

Penentuan *Selfheating* Pada Sensor Suhu Rendah Lapisan Tipis Cu dengan Transduser 2-WCB dan 3-WCB

Moh. Toifur^{1,a)}

¹Program Studi Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta
Jl. Prof. Soepomo Janturan Umbulharjo Yogyakarta 55164
email : ^{a)}mtoifur@yahoo.com

Abstrak

Telah diteliti fenomena *selfheating* pada eksperimen pengukuran suhu rendah berbantuan transduser konfigurasi 2-WCB (Wire Configuration Bridge) dan 3-WCB melalui penentuan nilai Lead Resistance (R_L). Sebagai sensor suhu digunakan lapisan Cu panjang 30 cm, tebal 18 μm dan lebar divariasi dari 1.0 mm sampai 2.5 mm. Penentuan lead resistance dilakukan dengan menyelesaikan secara numerik sistem persamaan bervariabel R_L dan R_{TD} (Resistance Temperature Detector) dengan masukan berupa 3 tahanan pada kedua jenis rangkaian WCB dan tegangan tegangan output sensor. Hasil penelitian menunjukkan adanya *selfheating* dengan nilai R_L yang cukup signifikan mempengaruhi nilai R_{TD} . Akibat adanya R_L ini maka pada transduser 2-WCB memiliki nilai R_{TD} yang lebih kecil dari transduser 3-WCB sehingga tegangan output R_{TD} transduser 2-WCB lebih besar dari tegangan output transduser 3-WCB. Adanya *selfheating* ini juga menyebabkan tegangan sensor tidak menunjukkan pola yang teratur terhadap kenaikan temperatur medium.

Kata-kata kunci: *Selfheating*, rangkaian konfigurasi 2-WCB, 3-WCB, Resistance temperature detector (RTD), lead resistance(R_L).

PENDAHULUAN

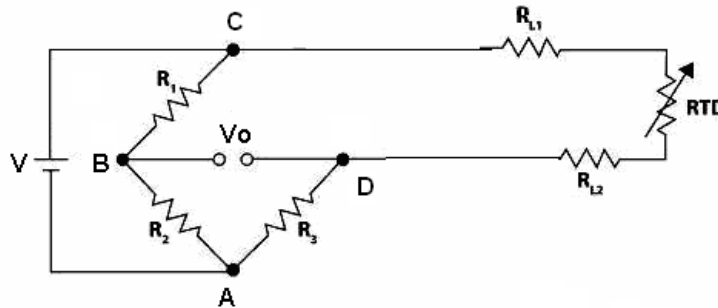
Ada beberapa cara untuk menentukan tegangan pada sensor suhu rendah berbasis RTD, diantaranya sensor dipasang pada rangkaian transduser konfigurasi 2-WCB, 3-WCB dan 4-WCB. Transduser ini ditempatkan di luar termos penyimpanan semen sapi, sementara sensor suhu ditempatkan di dalam termos. Akibatnya dibutuhkan kawat sepanjang kurang lebih 0,5 m sebagai penghubung sensor dan transduser sebanyak 2 buah. Idealnya kawat ini tidak membebani rangkaian dengan mengambil tegangan sumber, namun untuk arus-arus kecil kedua kawat ini mengambil tegangan karena dapat berperan sebagai hambatan, dan bahkan nilai hambatannya dapat bervariasi tergantung pada arus yang mengalir karena arus listrik akan menimbulkan panas pada penghantar. Tahanan yang timbul karena panas pada konduktor yang disebabkan aliran arus listrik ini disebut *selfheating*. Para ahli sudah lama membahas permasalahan ini terutama *selfheating* yang terjadi pada transistor [1]. Efek ini tidak bisa dihilangkan namun bisa dikurangi atau tetap ada namun pengaruhnya dapat diidentifikasi dengan jelas. Efek *selfheating* ini telah dimasukkan

pada kajian komputasi model termal arus statis pada transistor seperti transistor AlGaIn/GaN [1] karena dapat mempengaruhi mobilitas elektron [2,3].

Pada transduser 2-WCB terdapat 2 buah kawat yang menyumbang *selfheating*, sementara pada transduser 3-WCB jumlah kawat penyumbang *selfheating* dapat direduksi menjadi 1 kawat. *Selfheating* pada kawat ini secara tidak disadari ikut berperan untuk menambah tegangan keluaran sensor. Jika tegangan ini diungkapkan dalam besaran suhu maka penunjukan suhu tidak lagi murni merupakan suhu medium. Pada penelitian ini tahanan sensor cukup kecil sekitar 0,7 ohm sehingga tahanan *selfheating* sangat layak dipertimbangkan sebagai unsur penambah tahanan sensor.

Diantara cara untuk menangani hal ini adalah menggunakan rangkaian pembangkit arus yang benar-benar stabil ke RTD [1]. Demikian pula dengan penggunaan arus eksitasi yang rendah semisal 100µA [2]. Dengan arus sebesar ini maka *selfheating* dapat dikurangi dengan factor 10.000. Berikutnya adalah menggunakan rangkaian konfigurasi tipe 4 WCB [3]. Rangkaian 4 WCB tidak mengambil tegangan output dari dua kawat sebagai jalur pasokan arus listrik dari DC power supply tapi langsung mengambil beda potensial pada kedua ujung sensor. Dengan demikian tipe ini lebih mendiskripsikan beda potensial yang sesungguhnya.

Pada penelitian ini ditentukan nilai tahanan *selfheating* (R_L , *Lead Resistance*). Nilai R_L diperoleh dari penyelesaian sistem persamaan linier yang berasal dari penerapan hukum Kirchoff pada rangkaian 2-WCB (gambar 1) dan 3-WCB (gambar 2) dengan variabel R_L dan R_{TD} (tahanan sensor suhu) dan tegangan sensor yang berubah-ubah tergantung pada suhu medium. Hasilnya berupa profil tahanan R_L dan R_{TD} pada berbagai suhu medium.



Gambar 1. Rangkaian konfigurasi 2-WCB (<http://www.azom.com>)

Dari gambar 1, bisa ditentukan persamaan untuk menghitung tegangan output (V_o) dari R_{TD} yang disambungkan ke rangkaian 2-WCB,

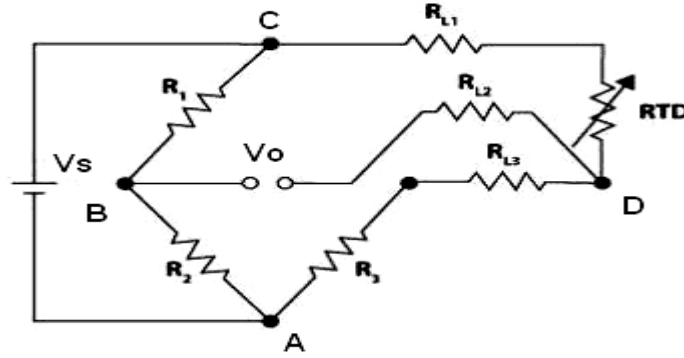
$$V_{BD} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_s - \left(\frac{R_{TD} + R_{L1} + R_{L2}}{R_3 + R_{TD} + R_{L1} + R_{L2}} \right) V_s \tag{1}$$

Dari pers. (1) tampak bahwa suku pertama ruas kanan bernilai konstan, sedangkan suku kedua mengandung R_{TD} yang nilainya bervariasi terhadap suhu medium. Namun pada suku kedua ini juga terdapat dua tahanan konduktor yang memberi sumbangan terhadap *selfheating* pada bagian pembilang yaitu R_{L1} dan R_{L2} . Inilah yang menjadikan nilai tegangan yang terukur pada R_{TD} menjadi tidak tepat. Jika $R_{L1} = R_{L2} = R_L$ maka diperoleh

$$V_{BD} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_0 - \left(\frac{R_{TD} + 2R_L}{R_3 + R_{TD} + 2R_L} \right) V_0 \tag{2}$$

dengan tegangan output V_o besarnya dapat diukur dari eksperimen.

Pada konfigurasi 3-WCB sebagaimana skema rangkaian pada gambar (2) panas ditransmisikan ke jalur konduktor yang menuju ke tegangan output.



Gambar 2. Rangkaian konfigurasi 3-WCB (<http://www.azom.com>)

Dengan menghitung V_{BD} dengan cara yang sama dengan perhitungan pada rangkaian 2-WCB maka tegangan output pada rangkaian 3-WCB,

$$V_{BD} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_s - \left(\frac{R_{TD} + R_{L1}}{R_{L1} + R_T + R_3 + R_{L3}} \right) V_s \quad (3)$$

Disini tampak bahwa kontribusi tegangan oleh konduktor R_L yang tampak pada suku kedua pers. (3) tinggal satu suku. Jika $R_{L1} = R_{L2} = R_L$ maka diperoleh

$$V_{BD} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_s - \left(\frac{R_{TD} + R_L}{R_3 + R_{TD} + 2R_L} \right) V_s \quad (4)$$

Dengan pemakaian konfigurasi 3-WCB maka pengaruh *selfheating* dapat dikurangi sehingga sensor R_{TD} dapat lebih jelas perannya dalam merespon suhu medium.

Secara teoritis nilai perbedaan tegangan akibat *selfheating* antara rangkaian konfigurasi 2-WCB dan 3-WCB (V_L) dapat diperoleh dengan mengurangkan pers. (2) dan (4) menjadi:

$$V_L = \frac{R_L}{R_3 + R_{TD} + 2R_L} V_s \quad (5)$$

dimana persamaan untuk R_L dan R_{TD} telah ditulis (Toifur, 2015) :

$$R_L = \frac{1}{\Delta} \left[\left(1 - \frac{A}{V_s} \right) \frac{A'}{V_s} R_3 - \frac{A}{V_s} R_3 \left(1 - \frac{A'}{V_s} \right) \right] \quad (6)$$

dan

$$R_{TD} = \frac{1}{\Delta} \left[\frac{A}{V_s} R_3 \left(1 - 2 \frac{A'}{V_s} \right) - \left(1 - 2 \frac{A}{V_s} \right) \frac{A'}{V_s} R_3 \right] \quad (7)$$

dengan

$$\Delta = \left(1 - \frac{A}{V_s} \right) \left(1 - 2 \frac{A'}{V_s} \right) - 2 \left(1 - \frac{A}{V_s} \right) \left(1 - \frac{A'}{V_s} \right)$$

$$A = \left(\frac{R_{TD} + 2R_L}{R_3 + R_{TD} + 2R_L} \right) V_s$$

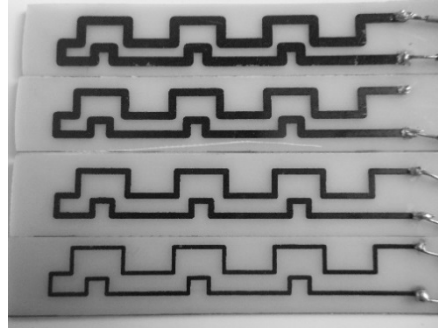
$$A' = \left(\frac{R_{TD} + R_L}{R_3 + R_{TD} + 2R_L} \right) V_s$$

METODE EKSPERIMEN

Alat dan Bahan

Peralatan dan bahan yang dibutuhkan meliputi:

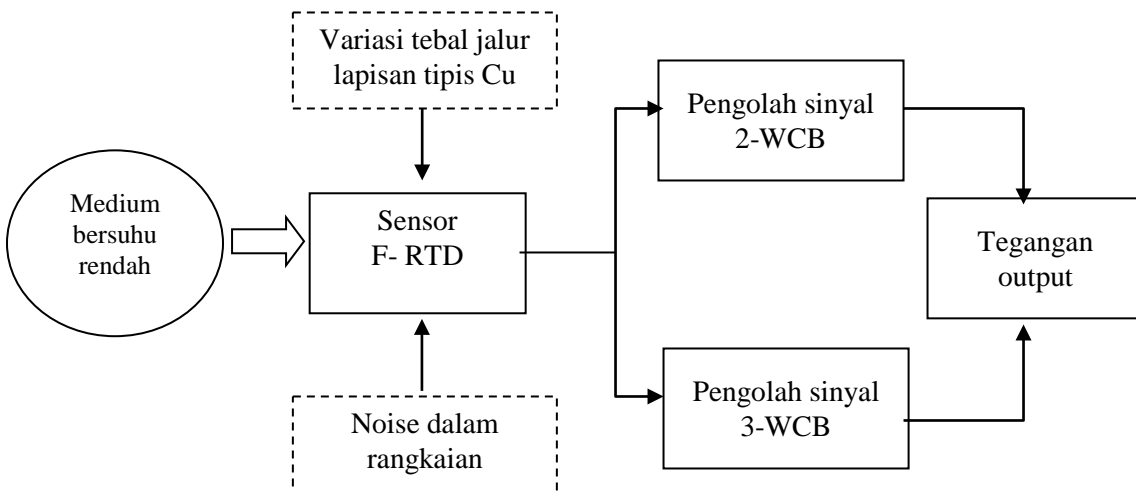
1. Lapisan tipis tembaga (Cu) setebal 17 μm dengan panjang 20 cm dan lebar jalur divariasi 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm, dan 2,0 mm digunakan sebagai sensor suhu (RTD pada rangkaian gambar 1 dan gambar 2). Sensor ini dipasang pada dua jenis rangkaian yaitu konfigurasi 3-WCB dan 4-WCB.



Gambar 3. Desain lapisan tembaga untuk sensor suhu rendah panjang 20 cm dan tebal divariasi 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm, dan 2,0 mm.

Selanjutnya lapisan tembaga dilapisi lapisan transparan (cat warna clear non konduktif) untuk melindungi lapisan dari oksidasi ataupun korosi.

2. Adaptor merk Super Anzon model SS500. Adaptor ini merupakan penyedia tegangan DC akan digunakan untuk memasok arus listrik pada rangkaian konfigurasi 3-WCB dan 4-WCB yang besarnya dapat divariasi mulai 1,5 s.d. 12 volt. Pada penelitian ini digunakan tegangan 1,5 volt.
3. Multimeter difungsikan sebagai amperemeter untuk mengukur arus yang mengalir pada rangkaian serta tegangan pada output.
4. Termokopel untuk mengukur suhu medium di sekitar sensor. Termokopel telah ada didalam bagian multimeter merk Winner M-890 C.
5. Nitrogen cair digunakan sebagai pendingin udara disekitar sensor lapisan tipis Cu. Setiap pengambilan data dibutuhkan 0,5 liter nitrogen cair untuk membangkitkan suhu dari -198°C sampai dengan 0°C dengan cara penguapan, dan setelah dicapai suhu 0°C maka nitrogen cair habis. Untuk pengambilan data berikutnya dibutuhkan nitrogen cair yang sama.



Gambar 4. Block diagram eksperimen

- Block diagram* eksperimen sebagaimana di diskripsikan pada gambar 4.
6. Kabel penghubung. Kabel penghubung terbuat dari kawat tembaga yang terbungkus lapisan karet, digunakan sebagai penghubung antar alat ukur.
 7. Gelas Kimia Merk Iwaki TE-32 Pyrex digunakan sebagai tempat sensor agar tidak bersentuhan langsung dengan nitrogen cair.

Tahapan kegiatan eksperimen dilaksanakan dengan mengikuti diagram alur sebagaimana ditampilkan pada gambar 4. Adapun aktivitas teknis eksperimen dan pengambilan data untuk setiap tahapan dilakukan sebagai berikut:

1. merangkai peralatan sebagaimana skema gambar 1 dengan memasang tahanan $R_1 = 100$ ohm, $R_2 = 100$ ohm, dan $R_3 = 100$ ohm, sensor lapisan tipis tembaga dengan lebar jalur 0,5 mm.
2. menuangkan nitrogen cair kedalam beker gelas 0,1 liter
3. mengukur arus dengan amperemeter, tegangan output dengan voltmeter, suhu dengan termometer digital hingga suhu ruangan berjalan dari suhu -198°C sampai suhu 10°C .
4. mengulangi langkah 1 sampai 4 sensor lapisan tipis tembaga dengan lebar jalur 1,0; 1,5; dan 2,0 mm.

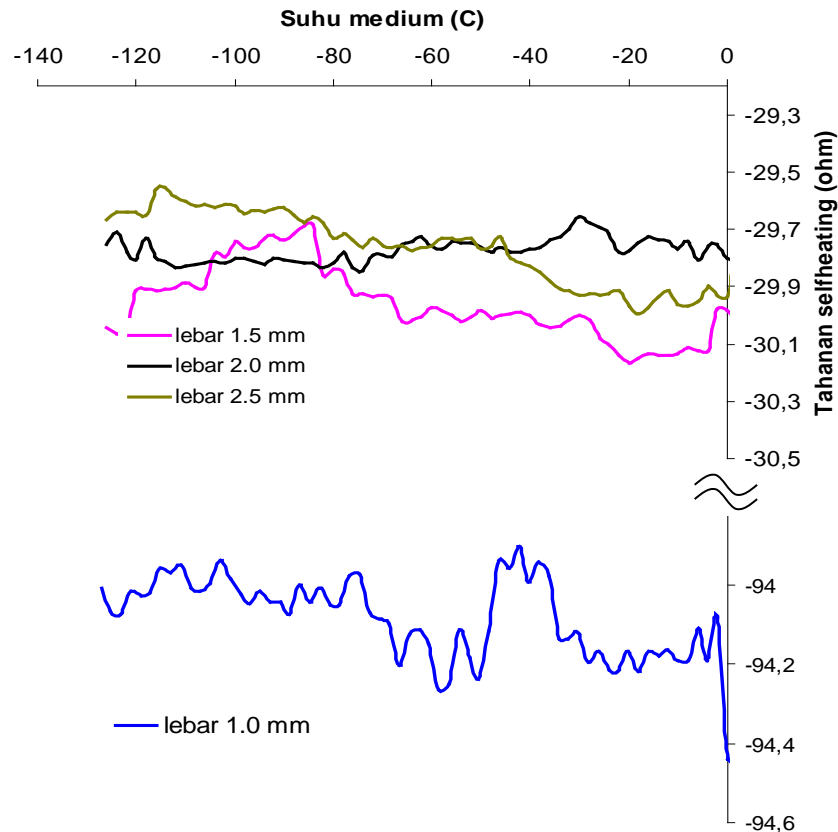
Metode Analisis Data

Setelah diperoleh data tegangan V_o pada berbagai suhu T , maka dibuat kurva antara T dan V_o . Selanjutnya dari kurva tersebut difitting menurut persamaan yang sesuai. Kurva yang memiliki indeks determinasi R_2 terbesar (paling mendekati 1) paling baik sehingga parameter-parameter yang terkait dengan hal ini berpotensi digunakan sebagai sensor suhu. *Selfheating* ditentukan melalui selisih tegangan pada setiap kenaikan suhu antara dua jenis rangkaian konfigurasi yaitu antara 3-WCB terhadap 2-WCB dan antara 4-WCB terhadap 2-WCB. dengan diketahui profil *selfheating* ini maka dapat dipilih tipe rangkaian konfigurasi yang cocok untuk dipasangkan dengan sensor suhu lapisan Cu.

HASIL PENELITIAN

Tahanan self heating (R_L)

Sebagaimana diungkapkan pada landasan teori bahwa tahanan *selfheating* ini ikut menyumbang resistansi pada sensor suhu. Besarnya tergantung pada arus yang mengalir. Oleh karena itu pada gambar 5 terlihat R_L tidak begitu bervariasi terhadap suhu.

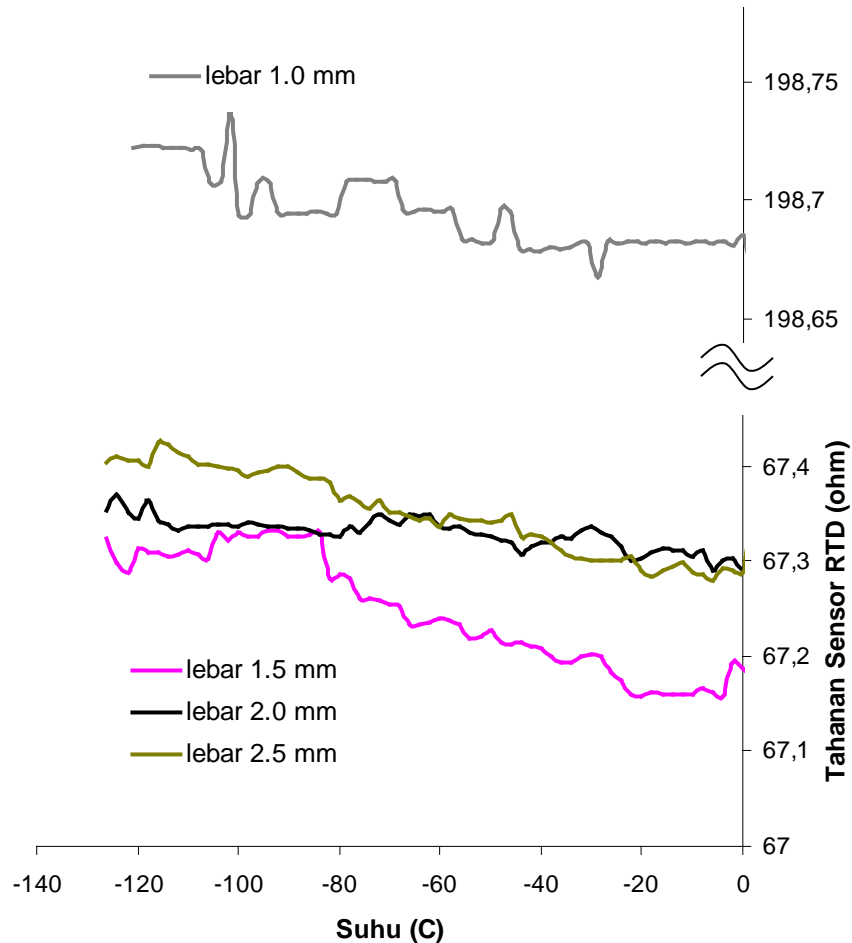


Gambar 5. Lead Resistance (tahanan kawat) untuk berbagai lebar jalur lapisan Cu

Karena tegangan sumber yang digunakan tetap 3 volt maka arus yang mengalir hanya sedikit bervariasi terhadap suhu pada sensor. Semakin besar arus maka semakin besar resistansinya. Dari gambar 18 tampak bahwa nilai R_L sekitar 16 – 23 ohm. Tanda negatif menunjukkan bahwa adanya R_L akan mengurangi tahanan yang terukur pada R_{TD} yang berakibat berkurangnya tegangan R_{TD} pula. Hal ini akan berakibat pada kesulitan mendeteksi tegangan R_{TD} (karena tegangan terlalu kecil) sehingga kadang-kadang tidak terbaca, atau jika ingin terbaca dibutuhkan alat ukur yang lebih teliti. Terdapat kecenderungan semakin lebar jalur lapisan Cu semakin kecil resistansinya yaitu untuk lebar jalur 2,5 mm, 2,0 mm kemudian 1,5 mm. Namun untuk lebar jalur 1,0 mm nilai R_L jauh lebih kecil lagi yaitu berada di sekitar 94 ohm..

Tahanan sensor (R_{TD})

Selanjutnya pada gambar 2 ditampilkan nilai R_{TD} pada variasi suhu medium. Dari gambar tampak adanya kecenderungan semakin tinggi suhu semakin menurun R_{TD} -nya. Hal ini akan berpengaruh pada tegangan output yang memiliki profil seperti polinomial orde dua yang semakin menuju ke titik balik maksimum sehingga semakin besar suhu medium semakin kecil penambahan tegangannya. Semua sampel menunjukkan kecenderungan semakin naik suhu medium semakin turun R_{TD} nya.



Gambar 6. Nilai tahanan R_{TD} untuk berbagai lebar jalur lapisan Cu.

Pada penelitian ini supaya dipastikan koneksi antar komponen terhubung bagus karena sangat boleh jadi koneksi yang tidak bagus akan menjadi sumber timbulnya tahanan yang tidak dikehendaki. Pada bidang peternakan sensor suhu rendah ini dapat diaplikasikan pada suhu semen sapi yang tersimpan pada termos semen pada suhu nitrogen cair (-198°C) untuk kepentingan inseminasi buatan. Pembacaan suhu oleh sensor RTD secara tepat dan teliti sangat dibutuhkan terutama pada suhu di dekat suhu kritis yaitu -100°C karena di atas suhu ini sperma sapi yang terkandung pada semen akan mati. Jika penunjukan suhu tercampur dengan suhu oleh akibat tahanan *selfheating* maka suhu terbaca lebih rendah dari suhu sebenarnya sehingga berakibat matinya sperma sapi. sehingga tidak terganggu efek Pembacaan suhu rendah secara tepat dan teliti sangat dibutuhkan sangat dibutuhkan Penelitian ini memberikan manfaat yang besar

KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Penggunaan rangkaian konfigurasi 2-WCB dan 3-WCB sebagai transduser sangat mempengaruhi nilai tegangan output terutama pada pengurangan kepekaan sensor oleh sebab adanya peristiwa *selfheating* oleh kawat konduktor yang menambah tahanan sensor.
2. Transduser 3-WCB lebih baik dibandingkan transduser 2-WCB karena tahanan kawat pada konfigurasi 3-WCB lebih sedikit dibandingkan dengan konfigurasi 2-WCB.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan trimakasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengembangan (LPP) Universitas Ahmad Dahlan yang telah mendanai penelitian ini dengan nomor kontrak : PFF-111/LPP-UAD/III/2015.

REFERENSI

1. P. Erico, *Self-Heating And Scaling Of Thin Body Transistors*, Ph.D. Thesis, Stanford University (2004.).
2. Y. Chang, Y. Zhang, Y. Zhang., K.Y. Tong, *A Thermal Model For Static Current Characteristics of AlGa_N / GaN High Electron Mobility Transistors Including Self-Heating Effect*, Journal Of Applied Physics, 99, 044501,2006, 1-5.
3. Towhid Chowdhury, *Study of Self-Heating Effects in GaN HEMTs*, Thesis for Master of Sciences, Arizona State University (2013).
4. Vasileska, D, Raleva, K. and Stephen, M. Goodnick, *Heating Effects in Nanoscale Devices*. Cutting Edge Nanotechnology, In Tech. Pub. Rijeka, Croatia (2010).
5. S. Loesch, *Single-Chip RTD-to-Digital Converter Reduces Integration Costs by 50 %*, Sensors & Transducers e-Digest, 145, Issue 10, October 2012: Product News (ISSN 1726-5479).
6. M. Murphy. *Eliminate RTD Self-Heating Errors*, Mar 6, 2000 diakses dari <http://electronicdesign.com/embedded/eliminate-rtd-self-heating-errors>
7. R. Kumar and N. Sahoo, *Design, Fabrication And Sensitivity Analysis Of The Resistance Temperature Detector Thin Film Sensors*, International Journal of Mechanical and Industrial Engineering (IJMIE), ISSN No. 2231 –6477, Vol-2, Iss-4, 2012.
8. M. Toifur, *Penentuan Selfheating Pada Sensor Suhu Rendah Lapisan Tipis Cu Dengan Transduser 3-WCB dan 4-WCB*, Laporan Penelitian Fundamental, LPP UAD, Yogyakarta (2015).
9. B.A. Jaspersen, F.E. Pfefferkorn, W. Qu, K.T. Turner, *A Thin-Film Heat Flux Sensor Fabricated on Copper for Heat Transfer Measurements in Parallel Channel Heat Sinks*, ICOMM/4M (2010) No. 73
10. J. Kim, Y. Shin, Y. Yoon, *A Study On Fabrication Of An RTD (Resistance Temperature Detector) By Using Pt Thin Film*, *Korean Journal Of Chemical Engineering*, January 2001, Volume 18, Issue 1, pp 61-66
11. J.L. Lin, I.H. Yang, *Fast Converging Technique in Reading Resistance Temperature Detectors*, WHAMPOA - An Interdisciplinary Journal 49(2005) 107-116
12. H. Okumoto. and T. Tsutsui, *A Source Of Negative Capacitance In Organic Electronic Devices Observed By Impedance Spectroscopy: Self-Heating Effects*, *Applied Physics Express Volume 7* (2014) Number 6
13. E. Pop, *Self-Heating And Scaling Of Thin Body Transistors*, PhD Disertation, The Department Of Electrical Engineering And The Committee On Graduate Studies of Stanford University. USA (2004).
14. H.A. Suthar and J.J. Gadit, *Low Cost Signal Conditioning Technique for RTD Measurement*, International Journal of Nano Devices, Sensors and Systems (IJ-Nano), 1 (2012), 1, 19-24.
15. Y.J. Yang, B.T. Chia, D.R. Chang, H.H. Liao, W.P. Shih, F.Y. Chang, K.C. Fan, *Development of A Flexible Temperature Sensor Array System*, Key Engineering Materials, Vol. 381-382 (2008) pp 383-386.