

Thermal Efficiency Analysis of Stainless Steel and Incoloy Tubular Elements in a Water Heating System

[Analisis Efisiensi Termal Elemen Tubular Material Stainless Steel Dan Incoloy Pada Sistem Pemanas Air]

Mohamad Budi Satrio¹⁾, Ali Akbar ^{*,2)}

¹⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: aliakbar@umsida.ac.id

Abstract. *This study analyzes the thermal efficiency of tubular heating elements made of Stainless Steel 321 and Incoloy 840 in a water-heating system through laboratory experimental testing. The observed parameters include initial and final water temperatures, heating time, electrical energy consumption, and thermal efficiency across four samples (two samples for each material). The results show that both materials can raise the water temperature to the range of 57–59°C with relatively similar energy consumption, approximately 470–478 Wh. However, Stainless Steel 321 performs better, achieving a thermal efficiency of 54–61% with a heating time of 80–90 minutes, whereas Incoloy 840 exhibits an efficiency of 37–50% with a heating time of 100–110 minutes. These differences indicate that overall heat-transfer effectiveness and system heat losses significantly affect heating performance.*

Keywords - Thermal efficiency, Incoloy, Stainless Steel, water heater.

Abstrak. *Penelitian ini menganalisis efisiensi termal elemen pemanas tubular berbahan Stainless Steel 321 dan Incoloy 840 pada sistem pemanas air melalui uji eksperimen laboratorium. Parameter yang diamati meliputi suhu awal–akhir, waktu pemanasan, konsumsi energi listrik, dan efisiensi termal pada empat sampel (dua sampel tiap material). Hasil menunjukkan kedua material mampu menaikkan suhu air hingga kisaran 57–59°C dengan konsumsi energi yang relatif serupa, yaitu sekitar 470–478 Wh. Namun, Stainless Steel 321 memberikan kinerja lebih baik dengan efisiensi termal 54–61% dan waktu pemanasan 80–90 menit, sedangkan Incoloy 840 menunjukkan efisiensi 37–50% dengan waktu pemanasan 100–110 menit. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa efektivitas perpindahan panas total dan rugi panas sistem berpengaruh signifikan terhadap kinerja pemanasan.*

Kata Kunci - Efisiensi termal, Incoloy, Stainless Steel, pemanas air.

I. PENDAHULUAN

Pemanas air merupakan perangkat termal yang memiliki peranan penting dalam mendukung aktivitas kehidupan modern, baik pada skala rumah tangga, komersial, hingga industri[1]. Penggunaannya sangat luas, mulai dari perhotelan, restoran, rumah sakit, fasilitas olahraga, hingga berbagai proses industri yang memerlukan suplai air panas dengan suhu stabil[2]. Seiring meningkatnya permintaan akan sistem pemanas air yang efisien, aman, dan tahan lama, aspek pemilihan material elemen pemanas menjadi faktor esensial dalam menentukan kinerja keseluruhan sistem[3].

Pemanas air merupakan perangkat termal yang banyak digunakan pada kebutuhan rumah tangga, komersial, hingga industri, sehingga aspek efisiensi pemanasan dan keandalan elemen pemanas menjadi faktor penting dalam kinerja sistem[4]. Salah satu sifat material yang sering dianggap menentukan kemampuan elemen pemanas mentransfer panas ke air adalah konduktivitas termal (*thermal conductivity*). Secara prinsip, material dengan nilai k lebih tinggi cenderung lebih mudah menghantarkan panas melalui dinding elemen (sheath) menuju fluida, sehingga secara teoritis dapat menurunkan hambatan perpindahan panas konduksi pada material tersebut[5], [6].

Namun, pada elemen pemanas tubular, pemilihan material sheath tidak dapat disimpulkan hanya dari “mana yang k -nya lebih tinggi”, karena nilai konduktivitas termal antar material kandidat dapat berbeda. Secara umum, stainless steel SS 304 memiliki konduktivitas termal lebih tinggi dibandingkan paduan Incoloy 321 pada temperatur ruang hingga mendekati temperatur operasi pemanas air. Nilai tipikal yang sering dijadikan acuan adalah stainless steel 304 sekitar 16 W/m·K, sedangkan Incoloy 321 sekitar 11–12 W/m·K[7], [8]. Hal ini menunjukkan bahwa apabila penilaian hanya didasarkan pada konduktivitas termal, maka stainless steel secara teoritis memiliki keuntungan pada jalur konduksi panas melalui sheath[9].

Meski demikian, praktik pemilihan material elemen pemanas air terutama tipe imersi tidak hanya menargetkan konduktivitas termal, tetapi juga mempertimbangkan ketahanan korosi, resistansi terhadap *pitting/scaling*, stabilitas pada temperatur sheath yang tinggi, serta umur pakai[10]. Dalam kondisi air tertentu (misalnya kaya mineral atau mengandung ion agresif), elemen pemanas lebih sering gagal akibat degradasi permukaan, pitting, atau penumpukan

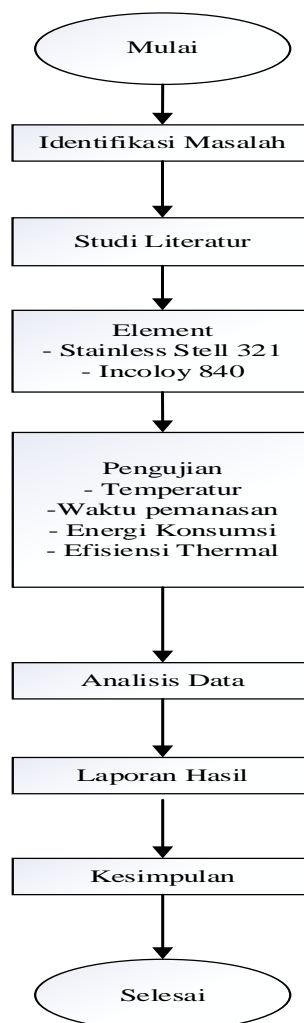
kerak (*fouling*) yang justru menambah hambatan perpindahan panas lebih besar daripada selisih k material[11]. Oleh karena itu, Incoloy banyak dipilih bukan karena konduktivitas termalnya lebih tinggi, melainkan karena ketahanannya yang lebih baik terhadap kondisi operasi berat sehingga performa pemanasan dapat lebih stabil dalam jangka panjang.

Berdasarkan uraian tersebut, kajian perbandingan material elemen tubular berbahan stainless steel dan Incoloy tetap relevan, tetapi dengan penekanan yang tepat: stainless steel unggul pada nilai konduktivitas termal tipikal, sedangkan Incoloy berpotensi unggul pada aspek keandalan dan durabilitas pada lingkungan yang lebih korosif atau menantang. Penelitian ini penting untuk mengevaluasi kinerja pemanasan secara menyeluruh melalui parameter seperti waktu pemanasan, konsumsi energi, serta kestabilan operasi, sehingga rekomendasi pemilihan material tidak hanya didasarkan pada asumsi, melainkan pada fakta sifat termal dan performa sistem yang terukur.

II. METODE

A. Diagram Alir Penelitian

Dalam penelitian ini, langkah-langkah proses penelitian akan dijelaskan dalam diagram alir (flow chart), Diagram alir (flow chart) dapat dilihat gambar tersebut.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

B. Teknik Pengumpulan Data

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium yang didukung observasi langsung untuk mengumpulkan data kinerja pemanasan air menggunakan elemen tubular berbahan Stainless Steel 321 dan Incoloy 840. Eksperimen laboratorium menjadi metode utama dengan melakukan pengujian pemanasan secara langsung pada masing-masing material dalam kondisi yang dibuat seragam agar hasil perbandingan efisiensi termal dapat dinilai secara objektif[12]. Tahap persiapan meliputi penyiapan wadah pemanas (teko), termometer digital untuk

mengukur suhu air, wattmeter untuk memantau konsumsi energi listrik, stopwatch untuk pencatatan waktu pemanasan, serta alat bantu untuk memastikan posisi elemen pemanas terpasang pada ketinggian yang sama di dalam wadah. Setiap elemen tubular diuji secara terpisah menggunakan prosedur yang identik.

Pengujian dilakukan dengan mengisi wadah menggunakan air dengan dua kondisi awal, yaitu air dingin dan air biasa. Sebelum pemanas diaktifkan, suhu awal air dicatat terlebih dahulu. Elemen tubular kemudian diposisikan sesuai ketentuan pemasangan, dan sumber listrik dihubungkan melalui wattmeter untuk merekam energi listrik yang digunakan selama proses pemanasan. Setelah semua perangkat siap, pemanas dinyalakan dan kenaikan suhu air diamati pada interval waktu yang konsisten hingga mencapai suhu akhir target. Pada setiap interval, data suhu, waktu, dan konsumsi energi dicatat secara sistematis. Prosedur yang sama diterapkan untuk kedua jenis material, sehingga diperoleh data primer berupa profil kenaikan suhu, waktu pemanasan total, serta konsumsi energi listrik dari masing-masing elemen pemanas.



Gambar 2. Element Tubular

Selain pengukuran kuantitatif, dilakukan pula observasi langsung untuk memperkuat data dan membantu interpretasi hasil. Observasi difokuskan pada kondisi operasional selama pemanasan, seperti kestabilan pemanasan, potensi kenaikan suhu berlebih, fluktuasi konsumsi daya, terbentuknya uap secara berlebihan, perubahan warna pada elemen, maupun adanya suara tidak normal yang dapat mengindikasikan ketidakstabilan kerja elemen. Kondisi lingkungan pengujian—misalnya suhu ruangan, aliran udara/ventilasi, dan penempatan peralatan—juga dicatat untuk mengidentifikasi kemungkinan rugi panas ke lingkungan. Seluruh pengujian dilakukan berulang untuk mengurangi kesalahan eksperimen dan meningkatkan keandalan hasil.

Tabel 2.1 Variabel Pengujian

No.	Jenis Material	Tegangan (Volt)	Daya (Watt)
1	Stainless Steel 321	240	500
2	Incoloy 840	240	500

Data pengujian kemudian dianalisis untuk membandingkan performa termal elemen pemanas tubular berdasarkan jenis material dengan parameter utama berupa suhu awal, suhu akhir, waktu pemanasan, konsumsi energi, dan efisiensi termal. Perbandingan dilakukan antara elemen Stainless Steel 321 dan Incoloy 840 pada kondisi air awal yang sama (air dingin maupun air biasa), sehingga perbedaan kinerja yang muncul dapat dikaitkan secara lebih jelas dengan karakteristik material elemen pemanas, bukan akibat perbedaan prosedur atau kondisi pengujian.

$$\text{Efisiensi (\%)} = \left(\frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{P \times t} \right) \times 100\%$$

Dimana:

- **m** = Massa air (kg)
- **c** = Kalor jenis air (4.186 kJ/kg°C)
- **ΔT** = Perubahan suhu (°C) (80 °C - 25°C = 55 °C)
- **P** = Daya pemanasan (W)
- **T** = Waktu Pemanasan

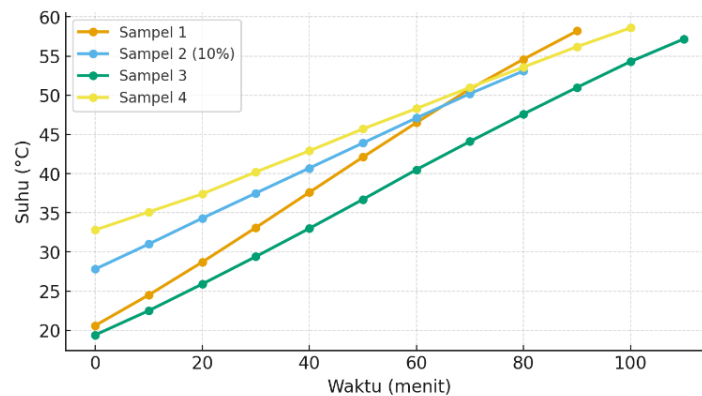
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Teknik Hasil dan Grafik Sistem Pemanas

No	Jenis Material	Suhu Awal (°C)	Suhu Akhir (°C)	Waktu Pemanasan (menit)	Konsumsi Energi (Wh)	Efisiensi Termal (%)
1	Stainless Steel 321	20,6	58,2	90	470,4	61
2	Stainless Steel 321	27,8	57,3	80	475,2	54
3	Incoloy 840	19,4	57,2	110	477,6	50
4	Incoloy 840	32,8	58,6	100	475,2	37

Hasil pengujian pada empat sampel menunjukkan bahwa elemen pemanas tubular dengan material Stainless Steel 321 dan Incoloy 840 mampu menaikkan suhu air dari suhu awal yang bervariasi hingga mencapai kisaran suhu akhir sekitar 57–59°C, dengan waktu pemanasan berada pada rentang 80–110 menit. Pada Stainless Steel 321, Sampel 1 meningkatkan suhu air dari 20,6°C menjadi 58,2°C dalam 90 menit dengan konsumsi energi 470,4 Wh dan efisiensi termal sekitar 61%, sedangkan Sampel 2 menaikkan suhu dari 27,8°C menjadi 57,3°C dalam 80 menit dengan konsumsi energi 475,2 Wh dan efisiensi sekitar 54%. Sementara itu, pada Incoloy 840, Sampel 3 menaikkan suhu dari 19,4°C menjadi 57,2°C dalam 110 menit dengan konsumsi energi 477,6 Wh dan efisiensi sekitar 50%, sedangkan Sampel 4 menaikkan suhu dari 32,8°C menjadi 58,6°C dalam 100 menit dengan konsumsi energi 475,2 Wh dan efisiensi sekitar 37%. Secara umum, konsumsi energi listrik pada semua sampel relatif mirip (sekitar 470–478 Wh), namun efisiensi termal menunjukkan perbedaan yang cukup nyata antar sampel. Kondisi ini mengindikasikan bahwa perbedaan kinerja lebih dipengaruhi oleh efektivitas perpindahan panas dari elemen ke air dan besarnya rugi panas sistem, bukan semata-mata oleh energi listrik yang masuk.

Hasil pengujian pada empat sampel memperlihatkan bahwa elemen pemanas tubular berbahan Stainless Steel 321 dan Incoloy 840 sama-sama mampu mencapai suhu akhir yang hampir setara, tetapi memiliki karakteristik waktu pemanasan dan efisiensi yang berbeda. Stainless Steel 321 cenderung memberikan efisiensi yang lebih tinggi (61% dan 54%) dengan durasi pemanasan lebih singkat (90 dan 80 menit), sedangkan Incoloy 840 menunjukkan efisiensi yang lebih rendah (50% dan 37%) dengan waktu pemanasan lebih panjang (110 dan 100 menit). Perbedaan ini dapat dijelaskan melalui teori perpindahan panas pada sistem imersi yang melibatkan mekanisme konduksi–konveksi dan rugi panas ke lingkungan. Panas yang dihasilkan oleh elemen harus melewati jalur konduksi di dalam elemen dan sheath, lalu ditransfer ke air melalui konveksi pada permukaan elemen. Ketika energi listrik yang digunakan relatif sama, sampel dengan efisiensi lebih tinggi menunjukkan bahwa fraksi panas yang benar-benar diserap air lebih besar, sehingga laju kenaikan suhu lebih efektif dan waktu pemanasan dapat lebih singkat. Sebaliknya, efisiensi yang lebih rendah—seperti pada Sampel 4—mengindikasikan bahwa proporsi panas yang hilang ke lingkungan atau tidak tersalurkan optimal ke air lebih besar, yang dapat dipengaruhi oleh kondisi konveksi air, posisi/perendaman elemen, serta rugi panas melalui dinding wadah atau permukaan terbuka. Dengan demikian, berdasarkan tabel hasil, perbedaan kinerja antar material pada pengujian ini tampak pada kombinasi waktu pemanasan dan efisiensi termal, di mana Stainless Steel 321 menunjukkan performa pemanasan yang lebih efektif, sedangkan Incoloy 840 cenderung mengalami penurunan efisiensi pada beberapa kondisi pengujian meskipun konsumsi energi listriknya hampir sama.



Gambar 2.1 Grafik Perbandingan

Jika ditinjau dari karakteristik pemanasan, variasi kinerja antar sampel dapat dijelaskan melalui kerangka teori perpindahan panas pada sistem imersi yang merupakan kombinasi mekanisme konduksi–konveksi. Panas yang dibangkitkan oleh elemen akibat pemanasan Joule terlebih dahulu ditransmisikan melalui jalur konduksi internal (dari kawat pemanas, melewati media pengisi/isolator, hingga mencapai sheath), kemudian dipindahkan ke air melalui konveksi pada permukaan elemen. Mengingat konsumsi energi listrik seluruh sampel berada pada rentang yang relatif sempit (± 470 – 478 Wh), perbedaan performa pemanasan terutama ditentukan oleh efektivitas transfer panas total, yaitu seberapa besar fraksi energi listrik yang benar-benar terkonversi menjadi kenaikan energi internal air. Sampel dengan waktu pemanasan lebih singkat dan efisiensi termal lebih tinggi menunjukkan resistansi termal total yang lebih rendah dan transfer panas yang lebih efektif ke fluida. Temuan ini tercermin pada Stainless Steel 321, khususnya Sampel 1 yang mencapai suhu akhir $58,2^{\circ}\text{C}$ dalam 90 menit dengan efisiensi termal 61%, serta Sampel 2 yang mencapai $57,3^{\circ}\text{C}$ dalam 80 menit dengan efisiensi 54%. Sebaliknya, Incoloy 840 menunjukkan durasi pemanasan yang lebih panjang dan efisiensi yang lebih rendah, yaitu Sampel 3 mencapai $57,2^{\circ}\text{C}$ dalam 110 menit dengan efisiensi 50%, sedangkan Sampel 4 mencapai $58,6^{\circ}\text{C}$ dalam 100 menit dengan efisiensi terendah 37%, yang mengindikasikan dominasi rugi panas atau meningkatnya resistansi perpindahan panas pada kondisi pengujian tersebut.

Walaupun konduktivitas termal (k) material sheath berkontribusi terhadap resistansi konduksi, hasil ini menegaskan bahwa performa pemanasan sistem imersi tidak dapat diatribusikan hanya pada satu parameter material. Pada elemen tubular, faktor-faktor operasional seperti konfigurasi pemasangan (tingkat perendaman dan posisi elemen), luas area kontak efektif, dinamika sirkulasi fluida akibat konveksi alami, serta rugi panas ke lingkungan melalui dinding wadah dan permukaan terbuka dapat menjadi pengendali utama laju pemanasan. Peningkatan rugi panas lingkungan akan menurunkan fraksi panas yang tersimpan dalam air meskipun energi listrik yang masuk relatif serupa, sehingga efisiensi termal menurun. Di sisi lain, pola konveksi alami yang lebih intens akan meningkatkan koefisien perpindahan panas pada sisi fluida, mempercepat distribusi panas, dan mendorong laju kenaikan suhu yang lebih tinggi.

Secara kuantitatif, efisiensi termal yang diperoleh berada pada kisaran 37–61%, menunjukkan adanya perbedaan tingkat pemanfaatan energi listrik menjadi panas berguna pada air. Efisiensi yang lebih rendah merefleksikan proporsi energi yang lebih besar hilang sebagai rugi panas atau tertahan oleh resistansi perpindahan panas, baik pada sisi konduksi maupun konveksi. Dengan demikian, meskipun kedua material mampu mencapai suhu akhir yang sebanding, perbedaan kinerja lebih merepresentasikan efektivitas perpindahan panas total sistem yang dipengaruhi oleh karakteristik material serta kondisi operasi/pemasangan selama proses pemanasan berlangsung.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian, elemen pemanas tubular berbahan Stainless Steel 321 dan Incoloy 840 sama-sama mampu menaikkan suhu air hingga kisaran 57 – 59°C dengan konsumsi energi listrik yang relatif serupa (± 470 – 478 Wh), namun menunjukkan perbedaan pada durasi pemanasan dan efisiensi termal. Stainless Steel 321 memberikan performa lebih baik dengan waktu pemanasan lebih singkat (80–90 menit) dan efisiensi lebih tinggi (54–61%), sedangkan Incoloy 840 memerlukan waktu lebih lama (100–110 menit) dengan efisiensi lebih rendah (37–50%). Perbedaan ini mengindikasikan bahwa pada kondisi pengujian ini, transfer panas ke air pada Stainless Steel 321 berlangsung lebih efektif, sementara pada Incoloy 840 terjadi rugi panas atau hambatan perpindahan panas yang lebih dominan, sehingga efisiensi termal menurun meskipun energi listrik yang digunakan hampir sama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada orang tua atas dukungan, kasih sayang, dan doa tak pernah putus selama studi Teknik Mesin. Semoga Allah membalas kebaikan kalian dengan kebahagiaan berlimpah. Terima kasih juga kepada teman-teman seangkatan Teknik Mesin atas persahabatan, diskusi mesin, dan dukungan yang membuat kuliah lebih menyenangkan. Khususnya, Bhima, terima kasih atas bantuan proyek dan motivasi.

REFERENSI

- [1] A. Janzen And E. Y. Kenig, "Analysis Of Crystallization Fouling In Electric Water Heating," *Heliyon*, Vol. 5, No. 11, Nov. 2019, Doi: 10.1016/J.Heliyon.2019.E02695.
- [2] D. H. Clift And H. Suehrcke, "Control Optimization Of Pv Powered Electric Storage And Heat Pump Water Heaters," *Solar Energy*, Vol. 226, Pp. 489–500, Sep. 2021, Doi: 10.1016/J.Solener.2021.08.059.
- [3] A. Ibrahim And S. Macintyre, "Failure Analysis Of Incoloy 800 Water Immersion Heating Element," *Green Technology, Resilience, And Sustainability*, Vol. 3, No. 1, Oct. 2023, Doi: 10.1007/S44173-023-00014-6.
- [4] I. A. Kachalla And C. Ghiaus, "Electric Water Boiler Energy Prediction: State-Of-The-Art Review Of Influencing Factors, Techniques, And Future Directions," Jan. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (Mdpi)*. Doi: 10.3390/En17020443.
- [5] W. Salameh, J. Faraj, E. Harika, R. Murr, And M. Khaled, "On The Optimization Of Electrical Water Heaters: Modelling Simulations And Experimentation," *Energies (Basel)*, Vol. 14, No. 13, Jul. 2021, Doi: 10.3390/En14133912.
- [6] S. Aggarwal, R. Kumar, S. Kumar, And T. Singh, "Impact Of Fin Material Properties And The Inclination Angle On The Thermal Efficiency Of Evacuated Tube Solar Water Heater: An Experimental Study," *J. King Saud Univ. Sci.*, Vol. 36, No. 5, May 2024, Doi: 10.1016/J.Jksus.2024.103186.
- [7] A. Ibrahim And S. Macintyre, "Failure Analysis Of Incoloy 800 Water Immersion Heating Element," *Green Technology, Resilience, And Sustainability*, Vol. 3, No. 1, Oct. 2023, Doi: 10.1007/S44173-023-00014-6.
- [8] A. Raduta, M. Nicoara, C. Locovei, And A. Răduță, "Optimal Design Of Heating Elements Sheathed With Incoloy Superalloy 800," 2010. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/298455466>
- [9] G. Pei, G. Li, X. Zhou, J. Ji, And Y. Su, "Comparative Experimental Analysis Of The Thermal Performance Of Evacuated Tube Solar Water Heater Systems With And Without A Mini-Compound Parabolic Concentrating (Cpc) Reflector ($C < 1$)," *Energies (Basel)*, Vol. 5, No. 4, Pp. 911–924, 2012, Doi: 10.3390/En5040911.
- [10] O. : Anjas, P. Junianto, And S. Riyadi, "Perancangan Pemanas Air Tenaga Surya Pasif Kapasitas 20 Liter," 2019.
- [11] N. Ramadhan *Et Al.*, "Analisis Perpindahan Panas Pada Kolektor Pemanas Air Tenaga Surya Dengan Turbulence Enhancer," *Jurnal Rekayasa Mesin*, Vol. 8, No. 1, 2017.
- [12] O. Asnal, "Perancangan Pengontrolan Pemanas Air Menggunakan Plc S7-1200 Dan Sensor Arus Acs712 Perancangan Pengontrolan Pemanas Air Menggunakan Plc Siemens S7-1200 Dan Sensor Arus Acs712." [Online]. Available: <http://www.novapdf.com/>

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.