

SENSOR SUHU BERBASIS BAHAN FERROELEKTRIK FILM $Ba_{0,55}Sr_{0,45}TiO_3$ (BST) BERBANTUKAN MIKROKONTROLER ATMEGA 8535

R. Siskandar^{1*}, Irmansyah², Irzaman^{2**}

¹ Mahasiswa Program Biofisika, Departemen Fisika, FMIPA, Institut Pertanian Bogor

² Departemen Fisika, FMIPA, Institut Pertanian Bogor

**irzamanhusein@yahoo.com, *ridwan_siskandar@yahoo.com

ABSTRACT

Growth of pure $Ba_{0,55}Sr_{0,45}TiO_3$ (BST) film on p-type silicon (100) substrates with two treatments on the enhancement and depletion (pretreatment of the substrate which is heated up to first at a temperature of 800°C for 15 hours before the spilled solution BST) with the method Chemical solution Deposition (CSD) and spin coating at 3000 rpm rotational speed for 30 seconds. Films (both on the type of enhancement treatment and type of depletes treatment) in put on top of the substrate is then heated at a temperature of 800°C, 850°C and 900°C for 15 hours. Of BST film obtained was then carried out the characterization of the value range, sensitivity, resolution BST films, the level of accuracy and hysteresis. Results showed that 850°C enhancement BST film is the best film that can be used as a temperature sensor to read the changes in the environment (temperature only) ATMEGA8535 based microcontroller. Output (voltage generated) amplified by differential amplifier circuit and non-inverting amplifier. Subsequently processed into digital data output on the Analog Digital Converter (ADC) internal ATMEGA8535. Digital data is processed by the microcontroller. Visualization using measuring 16x2 Liquid Crystal Display (LCD) display which can change the voltage in units of degrees celsius (°C) when given a BST film temperature stimuli

Keywords: BST film, temperature sensor, ATMEGA8535, liquid crystal display.

ABSTRAK

Telah dilakukan penumbuhan film $Ba_{0,55}Sr_{0,45}TiO_3$ (BST) di atas substrat silikon (100) tipe-p dengan dua perlakuan pada substrat yaitu enhancement (tanpa substrat dipanaskan) dan depletion (substrat dipanaskan terlebih dahulu pada suhu 800 °C selama 15 jam sebelum ditetesi larutan BST) dengan metode Chemical Solution Deposition (CSD) dan spin coating pada kecepatan putar 3000 rpm selama 30 detik. Film di atas substrat kemudian dipanaskan pada suhu 800°C, 850°C dan 900°C selama 15 jam. Film BST yang diperoleh dikarakterisasi rentang nilai, sensitivitas, resolusi, tingkat akurasi dan histerisis. Film BST enhancement 850 °C (film terbaik) digunakan sebagai sensor suhu untuk membaca perubahan lingkungan (dalam hal ini suhu) berbantuan mikrokontroler ATMEGA8535. Keluaran berupa tegangan yang dihasilkan dikuatkan dengan rangkaian penguat diferensial dan penguat noninverting. Selanjutnya keluaran tegangan analog diolah menjadi data digital pada Analog Digital Converter (ADC) internal ATMEGA8535. Data digital diolah oleh mikrokontroler. Liquid Crystal Display (LCD) berukuran 16x2 menampilkan

perubahan tegangan dalam satuan derajat celcius ($^{\circ}\text{C}$) ketika film BST diberikan rangsangan suhu.

Kata kunci: film BST, sensor suhu, ATmega 8535, liquid crystal display

PENDAHULUAN

Material ferroelektrik memiliki kemampuan untuk mengubah arah listrik internalnya, dapat terpolarisasi secara spontan dan menunjukkan efek histeresis yang berkaitan dengan pergeseran dielektrik dalam menanggapi medan listrik internal¹⁻³. Sifat histeresis dan konstanta dielektrik yang tinggi dapat diterapkan pada sel memori *Dynamic Random Access Memory* (DRAM) dengan kapasitas penyimpanan melampaui 1 Gbit, sifat piezoelektrik dapat digunakan sebagai mikroaktuator dan sensor, sifat piroelektrik dapat diterapkan pada sensor infra merah dan sifat elektro optik untuk diterapkan pada *switch* termal infra merah, sifat polaryzability dapat diterapkan sebagai *Non Volatile Ferroelectric Random Access Memory* (NVRAM).¹⁻³

Material BaSrTiO₃ merupakan salah satu material yang beberapa tahun terakhir ini gencar dikaji dan dikembangkan. Salah satunya adalah dalam bentuk teknologi ferroelektrik film BST yang digunakan untuk aplikasi sensor cahaya yang kemudian dapat dikembangkan menjadi sel surya⁴. BST merupakan bahan yang memiliki konstanta dielektrik yang tinggi, serta kapasitas penyimpanan muatan yang tinggi.^{4,5}

Pembuatan BST dapat menggunakan peralatan yang cukup sederhana, biaya murah dan dilakukan dalam waktu yang relatif singkat.^{4,6,7} Dalam proses pembuatan film, ada beberapa metode yang digunakan diantaranya metode *Metalorganic Chemical Vapor Deposition* (MOCVD),⁸⁻¹⁰ metode *Chemical Vapor Deposition*,¹¹ metode *Sol-Gel*,¹²⁻¹⁵ metode *Atomic Layer Deposition* (ALD),¹⁶ *Pulsed Laser Ablation Deposition* (PLAD),^{17,18} rf sputtering,^{13,19,20} dan metode *Chemical Solution Deposition* (CSD).²⁰⁻²⁷ Keunggulan dari metode CSD adalah dapat mengontrol stokiometri film dengan kualitas yang baik, prosedur yang mudah dan membutuhkan biaya yang relatif murah.²⁸⁻³⁰ Metode CSD merupakan cara pembuatan film tipis dengan pendeposisian larutan bahan kimia di atas substrat, kemudian dipreparasi dengan *spin coating* pada kecepatan putar tertentu.³¹ Metode CSD telah lama dikembangkan untuk penumbuhan *perovskite* film tipis semenjak tahun 1980-an.³²

Mikrokontroler merupakan otak dari sebuah sistem elektronika digital, yang dimana sistem kerjanya diatur berdasarkan program dalam bahasa pemrograman yang digunakan.³³ Bahasa pemrograman yang biasa digunakan dalam memrogram mikrokontroler produksi Atmel adalah bahasa Assembler, bahasa C, C++, basic, ataupun turbo pascal.³³

ATmega8535 merupakan salah satu mikrokontroler 8 bit buatan Atmel untuk keluarga AVR yang diproduksi secara massal pada tahun 2006. ATmega8535 memiliki beberapa kemampuan, yaitu^{33,34} sistem mikrokontroler 8 bit berbasis RISC dengan kecepatan maksimal 16 MHz, memiliki memori flash 8 KB, SRAM sebesar 512 byte dan EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) sebesar 512

byte, memiliki ADC (Pengubah analog-ke-digital) internal dengan ketelitian 10 bit sebanyak 8 saluran, memiliki PWM (Pulse Wide Modulation) internal sebanyak 4 saluran, portal komunikasi serial (USART) dengan kecepatan maksimal 2,5 Mbps, dan enam pilihan mode sleep, untuk menghemat penggunaan daya listrik.

Tujuan makalah ini adalah membuat film BST menggunakan metode CSD dengan variasi suhu *annealing* (800°C, 850°C, dan 900°C) selama 15 jam, di atas substrat silikon tipe-p (*enhancement* dan *depletion*); mengkarakterisasi film BST sebagai sensor suhu; dan melakukan pengintegrasian film BST sebagai sensor suhu berbantuan mikrokontroler ATmega 8535.

METODOLOGI

Persiapan Substrat

Substrat yang digunakan adalah silikon (100) tipe-p. Substrat dipotong membentuk persegi dengan ukuran 1 cm x 1 cm. Setelah proses pemotongan, kemudian dilanjutkan dengan pencucian menggunakan asam fluorida (HF) 5% yang dicampur dengan aquades sebanyak 2%.

Pembuatan Larutan BST

Larutan BST yang ditumbuhkan di atas substrat dengan metode CSD dibuat dari 0,3512 gr Barium Asetat [$\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$, 99%]; 0,2314 gr Strontium Asetat [$\text{Sr}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$, 99%]; 0,7105 gr Titanium Isopropoksida [$\text{Ti}(\text{C}_{12}\text{O}_4\text{H}_{28})$, 99%]; dan 2,5ml 2-metoksietanol [$\text{H}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$, 99%] sebagai pelarut untuk menghasilkan kelarutan 1 M.

Penumbuhan Film

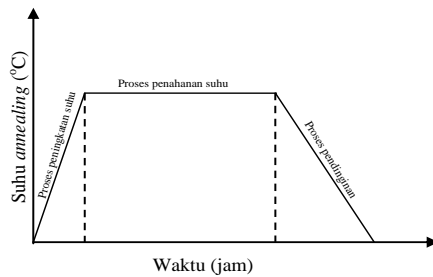
Proses penumbuhan film dilakukan dengan menggunakan reaktor *spin coating*, dimana substrat silikon tipe-p yang telah dicuci sebelumnya diletakkan di atas piringan reaktor *spin coating* yang telah ditempel dengan *double tape* pada bagian tengahnya. Kemudian 1/3 permukaan substrat silikon tipe-p yang telah ditempelkan pada permukaan piringan *spin coating* ditutupi dengan merekatkan *seal tape*. Perekatan *seal tape* bertujuan untuk menghindari agar tidak semua permukaan substrat silikon tipe-p terlapis atau tertutupi oleh larutan BST, dan penempelan *double tape* bertujuan agar substrat tidak terlepas saat piringan reaktor *spin coating* berputar.

Substrat yang telah ditempatkan di atas piringan *spin coating* ditetesi larutan BST sebanyak 3 tetes, kemudian reaktor *spin coating* diputar dengan kecepatan 3000 rpm selama 30 detik. Proses penetesan dilakukan sebanyak 3 kali dengan jeda setiap ulangan adalah 60 detik.

Proses Annealing

Proses *annealing* bertujuan untuk mendifusikan larutan BST dengan substrat. Proses *annealing* dilakukan dengan menggunakan *furnace* model Vulcan^{TM-3-130} dan dilakukan secara bertahap. Pemanasan dimulai dari suhu ruang kemudian dinaikkan hingga suhu *annealing* yang diinginkan yaitu sebesar 800 °C, 850°C, dan 900 °C dengan kenaikan suhu pemanasan yang

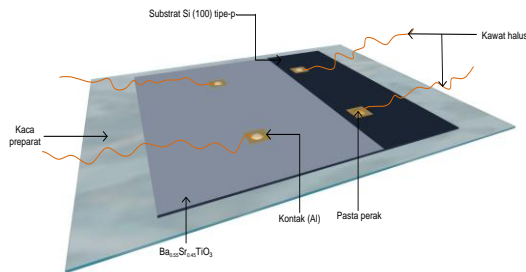
disesuaikan ($1,7^{\circ}\text{C}/\text{menit}$), kemudian suhu *annealing* ditahan konstan hingga 15 jam. Selanjutnya dilakukan *furnace cooling* sampai didapatkan kembali suhu ruang. Proses *annealing* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses *annealing*

Pembuatan Kontak pada Film

Lubang kontak pada film dibuat berbentuk persegi dengan ukuran $2 \times 2 \text{ mm}^2$ pada lapisan BST dan menutup bagian lain dari film BST yang tersisa dengan menggunakan *aluminium foil*. Proses selanjutnya adalah metalisasi aluminium (Al) sebagai media kontak film yang dilakukan secara evaporasi pada ruang vakum udara. Kemudian pemasangan *hidder* dan kawat tembaga yang berukuran halus dengan menggunakan pasta perak. Prototipe film BST ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Prototipe film BST

Karakterisasi Film BST sebagai Sensor Suhu

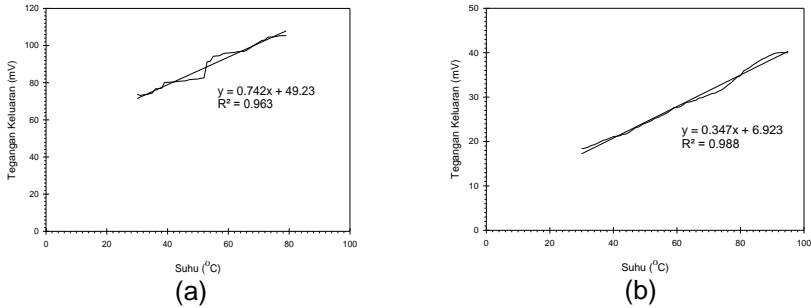
Tujuan karakterisasi film BST adalah mencari rentang nilai, resolusi, tingkat akurasi, dan histerisis dari film BST yang selanjutnya diintegrasikan sebagai sensor suhu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

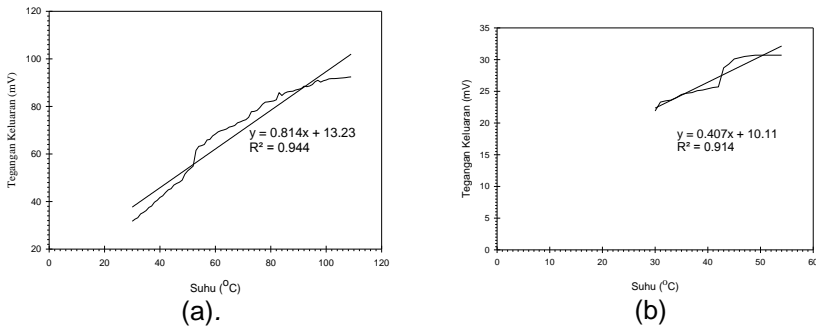
Karakterisasi Film BST sebagai Sensor Suhu

Karakterisasi rentang nilai, sensitivitas, resolusi, tingkat akurasi dan histerisis pada film BST dilakukan dengan cara memberikan rangsangan berupa suhu. Rangsangan diberikan di dalam *furnace* yang diatur dengan kenaikan suhu $1^{\circ}\text{C}/\text{menit}$.

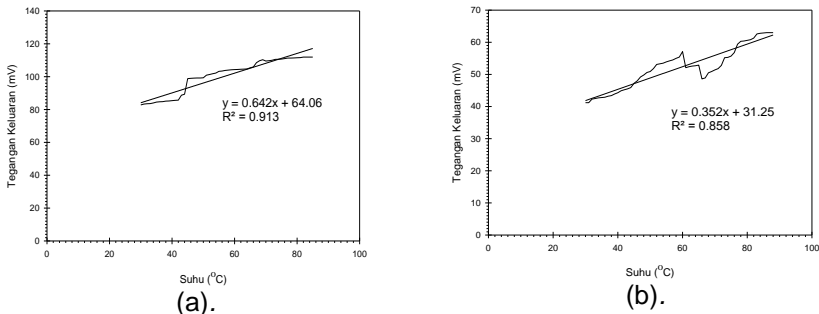
Pengujian dilakukan dengan pemberian suhu awal 30°C sampai suhu kondisi dimana film BST tidak lagi menunjukkan keluaran berupa tegangan yang cukup berarti. Proses pengujian ini menggunakan rangkaian jembatan *wheatstone*. Hasil keluaran dari jembatan *wheatstone* menunjukkan bahwa besarnya nilai keluaran tegangan yang dihasilkan berbanding lurus dengan nilai masukan suhu yang diberikan. Keluaran yang berasal dari rangkaian jembatan *wheatstone* ini yang kemudian diplotkan dengan masukan suhu yang diberikan, sehingga diperoleh kurva hubungan antara masukan suhu dengan keluaran tegangan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 sampai 5.



Gambar 3 Sensitivitas film BST 800 *enhancement* (a) dan *depletion*(b) .



Gambar 4 Sensitivitas film BST 850 *enhancement* (a) dan *depletion*(b)



Gambar 5 Sensitivitas film BST 900 *enhancement* (a) dan *depletion*(b)

Hasil pengukuran menunjukkan perlakuan substrat *enhancement* menghasilkan nilai sensitivitas yang lebih baik dibandingkan dengan perlakuan substrat *depletion*. Secara jelas, rentang nilai, sensitivitas,

resolusi, dan tingkat akurasi dari masing-masing film BST ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

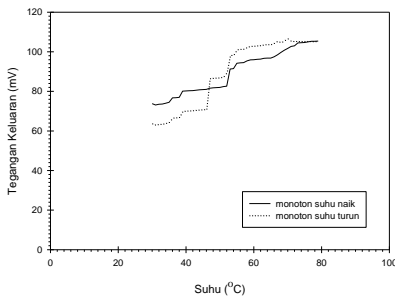
Karakterisasi histerisis yang ditunjukkan pada Gambar 6 sampai 8 menunjukkan bahwa histerisis pada film 850 *enhancement* mempunyai selisih suhu monoton naik dan monoton turun yang kecil dibandingkan film yang lainnya.

Tabel 1 Data rentang nilai, sensitivitas, resolusi dan tingkat akurasi film BST (*enhancement*).³³

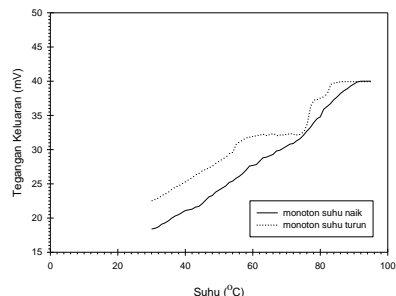
Film BST (<i>enhancement</i>) (°C)	Rentang Nilai (°C)	Sensitivitas mV/°C	Resolusi Sensor (°C)	Tingkat Akurasi (%)
800	30-79	0,742	1	96,3
850	30-109	0,814	1	94,4
900	30-85	0,642	1	91,3

Tabel 2 Data Rentang nilai, sensitivitas, resolusi dan tingkat akurasi film BST (*depletion*).³³

Film BST (<i>depletion</i>) (°C)	Rentang Nilai (°C)	Sensitivitas (mV/°C)	Resolusi Sensor (°C)	Tingkat Akurasi (%)
800	30-95	0,347	1	98,8
850	30-54	0,407	1	91,4
900	30-88	0,352	1	85,8

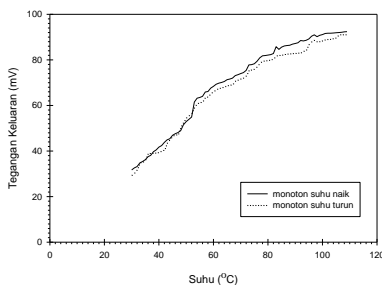


(a).

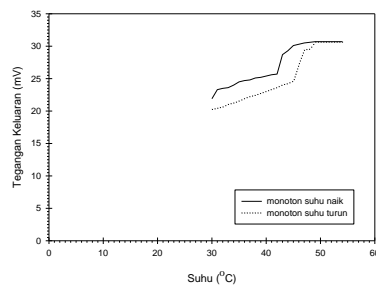


(b)

Gambar 6 Histerisis film BST 800 *enhancement* (a) dan *depletion*(b).

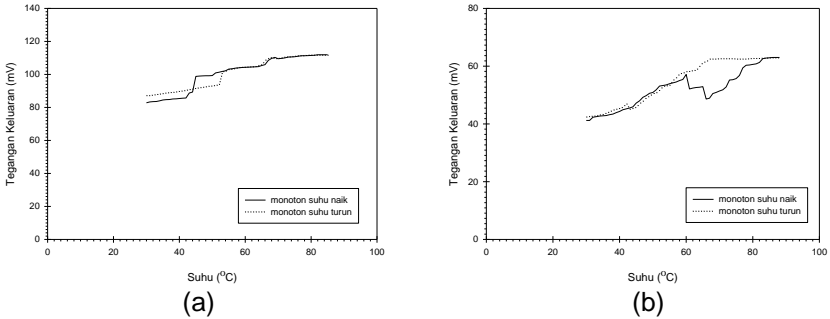


(a)



(b)

Gambar 7 Histerisis film BST 850 *enhancement* (a) dan *depletion*(b)

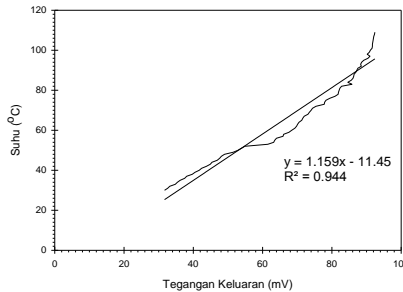


Gambar 8 Histerisis film BST 900 *enhancement* (a) dan *depletion*(b)

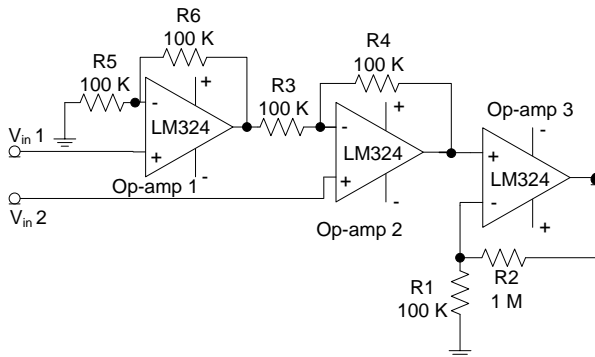
Berdasarkan hasil karakterisasi yang dilakukan secara keseluruhan, film BST terbaik yang bisa digunakan sebagai sensor suhu adalah film BST 850 *enhancement*. Hal tersebut ditunjukkan dengan rentang nilai 30°C-109°C, sensitivitas 0,814 mV/°C, resolusi film BST sebesar 1°C, tingkat akurasi 94,4% dan histerisis yang kecil.

Pengintegrasian Sensor Suhu BST Berbantuan Mikrokontroler ATmega8535

Hasil karakterisasi film BST digunakan sebagai data awal dalam pengintegrasian mikrokontroler. Ketika pengintegrasian mikrokontroler, data yang menjadi variabel tetap adalah tegangan, seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



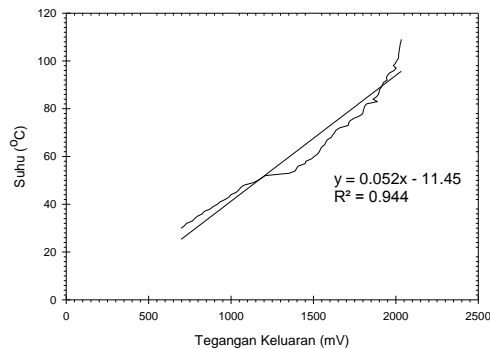
Gambar 9. Fungsi tegangan terhadap suhu film BST 850 *enhancement*



Gambar 10. Rangkaian penguat diferensial dan penguat *noninverting*.

Mikrokontroler yang digunakan adalah ATmega8535 yang menggunakan *Analog to Digital Convert* (ADC) dengan resolusi 10 bit dengan tegangan referensi 4,8 volt, sehingga mikrokontroler dapat membedakan tegangan yang masuk sebesar 0,0046875 volt. Untuk menyesuaikan resolusi film BST dengan resolusi ADC maka digunakan rangkaian penguat (*op-amp*). Rangkaian penguat yang digunakan adalah rangkaian penguat diferensial dan rangkaian penguat *noninverting*, yang ditunjukkan pada Gambar 10. Rangkaian penguat diferensial adalah rangkaian yang membandingkan dua masukan.^{35,36} Rangkaian penguat diferensial yang digunakan adalah gabungan dari rangkaian *noninverting* dan *inverting*. Total penguatan rangkaian untuk film BST adalah 2 kali penguatan dari rangkaian penguat diferensial dan 11 kali penguatan dari rangkaian penguat *noninverting*, sehingga total penguatannya adalah 22 kali. Dari hasil penguatan diperoleh hubungan fungsi tegangan keluaran terhadap suhu yang ditunjukkan pada Gambar 12.

Melalui persamaan linear yang dihasilkan Gambar 11, mikrokontroler dapat membaca masukan dari tegangan yang diberikan. Persamaan linear ini selanjutnya dimasukkan ke dalam listing program ADC pada *Code Vision AVR*. Tampilan suhu dalam bentuk digital ditampilkan pada LCD berukuran 16x2 yang ditunjukkan pada Gambar 18. Port yang digunakan untuk LCD pada ATmega8535 adalah PORTD.



Gambar 11. Fungsi tegangan terhadap suhu film BST 850 *enhancement* yang sudah dikuatkan dengan *op-amp*.

Tabel 3. Hasil pengukuran sensor suhu film BST.

Suhu (°C)	Sensor suhu film BST (°C)	Perbedaan Suhu (°C)
30	30,78	0,78
35	34,92	0,08
40	39,87	0,13
45	45,23	0,23

Hasil pengukuran film BST sebagai sensor suhu dilakukan di dalam *furnace* dengan kondisi suhu 30°C, 35°C, 40°C, 45°C yang ditunjukkan pada Tabel 3. Perbedaan suhu yang terukur antara *furnace* dan sensor suhu film BST dikarenakan pengaruh dari persamaan linear yang dimasukkan ke dalam listing program ADC pada *Code Vision AVR*. Dari pengukuran film BST sebagai sensor suhu didapat nilai ketepatan (*presisi*) sebesar 99,58%.



Gambar 12. Tampilan suhu yang terukur oleh film BST.

SIMPULAN

Telah berhasil membuat sensor suhu berbasis bahan ferroelektrik film BST yang berbantuan mikrokontroler ATmega8535 dengan tingkat sensitivitas, akurasi, dan presisi yang tinggi. Dengan demikian film BST dapat digunakan sebagai sensor suhu untuk membaca perubahan lingkungan (dalam hal ini perubahan suhu).

DAFTAR PUSTAKA

1. Azizahwati. Studi Morfologi Permukaan Film Tipis $\text{PbZr}_{0,525}\text{Ti}_{0,475}\text{O}_3$ yang Ditumbuhkan Dengan Metode DC Unbalanced Magnetron Sputtering. *Jurnal Nasional Indonesia*. 2002; 5(1):hal 50-56.
2. Irzaman, Y. Darvina, A. Fuad, P. Arifin, M. Budiman, and M. Barmawi. Physical and Pyroelectric Properties of Tantalum Oxide Doped Lead Zirconium Titanate [$\text{Pb}_{0,9950}(\text{Zr}_{0,525}\text{Ti}_{0,465}\text{Ta}_{0,010})\text{O}_3$] Thin Films and Its Application for IR Sensor. *Physica Status Solidi (a)*, Germany. 2003; vol 199: pp. 416 – 424.
3. H . Syafutra, Irzaman, I.D.M. Subrata. Integrated Visible Light Sensor Based on Thin Film Ferroelectric Material BST to Microcontroller ATmega8535. *The International Conference on Materials Science and Technology 2010; BATAN*, vol. 1: 291–296.
4. Irzaman. Studi Fotodiode Film Tipis Semikonduktor $\text{Ba}_{0,6}\text{Sr}_{0,4}\text{TiO}_3$ Didadah Tantalum. *J. Sains Material Indonesia*. 2008; 10(1): 18-22.

5. Tae Gon Ha. Cu-Doping Effect on the Dielectric and Insulation Properties of Sol-Gel Derived Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO₃Thin Film”, Journal of Korean Physical Society. 2006; Vol 49: pp.S571–S574.
6. Irzaman, L. Nady, A. Ardian, R. Erviansyah, H. Syafutra, I. Surur. Temperature Sensor Based Pyroelectric Thin Film Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO₃. Jurnal Sains Materi edisi Januari 2011, BATAN, Puspiptek Serpong.
7. Irzaman, Heriyanto Syafutra, Endang Rancasa, Abdul Wahidin Nuayi, Tb Gamma Nur Rahman, Nur Aisyah Nuzulia, Idawati Supu, Sugianto, Farly Tumimomor, Surianty, Otto Muzikarno, Masrur. The Effect of Ba/Sr ratio on Electrical and Optical Properties of Ba_xSr_(1-x)TiO₃(x = 0.25; 0.35; 0.45; 0.55) Thin Film Semiconductor. 2013; Ferroelectrics, 445 (1): page 4 – 17.
8. E.S. Choi, J.C. Lee, J.S. Hwang, S.G. Yoon. Electrical Characteristics of The Contour Vibration Mode Piezoelectric Transformer with Ring/Dot Electrode Area Ratio. Jpn. J. Appl. Phys.1993; 38 (9B): 5317.
9. S. Momose, T. Nakamura, K. Tachibana. Effects of Gas Phase Thermal Decompositions of Chemical Vapor Deposition Source Molecules on The Deposition of BST Films. Jpn. J. Appl. Phys. 2000; 39 (9B): 5384.
10. Gao, Y. & He, S., Alluri, P., Engelhard, M. & Lea, A. S., Finder, J., Melnick, B. & Hance, R. L. Effect of Precursors and Substrate Materials on Microstructure, Dielectric Properties and Step Coverage of (Ba, Sr)TiO₃ Films Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition. Journal of Applied Physics. 2000; vol .87: pp. 124-132.
11. Auciello, O., Scott, J.F. and Ramesh, R. The Physics of Ferroelectric Memories. Physics Today, American Institute of Physics. 1998; vol. 51: pp. 22-27.
12. Verma K, Sharma S, Sharma DK., Kumar R, Rai R. Sol gel Processing and Characterization of Nanometersized (Ba,Sr)TiO₃ Ceramics. Adv. Mat. Lett. 2012; 3(1): 44-49.
13. N. V. Giridharan, R. Jayavel, P. Ramasamy. Structural, Morphological and Electrical Studies on Barium Strontium Titanate Thin Films Prepared by Sol-Gel Technique. Crystal Growth Centre, Anna University, Chennai, India. 2001; 36: 65-72.
14. Chen, X., Cai, W., Fu, C., Chen, H. and Zhang, Q. Synthesis and Morphology of Ba(Zr_{0,20}Ti_{0,80})O₃ Powder Obtained by Sol-Gel Methode. Jurnal Sol-Gel Sci Technol. 2011; vol. 57: pp. 149-156.
15. F. Wang, A. Uusimaki, S. Leppavuori, S.F. Karmanenko, A.I. Dedyk, V.I. Sakharov, I.T. Serenkov. BST Ferroelectric Film Prepared with Sol-Gel Process and Its Dielectric Performance in Planar Capacitor Structure. J. Mater. 1998; Res. 13 (5): 1243.
16. Tyunina M. Dielectric Properties of Atomic Layer Deposited Thin Film Barium Strontium Titanate. Integrated Ferroelectrics. 2008; 102: 29–36.
17. S. Kim, T.S. Kang, J.H. Je. Structural Characterization of Laser Ablation Epitaxial BST Thin Films on MgO (001) by Synchrotron x-Ray Scattering. J. Mater. 1999; Res. 14 (7): 2905.
18. Zhu, X. H., Zheng, D. N., Peng, J. L. and Chen, Y. F. Enhanced Dielectric Properties of Mn Doped Ba_{0,6}Sr_{0,4}TiO₃ Thin Films Fabricated by Pulsed Laser Deposition. Materials Letters. 2005; vol. 60: pp. 1224-1228.

19. M. Izuha, K. Ade, M. Koike, S. Takeno, N. Fukushima. Electrical Properties and Microstructure of Pt/BST/SrRuO₃ Capacitors. *Appl. Phys.* 1997; Lett. 70 (11): 1405.
20. J.S. Lee, J.S. Park, J.S. Kim, J.H. Lee, Y.H. Lee, S.R. Hahn. Preparation of BST Thin Films with High Pyroelectric Coefficients an Ambient Temperatures. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1999; 38 (5B): L574.
21. Irzaman, Darmasetiawan H, Hardhienata H, Erviansyah R, Akhiruddin, Hikam M, Arifin P. Electrical Properties of Photodiode BST Thin Film Doped with Ferrium Oxide using Chemical Deposition Solution Method. *Journal Atom Indonesia*, Batan. 2010; 6 (2): 57-62.
22. Irzaman, H. Syafutra, H. Darmasetiawan, H. Hardhienata, R. Erviansyah, F. Huriawati, Akhiruddin, M. Hikam and P. Arifin. Electrical Properties of Photodiode Ba_{0.25}Sr_{0.75}TiO₃ (BST) Thin Film Doped with Ferric Oxide on p-type Si (100) Substrate using Chemical Solution Deposition Method. *Atom Indonesia*. 2011; 37 (3): 133 – 138.
23. B.A. Baumert, L.H. Chang, A.T. Matsuda and C.J. Tracy. A Study of BST Thin Films for Use in bypass Capacitors. *J. Mater.* 1998; Res. 13 (1): 197.
24. M.A. Itskovsky. Kinetics of Ferroelectric Phase Transition : Nonlinear Pyroelectric Effect and Ferroelectric Solar Cell. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1999; 38 (8): 4812.
25. H. Darmasetiawan, Irzaman, M.N. Indro, S. G. Sukaryo, M. Hikam and Na Peng Bo, "Optical Properties of Crystalline Ta₂O₅ Thin Films. *Physica Status Solidi (a)*, Germany. 2002; vol. 193: pp. 53 – 60.
26. Irzaman, H. Darmasetiawan, M Hikam, P. Arifin, M. Budiman, and M. Barmawi. Pyroelectric Properties of Lead Zirconium Titanate (PbZr_{0.525}Ti_{0.475}O₃) Metal-Ferroelectric-Metal Capacitor and Its Application for IR Sensor. Presented in International Conference on Materials for Advances Technology (ICMAT), Materials Research Society, Singapore, Dec.7-12, 2003.
27. M Dahrul, H Syafutra, A Arif, Irzaman, M N Indro, and Siswadi. Synthesis and Characterizations Photodiode Thin Film Barium Strontium Titanate (BST) Doped Niobium and Iron as Light Sensor. In *The 4th Asian Physics Symposium, American Institute of Physics (AIP) Conference*. 2010; vol 1325: pp. 43 – 46.
28. Hikam M, Sarwono E and Irzaman. Perhitungan polarisasi spontan dan momen quadrupol potensial listrik bahan PIZT (PbIn_xZr_yTi_{1-x-y}O_{3-x/2}). *Makara, Sains*. 2004 vol. 8: pp. 108-115.
29. Irzaman, Maddu A, Syafutra H and Ismangil A. Uji konduktivitas listrik dan dielektrik film tipis *lithium tantalate* (LiTaO₃) yang didadah niobium pentaoksida (Nb₂O₅) menggunakan metode *chemical solution deposition*. In: *proceedings of national workshop on physics*. 2010: pp. 175-183.
30. Umiati N A K, Irzaman, Budiman M and Barmawi M. Efek *annealing* pada penumbuhan film tipis ferroelektrik PbZr_{0.625}Ti_{0.375}O₃ (PZT). In: *Kontribusi Fisika Indonesia*. 2001; vol. 12: pp. 94-98.
31. Hamdani A, Komaro M, Irzaman. 2009. Pembuatan Sel Surya Berbasis Ferroelektrik LiTaO₃ dengan Metode Spin Coating sebagai Pembangkit Listrik Ramah Lingkungan. *Indonesian Science dan Technology Digital Library*. PDII-LIPI.

32. Schwartz, Robert W. Chemical Solution Deposition of Perovskite Thin Film. *Chem. Mater.* 1997: 2325-2340.
33. A. Ardian, L. Nady, R. Erviansyah, H. Syafutra, Irzaman, Siswadi. Penerapan Film Tipis $Ba_{0.25}Sr_{0.75}TiO_3$ (BST) yang Didadah Ferium Oksida sebagai Sensor Suhu Berbantuan Mikrokontroler. *Berkala Fisika*. 2010; 13(2): C53-C64.
34. Atmel. 2003. Data sheet ATMega 8535 2502E–AVR–12/03
35. Clayton, G., Winder, S. (2005). *Operational Amplifier*. Kastawan W, penerjemah: Santika W, editor. England: Elsevier Ltd. Terjemahan dari: *Operational Amplifiers*.
36. Kurniawan, A. (2011). Penerapan Fotodioda Film $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ (BST) Sebagai Detektor Garis Pada Robot *Line Follower* Berbasis Mikrokontroler ATMega8535 [Skripsi]. Bogor: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor.