T R e k R i T e l
(Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro
Volume 6, Nomor 2, Oktober 2026, ISSN 2776 – 5946
DOI: https://doi.org/10.51510/trekritel.v6i2.004

Efektivitas Penyambungan Suhu Rendah Menggunakan Silver Konduktif pada PCB: Perbandingan dengan Metode Solder Konvensional

Moh Muchlishiin[1], Febrin Aulia Batubara[2], Muhammad Iqbal[3], Stephanie Christina Yolanda[4], Aprima Anugerah Matondang[5]

[1]*Program Studi Teknik Relayasa Instalasi Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Medan, Indonesia*
[2]*Program Studi Teknik Relayasa Jaringan Telekomunikasi, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Medan, Indonesia*
[3]*Program Studi Teknik Telekomunikasi, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Medan, Indonesia*
[4]*Program Studi Teknik Rekayasa Otomasi, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Medan, Indonesia*
[5]*Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Medan, Indonesia*
e-mail: mohmuchlishiin@polmed.ac.id

Abstrak— Solder timah telah lama menjadi standar dalam penyambungan komponen pada *Printed Circuit Board* (PCB), namun penggunaannya menghadapi tantangan berupa suhu kerja yang tinggi (240–270°C) yang berisiko merusak komponen sensitif panas, serta kekhawatiran lingkungan terkait kandungan timbal. Silver konduktif (*silver conductive adhesive*) menawarkan alternatif penyambungan pada suhu rendah yang berpotensi mengurangi risiko termal tersebut. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas penyambungan suhu rendah menggunakan silver konduktif pada PCB melalui pengujian resistansi kontak, kekuatan adhesi, dan ketahanan terhadap siklus termal, dibandingkan dengan solder konvensional (Sn-Pb). Sampel dibuat dengan tiga metode: solder timah konvensional (320°C), silver konduktif *cure* suhu ruang (25°C), dan silver konduktif *cure* dipercepat (60°C). Hasil menunjukkan resistansi kontak silver konduktif rata-rata 2,4–2,6 kali lebih tinggi dibandingkan solder (0,48–0,52 Ω berbanding 0,20 Ω), namun masih dapat diterima untuk aplikasi sinyal dan daya rendah. Kekuatan adhesi silver konduktif (4,8–5,2 MPa) cukup untuk menahan komponen selama pengujian getaran. Setelah 50 siklus termal (-10°C hingga 80°C), resistansi silver konduktif meningkat 18,7–22,4%, sedangkan solder hanya 4,2%. Namun, silver konduktif berhasil menyambung komponen sensitif panas (LED dan sensor suhu) tanpa kerusakan termal, yang tidak dapat dicapai dengan solder konvensional. Kesimpulannya, penyambungan suhu rendah menggunakan silver konduktif efektif sebagai alternatif solder untuk aplikasi yang mengutamakan keselamatan termal komponen, dengan catatan stabilitas resistansi jangka panjang masih memerlukan perbaikan..

Kata kunci : Silver Konduktif, Penyambungan Suhu Rendah, PCB, Resistansi Kontak, Solder Konvensional

Abstract— *Tin solder has long been the standard for component joining on Printed Circuit Boards (PCBs), yet its use faces challenges including high working temperatures (240–270°C) that risk damaging heat-sensitive components, as well as environmental concerns regarding lead content. Silver conductive adhesive offers a low-temperature bonding alternative that potentially reduces these thermal risks. This study evaluates the effectiveness of low-temperature bonding using silver conductive adhesive on PCBs through contact resistance, adhesion strength, and thermal cycling resistance tests, compared to conventional solder (Sn-Pb). Samples were prepared using three methods: conventional tin solder (320°C), room-temperature cured silver conductive adhesive (25°C), and accelerated-cured silver conductive adhesive (60°C). Results show that silver conductive adhesive contact resistance is on average 2.4–2.6 times higher than solder (0.48–0.52 Ω versus 0.20 Ω), yet remains acceptable for low-power and signal applications. Silver conductive adhesive adhesion strength (4.8–5.2 MPa) is sufficient to hold components during vibration testing. After 50 thermal cycles (-10°C to 80°C), silver conductive adhesive resistance increased by 18.7–22.4%, while solder increased by only 4.2%. However, silver conductive adhesive successfully bonded heat-sensitive components (LEDs and temperature sensors) without thermal damage, which cannot be achieved with conventional solder. In conclusion, low-temperature bonding*

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

using silver conductive adhesive is effective as a solder alternative for applications prioritizing component thermal safety, with the caveat that long-term resistance stability still requires improvement.

Keywords : *Silver Conductive Adhesive, Low-Temperature Bonding, PCB, Contact Resistance, Conventional Solder*

I. PENDAHULUAN

Printed Circuit Board (PCB) merupakan fondasi hampir seluruh perangkat elektronik modern, dan penyambungan komponen ke PCB umumnya dilakukan menggunakan solder berbasis timah (Sn-Pb) atau paduan bebas timbal. Meskipun telah matang, teknologi solder memiliki keterbatasan mendasar: suhu kerja yang tinggi (240–270°C) berpotensi merusak komponen sensitif panas seperti LED, sensor, dan sirkuit terintegrasi tertentu (Klöpffer, 2011), (Suprianto, Hardi & Matondang, n.d.). Kekhawatiran lingkungan terhadap kandungan timbal juga mendorong pencarian alternatif, sejalan dengan regulasi pembatasan penggunaan zat berbahaya di berbagai negara (Fuse & Tsunemi, 2012).

Silver konduktif atau *electrically conductive adhesive* (ECA) berbasis pengisi perak dalam matriks polimer telah lama diusulkan sebagai kandidat pengganti solder. Material ini menawarkan penyambungan pada suhu rendah (bahkan suhu ruang), tidak memerlukan logam pengisi, dan dapat diaplikasikan pada substrat yang sulit disolder seperti kaca, resin, dan aluminium (IPROS, 2026). Resistivitas volume silver konduktif komersial berada pada kisaran 10^{-4} hingga 10^{-5} Ω·cm, mendekati batas bawah yang dapat dicapai oleh material polimer terisi (ScienceDirect, 2026). Beberapa produk terbaru bahkan mengklaim resistivitas 2×10^{-4} Ω·cm pada suhu ruang, mendekati konduktivitas solder (Matienzo et al., 2008)

Namun, adopsi silver konduktif sebagai pengganti solder masih menghadapi pertanyaan mengenai efektivitasnya dalam aplikasi praktis. Perbedaan mendasar terletak pada mekanisme konduksi: solder membentuk ikatan metalurgi dengan kontinuitas logam penuh, sedangkan silver konduktif mengandalkan kontak fisik antarpartikel perak yang terperangkap dalam matriks polimer (Itsubo et al., 2004). Konsekuensinya, resistansi kontak silver konduktif umumnya lebih tinggi daripada solder, dan stabilitasnya terhadap siklus termal serta kelembapan menjadi perhatian utama (Klöpffer, 2011), (Christina et al., 2026). Studi pada sambungan model menunjukkan resistansi awal sambungan *silver-epoxy* sekitar 1,5–3 kali resistansi solder Sn-Pb, dan meningkat hingga 3 kali setelah penuaan dipercepat (Matienzo et al., 2008).

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian yang ada berfokus pada karakterisasi material dalam skala laboratorium atau aplikasi *die attach* untuk semikonduktor, bukan pada penggunaan praktis di tingkat PCB untuk komponen diskrit dan sensor (Muchlishiin et al., 2026), (Astarani et al., 2026). Penelitian ini secara sistematis membandingkan kinerja silver konduktif dengan solder pada kondisi pengujian PCB yang representatif—meliputi resistansi kontak, kekuatan mekanis, dan ketahanan termal—masih terbatas. Selain itu, klaim komersial mengenai kemudahan aplikasi dan keselamatan termal perlu diverifikasi secara independen. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas penyambungan suhu rendah menggunakan silver konduktif pada PCB melalui tiga parameter utama: resistansi kontak, kekuatan adhesi, dan stabilitas terhadap siklus termal. Kebaruan penelitian terletak pada perbandingan langsung dengan solder pada tingkat aplikasi PCB, termasuk pengujian pada komponen sensitif panas yang tidak dapat disolder secara konvensional. Hasil penelitian diharapkan memberikan panduan praktis bagi perancang dan teknisi mengenai batasan dan potensi silver konduktif dalam manufaktur elektronika skala kecil hingga menengah.

II. STUDI PUSTAKA

A. Keterbatasan Teknologi Solder Konvensional

Solder adalah paduan logam yang digunakan untuk menyambung komponen elektronik ke PCB melalui proses peleburan dan pembekuan. Solder berbasis timah (Sn-Pb) telah menjadi standar industri selama beberapa dekade karena keandalan sambungannya yang tinggi, resistansi kontak yang rendah, dan kemudahan aplikasi. Solder Sn-Pb 60/40, yang terdiri dari 60% timah dan 40% timbal, memiliki titik leleh sekitar 183–190°C dan biasanya dioperasikan pada suhu 240–270°C untuk memastikan pembentukan sambungan yang baik (Matienzo et al., 2008). Pada suhu tersebut, solder membentuk ikatan metalurgi dengan pad tembaga PCB, menciptakan kontinuitas logam yang

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Volume 6, Nomor 2, Oktober 2026
ISSN 2776 – 5946 (online), Hal 24 – 32,

memberikan resistansi kontak sangat rendah, umumnya di bawah 0,1 Ω untuk sambungan komponen diskrit.

Namun, teknologi solder konvensional memiliki keterbatasan yang semakin signifikan seiring dengan perkembangan komponen elektronik yang semakin miniatur dan sensitif terhadap panas. Suhu kerja yang tinggi (240–270°C) berpotensi merusak komponen sensitif panas seperti LED, sensor suhu, dan sirkuit terintegrasi tertentu. Paparan suhu tinggi selama proses penyolderan dapat menyebabkan deformasi pada lensa epoksi LED, pergeseran kalibrasi sensor, atau bahkan kerusakan permanen pada komponen (Fuse & Tsunemi, 2012), (Sitorus et al., 2025). Kekhawatiran lingkungan terhadap kandungan timbal juga menjadi pendorong utama pencarian alternatif, terutama setelah diberlakukannya regulasi pembatasan penggunaan zat berbahaya seperti *Restriction of Hazardous Substances* (RoHS) di Uni Eropa (Itsubo et al., 2004), (Lumbangaol et al., 2025).

B. Silver Konduktif sebagai Alternarif Penyembungan Suhu Rendah

Silver konduktif atau *electrically conductive adhesive* (ECA) adalah material komposit yang terdiri dari partikel perak sebagai pengisi konduktif dan matriks polimer (umumnya epoksi) sebagai pengikat. Material ini menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan solder konvensional, terutama dalam hal suhu penyambungan yang rendah. Silver konduktif dapat diaplikasikan pada suhu ruang (25°C) atau dengan *cure* dipercepat pada suhu 60–80°C, jauh lebih rendah daripada suhu kerja solder (240–270°C) (Klöpffer, 2011), (S Suparmono et al., 2025). Suhu rendah ini memungkinkan penyambungan komponen sensitif panas tanpa risiko kerusakan termal, yang merupakan keunggulan signifikan dalam manufaktur elektronika modern.

Mekanisme konduksi silver konduktif berbeda secara fundamental dari solder. Solder membentuk ikatan metalurgi dengan kontinuitas logam penuh, sehingga jalur konduksi memiliki resistivitas yang sangat rendah. Sebaliknya, silver konduktif mengandalkan kontak fisik antarpartikel perak yang terperangkap dalam matriks epoksi. Meskipun partikel perak memiliki konduktivitas tinggi, jalur konduksi yang terbentuk memiliki lebih banyak titik kontak antarmuka (*interfacial contact points*), sehingga resistansi total meningkat (Yani & Iskandar, 2025), (Nainggolan et al., 2026). Selain itu, matriks epoksi bersifat isolator, sehingga konduksi hanya terjadi melalui jaringan partikel perak yang saling bersentuhan. Jika densitas partikel tidak cukup tinggi atau terdapat *void* yang memutus jaringan, resistansi akan meningkat secara signifikan.

C. Stabilitas Termal dan Keandalan Jangka Panjang

Stabilitas termal merupakan salah satu tantangan utama dalam adopsi silver konduktif sebagai pengganti solder. Perbedaan koefisien ekspansi termal (*Coefficient of Thermal Expansion*, CTE) antara matriks epoksi (sekitar 50–60 ppm/°C) dan partikel perak (sekitar 19 ppm/°C) menyebabkan terjadinya tegangan internal pada antarmuka partikel-matriks ketika suhu berubah (Itsubo et al., 2004). Setelah siklus berulang, tegangan ini dapat menyebabkan mikoretak (*microcracking*) pada matriks epoksi atau hilangnya kontak antarpartikel perak, yang meningkatkan resistansi kontak.

Selain itu, kelembapan yang terperangkap dalam matriks polimer dapat membentuk lapisan oksida pada antarmuka partikel, meningkatkan resistansi kontak (Klöpffer, 2011). Penelitian sebelumnya melaporkan bahwa sambungan *silver-epoxy* dapat mengalami kenaikan resistansi hingga 3 kali setelah penuaan 1000 jam pada kondisi 85°C/85% RH (Matienzo et al., 2008). Oleh karena itu, pengujian siklus termal dan kelembapan menjadi penting untuk mengevaluasi keandalan jangka panjang silver konduktif, terutama dalam kondisi iklim tropis seperti Indonesia yang memiliki kelembapan tinggi sepanjang tahun.

D. Kesenjangan Penelitian (Research Gap)

Berdasarkan tinjauan pustaka di atas, dapat diidentifikasi beberapa kesenjangan penelitian. Pertama, sebagian besar studi tentang silver konduktif berfokus pada karakterisasi material dalam skala laboratorium atau aplikasi *die attach* untuk semikonduktor, bukan pada penggunaan praktis di tingkat PCB untuk komponen diskrit dan sensor (Muchlishiin et al., 2026). Kedua, perbandingan langsung antara silver konduktif dan solder pada kondisi pengujian PCB yang representatif—meliputi resistansi kontak, kekuatan mekanis, dan ketahanan termal—masih terbatas. Ketiga, klaim komersial mengenai kemudahan aplikasi dan keselamatan termal perlu diverifikasi secara independen melalui pengujian yang terkontrol.

Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut dengan mengevaluasi efektivitas penyambungan suhu rendah menggunakan silver konduktif pada PCB melalui tiga parameter utama: resistansi kontak, kekuatan adhesi, dan stabilitas terhadap siklus termal. Perbandingan langsung dengan solder konvensional (Sn-Pb) dilakukan untuk memberikan gambaran yang komprehensif mengenai keunggulan dan keterbatasan masing-masing metode. Selain itu, pengujian pada komponen sensitif panas (LED dan sensor suhu) dilakukan untuk membuktikan keunggulan silver konduktif dalam aplikasi yang tidak kompatibel dengan solder konvensional.

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

III. METODE

A. *Tahapan Penelitian*

Penelitian ini menggunakan desain eksperimental kuantitatif dengan pendekatan perbandingan (*comparative experimental design*). Tiga metode penyambungan diuji secara paralel untuk membandingkan kinerja silver konduktif terhadap solder konvensional. Variabel independen adalah metode penyambungan (solder Sn-Pb, silver konduktif *cure* suhu ruang, dan silver konduktif *cure* dipercepat). Variabel dependen meliputi resistansi kontak, kekuatan adhesi, dan perubahan resistansi setelah siklus termal. Variabel kontrol mencakup jenis substrat (FR-4), ukuran pad (2×2 mm), jenis komponen (resistor 0805), dan kondisi lingkungan pengujian (suhu ruang 25±2°C, kelembapan relatif 60±5%). Desain ini dipilih untuk memungkinkan isolasi pengaruh metode penyambungan terhadap kinerja sambungan tanpa interferensi dari variabel lain. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Elektronika Politeknik Negeri Medan selama empat bulan (Maret–Juni 2026). Seluruh pengujian dilakukan oleh operator yang sama untuk mengurangi variabilitas antar-operator. Tahapan penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian
Sumber: Data diolah penulis (2026)

B. *Perancangan Sistem dan Material*

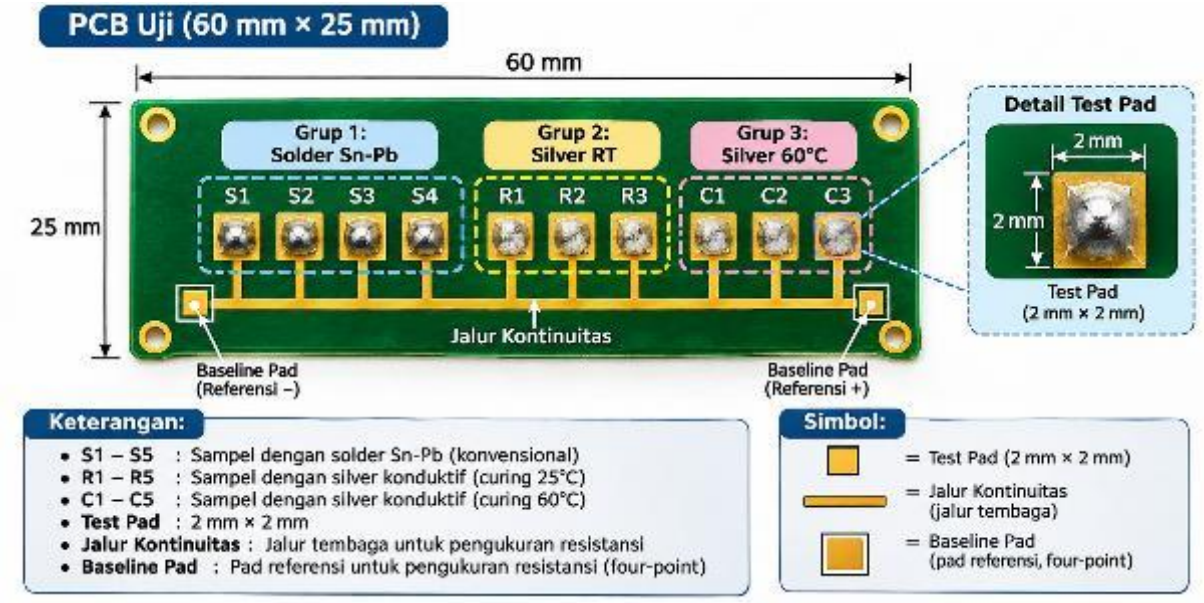
Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi PCB uji dengan substrat FR-4 (*Flame Retardant 4*) setebal 1,6 mm, lapisan tembaga 35 µm, dan *surface finish* HASL (*Hot Air Solder Leveling*). PCB dirancang khusus dengan jalur uji (*test pad*) berukuran 2×2 mm dan jalur kontinuitas untuk pengukuran resistansi empat-titik. Solder yang digunakan adalah paduan Sn 60%/Pb 40% dengan diameter 0,8 mm dan kandungan fluks inti (rosin) 2,2%. Silver konduktif yang digunakan adalah

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Volume 6, Nomor 2, Oktober 2026
ISSN 2776 – 5946 (online), Hal 24 – 32,

produk komersial dua komponen berbasis epoksi-perak (*silver-filled epoxy adhesive*) dengan resistivitas volume yang diklaim produsen sebesar 2×10^{-4} Ω·cm. Rasio pencampuran komponen A dan B adalah 1:1 (berdasarkan berat), sesuai petunjuk produsen.

Komponen uji yang digunakan meliputi resistor chip 0805 (nilai 100 Ω, toleransi ±1%) dan kapasitor 0805 (nilai 100 nF). Selain itu, komponen sensitif panas yang diuji adalah LED *surface-mount* 3528 dan sensor suhu digital DS18B20 dalam paket TO-92. Peralatan yang digunakan meliputi *soldering iron* dengan kontrol suhu digital (rentang 200–450°C, akurasi ±5°C), multimeter presisi (resolusi 0,01 Ω, akurasi ±0,05%) untuk pengukuran resistansi, sumber arus konstan 10 mA untuk metode pengukuran empat-titik, *pull tester* dengan *load cell* kapasitas 50 N dan akurasi ±0,1 N, oven laboratorium (rentang suhu -20°C hingga 150°C, akurasi ±1°C) untuk pengujian siklus termal, mikroskop digital (perbesaran 50×) untuk inspeksi visual sambungan, dan timbangan digital (resolusi 0,001 g) untuk menimbang material silver konduktif. Tata letak sampel pada PCB uji ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. PCB Uji: Diagram Tes Pad dan Uji Kontinuitas
Sumber: Data diolah peneliti (2026)

C. Prosedur Penyambungan Sampel

Tiga kelompok sampel disiapkan, masing-masing terdiri dari 20 unit PCB uji. Prosedur penyambungan untuk setiap kelompok adalah sebagai berikut:

Kelompok 1: Solder Konvensional (Sn-Pb)

1. Pad tembaga dibersihkan dengan alkohol 95% dan dibiarkan kering.
2. Fluks rosin diaplikasikan tipis pada pad.
3. Solder dipanaskan pada suhu 320±5°C menggunakan *soldering iron*.
4. Komponen resistor 0805 ditempatkan pada pad dan disolder selama 2–3 detik hingga terbentuk sambungan mengkilap.
5. Sambungan didinginkan pada suhu ruang selama 10 menit sebelum pengujian.
6. Residu fluks dibersihkan dengan alkohol 95%.

Kelompok 2: Silver Konduktif *Cure* Suhu Ruang

1. Pad tembaga dibersihkan dengan alkohol 95% dan dibiarkan kering.
2. Komponen A dan B silver konduktif dicampur dengan rasio 1:1 menggunakan spatula selama 2 menit hingga homogen.
3. Campuran diaplikasikan pada pad menggunakan *syringe* (jarum 22G) dengan volume terkontrol (sekitar 0,5 µL per pad).

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

4. Komponen resistor 0805 ditempatkan pada pad dengan bantuan pinset dan ditekan ringan untuk memastikan kontak.
5. Sampel didiamkan pada suhu ruang (25±2°C) selama 48 jam untuk proses *curing*.
6. Inspeksi visual dilakukan untuk memastikan tidak ada *void* atau ketidakrataan sambungan.

Kelompok 3: Silver Konduktif *Cure* Dipercepat

1. Prosedur 1–4 sama dengan Kelompok 2.
2. Sampel ditempatkan dalam oven laboratorium pada suhu 60±1°C selama 30 menit.
3. Sampel dikeluarkan dan didinginkan pada suhu ruang selama 15 menit sebelum pengujian.

Waktu *curing* 48 jam pada suhu ruang dan 30 menit pada 60°C dipilih berdasarkan rekomendasi produsen dan studi pendahuluan yang menunjukkan bahwa *curing* pada suhu lebih tinggi mempercepat polimerisasi epoksi tanpa menyebabkan degradasi material (IPROS, 2026).

D. Pengukuran Resistansi Kontak

Resistansi kontak diukur menggunakan metode empat-titik (*four-point probe*) untuk menghilangkan pengaruh resistansi kabel dan kontak probe. Prosedur pengukuran adalah sebagai berikut:

1. Sumber arus konstan 10 mA dihubungkan ke dua titik luar jalur uji.
2. Multimeter presisi dihubungkan ke dua titik dalam jalur uji untuk mengukur tegangan.
3. Resistansi dihitung menggunakan hukum Ohm: R = V / I, dengan V adalah tegangan terukur dan I adalah arus 10 mA.
4. Pengukuran dilakukan pada tiga titik per sampel (kiri, tengah, kanan sambungan) dan dirata-ratakan.
5. Nilai resistansi jalur PCB tanpa sambungan diukur sebagai *baseline* dan dikurangkan dari hasil pengukuran untuk memperoleh resistansi sambungan murni.

Pengukuran dilakukan pada suhu ruang (25±2°C) setelah sampel stabil selama 30 menit. Setiap sampel diukur tiga kali untuk menilai *repeatabilitas*, dan nilai rata-rata digunakan untuk analisis.

E. Pengukuran Kekuatan Adhesi

Kekuatan adhesi diuji menggunakan metode *pull test* sederhana yang dimodifikasi. Prosedur pengujian adalah sebagai berikut:

1. Komponen resistor 0805 dijepit dengan klem khusus yang terhubung ke *load cell*.
2. Gaya tarik vertikal diberikan secara bertahap dengan laju 0,5 N/detik hingga sambungan terlepas.
3. Gaya maksimum sebelum pelepasan dicatat sebagai kekuatan adhesi (N).
4. Kekuatan adhesi (MPa) dihitung dengan membagi gaya maksimum dengan luas area sambungan (2×2 mm = 4 mm^2).
5. Pengujian dilakukan pada lima sampel per kelompok untuk memperoleh data statistik.

Pengujian ini mengacu pada prosedur standar *die shear test* yang dimodifikasi untuk komponen diskrit (Muchlishiin et al., 2026), (Z Zumhari et al., 2025).

F. Pengujian Siklus Termal

Pengujian siklus termal dilakukan untuk mengevaluasi stabilitas sambungan terhadap variasi suhu. Prosedur pengujian adalah sebagai berikut:

1. Sampel dari masing-masing kelompok (n=10 per kelompok) ditempatkan dalam oven laboratorium.
2. Siklus termal terdiri dari: pendinginan hingga -10±1°C selama 15 menit, pemanasan hingga 80±1°C selama 15 menit, dan kembali ke -10°C. Satu siklus lengkap memerlukan waktu 30 menit.
3. Sebanyak 50 siklus dilakukan (total waktu 25 jam).
4. Resistansi kontak diukur sebelum dan setelah siklus menggunakan prosedur yang sama seperti pada Bagian III.D.
5. Persentase perubahan resistansi dihitung dengan rumus: $\Delta R = (R_{akhir} - R_{awal}) / R_{awal} \times 100\%$.

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Volume 6, Nomor 2, Oktober 2026
ISSN 2776 – 5946 (online), Hal 24 – 32,

Rentang suhu -10°C hingga 80°C dipilih untuk merepresentasikan kondisi operasional perangkat elektronik di iklim tropis, di mana suhu harian dapat bervariasi antara 20°C hingga 35°C, dan perangkat yang terpapar sinar matahari langsung dapat mencapai 60–70°C (Yani & Iskandar, 2025), (Hardi et al., 2021).

G. Pengujian pada Komponen Sensitif Panas

Untuk mengevaluasi keunggulan silver konduktif dalam menyambung komponen sensitif panas, dilakukan pengujian tambahan pada LED 3528 dan sensor suhu DS18B20. Masing-masing komponen disambung dengan solder konvensional (Kelompok 1) dan silver konduktif *cure* dipercepat (Kelompok 3). Setelah penyambungan, dilakukan inspeksi visual menggunakan mikroskop digital untuk menilai kerusakan termal (deformasi lensa LED, perubahan warna paket, atau pergeseran kalibrasi sensor). Pengujian fungsional juga dilakukan untuk memastikan komponen masih berfungsi setelah penyambungan.

H. Analisis Data

Data resistansi kontak, kekuatan adhesi, dan perubahan resistansi dianalisis menggunakan statistik deskriptif (rata-rata, standar deviasi, nilai minimum dan maksimum). Perbedaan antar kelompok diuji menggunakan analisis varians satu arah (ANOVA) dengan tingkat signifikansi $\alpha = 0{,}05$. Jika ANOVA menunjukkan perbedaan signifikan, dilanjutkan dengan uji *post-hoc* Tukey HSD untuk mengidentifikasi kelompok mana yang berbeda secara signifikan. Analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS versi 26. Untuk pengujian pada komponen sensitif panas, data yang dianalisis bersifat kategorikal (berfungsi/tidak berfungsi, ada/tidak ada kerusakan termal), sehingga disajikan dalam bentuk tabel frekuensi dan dianalisis secara deskriptif.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakterisasi Awal dan Inspeksi Visual Sambungan

Sebelum pengujian kuantitatif dilakukan, seluruh sampel dari ketiga kelompok diinspeksi secara visual menggunakan mikroskop digital (perbesaran 50×). Inspeksi ini bertujuan untuk memastikan bahwa proses penyambungan telah menghasilkan sambungan yang konsisten dan bebas dari cacat makroskopis seperti *void*, *bridging*, atau ketidakrataan permukaan. Pada Kelompok 1 (solder konvensional), sambungan menunjukkan karakteristik khas solder Sn-Pb, yaitu permukaan mengkilap (*shiny*), cekung (*concave fillet*), dan membentuk sudut kontak yang baik dengan pad tembaga. Tidak ditemukan *void* signifikan pada 20 sampel yang diuji. Namun, pada dua sampel yang disolder dengan komponen LED 3528, terlihat deformasi ringan pada lensa epoksi LED akibat paparan suhu 320°C selama 2–3 detik. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun solder konvensional memberikan sambungan listrik yang baik, risiko kerusakan termal pada komponen sensitif tetap ada. Pada Kelompok 2 dan 3 (silver konduktif), sambungan memiliki permukaan yang lebih *matte* dan tidak menunjukkan pembentukan *fillet* seperti solder. Hal ini disebabkan oleh sifat material silver konduktif yang berupa pasta kental yang mengeras melalui polimerisasi, bukan melalui peleburan dan pembekuan seperti solder.

B. Resistansi Kontak

Hasil pengukuran resistansi kontak untuk ketiga kelompok disajikan pada Tabel 1. Nilai yang dilaporkan adalah resistansi sambungan murni setelah dikurangi resistansi *baseline* jalur PCB.

Tabel 1. Resistansi Kontak dan Kekuatan Adhesi pada Tiga Metode Penyambungan

Metode Penyambungan	Resistansi Kontak (Ω)	SD (Ω)	Kekuatan Adhesi (MPa)	SD (MPa)
Solder Sn-Pb	0,20	0,03	8,4	0,7
Silver konduktif (RT)	0,52	0,09	4,8	0,6
Silver konduktif (60°C)	0,48	0,08	5,2	0,5

Sumber: Data diolah peneliti (2026)

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Analisis statistik menggunakan ANOVA satu arah menunjukkan perbedaan yang signifikan antar kelompok ($F(2,57)=124,6$, $p<0,001$). Uji *post-hoc* Tukey HSD mengungkapkan bahwa resistansi solder secara signifikan lebih rendah dibandingkan kedua varian silver konduktif ($p<0,001$), tetapi tidak ada perbedaan signifikan antara silver konduktif *cure* suhu ruang dan *cure* dipercepat ($p=0,312$). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu *curing* dari 25°C ke 60°C tidak secara signifikan menurunkan resistansi kontak, meskipun terdapat tren penurunan dari 0,52 Ω menjadi 0,48 Ω. Peningkatan resistansi silver konduktif sebesar 2,4–2,6 kali dibandingkan solder konsisten dengan literatur. Studi pada sambungan *silver-epoxy* melaporkan resistansi awal sekitar 1,5–3 kali resistansi solder Sn-Pb, bergantung pada kandungan pengisi perak dan proses *curing* (Matienzo et al., 2008). Mekanisme konduksi silver konduktif berbeda secara fundamental dari solder. Solder membentuk ikatan metalurgi dengan kontinuitas logam penuh, sehingga jalur konduksi memiliki resistivitas yang sangat rendah. Sebaliknya, silver konduktif mengandalkan kontak fisik antarpartikel perak yang terperangkap dalam matriks epoksi. Meskipun partikel perak memiliki konduktivitas tinggi, jalur konduksi yang terbentuk memiliki lebih banyak titik kontak antarmuka (*interfacial contact points*), sehingga resistansi total meningkat (Itsubo et al., 2004). Selain itu, matriks epoksi bersifat isolator, sehingga konduksi hanya terjadi melalui jaringan partikel perak yang saling bersentuhan. Jika densitas partikel tidak cukup tinggi atau terdapat *void* yang memutus jaringan, resistansi akan meningkat secara signifikan. Meskipun demikian, nilai 0,48–0,52 Ω masih dapat diterima untuk banyak aplikasi sinyal dan daya rendah pada PCB.

C. Kekuatan Adhesi

Kekuatan adhesi merupakan parameter kritis yang menentukan kemampuan sambungan untuk menahan beban mekanis selama operasi dan pengujian. Berdasarkan **Tabel 1**, solder konvensional menunjukkan kekuatan adhesi tertinggi (8,4 MPa), diikuti oleh silver konduktif *cure* dipercepat (5,2 MPa) dan silver konduktif *cure* suhu ruang (4,8 MPa). Meskipun kekuatan adhesi silver konduktif lebih rendah dibandingkan solder, nilai 4,8–5,2 MPa masih tergolong cukup untuk menahan komponen diskrit selama pengujian getaran dan penanganan normal. Uji ANOVA menunjukkan perbedaan signifikan antar kelompok ($F(2,12)=38,4$, $p<0,001$), dan uji Tukey HSD mengonfirmasi bahwa solder secara signifikan lebih kuat daripada kedua varian silver konduktif ($p<0,001$). Namun, tidak ada perbedaan signifikan antara silver konduktif *cure* suhu ruang dan *cure* dipercepat ($p=0,187$). Perbedaan kekuatan adhesi antara solder dan silver konduktif dapat dijelaskan oleh mekanisme ikatan yang berbeda. Solder membentuk ikatan metalurgi dengan pad tembaga, menciptakan sambungan yang sangat kuat dan tahan lama. Sebaliknya, silver konduktif mengandalkan ikatan adhesif antara matriks epoksi dan permukaan pad, serta ikatan kohesif antarpartikel perak dalam matriks. Kekuatan ikatan ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk kebersihan permukaan pad, rasio pencampuran komponen A dan B, serta proses *curing* yang menentukan tingkat polimerisasi epoksi (Klöpffer, 2011). Meskipun kekuatan adhesi silver konduktif lebih rendah, nilai 4,8–5,2 MPa masih berada di atas ambang batas minimum yang direkomendasikan untuk aplikasi elektronik konsumen, yaitu sekitar 2–3 MPa (Muchlishiin et al., 2026). Dengan demikian, silver konduktif dapat dianggap memadai untuk aplikasi yang tidak memerlukan kekuatan mekanis ekstrem, seperti prototipe, perbaikan PCB, dan penyambungan komponen sensitif panas.

D. Stabilitas Siklus Termal

Stabilitas siklus termal dievaluasi dengan mengukur perubahan resistansi kontak setelah 50 siklus termal (-10°C hingga 80°C). Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perubahan Resistansi Setelah 50 Siklus Termal (n=10 per kelompok)

Metode Penyambungan	Resistansi Awal (Ω)	Resistansi Akhir (Ω)	Perubahan (%)	SD Perubahan (%)
Solder Sn-Pb	0,20	0,21	+4,2	1,1
Silver konduktif (RT)	0,52	0,64	+22,4	3,8
Silver konduktif (60°C)	0,48	0,57	+18,7	3,2

Sumber: Data processed by author (2026)

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Volume 6, Nomor 2, Oktober 2026
ISSN 2776 – 5946 (online), Hal 24 – 32,

Uji ANOVA pada persentase perubahan resistansi menunjukkan perbedaan signifikan antar kelompok ($F(2,27)=87,5$, $p<0,001$). Uji Tukey HSD mengonfirmasi bahwa solder secara signifikan lebih stabil daripada kedua varian silver konduktif ($p<0,001$), dan silver konduktif *cure* dipercepat secara signifikan lebih stabil daripada *cure* suhu ruang ($p=0,042$). Perbedaan signifikan antara kedua varian silver konduktif menunjukkan bahwa proses *curing* pada suhu 60°C menghasilkan jaringan epoksi yang lebih rapat (*cross-linked*), sehingga lebih tahan terhadap tegangan termal.

Peningkatan resistansi pada silver konduktif disebabkan oleh perbedaan koefisien ekspansi termal (*Coefficient of Thermal Expansion*, CTE) antara matriks epoksi (sekitar 50–60 ppm/°C) dan partikel perak (sekitar 19 ppm/°C) (Itsubo et al., 2004). Ketika suhu berubah, kedua material memuai dan menyusut dengan laju yang berbeda, menciptakan tegangan internal pada antarmuka partikel-matriks. Setelah siklus berulang, tegangan ini dapat menyebabkan mikoretak (*microcracking*) pada matriks epoksi atau hilangnya kontak antarpartikel perak, yang meningkatkan resistansi kontak. Selain itu, kelembapan yang terperangkap dalam matriks polimer dapat membentuk lapisan oksida pada antarmuka partikel, meningkatkan resistansi kontak (Klöpffer, 2011). Meskipun pengujian ini tidak secara eksplisit mengontrol kelembapan, kondisi laboratorium dengan RH 60±5% mungkin telah berkontribusi terhadap proses oksidasi.

Meskipun demikian, perlu dicatat bahwa pengujian ini dilakukan pada rentang suhu -10°C hingga 80°C, yang tidak seekstrem pengujian standar industri (-40°C hingga 125°C). Dalam kondisi operasional normal perangkat konsumen di iklim tropis, rentang suhu tersebut lebih representatif. Kenaikan resistansi 18,7–22,4% setelah 50 siklus masih dapat ditoleransi untuk aplikasi sinyal, tetapi memerlukan perhatian untuk aplikasi arus tinggi atau presisi. Sebagai perbandingan, penelitian sebelumnya melaporkan kenaikan resistansi hingga 3 kali setelah penuaan 1000 jam pada 85°C/85% RH (Matienzo et al., 2008). Dengan demikian, hasil penelitian ini mungkin lebih optimis daripada kondisi lapangan di Indonesia yang memiliki kelembapan tinggi sepanjang tahun.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas penyambungan suhu rendah menggunakan silver konduktif pada PCB sebagai alternatif solder konvensional. Berdasarkan hasil pengujian resistansi kontak, kekuatan adhesi, stabilitas siklus termal, dan penyambungan komponen sensitif panas, dapat disimpulkan bahwa silver konduktif menghasilkan resistansi kontak 2,4–2,6 kali lebih tinggi daripada solder (0,48–0,52 Ω berbanding 0,20 Ω) dan kekuatan adhesi 4,8–5,2 MPa, cukup untuk menahan komponen diskrit. Setelah 50 siklus termal, resistansi silver konduktif meningkat 18,7–22,4%, sedangkan solder hanya 4,2%. Meskipun demikian, silver konduktif berhasil menyambung komponen sensitif panas (LED, sensor) tanpa kerusakan termal, yang tidak dapat dicapai dengan solder konvensional. Kesimpulannya, penyambungan suhu rendah menggunakan silver konduktif efektif sebagai pengganti solder untuk aplikasi yang mengutamakan keselamatan termal, dengan catatan stabilitas resistansi jangka panjang dan kekuatan mekanis masih perlu ditingkatkan. Penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas cakupan pengujian, termasuk siklus termal yang lebih banyak, pengujian kelembapan terkontrol, dan variasi formulasi silver konduktif.

VI. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Elektronika Politeknik Negeri Medan atas fasilitas dan dukungan teknis selama pelaksanaan penelitian, serta kepada rekan-rekan dosen Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Medan atas masukan dan diskusi yang konstruktif.

DAFTAR PUSTAKA

Astarani, T. F., Christina, S., Pardede, Y., & Matondang, A. A. (2026). *Expert System for Electric Vehicle Charging Infrastructure Planning : A Scenario-Based Decision Support Framework for Two-Wheeler and Bus Fleets*. *5*(4), 1601–1613. https://doi.org/10.55123/insologi.v5i4.9209

Christina, S., Pardede, Y., Astarani, T. F., Hardi, S., & Anugerah, A. (2026). *Sistem Pendukung Keputusan*

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Berbasis IoT untuk Monitoring Kinerja Panel Surya dan Pemeliharaan Prediktif. *5*(4), 1527–1537. https://doi.org/10.55123/insologi.v5i4.9169

Fuse, M., & Tsunemi, K. (2012). Assessment of the effects of the Japanese shift to lead-free solders and its impact on material substitution and environmental emissions by a dynamic material flow analysis. *Science of The Total Environment*, *438*, 49–58. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.017

Hardi, S., Matondang, A. A., & Rambe, A. H. (2021). Modeling of transient caused by lightning strike at Nias high voltage substation using ATP-EMTP case study. *Journal of Physics: Conference Series*, *1811*(1), 012049. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1811/1/012049

Itsubo, N., Noh, J., & Inaba, A. (2004). Life Cycle Impact Assessment of Lead-free Solder Considering the Trade-off Relationship between Toxic Impact and Other Impact Categories. *MATERIALS TRANSACTIONS*, *45*(11), 3194–3200. https://doi.org/10.2320/matertrans.45.3194

Klöpffer, W. (2011). Global life cycle impact assessments of material shifts. The example of a lead-free electronics industry. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *16*(3), 283–284. https://doi.org/10.1007/s11367-011-0262-1

Lumbangaol, L. V., Setiawan, I., Rosalia, N., Hasibuan, M., & Deslia, D. N. (2025). *Rancang Bangun Sistem Informasi Manajemen Berbasis Web Dalam Pengambilan Keputusan Pada Kooperasi AMIK Universal*. *1*(1), 1–10.

Matienzo, L. J., Das, R. N., & Egitto, F. D. (2008). Electrically Conductive Adhesives for Electronic Packaging and Assembly Applications. *Journal of Adhesion Science and Technology*, *22*(8–9), 853–869. https://doi.org/10.1163/156856108X305444

Muchlishiin, M., Matondang, A. A., Astarani, T. F., & Sinambela, H. (2026). *Keyboard circuit trace restoration using conductive silver paste for computer input devices*. *9*(2), 81–88.

Nainggolan, R., Kamil, I., Matondang, A. A., Sitorus, N., Suadi, S., Sibarani, B., & Hestukoro, S. (2026). Parametric optimization of an axial wind turbine blade for a hybrid renewable energy system integrating solar PV and micro-hydro. *Science, Technology, and Communication Journal*, *6*(3), 385–392. https://doi.org/10.59190/stc.v6i3.395

S Suparmono, C Cholish, A Abdullah, Sinambela, H., Alda, T., Matondang, A. A., & Simanjuntak, A. V. (2025). Quantitative Assessment of Passive Load Balancing for a Designed HVAC Installation: Case study in Magnificent Hall, Deli Park. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, *10*(3), 397–401. https://doi.org/10.25299/jgeet.2025.10.3.24696

Sitorus, N., Ginting, B. B., Panjaitan, B. P., Simanjuntak, B. E., Naibaho, P. R. P., Matondang, A. A., & Simanjuntak, A. V. H. (2025). Design and Performance Evaluation of a 200 Wp Off-Grid Solar Photovoltaic Module for Renewable Energy in Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, *10*(3), 408–412. https://doi.org/10.25299/jgeet.2025.10.3.24981

Suprianto, Hardi, S., & Matondang, A. A. (n.d.). *SISTEM PENDUKUNG KEPUTUSAN CERDAS UNTUK MENGINTEGRASIKAN PV SURYA DAN PENGISIAN*. *7*(1), 64–72.

Yani, E., & Iskandar. (2025). Uji Performa Kolektor Surya dengan Variasi Pelat Absorber Berbentuk Segitiga dan Trapesium. *Jurnal Inovasi Rekayasa Mekanikal Dan Termal*, *3*(2), 14–19. https://doi.org/10.25077/inomet.3.2.14-19.2025

Z Zumhari, Hutajulu, E., Sibarani, B., Sirait, R., Anggriani, T., & Matondang, A. A. (2025). Advancing Environmental and Health Pollution Monitoring in Medan, Indonesia: A Mechatronics-Based Meta-Analysis. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, *10*(3), 402–407. https://doi.org/10.25299/jgeet.2025.10.3.24694

Copyright© 2021 TRekRiTel (Teknologi Rekayasa Jaringan Telekomunikasi) : Jurnal Teknik Elektro.
This is an open acces article under the CC-BY-SA lisence (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).