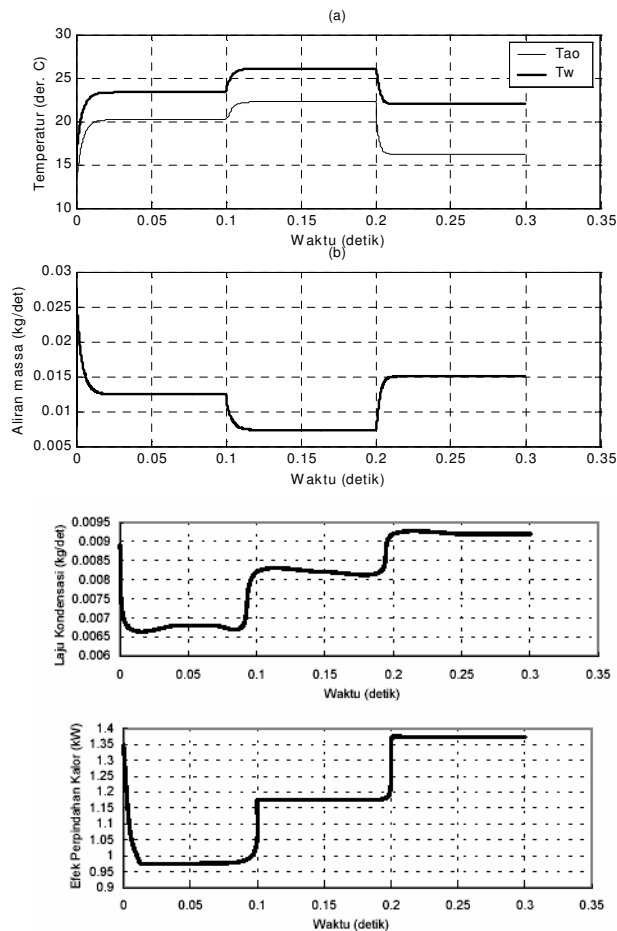
Gambar 4.2 (kasus 2 $T_r = 20\text{ }^\circ\text{C}$). (a). Profil T_{ao} dan T_w pada $T_r = 20\text{ }^\circ\text{C}$, (b). Laju aliran massa refrigeran, (c). Laju kondensasi, (d). Efek perpindahan kalor

Kasus 3: Penurunan *step* \dot{m}_i sebesar 50% yang dimulai pada $t = 0.05$ detik dari *steady state*, kemudian kenaikan *step* tegangan listrik sebesar 5 kV ke 15 kV . dimulai dari $t = 0.2$ detik

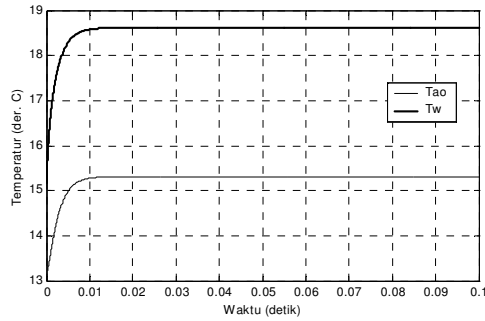


Gambar 4.3 (kasus 3 $T_r = 20\text{ }^\circ\text{C}$). (a). Profil T_{ao} dan T_w pada $T_r = 20\text{ }^\circ\text{C}$, (b). Laju aliran massa refrigeran, (c). Laju kondensasi, (d). Efek perpindahan kalor

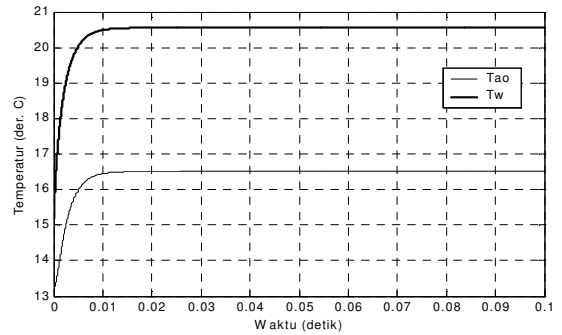
Kasus 4: Penurunan *step* \dot{m}_i 50% pada $t = 0$ detik dari kondisi stedi state, kemudian kenaikan *step* tegangan listrik sebesar 5 kV ke 15 kV . dimulai dari $t = 0.1$ detik, dan kenaikan *step* \dot{m}_i sebesar 50% yang dimulai pada $t = 0.2$ detik.



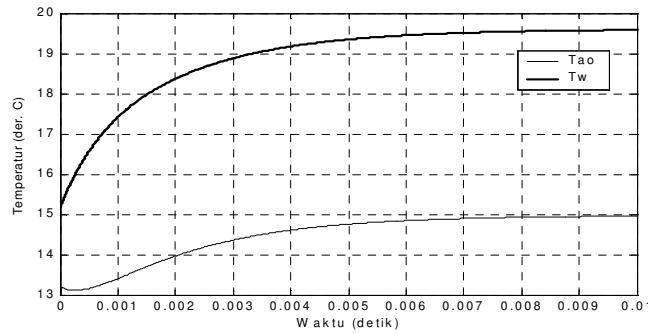
Gambar 4.4 (kasus 4 $T_r = 20\text{ }^\circ\text{C}$). (a). Profil T_{ao} dan T_w pada $T_r = 20\text{ }^\circ\text{C}$, (b). Laju aliran massa refrigeran, (c). Laju kondensasi, (d). Efek perpindahan kalor



Gambar 5. Respon perubahan temperatur terhadap Perubahan tegangan dari 5 kV ke 15 kV



Gambar 6. Respon perubahan temperatur terhadap perubahan tegangan dari 5 kV ke 25 kV



Gambar 7 Respon perubahan temperatur terhadap perubahan tegangan dari 5 kV ke 25 kV dan perubahan aliran massa air dari 0.1 kg/det ke 0.15 kg/det