

ANALISIS VARIASI KAWAT KONDUKTIF PADA KAIN PEMANAS *ANALYSIS OF CONDUCTIVE WIRE VARIATIONS IN HEATING FABRICS*

Agung Triyoko^{1*}, Abdurrohman¹, Andrian Wijayono², Ida Nuramdhani¹

¹Politeknik STTT Bandung, Kota Bandung 40272, Indonesia

²Akademi Komunitas Industri Tekstil dan Produk Tekstil, Surakarta, 57126, Indonesia

*Penulis Korespondensi :

Alamat Email: agungtriyoko30@gmail.com

Tanggal diterima: 21 November 2025, direvisi: 06 Januari 2026,

disetujui terbit: 06 Januari 2026

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja termal kain pemanas tipe rangkap yang memanfaatkan kawat nikelin sebagai elemen pemanas untuk aplikasi tekstil cerdas. Prototipe kain diproduksi menggunakan mesin *narrow fabric* dengan penyisipan kawat berdiameter 0,1 mm dan 0,3 mm dalam variasi jumlah kawat serta tegangan suplai. Pengujian dilakukan untuk mengukur kecepatan kenaikan suhu, suhu maksimum yang dicapai, kemampuan mempertahankan panas setelah sumber energi dihentikan, serta pengaruh jumlah kawat terhadap karakteristik termal. Hasil menunjukkan bahwa jumlah kawat dan besar tegangan berperan penting dalam menentukan profil kurva pemanasan dan suhu akhir. Konfigurasi paling optimal diperoleh pada penggunaan 4 kawat berdiameter 0,1 mm pada tegangan 3 V, serta penggunaan 2 atau 3 kawat berdiameter 0,3 mm pada tegangan yang sama, yang mampu mencapai suhu terapi aman (<50 °C) secara cepat. Sebaliknya, pemberian tegangan 6 V menghasilkan suhu berlebih yang berpotensi membahayakan. Selain itu, kawat berdiameter 0,3 mm menunjukkan kemampuan penyimpanan panas lebih baik dibandingkan kawat 0,1 mm. Temuan ini menegaskan pentingnya pemilihan jumlah kawat dan tegangan yang tepat untuk menghasilkan kain pemanas yang aman dan efisien bagi aplikasi tekstil cerdas.

Kata kunci : kain pemanas, kawat pemanas, kain rangkap

Abstract

This study aims to evaluate the thermal performance of double-layer heating fabrics utilizing nichrome wire as the heating element for smart textile applications. The fabric prototypes were produced using a narrow fabric weaving machine, incorporating wires with diameters of 0.1 mm and 0.3 mm in varying quantities and supply voltages. Tests were conducted to measure the heating rate, maximum achievable temperature, heat retention after power was switched off, and the effect of wire quantity on the fabric's thermal characteristics. The results indicate that both wire quantity and applied voltage play a crucial role in determining the heating rate and final temperature. The most optimal performance was achieved with configurations of four 0.1 mm wires at 3 V, and two to three 0.3 mm wires at the same voltage, which rapidly reached safe therapeutic temperatures (<50 °C). In contrast, the use of 6 V resulted in excessive temperatures that could pose safety risks. Furthermore, the 0.3 mm wire exhibited better heat retention than the 0.1 mm wire. These findings highlight the importance of

selecting the appropriate wire quantity and voltage to ensure safe and efficient heating fabric performance for smart textile applications.

Keywords: heating fabric, heating wire, double-layer fabric

PENDAHULUAN

Kain pemanas berbasis listrik bekerja dengan mengubah energi listrik menjadi panas melalui elemen pemanas yang terintegrasi di dalam struktur kain. Salah satu metode yang banyak dikembangkan adalah penyisipan kawat pemanas secara langsung ke dalam konstruksi kain, sehingga panas dapat dihasilkan dan didistribusikan secara lebih merata tanpa memerlukan kabel eksternal. Faktor utama yang memengaruhi kinerja kain pemanas adalah jenis, diameter, jumlah, dan konfigurasi kawat yang digunakan, karena parameter tersebut akan menentukan resistansi listrik, profil kurva kenaikan suhu, suhu maksimum, dan kemampuan mempertahankan panas^{1,2,3}.

Penelitian sebelumnya banyak menggunakan benang konduktif berbasis perak, polimer konduktif, atau serat karbon, namun penggunaan kawat logam seperti nikelin relatif jarang dieksplorasi, terutama dalam variasi jumlah dan diameternya^{4,5}. Kawat nikelin dikenal memiliki stabilitas termal dan ketahanan mekanik yang baik, serta dapat diproduksi dengan biaya yang lebih rendah dibandingkan material konduktif lainnya⁶. Dalam penelitian ini, kawat nikelin dengan diameter 0,1 mm dan 0,3 mm disisipkan ke dalam kain tenun rangkap berbahan poliester yang diproduksi menggunakan mesin *narrow fabric*. Diameter 0,1 mm dipilih karena fleksibel dan mudah dibenamkan dalam struktur kain tanpa menurunkan kenyamanan, sedangkan diameter 0,3 mm dipilih untuk mewakili kawat pemanas dengan resistansi lebih rendah sehingga menghasilkan daya pemanasan lebih tinggi. Kedua diameter ini memberikan

rentang resistansi yang cukup kontras untuk mengamati efek perubahan ukuran kawat terhadap performa termal. Variasi jumlah kawat yang digunakan adalah 2, 3, dan 4 helai, dengan tujuan untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi jumlah dan diameter kawat terhadap performa pemanasan. Pemilihan variasi jumlah kawat 2, 3, dan 4 helai didasarkan pada beberapa pertimbangan teknis dan aplikatif. Secara teknis, jumlah helai kawat berpengaruh langsung terhadap resistansi total rangkaian pemanas: semakin banyak helai yang dipasang paralel, resistansi menurun sehingga arus dan daya pemanasan meningkat. Rentang 2 helai, 3 helai dan 4 helai dipilih karena masih mewakili perubahan resistansi yang signifikan tanpa menyebabkan arus berlebih pada sumber daya. Dari sisi tujuan penelitian, jumlah helai tersebut memberikan jarak pembandingan yang cukup untuk mengamati tren peningkatan performa pemanasan tanpa menghasilkan variasi yang terlalu ekstrem. Berdasarkan teori pemanasan Joule dan prinsip rangkaian listrik paralel, dihipotesiskan bahwa semakin banyak kawat yang digunakan, resistansi total akan menurun, arus yang mengalir meningkat, dan pemanasan menjadi lebih cepat serta merata⁷. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan rancangan kain pemanas yang mampu mencapai suhu kerja optimal dalam waktu singkat, aman digunakan, dan memiliki kemampuan mempertahankan panas yang baik. Hasil penelitian ini juga dapat memberikan informasi teknis penting untuk pengembangan produk kain pemanas dengan performa termal yang lebih efisien^{8,9}.

BAHAN DAN METODA

Penggunaan kain tenun rangkap dalam penelitian ini merujuk pada prinsip yang juga dijelaskan oleh Noda dan Shinoda⁹, yaitu penggunaan struktur tekstil berlapis memungkinkan integrasi elemen konduktif pada bahan tekstil secara stabil tanpa mengurangi fleksibilitas material. Struktur dua lapis tersebut memberikan ruang untuk penyisipan kawat pemanas sekaligus menjaga isolasi antara elemen konduktor dan permukaan kain, sehingga lebih aman untuk aplikasi wearable. Elemen pemanas yang digunakan adalah kawat nikelin dengan dua variasi diameter, yaitu 0,1 mm dan 0,3 mm. Pemilihan kedua spesifikasi ini didasarkan pada perbedaan karakteristik resistivitas linear dan fleksibilitas yang dapat memengaruhi performa pemanasan kain. Variasi

diameter tersebut juga merujuk pada temuan Hao et al⁵ bahwa ukuran elemen konduktor berperan penting dalam menentukan profil kurva pemanasan, distribusi suhu, dan stabilitas termal pada kain tenun yang diintegrasikan dengan konduktor. Variasi jumlah kawat meliputi 2, 3, dan 4 helai yang disisipkan secara paralel pada arah lusi di lapisan tengah kain, sehingga tidak bersentuhan langsung dengan kulit pemakai. Sumber tegangan berasal dari baterai DC (*Direct Current*) sebesar 3 V dan 6 V. Spesifikasi lengkap kawat pemanas ditunjukkan pada Tabel 1. Tabel 2 menunjukkan spesifikasi benang lusi dan benang pakan yang digunakan pada penelitian ini. Adapun rancangan struktur kain dan posisi kawat pemanas ditunjukkan pada Gambar 2.

Tabel 1. Spesifikasi Kawat Pemanas

Nama Kawat	Ukuran diameter (d)	Resistansi per panjang (R/L)	Luas penampang (A)	Resistivitas Linear (ρ)
Kawat Nichrome A	$0,1 \times 10^{-3}$ m	155 ohm/m	$7,854 \times 10^{-9}$ m ²	$1,217 \times 10^{-6}$ Ω .m
		127 ohm/m		$0,998 \times 10^{-6}$ Ω .m
		135 ohm/m		$1,060 \times 10^{-6}$ Ω .m
Kawat Nichrome B	$0,3 \times 10^{-3}$ m	18 ohm/m	$70,686 \times 10^{-9}$ m ²	$1,272 \times 10^{-6}$ Ω .m
		14 ohm/m		$0,989 \times 10^{-6}$ Ω .m
		15 ohm/m		$1,060 \times 10^{-6}$ Ω .m

Tabel 2. Spesifikasi Benang Lusi dan Pakan

Benang	Warna	Jenis Serat	Nomor Benang
Lusi	1. Putih	Polyester 100%	300D (Multifilamen)
	2. Biru		
	3. Hitam		
Pakan	Hitam	Polyester 100%	300D (Multifilamen)

Nilai pada Tabel 1 diperoleh dari hasil perhitungan resistivitas linear kawat konduktif berdasarkan hasil pengukuran hambatan kawat yang diperoleh dari supplier. Hasil pengukuran resistansi per panjang 1 meter dapat dilihat pada Tabel 1.

Masing-masing kawat memiliki spesifikasi diameter $0,1 \times 10^{-3}$ m dan $0,3 \times 10^{-3}$ m, sehingga nilai luas penampang kawat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 1 berikut:

$$A = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \dots(1)$$

di mana:

- A = Luas penampang (m^2)
- r = jari-jari kawat konduktif (m)
- d = diameter kawat konduktif (m)

Nilai resistivitas linear kawat konduktif dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2 berikut:

$$\rho = \left(\frac{R}{L}\right) \times A \dots(2)$$

di mana:

- A = Luas penampang (m^2)
- R = Hambatan kawat konduktif (Ω)
- L = Panjang kawat konduktif (m)
- ρ = Resistivitas linear kawat ($\Omega.m$)

Nilai resistivitas linear (*specific resistance*) kawat nikelin yang digunakan pada penelitian ini berkisar pada angka $(1,092 \pm 0,133) \times 10^{-6}$ $\Omega.m$ untuk kawat nichrome A dan $(1,107 \pm 0,147) \times 10^{-6}$ $\Omega.m$ untuk kawat nichrome B. Nilai resistivitas linear kawat nichrome menurut literatur¹⁶ adalah pada nilai 1×10^{-6} $\Omega.m$, sehingga kedua jenis sampel kawat yang digunakan relatif sama dengan nilai kawat nichrome pada literatur. Hal ini juga menyimpulkan bahwa diameter hanya mempengaruhi resistansi kawat dan tidak mempengaruhi resistivitas linear kawat konduktif, karena resistivitas bergantung pada sifat intrinsik material itu sendiri.

Kain pemanas dalam penelitian ini dibuat dengan teknik pertununan rangkap menggunakan mesin *narrow fabric*. Pemilihan struktur multilapis bertujuan mengoptimalkan distribusi panas dan kestabilan konduktivitas, sejalan dengan temuan Wang et al¹ yang menunjukkan bahwa parameter struktural kain berperan penting terhadap karakteristik elektrotermal. Mesin narrow fabric yang digunakan pada penelitian ini berjenis Jacquard

loom model SH-J/Q-6/50 dengan merk Saehwaloom. Mesin tenun tipe SH-J/Q-6/50 memiliki jumlah 6 delivery, 96-320 unit hook, lebar sisir tenun 50 mm, 8 unit kamran, jumlah ulangan pick maksimal 32 kali, kecepatan maksimum 1200 RPM, dengan motor penggerak sebesar 2 HP. Kawat nikelin disisipkan pada lapisan tengah selama proses penenunan agar tetap aman dan terintegrasi secara permanen di dalam kain. Konfigurasi jumlah kawat diatur sesuai rancangan, kemudian ujung kawat dihubungkan ke sumber tegangan DC. Skema penyisipan kawat pada proses pembuatan kain ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3 berikut.

Setiap kawat pemanas dalam Gambar 2 (R_1 , R_2 , R_3 , & R_4) mewakili resistansi total dari satu segmen kawat yang dipasang di dalam kain. Dalam konteks eksperimen ini, setiap kawat diasumsikan memiliki panjang yang sama (L). Perbedaan nilai resistansi antara kawat-kawat tersebut ($R_1 \neq R_2 \neq R_3 \neq R_4$) dapat muncul dari dua sumber utama variasi yang tidak dapat dihindari dalam kawat komersial, yaitu komposisi paduan material (misalnya, Nikrom) dapat bervariasi secara mikroskopis antar batch produksi. Resistansi total (R) kawat pemanas ditentukan oleh resistivitas material (ρ), panjang kawat (L), dan luas penampang melintang (A). Luas penampang (A) bergantung pada diameter kawat (d).

Rumus dasar resistansi dapat dihitung sesuai persamaan 3 sebagai berikut:

$$R = \rho \frac{L}{A} \dots(3)$$

di mana:

- A = Luas penampang (m^2)
- R = Hambatan kawat konduktif (Ω)
- L = Panjang kawat konduktif (m)
- ρ = Resistivitas linear kawat ($\Omega.m$)

Karena kawat memiliki penampang melingkar, maka rumus persamaan 3

dapat dituliskan sesuai persamaan 4 berikut:

$$R = 4\rho \frac{L}{\pi d^2} \dots(4)$$

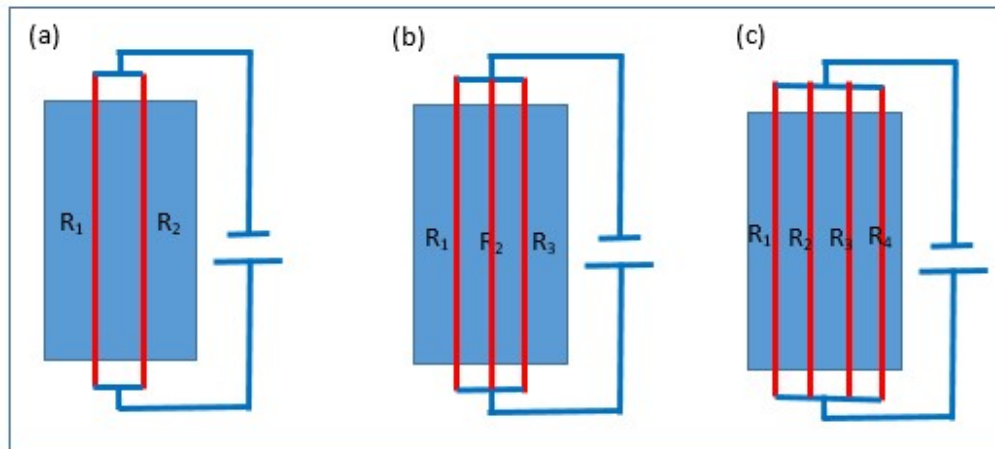
di mana:

d = diameter kawat (m)

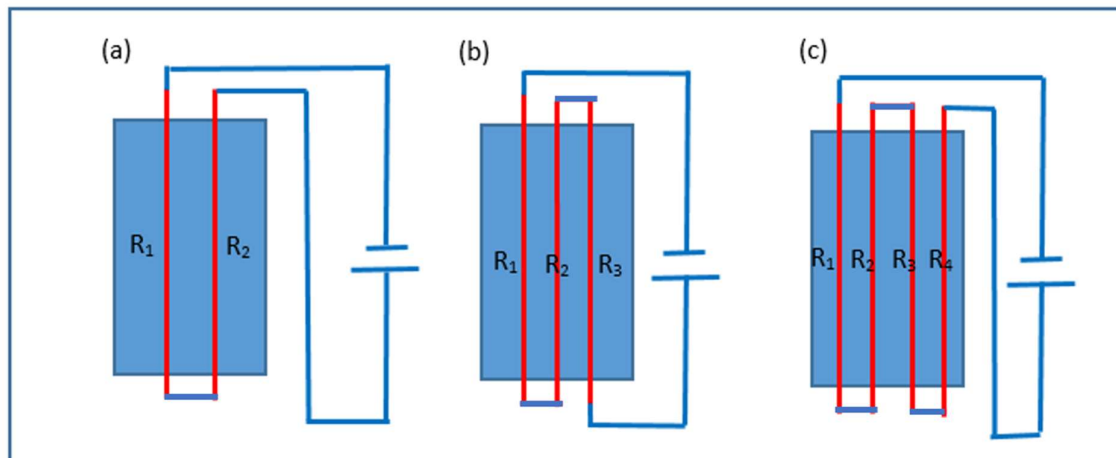
Dengan asumsi L adalah konstan (panjang kawat yang sama digunakan di semua jalur pada rangkaian), maka perbedaan resistansi R_n disebabkan oleh variasi ρ di antara setiap segmen kawat.

Gambar 3 (a), (b), dan (c) menyajikan skema rangkaian seri kawat pemanas, yang secara khusus digunakan untuk pengujian kawat berdiameter 0,3 mm (Sampel 7-12). Berbeda dengan rangkaian paralel, pada konfigurasi seri, total panjang kawat dialiri oleh arus yang sama. Dalam diagram ini, setiap segmen berlabel R_1 , R_2 , R_3 , & R_4 merepresentasikan segmen kawat dengan panjang unit yang setara (L). Segmen-segmen ini bukanlah material yang berbeda, melainkan bagian kontinu dari kawat yang sama. Dengan demikian, resistansi total rangkaian seri (R_{total}) dihitung sebagai penjumlahan resistansi dari semua segmen yang dapat ditulis jumlahan dari seluruh $R_1 + \dots + R_n$, dengan N adalah jumlah segmen kawat yang digunakan. Penamaan R_n digunakan untuk memodelkan bahwa resistansi setiap segmen, meskipun semua nilai R adalah dapat dianggap sama. Meskipun ada perbedaan sedikit R

yang disebabkan oleh toleransi resistivitas kawat yang telah dikarakterisasi dalam Tabel 1, dan bukan disebabkan oleh perbedaan panjang kawat. Pengujian termal dilakukan untuk mengukur profil kurva kenaikan suhu, suhu maksimum, dan kemampuan mempertahankan panas setelah sumber listrik diputus^{3,4}. Pengukuran suhu dilakukan menggunakan sensor suhu DHT11 yang dihubungkan ke Arduino Uno, dengan pencatatan data secara real-time setiap 1 detik selama pemanasan dan pendinginan. Data hasil pengujian ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan antara perubahan suhu per satuan waktu. Analisis data dilakukan dengan membandingkan pengaruh jumlah dan diameter kawat terhadap resistansi, profil kurva kenaikan suhu, suhu maksimum, serta waktu pendinginan. Perhitungan mengacu pada hukum Joule⁷ dan prinsip rangkaian listrik seri dan paralel¹⁰ untuk memprediksi pengaruh variasi jumlah kawat terhadap resistansi total. Selanjutnya perlu dipastikan bahwa rangkaian yang dibuat membutuhkan arus yang tidak lebih dari 3A dikarenakan sumber energi yang akan digunakan adalah menggunakan baterai. Setelah dilakukan penelaahan maka di variasi sampel yang dibuat adalah seperti pada Tabel 3 dengan sampel yang membutuhkan arus di bawah 3A.



Gambar 2. Rangkaian Paralel Kawat Pemanas di dalam kain (a) 2 Kawat (b) 3 Kawat (c) 4 Kawat



Gambar 3. Rangkaian Seri Kawat Pemanas di dalam kain (a) 2 Kawat (b) 3 Kawat (c) 4 Kawat

HASIL

Kain pemanas berhasil dibuat menggunakan teknik pertenunan rangkap tiga lapis pada mesin *narrow fabric*. Elemen pemanas berupa kawat nikelin disisipkan pada lapisan tengah kain secara paralel di arah lusi untuk setiap konfigurasi yang telah dirancang. Variasi jumlah kawat meliputi 2, 3, dan 4 helai, dengan dua pilihan diameter kawat, yaitu 0,1 mm dan 0,3 mm.

Tabel 3 Sampel Kain pemanas

Sampel	Jenis Kawat Pemanas	Jumlah Kawat pemanas	Rangkaian	Tegangan
1	0,1 mm	2	Paralel	3 Volt
2	0,1 mm	3	Paralel	3 Volt
3	0,1 mm	4	Paralel	3 Volt
4	0,1 mm	2	Paralel	6 Volt
5	0,1 mm	3	Paralel	6 Volt
6	0,1 mm	4	Paralel	6 Volt
7	0,3 mm	2	Seri	3 Volt
8	0,3 mm	3	Seri	3 Volt
9	0,3 mm	4	Seri	3 Volt
10	0,3 mm	2	Seri	6 Volt
11	0,3 mm	3	Seri	6 Volt
12	0,3 mm	4	Seri	6 Volt

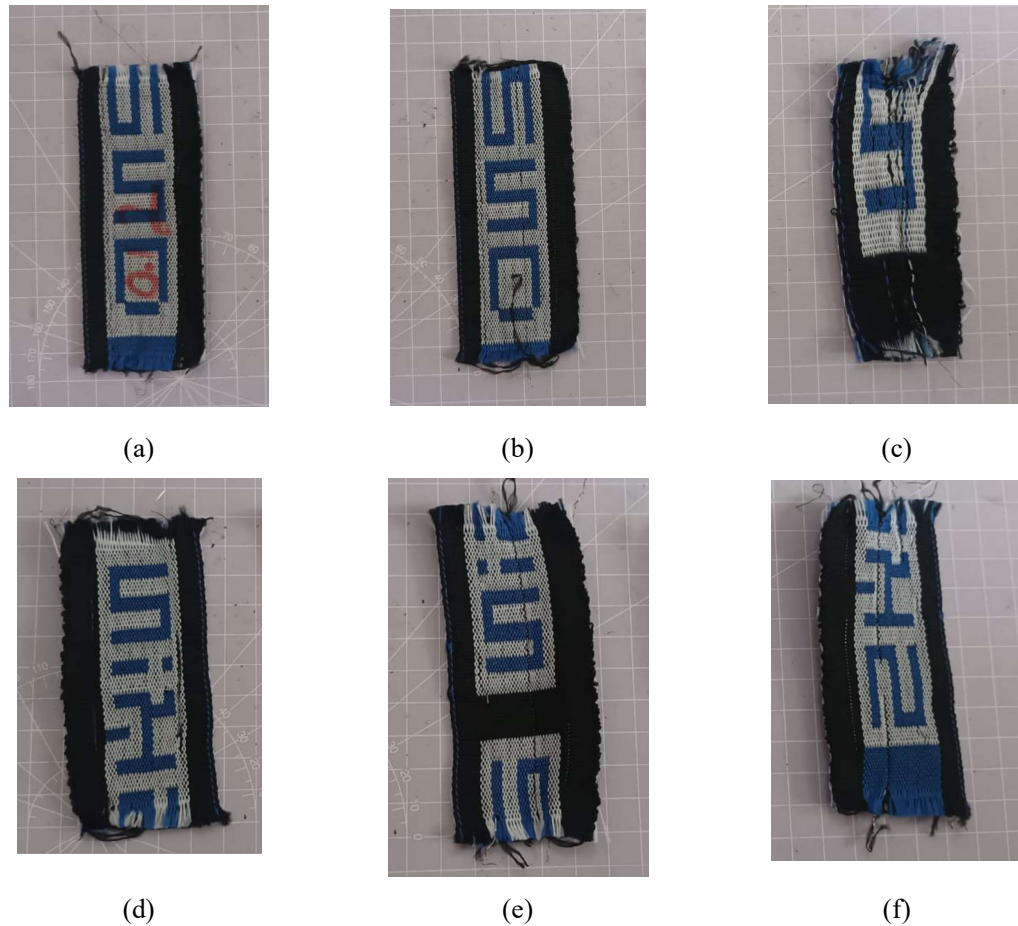
Struktur kain yang dihasilkan memiliki permukaan luar dari poliester yang tetap halus dan fleksibel, sehingga nyaman saat bersentuhan dengan kulit. Penyisipan kawat di lapisan tengah terbukti mampu menyembunyikan elemen pemanas tanpa memengaruhi estetika kain. Kawat juga terintegrasi kuat pada struktur kain, sehingga tidak mudah bergeser atau keluar dari posisi meskipun kain dilipat atau diregangkan.

Perbedaan diameter kawat memengaruhi ketebalan dan kekakuan kain; kain dengan kawat 0,3 mm sedikit lebih kaku dibandingkan dengan kain menggunakan kawat 0,1 mm, namun keduanya masih berada dalam kategori fleksibel untuk aplikasi pakaian. Meskipun pada penelitian ini tidak dilakukan pengukuran kekakuan kain, namun penelitian Oner menunjukkan bahwa keberadaan sisipan kawat pada bahan tekstil akan menambah kekakuan kain¹⁷. Pragma² juga telah menambahkan bahwa semakin besar

sisipan benang konduktif yang ada di dalam kain akan menyebabkan peningkatan *flexural rigidity* pada kain. Hal ini secara tidak langsung menunjukkan bahwa semakin besar kawat yang digunakan akan menghasilkan kain yang lebih kaku. Proses penyisipan kawat juga berhasil mempertahankan jarak antar elemen pemanas secara konsisten, yang penting untuk distribusi panas merata pada tahap pengujian.

Tabel 4 Konstruksi Kain Rangkap

Spesifikasi Kain	Hasil Pengujian
Jumlah Lusi Pick	320 helai 44 helai/inchi
Lebar Kain Rangkapan	4,5 cm 3



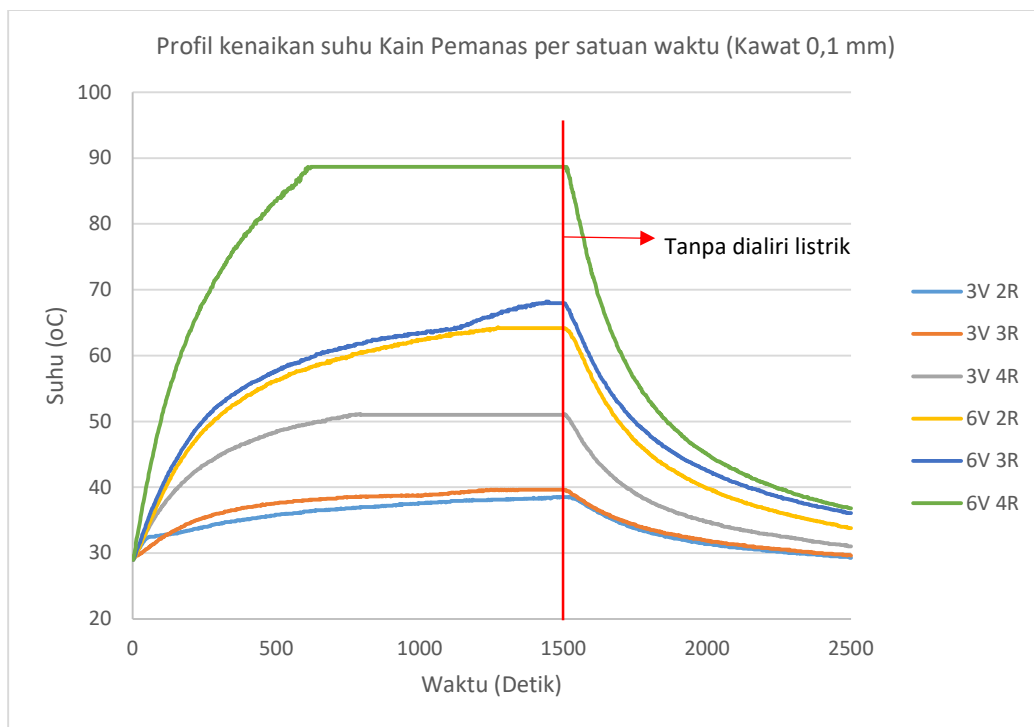
Gambar 4. Kain Pemanas (a) 2 Kawat 0,1 mm (b) 3 Kawat 0,1 mm (c) 4 Kawat 0,1 mm (d) 2 Kawat 0,3 mm (e) 3 Kawat 0,3 mm (f) 4 Kawat 0,3 mm

Pengujian pada kain pemanas dengan kawat nikelin diameter 0,1 mm menunjukkan bahwa peningkatan jumlah kawat dari 2 menjadi 4 helai secara signifikan mempercepat profil kurva kenaikan suhu dan meningkatkan suhu maksimum yang dicapai. Konfigurasi 4 kawat pada tegangan 3 V mampu mencapai suhu ± 48 °C dalam waktu kurang dari 180 detik, yang berada dalam kisaran aman untuk terapi panas (<50 °C). Pengukuran suhu dilakukan menggunakan sensor suhu DHT11 yang dikoneksikan ke *data-logger* berupa Arduino Uno, dengan pencatatan data *real-time* setiap 1 detik. Untuk setiap sampel dilakukan pengukuran satu kali (N = 1).

Pengukuran dilakukan dengan cara sampel diberi suplai tegangan sampai tercapai suhu maksimum kemudian suplai diputus dan suhu direkam sampai mendekati nilai awal untuk menilai kemampuan retensi panas. Data yang direkam meliputi waktu (detik) dan suhu (°C). Gambar 5 menunjukkan data hasil pengukuran dari metode yang dilakukan pada penelitian ini. Fenomena ini sejalan dengan prinsip Hukum Joule (sesuai persamaan 1) yaitu penambahan jalur konduktif paralel menurunkan resistansi total, meningkatkan arus yang mengalir, dan mempercepat proses pemanasan¹⁰. Namun, pada tegangan 6 V, seluruh konfigurasi kawat 0,1 mm

mengalami lonjakan suhu signifikan, dengan suhu puncak melebihi 55 °C, bahkan mencapai ±60 °C pada konfigurasi 4 kawat. Kondisi ini dapat menimbulkan risiko ketidaknyamanan atau cedera kulit, sebagaimana disampaikan oleh Thilagavathi (2017) bahwa pemanasan berlebih pada tekstil konduktif dapat menciptakan *hotspot* yang membahayakan pengguna. Selain

itu, kawat 0,1 mm memiliki *thermal inertia* yang relatif rendah, sehingga waktu pendinginan setelah sumber listrik diputus berlangsung lebih cepat dibandingkan kawat diameter lebih besar. Gambar 5 berikut menunjukkan perbandingan dari masing-masing sampel 1-6 dengan menggunakan kawat nikelin 0,1 mm¹¹.



Gambar 5 Grafik perbandingan profil kurva kenaikan suhu masing-masing sampel (1-6) untuk penggunaan kawat pemanas 0,1mm

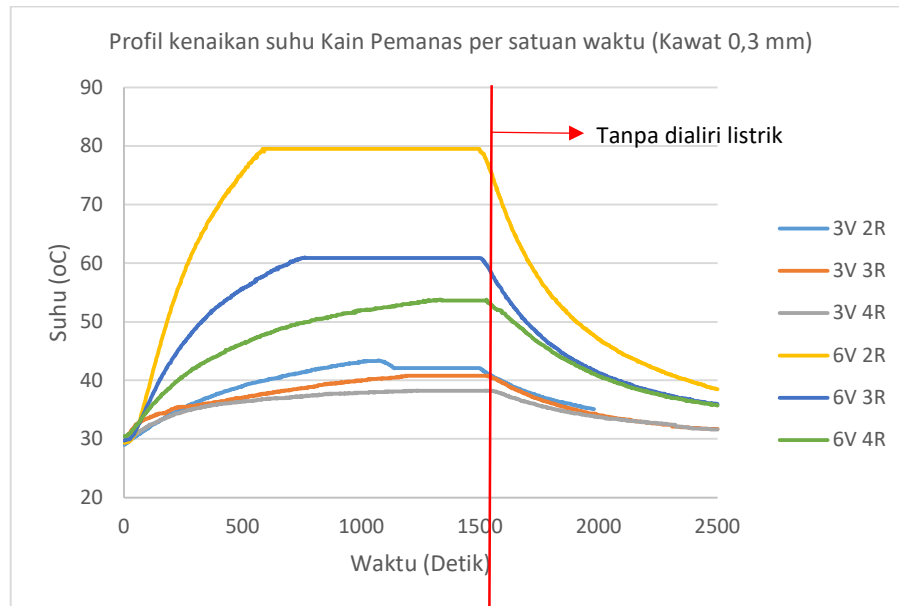
Kain pemanas dengan kawat nikelin diameter 0,3 mm menunjukkan karakteristik termal yang berbeda. Meskipun profil kurva kenaikan suhu sedikit lebih lambat dibandingkan kawat 0,1 mm pada tegangan yang sama, kemampuan mempertahankan panasnya lebih baik. Konfigurasi 2 dan 3 kawat dengan tegangan 3 V mampu mencapai suhu antara 45–49 °C dalam

150–210 detik, yang juga berada dalam batas aman terapi. Keunggulan kawat 0,3 mm terletak pada massa logam yang lebih besar, sehingga memiliki kapasitas penyimpanan panas yang lebih tinggi. Hal ini membuat penurunan suhu setelah sumber listrik diputus berlangsung lebih lambat, memberikan efek hangat yang lebih lama¹². Namun, pada tegangan 6 V, suhu maksimum

meningkat drastis, dengan konfigurasi 4 kawat mencapai >60 °C dalam ±90 detik, dapat meningkatkan risiko *thermal discomfort*¹³.

Dari sisi kenyamanan, kawat 0,3 mm sedikit meningkatkan kekakuan kain, meskipun masih dalam kategori

fleksibel. Presisi penempatan kawat selama proses pertenunan terbukti penting untuk menghindari konsentrasi panas lokal (*hotspot*), Berikut Gambar 6 grafik perbandingan profil kurva pertambahan suhu untuk kain pemanas berbahan kawat nikelin ukuran 0,3mm



Gambar 6 Grafik perbandingan profil kurva kenaikan suhu masing-masing sampel (7-12) untuk penggunaan kawat pemanas 0,3mm

PEMBAHASAN

Hasil pembuatan kain pemanas menunjukkan bahwa teknik pertenunan rangkap tiga lapis pada mesin *narrow fabric* mampu mengintegrasikan kawat nikelin sebagai elemen pemanas secara aman dan permanen di dalam struktur kain. Integrasi ini tidak hanya menjaga estetika dan kenyamanan, tetapi juga melindungi kawat dari kerusakan mekanis. Keberhasilan penyisipan kawat dengan diameter berbeda (0,1 mm dan 0,3 mm) membuktikan fleksibilitas metode ini dalam menghasilkan kain pemanas dengan karakteristik fisik yang dapat disesuaikan. Hasil ini sejalan dengan temuan Boushehri (2022) bahwa penempatan elemen pemanas di antara

lapisan kain dapat meningkatkan keamanan penggunaan tanpa mengorbankan fleksibilitas¹⁴.

Pengujian termal menunjukkan bahwa jumlah kawat, diameter kawat, dan tegangan berpengaruh signifikan terhadap profil kurva kenaikan suhu, suhu maksimum, dan kemampuan menghasilkan panas. Hal ini sesuai dengan prinsip Hukum Joule pada persamaan 5 berikut,

$$Q = I^2 R t \dots(5)$$

di mana:

Q = Energi panas yang dihasilkan (J)

I = Arus listrik yang mengalir (A)

R = Resistansi listrik dari elemen konduktif (kawat nikelin) (Ω)

t = Waktu arus mengalir (sekon)

di mana panas yang dihasilkan sebanding dengan kuadrat arus listrik yang mengalir dan besar hambatan¹⁰. Pada konfigurasi paralel, penambahan jumlah kawat akan menurunkan resistansi total, sehingga meningkatkan arus dan mempercepat proses pemanasan. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Lee¹⁵ dan Sun¹³, yang melaporkan bahwa penurunan resistansi akibat penambahan jalur konduktif meningkatkan efisiensi pemanasan. Untuk memperdalam analisis karakteristik termal ini, dilakukan pemodelan menggunakan *Design of Experiments* (DoE) berbasis regresi multivarian dan optimasi gradien $\nabla_i y = \frac{\partial y}{\partial x_i} = 0$. Mengingat perbedaan fundamental sifat kelistrikan dan ukuran diameter kawat, pada penelitian ini dilakukan analisis terpisah antara rangkaian paralel dan seri. Hasil analisis regresi ditunjukkan pada Tabel 5.

Pada konfigurasi paralel, penambahan jumlah kawat akan menurunkan resistansi total, sehingga meningkatkan arus dan mempercepat proses pemanasan. Temuan ini dikonfirmasi oleh nilai gradien positif $\frac{\partial y}{\partial x_{jumlah\ kawat}}$ sebesar +8,17, yang berarti setiap penambahan satu jalur kawat secara paralel akan meningkatkan suhu

maksimum sebesar 8,17 °C. Hal ini konsisten dengan hasil penelitian Lee¹⁵ dan Sun¹³ yang melaporkan bahwa penurunan resistansi akibat penambahan jalur konduktif meningkatkan efisiensi pemanasan.

Diameter kawat juga memengaruhi resistansi dan kapasitas penyimpanan panas. Kawat berdiameter lebih kecil (0,1 mm) memiliki resistansi lebih tinggi, sehingga cenderung menghasilkan panas lebih cepat pada tegangan tertentu. Namun, kawat berdiameter lebih besar (0,3 mm) memiliki massa logam yang lebih besar, yang berkontribusi pada kemampuan mempertahankan panas lebih lama setelah sumber listrik diputus. Fenomena ini didukung oleh temuan Sezgin yang menyatakan bahwa konduktor dengan massa lebih besar cenderung memiliki *thermal inertia* yang lebih tinggi¹².

Pada rangkaian seri (Sampel 7-12), ditemukan perilaku yang bertolak belakang di mana nilai gradien $\frac{\partial y}{\partial x_{jumlah\ kawat}}$ bernilai negatif yaitu -7,83.

Hal ini secara matematis membuktikan bahwa pada rangkaian seri, penambahan jumlah kawat (yang memperpanjang jalur konduktif) justru meningkatkan hambatan total (R_{total}), sehingga pada tegangan konstan akan menurunkan arus listrik (I) dan menurunkan suhu akhir.

Tabel 5 Hasil analisis regresi multivarian dengan optimasi $\nabla_i y = 0$

Model rangkaian	Persamaan regresi ($y = \beta_0 + \beta_1 x_{jumlah\ kawat} + \beta_2 x_{volt}$)	Koefisien determinasi R^2
Paralel (kawat 0,1 mm)	$y = -21,67 + 8,17x_{jumlah\ kawat} + 9,56x_{volt}$	0,94
Seri (kawat 0,3 mm)	$y = 17,00 - 7,83x_{jumlah\ kawat} + 11,22x_{volt}$	0,89

Penggunaan tegangan 3 V terbukti mampu menghasilkan suhu yang berada dalam rentang aman untuk terapi (<50\$) pada beberapa konfigurasi. Berdasarkan optimasi

gradien $\nabla_i y = 0$ dengan target suhu terapi aman ($\pm 45-50$ °C), ditemukan bahwa konfigurasi paling optimal adalah 4 kawat diameter 0,1 mm (untuk rangkaian paralel) dan 2-3 kawat

diameter 0,3 mm (untuk rangkaian seri) pada tegangan 3 V. Sebaliknya, tegangan 6 V menghasilkan suhu berlebih ($>55^{\circ}\text{C}$) pada hampir semua konfigurasi, yang berpotensi membahayakan pengguna. Hal ini sejalan dengan temuan Thilagavathi¹¹ bahwa peningkatan voltase di atas batas desain dapat menyebabkan akumulasi panas berlebih yang berisiko bagi kenyamanan dan keselamatan.

Distribusi panas yang merata pada konfigurasi optimal menunjukkan bahwa jarak kawat yang konsisten selama proses penenunan berperan penting dalam pemerataan suhu. Zhao & Li² melaporkan bahwa ketidakseragaman jarak elemen konduktif dapat menyebabkan konsentrasi panas (*hotspot*) pada area tertentu. Oleh karena itu, keberhasilan penelitian ini tidak hanya terletak pada pemilihan material dan konfigurasi kawat, tetapi juga pada presisi fabrikasi yang dihasilkan oleh mesin *narrow fabric*.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi penting terhadap pengembangan kain pemanas yang aman, fleksibel, dan memiliki distribusi panas yang merata. Hasil yang diperoleh dapat menjadi dasar untuk pengembangan lebih lanjut pada aplikasi pakaian musim dingin, produk terapi panas, maupun perlengkapan luar ruang, dengan tetap mempertimbangkan optimasi konfigurasi kawat dan tegangan untuk keseimbangan antara keamanan dan performa termal.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa kain pemanas berhasil dibuat dengan menggunakan metode pertenunan rangkap tiga lapis, yang memanfaatkan mesin *narrow fabric*. Dalam proses ini, kawat nikelin disisipkan pada lapisan tengah kain untuk menjaga estetika dan

kenyamanan, sekaligus memberikan perlindungan mekanis terhadap elemen pemanas. Penelitian ini juga mengungkapkan bahwa variasi jumlah dan diameter kawat memiliki pengaruh signifikan terhadap performa termal kain. Kawat dengan diameter 0,1 mm menghasilkan profil kurva pemanasan yang lebih cepat, sementara kawat dengan diameter 0,3 mm memiliki kapasitas penyimpanan panas yang lebih baik. Konfigurasi optimal untuk kain pemanas diperoleh dengan menggunakan empat kawat 0,1 mm dan dua hingga tiga kawat 0,3 mm, dengan tegangan 3 V, yang mampu mencapai suhu terapi yang aman (kurang dari 50°C) dengan distribusi panas yang merata. Sementara itu, penggunaan tegangan 6 V berisiko meningkatkan suhu berlebih (lebih dari 55°C), sehingga tidak disarankan untuk aplikasi pemanas tubuh. Selain itu, presisi dalam jarak penyusunan kawat selama proses fabrikasi sangat penting untuk memastikan distribusi panas yang merata pada kain pemanas tersebut.

Saran

Penelitian selanjutnya dapat mengarah pada eksplorasi material konduktif lainnya, seperti kawat tembaga berlapis perak atau serat berbasis karbon, untuk membandingkan kinerja termal dan fleksibilitasnya. Selain itu, penting untuk melakukan pengujian ketahanan kain terhadap siklus pencucian dan lipatan guna memastikan keandalan kain pemanas dalam jangka panjang. Untuk meningkatkan tingkat keamanan penggunaan, sistem pengaturan suhu berbasis temperature controller dan sensor umpan balik sangat direkomendasikan, terutama dalam aplikasi pakaian. Desain fabrikasi kain pemanas juga dapat dikembangkan lebih lanjut untuk menyesuaikan bentuk dan pola distribusi panas sesuai

dengan kebutuhan spesifik, seperti pada area terapi medis atau pakaian luar ruang. Terakhir, untuk mengevaluasi performa kain pemanas dalam kondisi nyata, uji lapangan perlu dilakukan dalam berbagai kondisi

lingkungan yang berbeda, seperti suhu rendah, kelembapan tinggi, dan aktivitas pengguna, guna memastikan bahwa kain pemanas dapat bekerja secara efektif dalam berbagai situasi.

DAFTAR PUSTAKA

1. Wang, Y., Yang, R., & Zhang, X. Structural parameters affecting electrothermal properties of conductive fabrics. *Textile Research Journal* **85**, 174–184 (2015).
2. Pragma, S., Singh, R., & Kumar, A. Development and evaluation of braided-cum-woven conductive fabrics for heating applications. *Journal of Industrial Textiles* (2020).
3. Zhao, Y. & Li, X. Design optimization of conductive pathways for uniform heat distribution in textile heating fabrics. *Materials & Design* **202**, 109515 (2021).
4. Craighero, M., et al. Poly(benzodifurandione) coated silk yarn for thermoelectric textiles: durability and thermal stability. *Materials* **17**, 1532 (2024).
5. Hao, L., et al. Joule heating behaviour of woven fabrics integrated with conductive elements. *Fibers and Polymers* **13**, 1040–1046 (2012).
6. Tong, J., et al. Wearable electric heating fabrics based on metal fiber yarns. *Fibers and Textiles in Eastern Europe* **22**, 105–110 (2014).
7. Bu, Y. Thermo-mechanical behavior of textile heating fabric. *Fibers and Polymers* **14**, 163–169 (2013).
8. Sezgin, B., et al. Effect of different conductive yarns on heating behaviour of woven fabrics. *Journal of Industrial Textiles* **42**, 234–247 (2012).
9. Noda, K. & Shinoda, H. Power and data transfer over double-sided conductive textiles for wearable devices. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **65**, 2764–2772 (2018).
10. Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. *Fundamentals of Physics* 10th edn. (Wiley, 2014).
11. Thilagavathi, G., Muthukumar, N., Kannaian, T. Development and characterization of electric heating fabric based on silver coated nylon yarn. *J Textile Eng Fashion Technol.* **1**, 224-226 (2017).
12. Sezgin, H., Bahadir, S. K., Boke, Y. E., & Kalaoglu, F. Effect of different conductive yarns on heating behaviour of fabrics. *In Proceedings of the 4th Annual International Conference on Textiles and Fashion, Bangkok, Thailand* (pp. 3-4). (2012)
13. Sun, K., Liu, S., & Long, H. Structural parameters affecting electrothermal properties of woolen knitted fabrics integrated with silver-coated yarns. *Polymers.* **11**, 1709 (2019).
14. Nazem Boushehri, A., Ezazshahabi, N., & Tehran, M. A. Fabrication and thermal assessment of three-layer woven heating fabrics. *Journal of Industrial Textiles.* **51**, (2022).
15. Lee S. Analysis of electrical and comfort properties of conductive knitted fabrics based on blending ratio of silver-coated yarns for smart clothing. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics.* **17**, (2022).

16. Juwariyah, T., & Djaja, Y. Analisa resistivitas kawat penghantar ditinjau dari metode jembatan wheatstone dan metode hukum ohm pada modul praktikum fisika. *Bina teknika*. **12**, 239-244 (2016).
17. Oner, E., Seckin, A. C., Coskun, H., & Kole, D. E. Thermophysiological comfort properties of woven fabrics produced from hybrid yarns containing copper wires. *Journal of industrial textiles*. **51**. 926-952 (2022).