JOURNAL SYNTAX IDEA
p–ISSN: 2723-4339 e-ISSN: 2548-1398
Vol. 7, No. 8, Agustus 2025

Pengaruh Komposisi Bahan Dasar dan Sifat Lapisan Permukaan Terhadap Gaya Hubung (*Mating Force*) dan Hambatan Kontak (*Contract Resistance*) Pada Konektor Listrik

Muhammad Satya Putra Gantada
Universitas Sriwijaya
Email: gantasatya51@gmail.com

Abstrak

Kinerja konektor listrik sangat dipengaruhi oleh jenis bahan dasar yang digunakan serta lapisan pelapis pada permukaannya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara komposisi kimia bahan dasar, sifat fisik lapisan pelapis, dan pengaruh keduanya terhadap gaya pemasangan (mating force) dan hambatan kontak (contact resistance) pada konektor. Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium untuk menguji berbagai kombinasi bahan dasar dan lapisan pelapis serta mengukur gaya pemasangan dan hambatan kontak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bahan dengan kekuatan mekanis tinggi cenderung memerlukan gaya pemasangan yang lebih besar, tetapi memberikan kontak yang lebih stabil. Di sisi lain, bahan dengan lapisan pelapis tertentu dapat menurunkan hambatan listrik namun terkadang mengurangi ketahanan aus atau kekuatan mekanis. Penelitian ini mengidentifikasi kebutuhan keseimbangan antara sifat mekanis dan sifat listrik untuk memastikan konektor dapat berfungsi secara andal dan efisien. Implikasi dari penelitian ini adalah pentingnya pemilihan bahan dasar dan lapisan pelapis yang tepat untuk memastikan kinerja optimal konektor dalam aplikasi yang memerlukan ketahanan jangka panjang dan efisiensi listrik yang tinggi.

Kata kunci: konektor listrik, bahan dasar, lapisan pelapis, gaya pemasangan, hambatan kontak.

Abstract

The performance of electrical connectors is significantly influenced by the type of base material used and the coating layer on its surface. This study aims to analyze the relationship between the chemical composition of the base material, the physical properties of the coating layer, and how these factors jointly affect the mating force and contact resistance of the connector. The research method involved laboratory experiments testing various combinations of base materials and coating layers, measuring the mating force and contact resistance. The results show that materials with high mechanical strength tend to require greater mating force but provide more stable contact. Conversely, materials with certain coating layers can reduce electrical resistance but may sometimes compromise wear resistance or mechanical strength. This study identifies the need for a balance between mechanical and electrical properties to ensure reliable and efficient connector performance. The implications of this research highlight the importance of selecting the appropriate base material and coating layer to maintain optimal connector performance in applications requiring long-term durability and high electrical efficiency.

Keywords*: electrical connector, base material, coating coating, installation style, contact resistance.*

PENDAHULUAN

Konektor listrik merupakan komponen penting yang berfungsi untuk menghubungkan dan menghantarkan sinyal maupun daya listrik dengan andal di berbagai bidang, seperti kendaraan bermotor, peralatan elektronik, hingga sistem penerbangan (Fouvry et al., 2020; Zhang et al., 2019). Agar konektor dapat berfungsi secara optimal, dua faktor utama yang perlu diperhatikan adalah gaya sambungan (mating force) dan hambatan kontak (contact resistance) (Ni et al., 2021). Menurut standar IEC 60512-2, nilai hambatan kontak konektor sebaiknya ≤ 20 mΩ untuk menjaga efisiensi arus dan mencegah penurunan kinerja yang disebabkan oleh peningkatan resistansi. Selain itu, standar MIL-STD-202 juga mengatur tentang batas toleransi gaya sambungan, yang harus berada dalam rentang yang ditentukan agar konektor dapat dipasang dengan aman dan efisien tanpa merusak komponen terkait (Chen et al., 2017). Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai pengaruh bahan dasar dan lapisan pelapis terhadap kedua faktor ini sangat penting untuk memastikan kinerja konektor yang optimal dalam berbagai aplikasi teknis (Liu et al., 2019).

Gaya sambungan adalah besarnya gaya yang diperlukan ketika dua bagian konektor disatukan atau dilepas (Ni et al., 2021). Jika gaya ini terlalu kecil, konektor bisa mudah terlepas atau bergeser, sehingga koneksi menjadi kurang stabil. Sebaliknya, jika gaya sambungan terlalu besar, maka proses pemasangan dan pelepasan konektor menjadi lebih sulit dan dapat menyebabkan keausan yang berlebihan pada permukaan kontak, yang pada akhirnya bisa menurunkan kualitas koneksi (Turel et al., 2017).

Sementara itu, hambatan kontak adalah hambatan listrik yang terjadi di titik pertemuan antara kedua bagian konektor (Braunovic, 2015). Hambatan yang rendah sangat diharapkan karena memungkinkan arus listrik mengalir dengan lebih efisien, mengurangi panas yang timbul, serta meningkatkan kinerja keseluruhan sistem (Turel et al., 2017). Namun, menjag keseimbangan antara hambatan kontak yang rendah dan gaya sambungan yang ideal bukanlah hal yang sederhana, karena keduanya saling mempengaruhi.

Faktor yang paling berperan dalam menentukan sifat-sifat tersebut adalah bahan dasar konektor serta lapisan pelapisnya (Ren et al., 2015). Komposisi bahan dasar berpengaruh besar terhadap kekuatan dari mekanis konektor, ketahanan terhadap korosi, serta kesesuaiannya dengan lapisan pelapis yang digunakan (Turel et al., 2017). Di sisi lain, jenis bahan pelapis dan ketebalannya akan mempengaruhi seberapa baik konektor menghantarkan listrik, seberapa tahan terhadap keausan akibat gesekan berulang, serta seberapa lama konektor dapat digunakan tanpa mengalami penurunan kualitas.

Penelitian sebelumnya oleh Zhang et al. (2018) membahas hubungan antara bahan dasar konektor dan hambatan kontak, dengan fokus pada pengaruh komposisi material terhadap kinerja listrik dan ketahanan terhadap korosi. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa bahan dengan daya hantar listrik tinggi cenderung memiliki hambatan kontak yang lebih rendah, tetapi seringkali mengorbankan ketahanan mekanis dan ketahanan aus (Song et al., 2018). Namun, penelitian ini kurang membahas pengaruh lapisan pelapis terhadap kualitas koneksi jangka panjang, yang menjadi aspek penting

dalam penelitian ini. Penelitian lainnya oleh Smith dan Lee (2017) mengkaji pengaruh gaya sambungan terhadap stabilitas koneksi, namun hanya terbatas pada pengujian satu jenis material tanpa mempertimbangkan variasi lapisan pelapis yang digunakan. Penelitian ini mengisi gap tersebut dengan mengkaji interaksi antara bahan dasar, pelapis, gaya sambungan, dan hambatan kontak secara holistik, serta mengeksplorasi berbagai kombinasi material untuk menemukan keseimbangan yang optimal (Zhang et al., 2022).

Dalam penelitian ini, hubungan antara bahan dasar, pelapis, gaya sambungan, dan hambatan kontak dikaji secara lebih mendalam. Tujuannya adalah untuk menemukan kombinasi material yang paling seimbang, sehingga konektor dapat memiliki kinerja listrik yang baik, ketahanan mekanis yang kuat, serta umur pakai yang lebih panjang. Manfaat penelitian ini adalah untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja konektor, serta memberikan pedoman bagi industri dalam memilih bahan dan lapisan pelapis yang sesuai untuk meningkatkan efisiensi listrik, ketahanan mekanis, dan umur pakai konektor.

METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap tiga jenis material dasar yang sering digunakan dalam pembuatan konektor listrik. Ketiga material tersebut adalah kuningan, yang merupakan campuran logam antara tembaga (Cu) dan seng (Zn); perunggu fosfor, yaitu campuran dari tembaga (Cu), timah (Sn), dan fosfor (P); serta tembaga berilium, yaitu paduan logam antara tembaga (Cu) dan berilium (Be). Pemilihan ketiga bahan ini didasarkan pada sifat mekanik dan konduktivitas listriknya yang baik, sehingga banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi kelistrikan.

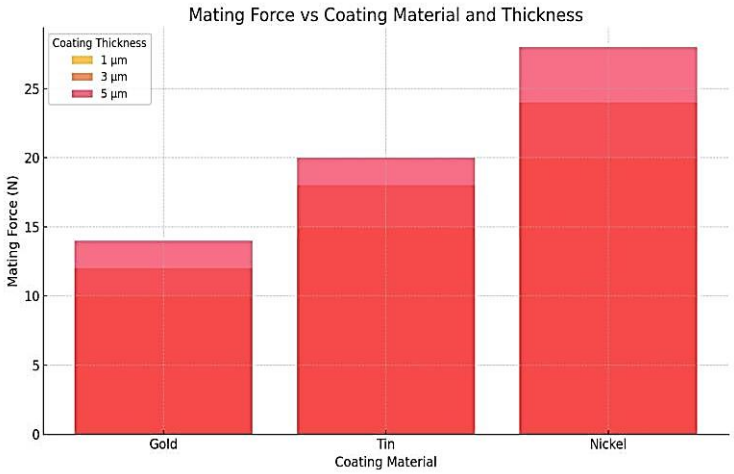
Setelah menentukan bahan dasarnya, setiap jenis material kemudian dilapisi dengan tiga macam bahan pelapis yang berbeda, yaitu emas (Au), timah (Sn), dan nikel (Ni). Tujuan dari penggunaan pelapis ini adalah untuk melindungi material dasar dari korosi, meningkatkan keawetan, serta memperbaiki kualitas penghantaran arus listrik pada sambungan konektor. Ketebalan lapisan pelapis juga divariasikan menjadi tiga ukuran, yaitu 1 mikrometer (µm), 3 mikrometer (µm), dan 5 mikrometer (µm), untuk mengetahui pengaruh ketebalan terhadap kinerja konektor secara keseluruhan (Buldum & Lu, 2000; Qiu et al., 2017).

Setiap sampel konektor yang telah dilapisi kemudian diuji dalam kondisi lingkungan yang terkendali. Dua parameter utama yang diukur dalam pengujian ini adalah gaya penyambungan dan tahanan kontak. Gaya penyambungan, yaitu gaya yang diperlukan agar dua bagian konektor dapat terhubung dengan baik, diukur menggunakan alat pengukur gaya khusus (force gauge) (Ni et al., 2021). Sementara itu, tahanan kontak, yang menunjukkan seberapa besar hambatan listrik yang terjadi pada titik sambungan, diukur menggunakan metode empat titik (four-point probe method), sebuah teknik pengukuran yang umum digunakan dalam pengujian konduktivitas listrik karena memberikan hasil yang lebih akurat (Turel et al., 2017).

Selain pengujian awal, penelitian ini juga mensimulasikan proses penuaan dan keausan pada konektor untuk mengetahui seberapa baik kinerja konektor dalam jangka

panjang (Qiu et al., 2017). Simulasi penuaan dilakukan untuk meniru kondisi penggunaan konektor dalam jangka waktu lama, sedangkan simulasi keausan bertujuan untuk melihat bagaimana pelapis dan material dasar bertahan setelah mengalami gesekan berulang kali akibat proses penyambungan dan pelepasan. Dengan pendekatan ini, diharapkan diperoleh gambaran yang menyeluruh mengenai performa masing-masing kombinasi material dasar dan lapisan pelapis, baik dalam kondisi awal maupun setelah penggunaan dalam waktu yang lama. Informasi ini sangat penting untuk membantu memilih bahan yang paling sesuai untuk aplikasi konektor listrik yang mengutamakan daya tahan, keandalan, dan efisiensi penghantaran arus listrik.

HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 1. Mating Force sebagai fungsi bahan pelapis dan ketebalan

Gambar diatas menunjukkan bagaimana jenis lapisan pelindung (coating) dan ketebalannya dapat mempengaruhi gaya sambungan (mating force) pada konektor. Dari hasil yang ditampilkan, terlihat bahwa konektor yang dilapisi dengan emas menghasilkan gaya sambungan yang paling rendah, tidak peduli jenis bahan dasarnya. Hal ini disebabkan oleh sifat alami emas yang licin, sehingga mengurangi gesekan saat kedua bagian konektor disatukan (Ni et al., 2021; Persson et al., 2005).

Sebaliknya, konektor yang menggunakan lapisan timah dan nikel menunjukkan gaya sambungan yang lebih tinggi. Meskipun pelapisan timah lebih murah dan banyak digunakan, namun bahan ini memiliki tingkat gesekan yang lebih tinggi serta permukaan yang cenderung lebih kasar dibandingkan emas. Akibatnya, diperlukan gaya yang lebih besar untuk menyatukan atau melepaskan konektor yang dilapisi timah (Persson et al., 2005; Malec et al., 2011).

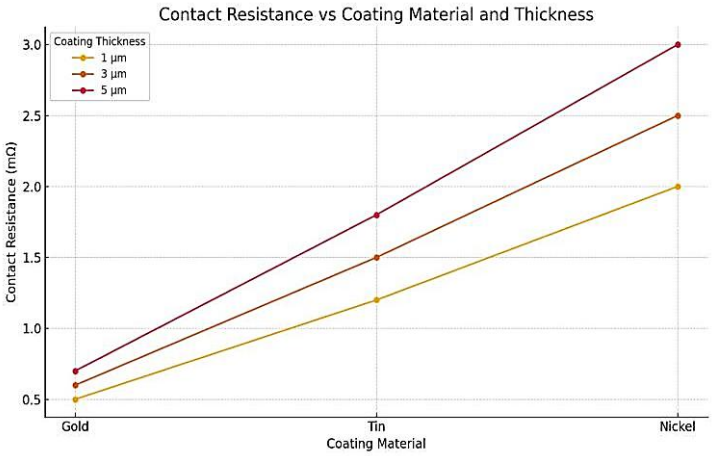
Dengan kata lain, pemilihan jenis lapisan sangat berpengaruh terhadap kenyamanan dan keawetan penggunaan konektor (Turel et al., 2017). Lapisan emas, walaupun lebih mahal, memberikan kinerja yang lebih baik dalam mengurangi gaya sambungan,

sementara lapisan timah dan nikel, meski lebih ekonomis, cenderung membutuhkan usaha lebih saat digunakan.

Bahan dasar yang digunakan juga memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap hasil pengujian. Logam beryllium copper cenderung memerlukan gaya tekan yang lebih tinggi saat kedua permukaan disatukan, karena logam ini memiliki kekerasan mekanis yang lebih baik dibandingkan bahan lainnya. Sebaliknya, logam kuningan (brass) menunjukkan kebutuhan gaya tekan paling rendah, yang berarti lebih mudah untuk disatukan dibandingkan beryllium copper (Turel et al., 2017; Yang et al., 2025).

Selain jenis bahan dasar, ketebalan lapisan pelapis (coating) yang digunakan di permukaan juga turut mempengaruhi besarnya gaya tekan yang dibutuhkan.

Secara umum, semakin tebal lapisan pelapis yang digunakan, maka gaya tekan yang diperlukan untuk menyatukan kedua permukaan cenderung menjadi lebih besar. Dengan kata lain, baik kekerasan bahan dasar maupun ketebalan lapisan pelapis bekerja sama mempengaruhi seberapa besar gaya yang diperlukan untuk proses penyambungan komponen.



Gambar 2 Resistensi kontak sebagai fungsi bahan dan ketebalan pelapis

Gambar diatas menunjukkan data mengenai hambatan kontak dari berbagai kombinasi material yang digunakan. Dari hasil pengujian, lapisan emas memberikan hambatan kontak yang paling rendah. Hal ini disebabkan oleh sifat emas yang sangat baik dalam menghantarkan listrik serta kemampuannya yang tinggi untuk tahan terhadap proses oksidasi, yaitu pembentukan lapisan karat akibat reaksi dengan udara. Karena tidak mudah teroksidasi, sambungan listrik dengan lapisan emas tetap stabil dan memiliki kinerja yang konsisten.

Sementara itu, sampel yang dilapisi dengan timah menunjukkan nilai hambatan kontak yang sedang, tidak terlalu rendah maupun terlalu tinggi. Namun, seiring waktu, terutama setelah proses penuaan atau penggunaan dalam jangka waktu yang lama, terjadi peningkatan variasi pada nilai hambatannya. Hal ini disebabkan oleh terbentuknya lapisan oksida pada permukaan timah, yang dapat mengganggu aliran arus listrik dan menyebabkan ketidakstabilan dalam kinerja sambungan.

Adapun lapisan nikel, meskipun secara mekanis cukup kuat dan tahan terhadap keausan fisik, justru menunjukkan hambatan kontak yang paling tinggi di antara semua material yang diuji. Hal ini terjadi karena daya hantar listrik nikel secara alami memang lebih rendah dibandingkan dengan emas maupun timah. Akibatnya, aliran arus listrik melalui sambungan berlapis nikel menjadi kurang efisien.

Bahan dasar yang memiliki tingkat kekerasan lebih tinggi, seperti beryllium copper (paduan tembaga-berilium), mampu membentuk permukaan kontak yang lebih stabil (Malec et al., 2011. Stabilitas ini penting karena dapat menjaga kestabilan nilai tahanan listrik, bahkan saat mengalami tekanan atau getaran mekanis. Artinya, meskipun terjadi tekanan berulang atau adanya gaya dari luar, sambungan listrik tetap bekerja dengan baik tanpa banyak perubahan pada aliran arus listrik.

Sebaliknya, bahan yang lebih lunak seperti kuningan (brass) cenderung lebih mudah berubah bentuk ketika mendapat tekanan. Karena sifatnya yang mudah

mengalami deformasi, permukaan kontak menjadi tidak konsisten atau berubah-ubah. Akibatnya, area yang bersentuhan untuk menghantarkan listrik bisa menjadi lebih kecil atau bergeser, yang pada akhirnya membuat nilai tahanan listrik menjadi tidak stabil. Ketidakstabilan ini bisa menyebabkan gangguan pada kinerja komponen listrik, terutama dalam aplikasi yang membutuhkan ketelitian tinggi atau kestabilan arus dalam jangka panjang.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan adanya dilema penting dalam memilih material pelapis untuk konektor listrik. Di satu sisi, pelapisan emas mampu memberikan hambatan kontak yang sangat rendah, sehingga arus listrik dapat mengalir dengan sangat baik dan stabil. Namun, penggunaan emas memiliki beberapa kelemahan yang cukup signifikan. Selain harganya yang sangat mahal, emas juga relatif mudah aus atau terkelupas apabila mengalami tekanan mekanis yang tinggi berulang kali saat proses pemasangan dan pelepasan konektor. Hal ini dapat memperpendek umur pakai komponen, terutama pada aplikasi yang sering mengalami siklus sambung-lepas (Ni et al., 2021; Persson et al., 2005).

Sebagai alternatif yang lebih ekonomis, pelapisan dengan timah (tin) atau nikel sering digunakan. Kedua material ini jauh lebih murah dibandingkan emas, sehingga cocok untuk aplikasi dengan anggaran biaya terbatas. Akan tetapi, penggunaan timah atau nikel juga tidak sepenuhnya bebas masalah. Timah, misalnya, cenderung mengalami penuaan material (aging), di mana sifat konduktif dan keandalan permukaannya dapat menurun seiring waktu akibat oksidasi atau pembentukan lapisan film tipis yang mengganggu aliran arus listrik (Zhang et al., 2020). Sementara itu, nikel memiliki sifat kekuatan mekanis yang baik, tetapi koefisien geseknya yang lebih tinggi dapat meningkatkan risiko keausan pada permukaan kontak saat sering dipasang dan dilepas. Oleh karena itu, pemilihan material pelapis harus mempertimbangkan keseimbangan antara biaya, ketahanan aus, serta stabilitas performa jangka panjang (Ni et al., 2021).

Selain pemilihan material, bentuk geometris dari permukaan kontak juga sangat berpengaruh terhadap daya rekat lapisan pelapis. Permukaan yang halus dan rata akan mempermudah proses pelapisan dan memungkinkan lapisan menempel dengan kuat dan merata (Malec et al., 2011; Zhang et al., 2020). Sebaliknya, jika permukaan kontak memiliki bentuk yang tidak beraturan, misalnya terdapat tonjolan, goresan, atau sudut tajam, maka lapisan pelapis bisa menjadi tidak seragam. Hal ini bisa menyebabkan ketebalan pelapis bervariasi di berbagai titik, sehingga menurunkan ketahanan mekanis maupun kestabilan konduksi listriknya (Ni et al., 2021). Oleh sebab itu, desain geometri yang dioptimalkan—misalnya dengan ujung yang membulat atau permukaan yang dipoles halus—dapat membantu memperbaiki kestabilan mekanis, memperpanjang umur pakai, sekaligus menjaga kualitas kinerja listrik dengan mengurangi konsentrasi tegangan di area tertentu (Yang et al., 2025; Buldum & Lu, 2000).

Tak kalah penting, proses pelapisan itu sendiri juga memainkan peranan besar dalam menentukan kualitas akhir konektor. Beberapa metode pelapisan yang umum digunakan antara lain adalah elektroplating (pelapisan elektrolisis) dan electroless plating (pelapisan tanpa arus listrik) (Yang et al., 2025; Qiu et al., 2017). Di antara keduanya, elektroplating sering menjadi pilihan utama karena mampu mengatur ketebalan lapisan secara lebih presisi dan seragam. Namun, sebelum proses pelapisan dilakukan, diperlukan beberapa tahap persiapan (pretreatment) pada permukaan bahan dasar. Tahap ini meliputi proses pembersihan dan aktivasi permukaan agar pelapisan dapat menempel dengan kuat. Sebagai contoh, proses chemical etching atau pengikisan kimia digunakan untuk menghilangkan kotoran, minyak, atau lapisan oksida yang menempel di permukaan logam (Song et al., 2018). Setelah permukaan benar- benar bersih, lapisan pelapis dapat menempel secara merata dan kuat, menghasilkan konektor dengan daya tahan dan kinerja optimal (Wang et al., 2017).

Secara keseluruhan, pemilihan material pelapis, desain geometri kontak, serta kontrol proses pelapisan yang tepat merupakan kunci utama untuk menghasilkan konektor listrik yang andal, tahan lama, dan berkinerja tinggi (Zhang et al., 2022).

KESIMPULAN

Dalam memilih material yang tepat, penting untuk menyeimbangkan antara kekuatan mekanik dan kemampuan hantaran listrik, baik dari material dasarnya maupun dari lapisan pelapisnya. Untuk aplikasi yang membutuhkan kinerja listrik tinggi, kombinasi beryllium copper dengan lapisan emas sering menjadi pilihan utama. Meskipun harganya mahal, kombinasi ini memberikan konduktivitas listrik yang sangat baik sekaligus tahan lama terhadap korosi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk aplikasi yang memerlukan kinerja listrik tinggi, kombinasi beryllium copper dengan lapisan emas adalah pilihan utama karena memberikan konduktivitas listrik yang sangat baik dan ketahanan terhadap korosi meskipun harganya mahal. Sementara itu, untuk aplikasi dengan kebutuhan kinerja sedang, pilihan material yang lebih ekonomis seperti phosphor bronze dengan lapisan timah dapat digunakan sebagai alternatif, memberikan performa

yang cukup baik dengan biaya yang lebih terjangkau. Selain itu, penelitian ini menekankan pentingnya teknologi pelapisan yang lebih canggih dan desain bentuk kontak yang lebih optimal untuk meningkatkan keandalan dan umur pakai komponen. Kontribusi penelitian ini di masa depan dapat diarahkan pada pengembangan teknologi pelapisan multi-lapis yang menggabungkan keunggulan beberapa material sekaligus, serta pengembangan model simulasi yang dapat memprediksi kinerja material dalam jangka panjang untuk pemilihan material yang lebih akurat sesuai dengan kebutuhan aplikasi.

DAFTAR PUSTAKA

Braunovic, M. (2015). Material selection in the design of electrical connectors. Materials & Design, 58, 70–78. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.061

Chen, Z., Song, K., & Zhang, L. (2017). Effect of normal forces on fretting corrosion of tin-coated electrical contacts. Wear, 380–381, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.043

Fouvry, S., Jedrzejczyk, P., & Chalandon, P. (2020). Fretting corrosion of gold-plated connector contacts. Wear, 452–453, 203303. https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203303

Liu, Y., Wang, H., Liu, W., Wei, Y., Lei, Q., Wang, X., & Ren, W. (2019). Electrical contact resistance of connector response to mechanical vibration environment. IEEE Access, 7, 95180–95189. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928580

Malec, C. E., Elkus, B., & Davidović, D. (2011). Vacuum annealed Cu contacts for graphene electronics. Solid State Communications, 151(23), 1791–1793. https://doi.org/10.1016/j.ssc.2011.08.025

Ni, J., Han, L., Pan, J., Zheng, J., Shi, Y., Cui, Z., & Cai, J. (2021). Evolution of contact performance of industry electrical connector based on reliability accelerated testing. Advances in Mechanical Engineering, 13(2). https://doi.org/10.1177/1687814021998829

Ostendorf, F., Wielsch, T., & Reiniger, M. (2024). The state of health of electrical connectors. Machines, 12(7), 474. https://doi.org/10.3390/machines12070474

Qiu, D., Peng, L., Yi, P., & Lai, X. (2017). A micro contact model for electrical contact resistance prediction between roughness surface and carbon fiber paper. International Journal of Mechanical Sciences, 124–125, 37–47. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.02.026

Ren, W., Wang, H., Song, K., & Zhang, L. (2015). Correlation between friction and wear properties and electrical performance of silver coated electrical connectors. Wear, 330–331, 400–411. https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.067

Ren, W., Wang, H., Tian, H., & Jin, X. (2022). Analytical modeling and simulation of electrical contact resistance for elastic rough electrode surface contact including frictional temperature rise. AIP Advances, 12(2), 025204. https://doi.org/10.1063/5.0078878

Song, J., Liu, W., Wang, E., Zhao, S., Liu, S., & Wang, J. (2018). Contact resistance evolution and degradation of $AgSnO_2$ electrical contact materials under DC breaking arcs. Materials & Design, 155, 361–371. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.016

Turel, A., Slavič, J., & Boltežar, M. (2017). Electrical contact resistance and wear of a dynamically excited metal–graphite brush. Advances in Mechanical Engineering, 9(3). https://doi.org/10.1177/1687814017694801

Wang, P., Song, K., Ji, L., Wang, J., Chen, H., Chen, J., & Zhou, H. (2017). Combined effects of fretting and pollutant particles on the contact resistance of the electrical connectors. Wear, 376–377, 1230–1235. https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.054

Yang, Z., Li, W., Zheng, X., Zhao, M., & Zhang, Y. (2025). The influence of initial surface roughness on the current-carrying friction process of elastic pairs. Materials, 18(2). https://doi.org/10.3390/ma18020370

Zeroukhi, Y., Napieralska-Juszczak, E., Vega, G., Komeza, K., Morganti, F., & Wiak, S. (2014). Dependence of the contact resistance on the design of stranded conductors. Sensors, 14(8), 13925–13942. https://doi.org/10.3390/s140813925

Zhang, C., Ren, W., & Liao, X. (2020). On the relationship between contact resistance and load force for electrode materials with rough surfaces. Materials, 15(16). https://doi.org/10.3390/ma15165667

Zhang, L., Liu, J., Ma, S., & Wang, S. (2022). Multi-physics electrical contact analysis considering the electrical resistance and Joule heating. International Journal of Solids and Structures, 254–255, 111872. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2022.111872

Zhang, X., Chen, Z., & Xu, Y. (2019). Investigation of electrical contact properties and fretting wear behavior of gold-plated electrical connectors. Tribology International, 140, 105842. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105842

Copyright holder:
Muhammad Satya Putra Gantada (2025)

First publication right:
Syntax Idea

This article is licensed under: