

Pemodelan Sistem Pendingin Termoelektrik pada Modul *Superluminescence* LED

Nanang Sulistiyanto

Abstrak— *Superluminescence* LED (SLED) diaplikasikan secara luas dalam berbagai sistem serat optik, seperti sistem telekomunikasi dan sistem navigasi. Secara umum karakteristik elektrik SLED sama seperti LED biasa. Arus operasi SLED dapat menghasilkan panas berlebih yang dapat menurunkan kinerja atau bahkan merusak SLED sehingga SLED umumnya dilengkapi dengan pendingin termoelektrik atau TEC (*Thermoelectric Cooler*).

Suhu *junction* SLED dipengaruhi secara tak linier oleh arus SLED, arus TEC, dan suhu lingkungan serta karakteristik TEC. Untuk keperluan perancangan sistem kontrol, sistem pendingin tersebut perlu dimodelkan. Dalam penelitian ini, model simulasi dibuat berdasarkan aproksimasi numerik model fisika SLED dan TEC yang terkait dengan sifat termal dan elektrik. Operasi diferensial diaproksimasi secara langsung dengan menggunakan metode Euler.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu sisi dingin TEC yang dihasilkan melalui simulasi mendekati hasil pengukuran.

Kata Kunci—LED, Peltier, SLED, Termoelektrik.

I. PENDAHULUAN

PERUBAHAN suhu SLED tersebut dipengaruhi oleh pemanasan internal dan suhu lingkungan. Ketika SLED mendapatkan arus injeksi, sebagian energi listrik berubah menjadi energi panas yang akan menaikkan suhu *junction* dengan laju pemanasan tertentu. Kalor akan mengalir keluar jika suhu lingkungan lebih rendah daripada suhu *junction* tersebut. Sesuai dengan hukum termodinamika, laju konduksi termal tersebut sebanding dengan perbedaan suhu antara *junction* dan lingkungan.

Umumnya, SLED dioperasikan dengan arus dan suhu operasional konstan. Kalor yang dihasilkan SLED tersebut harus mampu diserap oleh sistem pendingin sehingga menghasilkan suhu yang konstan. Proses pendinginan yang bersifat dinamik semacam ini umumnya diimplementasikan dengan menggunakan pendingin termoelektrik atau dikenal dengan istilah TEC (*thermoelectric cooler*).

II. MODEL SLED DAN PENDINGIN TERMOELEKTRIK

A. Model Elektrik Diode

Berdasarkan prinsip kerja *p-n junction*, karakteristik elektrik diode dapat diaproksimasi sebagai berikut [3]:

$$I_D \approx I_S \left(e^{qV_D/\eta kT} - 1 \right) \quad (1)$$

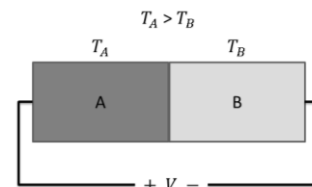
dengan I_D ialah arus operasi diode, I_S ialah arus bocor diode, q ialah muatan elektron, V_D ialah tegangan operasi diode, η ialah konstanta bahan *junction*, k ialah konstanta Boltzman, T ialah suhu *junction* (suhu mutlak). Besar konstanta η untuk germanium sekitar 1 sedangkan untuk silikon sekitar 1,3.

B. Efek Seebeck

Efek Seebeck merupakan fenomena terjadinya tegangan listrik yang ditimbulkan oleh perbedaan suhu pada dua jenis logam yang tersusun seperti dalam Gambar 1. Tegangan tersebut diukur dalam kondisi *open-loop* dan besarnya sebanding dengan selisih suhu pada kedua logam. Hal ini dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan koefisien Seebeck sebagai berikut [4]:

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B = \frac{V}{T_A - T_B} \quad (2)$$

dengan α_{AB} ialah koefisien Seebeck, V ialah tegangan listrik, serta T_A dan T_B ialah suhu mutlak logam A dan B. Koefisien Seebeck relatif mudah diukur sehingga koefisien ini sering digunakan sebagai salah satu parameter sistem pendingin termoelektrik.



Gambar 1 Efek Seebeck yang ditimbulkan oleh perbedaan suhu kedua logam A dan B.

C. Efek Peltier

Efek Peltier merupakan fenomena utama yang diterapkan dalam TEC. Fenomena ini merupakan kebalikan dari efek Seebeck, yaitu terjadinya aliran kalor pada dua jenis logam yang tersusun seperti dalam Gambar 2 sebagai akibat adanya aliran arus listrik. Besarnya aliran kalor pada kedua logam tersebut sebanding dengan besar arus yang mengalir, yaitu [4]:

$$q = \pi_{AB} I \quad (3)$$

dengan q ialah laju aliran kalor, π_{AB} ialah koefisien Peltier, dan I ialah arus listrik.

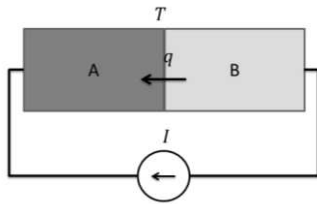
Lebih lanjut, hubungan koefisien Peltier dengan koefisien Seebeck telah dirumuskan oleh hubungan Kelvin sebagai berikut [4]:

$$\pi_{AB} = \alpha_{AB} T \quad (4)$$

Nanang Sulistiyanto adalah Dosen pada Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang.

dengan T ialah suhu logam. Hal ini menunjukkan bahwa koefisien Peltier bergantung pada suhu logam. Jadi, makin tinggi suhu logam maka makin cepat laju aliran kalor, seperti dalam persamaan berikut [4]:

$$q = \alpha_{AB}IT \tag{5}$$



Gambar 2 Efek Peltier yang ditimbulkan oleh aliran listrik dari logam A ke B.

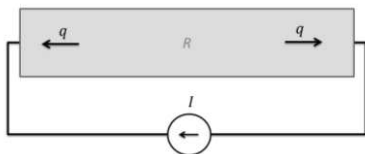
D. Efek Joule

Umumnya, material yang digunakan dalam pendingin termoelektrik memiliki resistansi elektrik. Seperti diilustrasikan dalam Gambar 3, aliran arus listrik I akan menyebabkan daya disipasi panas sebesar:

$$P = RI^2 \tag{6}$$

Fenomena ini dikenal sebagai efek Joule. Energi panas ini akan menyebar secara merata sebagai aliran kalor. Dalam model aliran kalor berdimensi satu seperti dalam Gambar 3, aliran kalor q akan memiliki nilai yang sama yaitu [4]:

$$q = \frac{RI^2}{2} \tag{7}$$



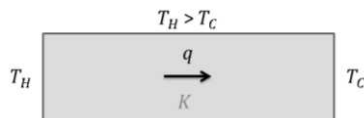
Gambar 3 Efek Joule yang ditimbulkan aliran arus listrik pada logam.

E. Konduktivitas Kalor

Pendingin termoelektrik memiliki dua sisi yang memiliki perbedaan suhu cukup tinggi. Perbedaan suhu tersebut menimbulkan konduksi kalor dari sisi panas T_H ke sisi dingin T_C , seperti dalam Gambar 4. Laju aliran kalor tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut [4]:

$$q = K(T_H - T_C) \tag{8}$$

dengan K ialah konduktivitas termal material, serta T_H dan T_C ialah suhu sisi panas dan dingin.



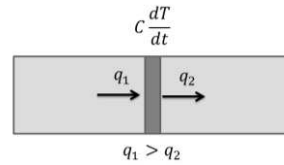
Gambar 4 Aliran kalor yang disebabkan perbedaan suhu pada kedua sisi logam.

F. Akumulasi Kalor

Akumulasi kalor pada bagian tertentu dalam suatu sistem pendingin menyebabkan kenaikan suhu, seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 5. Laju kenaikan suhu tersebut dipengaruhi oleh laju akumulasi kalor dan kapasitas termal material yang digunakan. Hal ini dapat dirumuskan sebagai berikut [4]:

$$C \frac{dT}{dt} = q_1 - q_2 \tag{9}$$

dengan C ialah kapasitas termal material, T ialah suhu pada bagian yang mengalami akumulasi kalor, t ialah waktu, dan q ialah laju aliran kalor. Jika q_1 lebih kecil dari q_2 , laju perubahan suhu akan bernilai negatif. Hal ini berarti terjadi proses pendinginan pada bagian tersebut.



Gambar 5 Akumulasi kalor pada suatu area yang mengakibatkan kenaikan suhu pada area tersebut.

G. Pendingin Termoelektrik

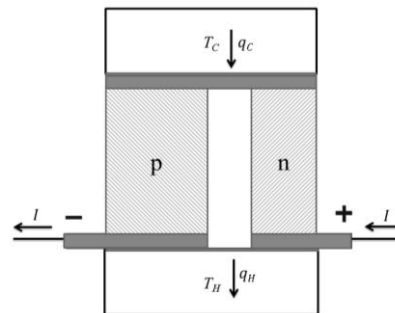
Konstruksi dasar pendingin termoelektrik atau TEC diilustrasikan dalam Gambar 6. Untuk memperbesar efek Peltier digunakan bahan semikonduktor ekstrinsik tipe P dan tipe N. Dalam semikonduktor tipe P, hole berperan sebagai pembawa muatan mayoritas sehingga ketika arus listrik mengalir pada bahan tersebut hole-hole seakan-akan bergerak secara aktif searah dengan aliran arus tersebut. Selain aktif sebagai pembawa muatan listrik, hole-hole tersebut juga berperan sebagai pembawa kalor. Dengan demikian, dalam bahan semikonduktor tipe P, kalor mengalir searah dengan arus listrik, yaitu dari sisi dingin ke sisi panas.

Aliran kalor total pada sisi dingin dapat ditentukan sebagai berikut [4]:

$$q_C = (\alpha_P - \alpha_N)IT_C - (K_P + K_N)(T_H - T_C) - \frac{(R_P + R_N)I^2}{2} \tag{10}$$

Nilai arus maksimum (I_{max}) tersebut dapat ditentukan sebagai berikut [4]:

$$I_{max} = \frac{\alpha_P - \alpha_N}{R_P + R_N} T_C \tag{11}$$



Gambar 6 Sistem pendingin termoelektrik semikonduktor [3].

III. METODE PENELITIAN

Pemodelan SLED berdasarkan karakteristik elektrik LED sedangkan pemodelan TEC berdasarkan model berdimensi satu fenomena fisika yang terkait dengan kalor. Persamaan diferensial yang terkait dengan fenomena fisika sistem pendingin termoelektrik SLED diaproksimasi secara numerik dengan menggunakan metode Euler. Parameter simulasi dihitung berdasarkan metode yang diusulkan oleh Luo [1]. Simulasi diimplementasikan dengan menggunakan program *open-source* Scilab versi 5.5.0 (64-bit) dalam lingkungan sistem operasi Windows 7 (64-bit).

Pengujian dilakukan dalam dua tahap dengan

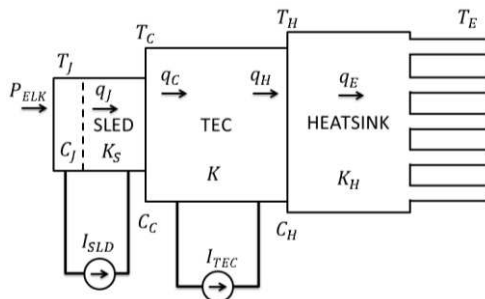
menggunakan modul SLED model QSDM-1550-2 [2]. Pada setiap percobaan, modul SLED dioperasikan terus-menerus selama 15 menit. Suhu SLED diukur melalui sensor suhu (termistor) yang telah tersedia dalam modul SLED tersebut dengan frekuensi sampling 800 Hz. Pengujian tahap pertama dilakukan dalam kondisi SLED tidak aktif. Setelah lima menit, arus TEC dinaikkan pada level tertentu selama lima menit. Level arus TEC tersebut meliputi 50, 100, 200, 300, dan 400 mA. Untuk mencegah kerusakan SLED, pengujian tahap kedua dilakukan dalam kondisi TEC aktif dengan arus operasi 300 mA. Setelah lima menit, arus SLED dinaikkan pada level tertentu selama lima menit. Sesuai dengan kemampuan SLED yang diuji, level arus SLED ditentukan sebesar 0, 50, 100, 150, dan 200 mA.

Simulasi dilakukan sesuai dengan prosedur pengujian tahap pertama dan kedua tersebut. Suhu lingkungan pada pengujian tahap pertama ditentukan berdasarkan kondisi awal dan akhir pengukuran suhu SLED. Di lain pihak, suhu lingkungan dalam pengujian tahap kedua diasumsikan konstan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Model Matematika

Modul SLED yang digunakan dalam tesis ini telah dilengkapi pendingin termoelektrik (TEC) internal dan sensor suhu internal dalam sebuah kemasan logam yang berfungsi sebagai *heatsink*. Model sederhana sistem pendingin SLED tersebut diilustrasikan dalam Gambar 7. Seluruh variabel dan parameter model tersebut dijelaskan sebagai berikut. I_S ialah arus operasi SLED dan I ialah arus TEC. T_J ialah suhu *junction* SLED, T_C ialah suhu sisi dingin TEC, T_H ialah suhu sisi panas TEC, dan T_E ialah suhu lingkungan. P_E ialah daya elektrik SLED yang diakibatkan oleh I_S , q_J ialah aliran kalor akibat perbedaan suhu T_J dan T_C , q_C ialah aliran kalor pada sisi dingin TEC, q_H ialah aliran kalor pada sisi panas TEC, dan q_E ialah aliran kalor yang terbuang ke lingkungan. Terakhir, C_J ialah kapasitansi termal pada *junction* SLED, C_C ialah kapasitansi termal sisi dingin TEC, dan C_H ialah kapasitansi termal sisi panas TEC.



Gambar 7 Pemodelan Sistem Pendingin SLED

Ketika SLED dinyalakan, SLED menghasilkan energi panas yang meningkatkan suhu *junction* T_J . Laju perubahan T_J tersebut sebanding dengan akumulasi kalor yang diakibatkan perbedaan aliran kalor P_E dan q_J , yaitu:

$$C_J \frac{dT_J}{dt} = P_E - q_J \quad (12)$$

Daya elektrik P_E berhubungan dengan karakteristik elektrik SLED yang telah dijelaskan dalam Persamaan (12). Persamaan tersebut dapat disederhanakan sebagai:

$$I_{SLED} \approx A(e^{BV_{SLED}/T_J} - 1) \quad (13)$$

dengan A dan B ialah parameter yang didapatkan dari percobaan. Karena SLED dioperasikan dengan arus konstan I_S , tegangan yang dihasilkan arus tersebut dapat diperoleh melalui modifikasi Persamaan (13), yaitu:

$$V_{SLED} \approx \frac{T_C}{B} \ln\left(1 + \frac{I_{SLED}}{A}\right) \quad (14)$$

Dengan demikian, daya elektrik yang diserap SLED dapat ditentukan, yaitu:

$$P_E = I_{SLED} V_{SLED} = \frac{T_C I_{SLED}}{B} \ln\left(1 + \frac{I_{SLED}}{A}\right) \quad (15)$$

Berdasarkan *datasheet*, nilai arus dan tegangan operasi SLED yang digunakan dalam penelitian ini diberikan dalam Tabel I. P_O sebesar 1 mW ialah daya optik untuk arus I_S sebesar 201 mA dan V_S sebesar 1,16 V yang bersesuaian dengan daya elektrik P_E sebesar 232 mW. Hal ini menunjukkan bahwa hanya sebagian kecil daya P_E yang dikonversi menjadi daya optik. Dengan demikian, daya optik tersebut dapat diabaikan dan seluruh daya elektrik P_E dapat diasumsikan berubah menjadi aliran kalor. Selanjutnya, sebagian kalor dari SLED mengalir ke sisi dingin TEC melalui mekanisme konduksi kalor, yaitu:

$$q_J = K_S(T_J - T_C) \quad (16)$$

TABLE I
PARAMETER MODUL SLED [1]

Parameter	Nilai	Satuan
P_o	1,00	mW
I_S	201,00	mA
$I_{S,max}$	221,00	mW
V_S	1,16	V
λ	1526,10	nm
BW	34,64	nm

Akumulasi kalor pada sisi dingin TEC menyebabkan perubahan suhu T_C , sebagai berikut:

$$C_C \frac{dT_C}{dt} = q_J - q_C \quad (17)$$

Demikian juga dengan akumulasi kalor pada sisi panas TEC menyebabkan perubahan suhu T_H sebagai berikut:

$$C_H \frac{dT_H}{dt} = q_H - q_E \quad (18)$$

sehingga aliran kalor q_C dan q_H dapat disederhanakan menjadi:

$$q_C = \alpha I_{TEC} T_C - K(T_H - T_C) - \frac{RI_{TEC}^2}{2} \quad (19)$$

$$q_H = \alpha I_{TEC} T_H + K(T_H - T_C) + \frac{RI_{TEC}^2}{2} \quad (20)$$

dengan α ialah konstanta Siebeck total TEC, K ialah konduktansi termal total TEC, dan R ialah resistansi elektrik total TEC. Ketiga parameter tersebut merupakan resultan dari dua parameter yang dihasilkan

semikonduktor tipe P dan tipe N dalam TEC. Terakhir, pembuangan kalor ke lingkungan melalui *heatsink* dapat dirumuskan sebagai konduksi kalor:

$$q_E = K_{HS}(T_H - T_E) \tag{21}$$

dengan K_{HS} ialah konduktivitas *heatsink*.

B. Aproksimasi Numerik

Dengan menggunakan transformasi bilinear, integrasi dalam Persamaan (12)–(21) diaproksimasi secara numerik hingga menghasilkan set persamaan diskrit berikut:

$$P_E(k) = \frac{T_J(k)I_S(k)}{2A} \ln\left(1 + \frac{I_S(k)}{B}\right) \tag{22}$$

$$P(k) = K_S(T_J(k) - T_C(k)) \tag{23}$$

$$g_J(k) = \frac{P_E(k) - q_J(k)}{C_J} \tag{24}$$

$$q_C(k) = \alpha I(k)T_C(k) - K(T_H(k) - T_C(k)) - \frac{RI(k)^2}{2} \tag{25}$$

$$g_C(k) = \frac{q_J(k) - q_C(k)}{C_1} \tag{26}$$

$$q_H(k) = \alpha I_{TEC}(k)T_H(k) + K(T_H(k) - T_C(k)) + \frac{RI_{TEC}(k)^2}{2} \tag{27}$$

$$q_E(k) = K_{HS}(T_H(k) - T_E(k)) \tag{28}$$

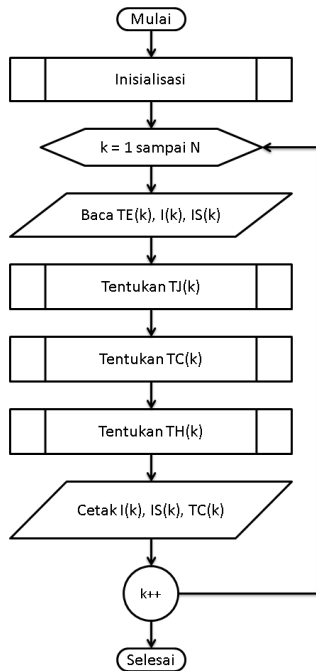
$$g_H(k) = \frac{q_H(k) - q_E(k)}{C_2} \tag{29}$$

$$T_J(k+1) = g_J(k)\Delta t + T_J(k) \tag{30}$$

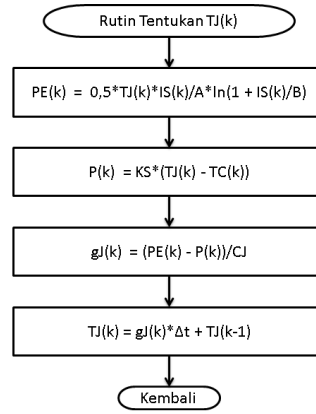
$$T_C(k+1) = g_C(k)\Delta t + T_C(k) \tag{31}$$

$$T_H(k+1) = g_H(k)\Delta t + T_H(k) \tag{32}$$

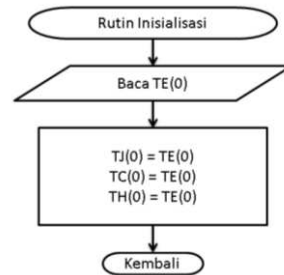
Berdasarkan set persamaan diskrit tersebut, dibuat algoritma program simulasi seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 8–12.



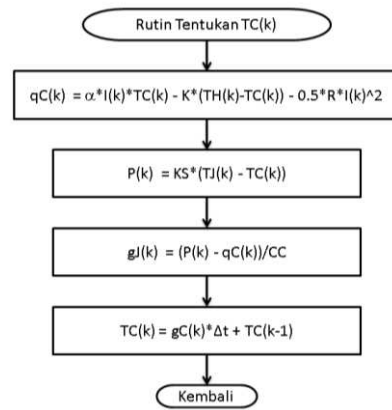
Gambar 8 Program Utama Simulasi Sistem Pendingin SLED



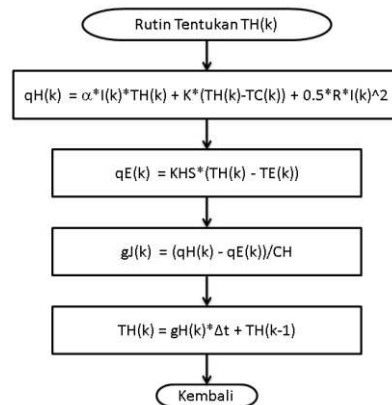
Gambar 10 Rutin Penentuan Suhu Junction



Gambar 9 Rutin Inisialisasi



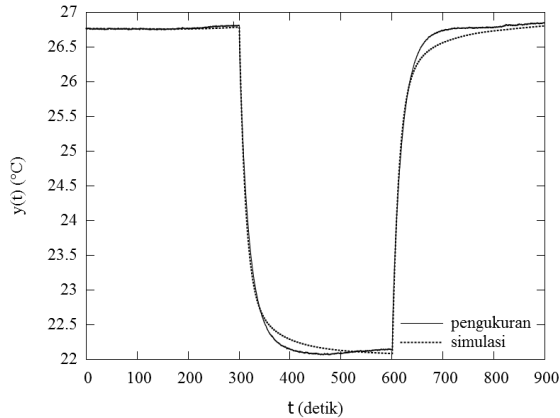
Gambar 11 Rutin Penentuan Suhu Sisi Dingin



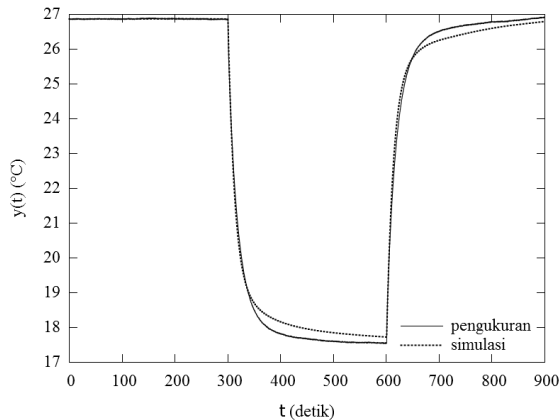
Gambar 12 Rutin Penentuan Suhu Sisi Panas

C. Hasil Simulasi

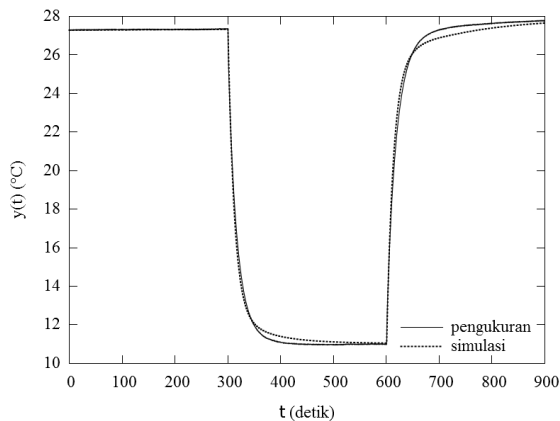
Sebagai hasil pengujian tahap pertama, perbandingan hasil simulasi dan hasil pengujian untuk arus I_S sebesar nol dan I sebesar 50–400 mA disajikan dalam Gambar 13 sampai 17. Untuk I sebesar 50–300 mA, kesalahan rms yang dihasilkan kurang dari 0,5°C dan kesalahan absolut meningkat dari 0,22°C sampai 1,64°C. Pengujian untuk arus I sebesar 400 mA menghasilkan kesalahan yang terbesar. Hal ini disebabkan oleh ketidakidealan rangkaian elektronika yang digunakan sebagai sensor dan aktuator.



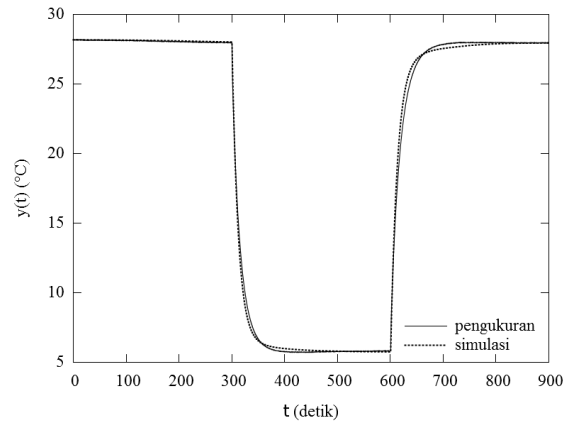
Gambar 13 Hasil pengujian untuk I sebesar 50 mA dengan kesalahan rms sebesar 0,08°C dan kesalahan maksimum 0,22°C



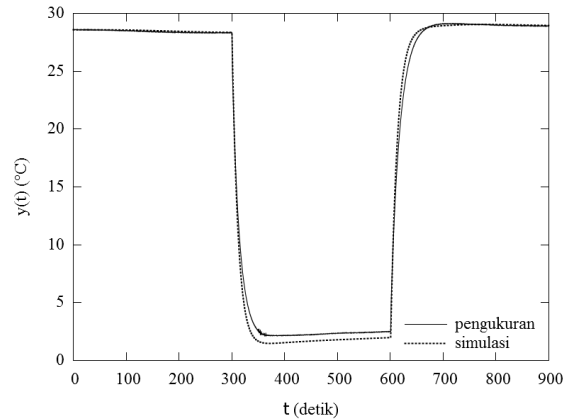
Gambar 14 Hasil pengujian untuk I sebesar 100 mA dengan kesalahan rms sebesar 0,20°C dan kesalahan maksimum 0,50°C



Gambar 15 Hasil pengujian untuk I sebesar 200 mA dengan kesalahan rms sebesar 0,25°C dan kesalahan maksimum 0,90°C

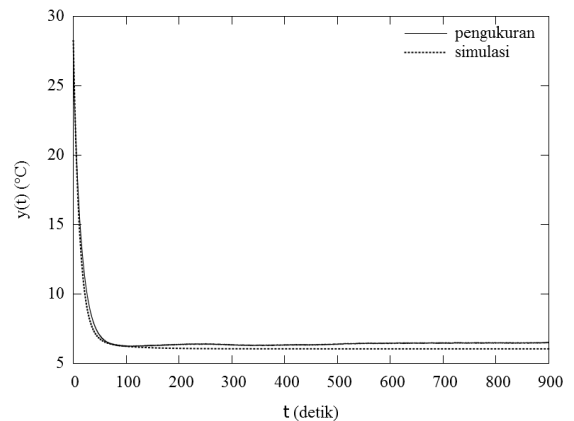


Gambar 16 Hasil pengujian untuk I sebesar 300 mA dengan kesalahan rms sebesar 0,33°C dan kesalahan maksimum 1,64°C

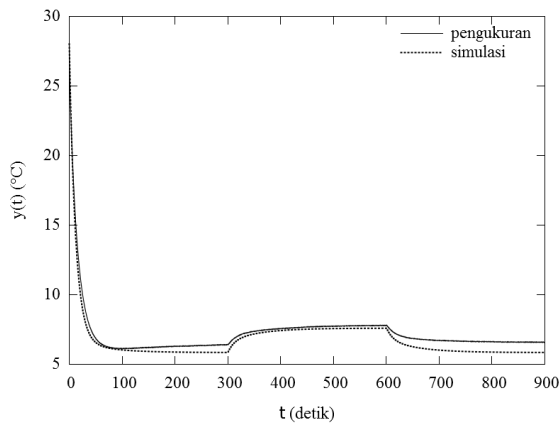


Gambar 17 Hasil pengujian untuk I sebesar 400 mA dengan kesalahan rms sebesar 0,57°C dan kesalahan maksimum 2,17°C

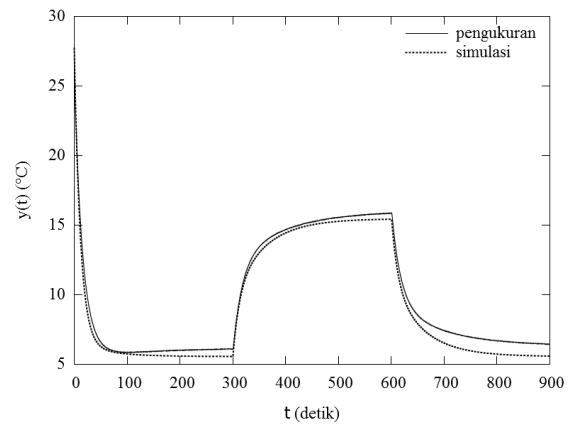
Selanjutnya, hasil pengujian kedua disajikan dalam Gambar 18 sampai 20 untuk arus I sebesar 300 mA dan I_S sebesar 0–200 mA. Hasil pengujian untuk kondisi $I_S = 0$ menunjukkan kenaikan suhu yang signifikan. Kenaikan ini kemungkinan disebabkan oleh kenaikan suhu lingkungan karena suhu ruangan tempat pengujian tersebut dilakukan tidak dikontrol oleh pendingin ruangan. Secara keseluruhan, pengujian tahap ini menghasilkan kesalahan rms sekitar 0,5°C sampai 0,6°C yang mengindikasikan bahwa hasil simulasi memiliki kecenderungan yang sama dengan hasil pengujian.



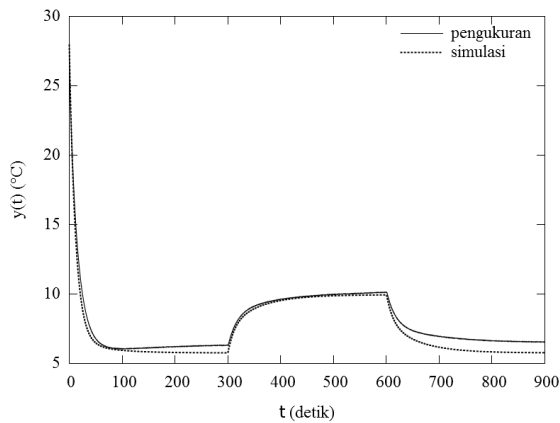
Gambar 18 Hasil pengujian untuk I_S sebesar 0 mA dengan kesalahan rms sebesar 0,38°C dan kesalahan maksimum 1,21°C



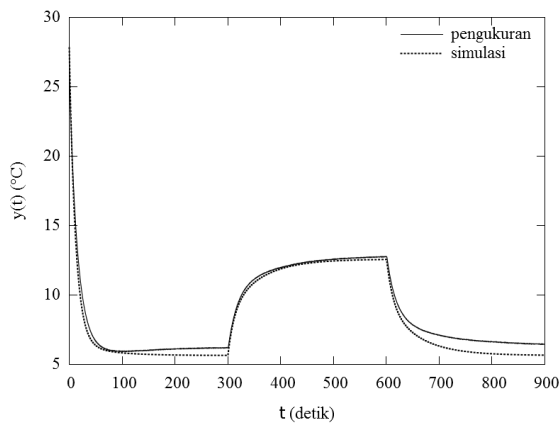
Gambar 19 Hasil pengujian untuk I_S sebesar 50 mA dengan kesalahan rms sebesar $0,50^{\circ}\text{C}$ dan kesalahan maksimum $1,25^{\circ}\text{C}$



Gambar 22 Hasil pengujian untuk I_S sebesar 200 mA dengan kesalahan rms sebesar $0,61^{\circ}\text{C}$ dan kesalahan maksimum $1,27^{\circ}\text{C}$



Gambar 20 Hasil pengujian untuk I_S sebesar 100 mA dengan kesalahan rms sebesar $0,52^{\circ}\text{C}$ dan kesalahan maksimum $1,25^{\circ}\text{C}$



Gambar 21 Hasil pengujian untuk I_S sebesar 150 mA dengan kesalahan rms sebesar $0,54^{\circ}\text{C}$ dan kesalahan maksimum $1,27^{\circ}\text{C}$

V. KESIMPULAN

Berdasarkan fenomena-fenomena fisika yang terkait dengan kalor, sistem pendingin termoelektrik dapat disimulasikan untuk memprediksi suhu *junction* SLED, suhu sisi dingin dan panas TEC, dengan arus SLED, arus TEC, dan suhu lingkungan sebagai input. Hasil pengujian menunjukkan bahwa simulasi sistem pendingin termoelektrik dapat digunakan untuk merepresentasikan modul SLED riil dengan kesalahan rms berkisar antara berkisar $0,5^{\circ}\text{C}$ sampai $0,6^{\circ}\text{C}$ pada kondisi arus TEC sebesar 300 mA dan arus SLED bervariasi dari 0 sampai 200 mA.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Luo, "A Simple Method To Estimate The Physical Characteristics Of A Thermoelectric Cooler From Vendor Datasheets," *Electronics Cooling*, August 2008.
- [2] Qphotonics. Fiber coupled superluminescent diode, 1mW @ 1550nm, QSDM-1550-2. Datasheet. 2008.
- [3] S. S. Li, *Semiconductor Physical Electronics*, Second ed., New York: Springer, 2006.
- [4] H. Goldsmid, *Introduction to Thermoelectricity*, R. Hull, R. Osgood, J. Parisi and H. Warlimont, Eds., Berlin: Springer, 2010.