

Sistem Pemetaan Suhu Permukaan Lahan Menggunakan Sensor Inframerah untuk Pendeteksi Dini Kebakaran

Widya Yanuar Samsudin, Muhammad Rivai, dan Tasripan

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: tasripan@ee.its.ac.id

Abstrak— Saat ini kebakaran lahan sering terjadi di Indonesia. Pencegahan dapat dilakukan dengan cara mendeteksi titik panas (*hotspot*) sebelum terjadinya kebakaran. Titik panas adalah daerah yang memiliki suhu permukaan relatif lebih tinggi dibandingkan daerah di sekitarnya. Pada penelitian ini telah dirancang suatu sistem pencegahan yang dapat memetakan suhu suatu permukaan area atau lahan. Pengukur suhu berupa sensor inframerah *thermopile* akan mengukur intensitas cahaya inframerah yang terpancar dari suatu titik atau objek tanpa kontak. Intensitas cahaya inframerah ini proporsional terhadap suhu objek tersebut. Tegangan keluaran dari sensor *thermopile* dikuatkan oleh rangkaian pengondisi sinyal dan kemudian dibaca *Analog to Digital Converter* pada mikrokontroler Arduino Nano. Sistem pemindai yang menggunakan motor servo dan motor stepper digunakan untuk mengubah arah titik pengukuran suhu beberapa titik dalam area lahan sehingga suhu suatu area di sekitar sistem dapat dipetakan. Data-data suhu pada area tersebut kemudian divisualisasikan pada perangkat lunak pemetaan komputer yang dirancang menggunakan IDE Microsoft Visual Studio. Sistem pengukur suhu berdasarkan sensor inframerah *thermopile* dapat mengukur suhu tanpa kontak dengan rerata kesalahan sebesar 6,4% pada rentang pengukuran suhu 37 °C s.d. 170 °C.

Kata Kunci—Inframerah, Kebakaran, Suhu, *Thermopile*.

I. PENDAHULUAN

KEBAKARAN lahan dan hutan merupakan fenomena alam yang sering terjadi di Indonesia. Kerugian yang diakibatkan mulai dari keanekaragaman hayati yang berkurang, habitat hewan-hewan yang hilang, hingga manusia yang dirugikan baik materil maupun non materil akibat kebakaran yang terjadi. Pada 2015, kebakaran terjadi pada 2,6 hektar lahan, yaitu setara dengan ukuran empat setengah kali lipat Pulau Bali dan kerugian bagi negara Indonesia mencapai 221 triliun rupiah [1]. Umumnya kebakaran hutan di Indonesia pada lahan gambut. Lahan gambut adalah lahan basah dengan lapisan tanah berair yang terdiri dari bahan tanaman mati dan membusuk.

Kebakaran hutan ini disebabkan oleh berbagai macam mulai dari *human error*, faktor alam yaitu suhu yang tinggi, curah hujan yang rendah, dan bahan yang ada pada lahan yang mudah terbakar [2]. Siklus terjadinya kebakaran hutan terjadi saat musim kemarau yang memang merupakan saat di mana lahan mulai mengering dan suhu sangat tinggi. Penanganan setelah kebakaran hutan tergolong lebih sulit dan memakan biaya yang

lebih banyak. Jika sudah telanjur terbakar, api di lahan gambut jadi sulit dipadamkan karena lahan gambut akan sangat kering sampai kedalaman tertentu.

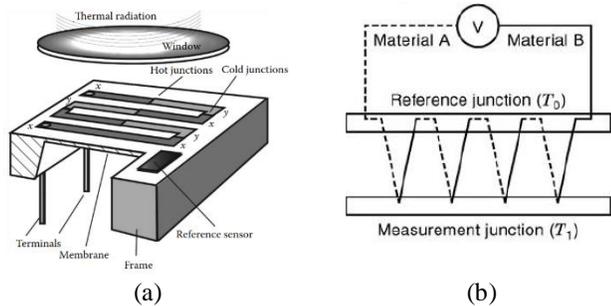
Untuk itu diperlukan suatu pencegahan kebakaran lahan. Pencegahan dapat dilakukan dengan pembacaan salah satu parameter penyebab kebakaran lahan yaitu *hotspot* (titik panas). *Hotspot* secara definisi dapat diartikan sebagai daerah yang memiliki suhu permukaan relatif lebih tinggi dibandingkan daerah di sekitarnya [3], sehingga pemetaan suhu permukaan lahan dapat digunakan untuk sistem pencegahan kebakaran pada tahap selanjutnya. Teknologi yang sudah umum untuk pembacaan suhu di permukaan bumi adalah *remote sensing* menggunakan satelit. Salah satu satelit yang digunakan adalah NOAA-AVHRR. Satelit ini dapat memberikan data global dua kali dalam sehari [4]. Resolusi tertinggi tanah yang dapat diperoleh dari satelit ini adalah 1.1 km [5]. Hal-hal tersebut membuat data yang didapat jauh dari *real-time* dan beresolusi yang masih terlalu besar.

Untuk pencegahan kebakaran lahan yang lebih efektif, maka diperlukan sistem yang mempunyai spesifikasi yang lebih baik dengan pengukuran secara *in-situ*. Metode ini mempunyai waktu pembacaan yang lebih cepat (mendekati *real-time*) dan resolusi yang lebih kecil. Pengukuran suhu permukaan lahan tanpa kontak dilakukan menggunakan sensor inframerah *thermopile*. Motor Stepper dan servo digunakan untuk pemindaian sehingga data suhu di area sekitar sistem dapat terbaca. Data-data tersebut kemudian divisualisasikan dalam pemetaan suhu permukaan lahan pada program komputer.

II. DASAR TEORI

Salah satu kelas dari sensor inframerah disebut detektor termal yang merespons panas yang diakibatkan oleh penyerapan radiasi termal oleh permukaan elemen penginderaan yang mampu mengubah tingkat panas menjadi sinyal listrik. Panas yang diserap meningkatkan suhu permukaan, dan kenaikan suhu yang dihasilkan menjadi ukuran radiasi termal yang terjadi. Dalam rujukan [6] suhu objek dapat dihitung dari persamaan:

$$T_b \approx T_{sc} + \frac{V}{4Ag\epsilon\epsilon_s\sigma T_{sc}^3} \quad (1)$$



Gambar 1. (a) Penampang Melintang Sensor Thermopile, (b) Diagram Skematik Thermopile yang Terdiri dari 4 Thermokopel yang Dihubung Seri [8].

dimana T_b adalah suhu objek dan T_{sc} adalah suhu sensor dalam satuan K dan V adalah tegangan output thermopile dalam volt. Sedangkan parameter luas permukaan A dengan m^2 , ϵ emisivitas objek, ϵ_s emisivitas sensor, dan σ adalah konstanta Stefan-Boltzman yang bernilai $5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$, adalah faktor kalibrasi. Untuk menghitung suhu objek perlu mengetahui dua variable yaitu suhu sensor dan tegangan keluaran detektor. Faktor kalibrasi ditemukan selama kalibrasi thermometer.

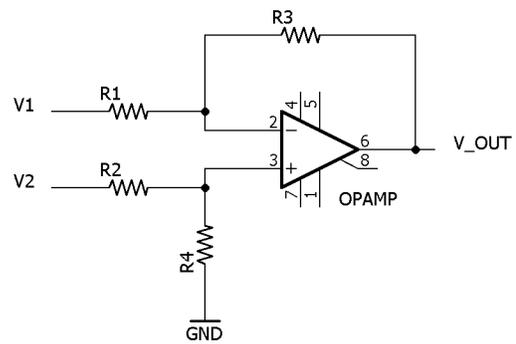
Thermopile adalah detektor termal paling populer. Thermopile termasuk dalam kelas detektor inframerah pasif yang menghasilkan output listrik sehubungan dengan fluks termal yang diserap tanpa memerlukan sumber energi tambahan. Thermopile terdiri dari thermokopel yang terhubung secara seri dan sebuah penyerap inframerah. Karena lapisan penyerapan menyerap daya inframerah yang dipancarkan dari target yang panas, maka perbedaan suhu antara *hot junctions* dan *cold junctions* dari thermokopel terbentuk. Tegangan thermoelektrik antara dua terminal dari thermokopel yang dihubungkan seri akan terbentuk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1(b). Tegangan keluaran dari thermopile proporsional terhadap daya inframerah yang terserap sebagai fungsi suhu dari pemancar inframerah dan suhu lingkungan dari thermopile [7].

Thermopile menghasilkan sinyal yang hampir proporsional dengan gradien suhu antara *hot junction* dan *cold junction* sehingga thermopile harus ditambahkan sensor suhu absolut atau sensor suhu referensi, misalnya thermistor [8].

Thermistor dibagi menjadi dua kelompok, yaitu NTC yang umum digunakan untuk pengukuran suhu, dan PTC. Resistansi thermistor NTC menurun seiring dengan kenaikan suhu. Resistansi thermistor (S) sebesar ohm berhubungan dengan suhu absolutnya T Kelvin dengan persamaan polinomial:

$$\ln S = A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2} + \frac{A_3}{T^3} \quad (2)$$

Model komputasi thermistor ada 3, yaitu model sederhana, model Fraden, dan model Steinhart-Hart. Model Steinhart-Hart mempunyai *error* terkecil dari dua model lainnya [9]. Rumus model Steinhart-Hart dinyatakan:



Gambar 2. Konfigurasi Rangkaian Penguat Diferensial

$$T = [A + B \ln S + C(\ln S)^3]^{-1} \quad (3)$$

Komputasi dengan model Steinhart-Hart memerlukan 3 titik kalibrasi resistansi thermistor terhadap suhu, T_1 dengan S_1 , T_2 dengan S_2 , dan T_3 dengan S_3 untuk mendapatkan koefisien A , B , dan C :

$$\begin{aligned} L_1 &= \ln(S_1) & Y_1 &= \frac{1}{T_1} \\ L_2 &= \ln(S_2) & Y_2 &= \frac{1}{T_2} \\ L_3 &= \ln(S_3) & Y_3 &= \frac{1}{T_3} \\ Y_2 &= \frac{Y_2 - Y_1}{L_2 - L_1} & Y_3 &= \frac{Y_3 - Y_1}{L_3 - L_1} \\ C &= \left(\frac{Y_3 - Y_2}{L_3 - L_2} \right) (L_1 + L_2 + L_3)^{-1} \\ B &= Y_2 - C(L_1^2 + L_1 L_2 + L_2^2) \\ A &= Y_1 - (B + L_1^2 C)L_1 \end{aligned} \quad (4)$$

Penguat diferensial memperkuat selisih antara dua tegangan. Rangkaian penguat diferensial ditunjukkan pada Gambar 2. Fungsi alih untuk rangkaian penguat diferensial diberikan sebagai berikut [10]:

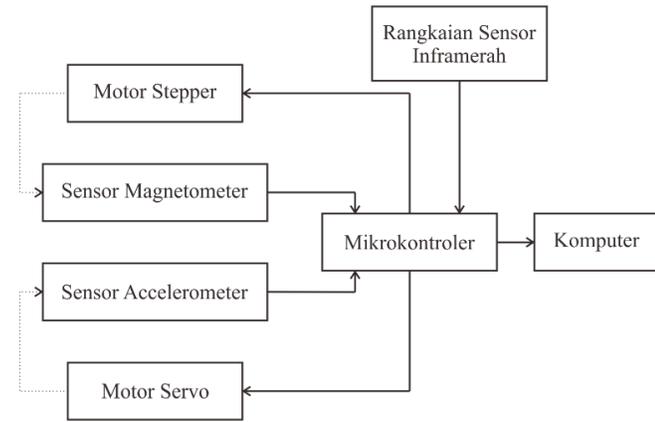
$$V_{out} = -V_1 \left(\frac{R_3}{R_1} \right) + V_2 \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \left(\frac{R_1 + R_3}{R_1} \right) \quad (5)$$

Jika resistor $R_1 = R_2$ dan $R_3 = R_4$, fungsi alih penguat diferensial dapat disederhanakan menjadi fungsi sebagai berikut:

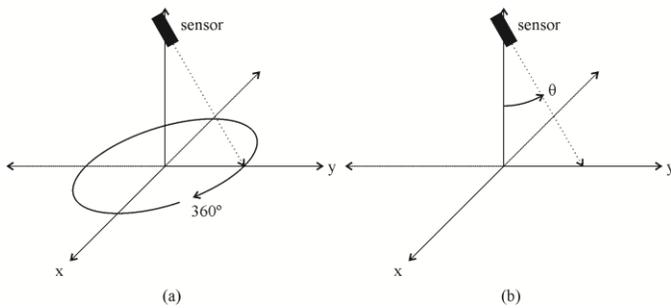
$$V_{out} = \frac{R_3}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (6)$$

III. PERANCANGAN SISTEM

Sistem pemetaan suhu permukaan lahan ini mempunyai sistem kontrol utama mikrokontroler berupa *board* Arduino Nano. Mikrokontroler ini digunakan untuk mengubah nilai analog menjadi digital besar suhu yang diukur oleh rangkaian sensor inframerah dengan menggunakan ADC, mengatur putaran motor stepper dengan fungsi *digital output*-nya, mengatur putaran motor servo dengan fasilitas PWM-nya, membaca nilai dari sensor akselerometer dan magnetometer



Gambar 3. Blok Diagram Sistem



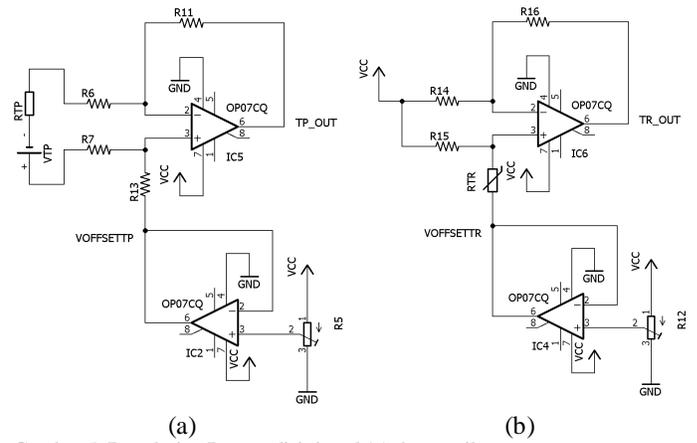
Gambar 4. Ilustrasi Arah Putaran Motor (a) Stepper, (b) Servo

melalui protokol I2C, dan mengirim data suhu yang telah terukur ke komputer dengan komunikasi serial. Blok diagram sistem ini ditunjukkan pada Gambar 3.

Sistem pemindaian terdiri dari motor servo dan motor stepper yang operasi putarannya ditunjukkan pada Gambar 4. Motor servo digunakan untuk mengubah arah pengukuran dari sensor thermopile sehingga arah pengukuran dapat berubah dalam radiusnya (kemiringan dari arah sensor). Sensor accelerometer digunakan mengetahui besar derajat kemiringan sensor accelerometer. Motor stepper digunakan untuk mengubah arah pengukuran dari sensor thermopile sehingga arah pengukuran dapat berputar (mengelilingi) 360° di sekitar sistem. Untuk mengetahui arah mata angin dari sistem maka digunakan sensor magnetometer.

Rangkaian sensor inframerah terdiri dari sensor inframerah thermopile dan rangkaian pengondisi sinyalnya. Rangkaian pengondisi sinyal digunakan untuk menguatkan tegangan output dari sensor inframerah thermopile. Rangkaian ini terdiri dari penguat diferensial. Sensor thermopile yang digunakan adalah tipe ZTP-135SR. Sensor thermopile ini sudah dilengkapi thermistor NTC yang digunakan untuk mengukur suhu sensor itu sendiri sebagai referensi. Suhu permukaan lahan yang telah terukur kemudian dikirim ke komputer dengan komunikasi serial. Perangkat lunak yang digunakan telah dirancang dengan IDE Microsoft Visual Studio untuk menampilkan visualisasi dari pemetaan suhu permukaan lahan.

Rangkaian pengondisi sinyal thermopile pada Gambar 5(a) menggunakan rangkaian penguat diferensial yang akan menghasilkan tegangan keluaran V_{OUT_TP} dengan penambahan



Gambar 5. Rangkaian Pengondisi sinyal (a) thermopile, (b) thermistor

tegangan offset V_{OFF_TP} dari output rangkaian *non-inverting voltage follower*. Resistor variable R_5 digunakan untuk mengatur V_{OFF_TP} dengan dasar rangkaian pembagi tegangan. Sesuai dengan persamaan (6), tegangan thermopile V_{TP} menjadi:

$$V_{TP} = \left(\frac{R_6}{R_{11}} \right) (V_{OUT_TP} - V_{OFF_TP}) \tag{7}$$

Rangkaian pengondisi sinyal thermistor pada Gambar 5(b) menggunakan rangkaian penguat diferensial yang akan menghasilkan tegangan keluaran V_{OUT_TR} dengan penambahan tegangan offset V_{OFF_TR} dari output rangkaian *non-inverting voltage follower*. Resistor variable R_{13} digunakan untuk mengatur V_{OFF_TR} dengan dasar rangkaian pembagi tegangan. Sesuai dengan persamaan (5), resistansi thermistor R_{TR} menjadi:

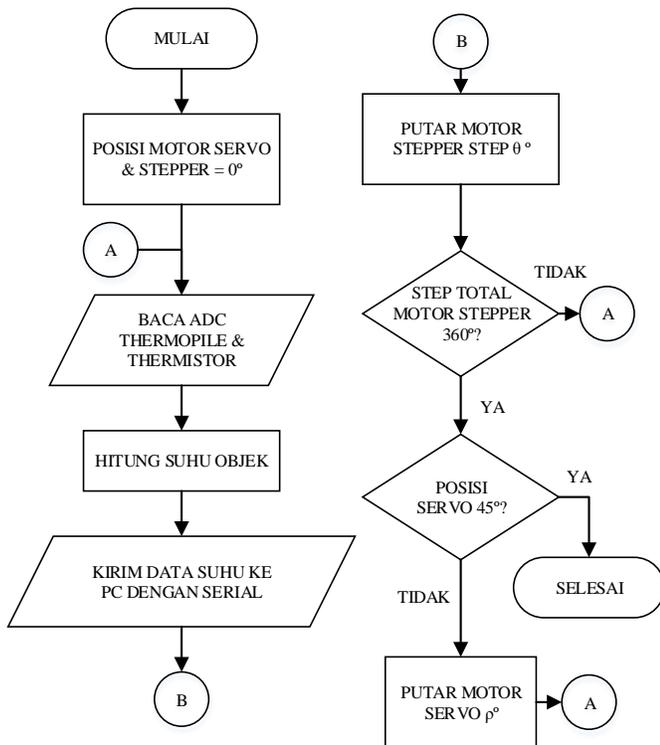
$$R_{TR} = \frac{x - R_{15}}{1 - x}, \text{ di mana} \tag{8}$$

$$x = \left[\frac{V_{OUT_TR} - V_{OFF_TR}}{V_{CC}} + \left(\frac{R_{16}}{R_{14}} \right) \right] \left(\frac{R_{14}}{R_{14} + R_{16}} \right)$$

Perangkat lunak pengukuran suhu pada mikrokontroler membaca tegangan keluaran rangkaian pengondisi sinyal thermopile V_{OUT_TP} dan V_{OUT_TR} dengan fasilitas ADC. Kemudian dilakukan komputasi pengukuran suhu objek T_B sesuai dengan persamaan (1) memerlukan variabel suhu sensor T_{SC} dengan persamaan (3), tegangan keluaran dari sensor thermopile V_{TP} dengan persamaan (7) dan faktor kalibrasi. Faktor kalibrasi K_P didapatkan dengan bebarapa kalibrasi dengan membalik persamaan (1) menjadi persamaan (9). Setelah K_P didapatkan, pengukuran suhu objek T_B dapat dilakukan. Diagram alir dari komputasi pengukuran suhu ditunjukkan pada Gambar 6.

$$K_P \approx \frac{V_{TP}}{4 \cdot T_{SC}^3 (T_B - T_{SC})} \tag{9}$$

Perangkat lunak pada mikrokontroler Arduino Nano dimulai dengan inialisasi sudut pada motor servo dan stepper. Kemudian dilakukan pembacaan tegangan keluaran rangkaian pengondisi sinyal thermopile dan thermistor dengan ADC.



Gambar 6. Diagram Alir Perangkat Lunak Mikrokontroler

Hasil pembacaan ADC kemudian dihitung sesuai rancangan perangkat lunak pengukuran suhu. Data suhu, sudut servo, dan sudut stepper kemudian dikirim ke komputer melalui komunikasi serial. Kemudian untuk mengubah arah pengukuran dilakukan dengan memutar motor stepper sebesar θ° . Jika step total dari motor stepper belum 360° maka akan mengulang pembacaan ADC kembali. Begitu pula jika sudut servo belum 45° akan mengulang ke pembacaan ADC. Aliran program ini ditunjukkan pada Gambar 6.

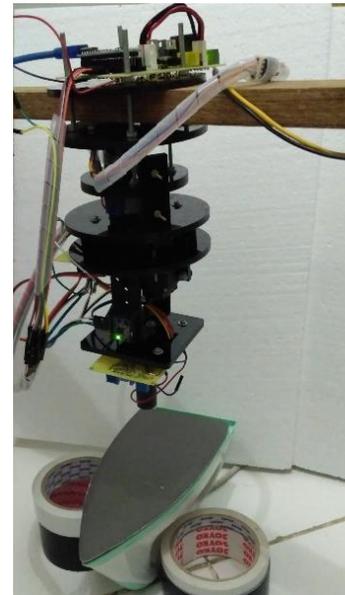
Akselerometer digunakan untuk menghitung sudut kemiringan ρ sensor terhadap sumbu normal bumi (percepatan gravitasi bumi) di mana G_{PX} adalah percepatan terukur pada sumbu X, G_{PY} adalah percepatan terukur pada sumbu Y, dan G_{PZ} adalah percepatan terukur pada sumbu Z. Rumus yang digunakan untuk menghitung ada pada persamaan (10).

$$\rho = \cos^{-1} \frac{G_{PZ}}{\sqrt{G_{PX}^2 + G_{PY}^2 + G_{PZ}^2}} \quad (10)$$

Magnetometer digunakan untuk mengukur arah mata angin (kompas) θ sensor di mana H_X adalah medan magnet terukur pada sumbu X dan H_{PY} adalah medan magnet terukur pada sumbu Y. Rumus yang digunakan untuk menghitung ada pada persamaan (11). Fungsi dalam program adalah atan2() yaitu *four-quadrant inverse tangent*.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{H_Y}{H_X} \quad (11)$$

Perangkat lunak pemetaan pada komputer digunakan untuk memvisualisasikan data suhu permukaan pada suatu area lahan



Gambar 7. Pengujian yang Dilakukan untuk Mendapatkan Faktor Kalibrasi (K_P) dan Pengukuran Suhu Objek

yang sudah diukur. Data suhu diterima melalui komunikasi serial. Data sudut motor servo dan stepper juga diterima yang nantinya digunakan untuk menentukan koordinat piksel pada berkas gambar. Data suhu dikonversi menjadi data piksel yang mengandung nilai RGB di setiap piksel gambar. Berkas gambar kemudian akan dihasilkan dari data piksel tersebut.

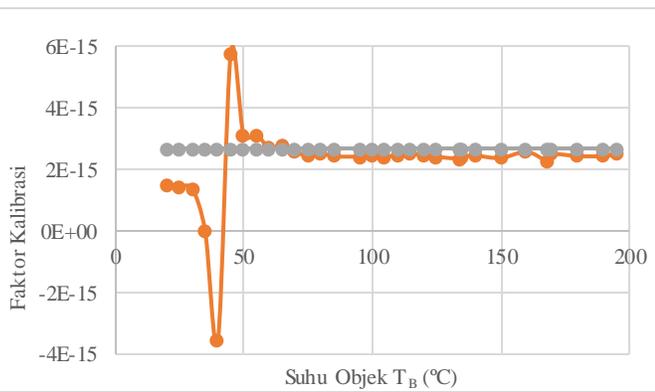
IV. PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN SISTEM

Sistem yang dirancang memiliki bagian utama yang mengandung rangkaian regulator, motor servo dan motor stepper sebagai pengubah arah pengukuran suhu, sensor thermopile dan rangkaian pengondisi sinyal, sensor akselerometer, dan sensor magnetometer. Pengujian untuk mendapatkan faktor kalibrasi (K_P) seperti pada Gambar 7 dilakukan untuk mendapatkan nilai faktor kalibrasi K_P menggunakan persamaan (9). Suhu objek T_B diukur secara manual menggunakan thermogun. Suhu sensor diukur menggunakan thermistor menggunakan persamaan (3) yang didapatkan dari pembacaan ADC pengondisi sinyal thermistor. Sedangkan tegangan thermopile dihitung menggunakan pengondisi sinyal thermopile.persamaan (7) yang didapatkan dari pembacaan ADC Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada pengukuran pada objek bersuhu 50°C s.d. 195°C nilai K_P cukup konstan dengan nilai rata-rata yang dinyatakan:

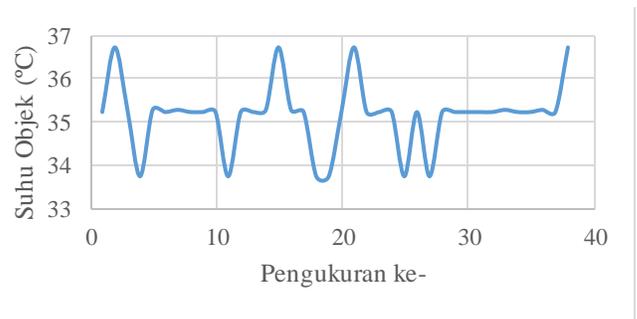
$$\overline{K_P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{P_i} = 2.65 \times 10^{-15} \quad (12)$$

Nilai K_P yang didapatkan kemudian digunakan dalam perhitungan pengukuran suhu objek.

Pengujian pengukuran suhu objek dengan program dan rangkaian thermopile ($T_{B(R)}$) akan dibandingkan dengan pengukuran secara manual menggunakan thermogun ($T_{B(M)}$). Hasil pengujian ini ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 8.



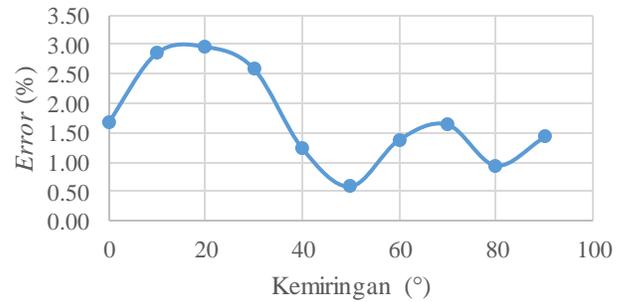
Gambar 8. Pengujian Faktor Kalibrasi



Gambar 9. Pengujian Pengukuran Suhu terhadap Objek Bersuhu Konstan

Tabel 1. Hasil dan Error Pengujian Pengukuran Suhu

T _{B(R)} (°C)	T _{B(M)} (°C)	Error (%)	T _{B(R)} (°C)	T _{B(M)} (°C)	Error (%)
170	173	1.73	75	82	8.54
157	162	3.09	71	76	6.58
143	150	4.67	68	73	6.85
131	135	2.96	65	70	7.14
121	127	4.72	62	66	6.06
116	123	5.69	58	63	7.94
109	116	6.03	56	59	5.08
102	108	5.56	50	52	3.85
94	102	7.84	47	50	6.00
90	99	9.09	43	46	6.52
86	96	10.42	40	43	6.98
83	91	8.79	37	40	7.50



Gambar 10. Error Pengukuran Sensor Akselerometer

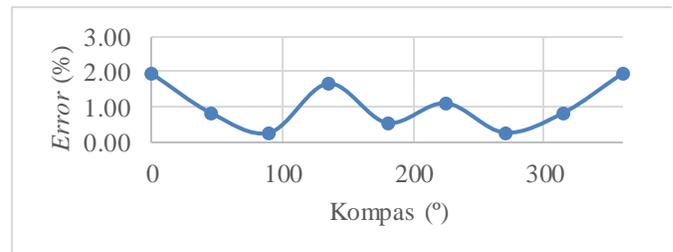
Perhitungan *error* pengukuran dihitung dengan rumus pada persamaan (13). Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem ini memiliki *error* rata-rata sebesar 6,4%. Pengujian ini mengukur suhu dengan pada rentang 37 °C s.d. 170 °C.

$$Error = \frac{T_{B(M)} - T_{B(R)}}{T_{B(M)}} \times 100\% \quad (13)$$

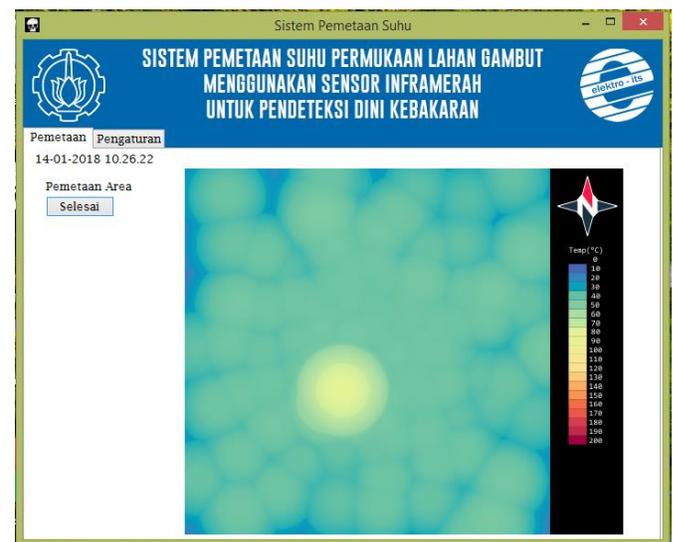
Pengujian pengukuran suhu juga dilakukan terhadap objek bersuhu konstan. Pengujian ini diulang sebanyak 38 kali. Kurva hasil pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 9. Pada pengujian ini didapatkan *error* yang terjadi ketika sistem mengukur objek bersuhu konstan sebesar ±1,5 °C.

Pengujian pengukuran sudut kemiringan sensor inframerah dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan dari akselerometer dengan kemiringan referensi. *Error* yang dihasilkan antara 0,58% s.d. 2,96% dengan rata-rata 1,72%, ditunjukkan pada Gambar 10.

Pengujian sensor magnetometer adalah dengan membandingkan hasil pengukuran dan kode program dengan kompas. Pengujian dilakukan dengan membandingkan arah mata angin 0° (360°), 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, dan 315°. *Error* pengujian ditunjukkan pada Gambar 11. Dari hasil pengujian yang dilakukan, persentase *error* yang terjadi adalah antara 0,28% s.d. 1,94%.



Gambar 11. Error pada Pengujian Sensor Magnetometer



Gambar 12. Hasil Pengujian Pemetaan Suhu.

Pengujian perangkat lunak pemetaan pada komputer yang dirancang adalah menerima data melalui komunikasi serial. Data yang diterima kemudian dikonversikan menjadi berkas gambar pemetaan suhu berekstensi png (*Portable Network Graphic*). Berkas gambar ini kemudian ditampilkan dalam GUI (*graphical user interface*). Hasil pengujian pada lahan ditunjukkan pada Gambar 12. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa pada sebelah kiri bawah titik tengah GUI terdapat sumber panas dengan suhu sedang yang direpresentasikan warna kuning.

V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dibuat perancangan, realisasi, dan pengujian sistem pemetaan suhu permukaan lahan. Sistem ini terdiri dari sensor inframerah thermopile untuk mengukur suhu objek tanpa kontak. Sistem pemindai menggunakan motor servo dan motor stepper yang dapat mengubah arah titik pengukuran suhu sehingga dapat mencakup seluruh luasan atau area. Mikrokontroler Arduino Nano digunakan untuk membaca sinyal sensor inframerah thermopile dan mengirimnya ke komputer. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem ini memiliki rerata kesalahan sebesar 6,4% pada rentang pengukuran objek bersuhu 37 °C s.d. 170 °C. Untuk pengukuran terhadap objek bersuhu konstan secara berulang memiliki kesalahan sebesar $\pm 1,5$ °C. Hasil pengujian sistem

menunjukkan bahwa perangkat lunak pemetaan dapat memetakan suhu permukaan lahan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. J. Glauber, S. Moyer, M. Adriani, and I. Gunawan, "Kerugian dari Kebakaran Hutan – Analisa Dampak Ekonomi dari Krisis Kebakaran Tahun 2015," *World Bank Gr.*, p. 2, 2016.
- [2] M. R. Akbar, Luthfan Aufar and F. Budiman, "Rancang Bangun Sensor Node pada Wireless Sensor Network Menggunakan Deret Sensor Gas dan Jaringan Syaraf Tiruan untuk Mendeteksi Kebakaran Hutan," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, pp. A192–A197, 2016.
- [3] O. Roswintarti, *Informasi Titik Panas (Hotspot) Kebakaran Hutan/Lahan*. Jakarta: LAPAN, 2016.
- [4] I. C. M. R. Dwinata and E. Setijadi, "Desain Wireless Sensor Network dan Webservice untuk Pemetaan Titik Api pada Kasus Kebakaran Hutan," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, pp. A198–A203, 2016.
- [5] J. Robel and A. Graumann, *NOAA KLM User's Guide*. Asheville: NOAA, 2014.
- [6] J. G. Webster and H. Eren, *Noncontact Thermometers*, in *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement*, 2nd ed. Florida: CRC Press, 2014.
- [7] S.-N. Chen, "Temperature Error Analysis and Parameter Extraction of an 8-14 μ m Thermopile with a Wavelength-Independent Absorber for Tympanic Thermometer," *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 8, pp. 2260–2271, 2016.
- [8] G. Saez, J. A., Quero, and M. Angulo Jerez, "Earth Sensor Based on Thermopile Detectors for Satellite Attitude Determination," *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 8, pp. 2260–2271, 2016.
- [9] J. Fraden, *Temperature Sensors*, in *Handbook of Modern Sensors – Physics, Design, and Application*, 5th ed. London: Springer, 2016.
- [10] Pujiono, *Rangkaian Penguat (Amplifier)*, in *Rangkaian Elektronika Analog*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2012.