

**PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP RESISTANSI BAHAN KONDUKTOR
Al,Cu dan SEMIKONDUKTOR LAPISAN TIPIS Pb(Se,Te), CdTe HASIL
PREPARASI DENGAN TEKNIK EVAPORASI TERMAL****THE EFFECT OF THE TEMPERATURE HEATING TO THE RESISTANCE
VALUE ON THE Al, Cu and SEMICONDUCTOR MATERIAL Pb (Se,Te), CdTe
THIN LAYER PREPARED BY THERMAL EVAPORATION TECHNIQUE**

Nur hidayat*, *Jurusan Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia*

Ariswan, *Jurusan Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia*

*e-mail: Nurhidayatb10@gmail.com

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur terhadap nilai resistansi dari aluminium, tembaga dan bahan semikonduktor Pb(Se,Te), CdTe. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen. Data yang diperoleh merupakan hubungan antara suhu dan nilai resistansi sampel. Data yang diperoleh dianalisis dengan menggunakan software origin 6.1 untuk mendapatkan bentuk grafik hubungan temperatur terhadap nilai resistansi untuk tiap-tiap sampel uji. Hasil penelitian menunjukkan adanya penurunan nilai resistansi pada bahan semikonduktor yang diformulasikan menurut persamaan berikut ini. Untuk bahan PbSe $R(t) = (176,34 + 8418,54 e^{-t / 7,34}) \Omega$, bahan PbTe $R(t) = (9,61 + 75,34 e^{-t / 13,92}) \Omega$, dan bahan CdTe $R(t) = (0,61 + 6,84 e^{-t / 34,68}) \Omega$. Untuk bahan konduktor terdapat kenaikan nilai resistansi yang diformulasikan menurut persamaan berikut ini. Untuk aluminium $R(t) = (-2,21 + 0,09t) \Omega$, untuk tembaga $R(t) = (-0,74 + 0,03t) \Omega$, dengan batas suhu terendah sebesar 30°C

Kata Kunci : Resistansi, Semikonduktor, Konduktor.

Abstract. This research aims to observe the temperature effect of the resistance value of the thin layer Pb(Se,Te), CdTe semiconductors, and Al, Cu metal. This research using experiment method, where the result of data are relation between the temperature and the trial sample resistance. Then we analysis the data result using origin 6.1 for finding the shape of the relations chart for each trial sample. The result of this research shows that there was a decrease of the resistance value that affected by increasing of the temperature on the surface of thin layer semiconductor which formulated into following equations. For PbSe $R(t) = (176.34 + 8418.54 e^{-t / 7.34}) \Omega$, PbTe $R(t) = (9.61 + 75.34 e^{-t / 13.92}) \Omega$, and CdTe $R(t) = (0.61 + 6.84 e^{-t / 34.68}) \Omega$. And for Al, Cu there was increase of the resistance value which formulated into following equations. For aluminium $R(t) = (-2.21 + 0.09t) \Omega$. for copper $R(t) = (-0.74 + 0.03t) \Omega$, with the lowest temperature is 30°C.

Keywords: Resistance, Semiconductor, Conductor.

PENDAHULUAN

Semikonduktor merupakan bahan yang konduktivitas listriknya terletak antara konduktor dan isolator, atau bahan yang memiliki resistivitas antara $(10^{-2} - 10^4) \Omega\text{m}$. Contoh bahan semikonduktor adalah germanium, silikon, karbon, dan selenium. Semikonduktor mempunyai struktur pita energi yang sama dengan isolator, hanya saja celah energi terlarang atau energi gap (E_g) pada semikonduktor jauh lebih kecil dari pada isolator. Pada suhu 0 K, bahan semikonduktor akan berlaku sebagai isolator dengan pita valensinya terisi penuh dan pita konduksi kosong. Pada temperatur di atas 0 K, energi termal tersebut dapat menyebabkan elektron berpindah dari pita valensi menuju ke pita konduksi dengan meninggalkan hole di pita valensi, dengan demikian pada keadaan seperti ini semikonduktor bersifat konduktor. Keadaan yang demikian terjadi karena jarak kedua pita tersebut dipisahkan oleh celah energi kecil, yakni dalam rentang antara 0,18 eV - 3,7 eV [1]. Ketika energi termal diberikan secara kontinyu pada semikonduktor maka elektron-elektron akan mendapatkan energi tambahan yang lebih besar pada pita valensi. Ketika energi termal sama besar atau bahkan lebih besar dari pada energi gapnya maka elektron-elektron tersebut mampu melewati celah energi terlarang dan berpindah menuju pita konduksi sebagai elektron bebas. Akibat adanya peristiwa perpindahan atau generasi elektron tersebut maka pada saat ini pita konduksi akan ditempati oleh lebih banyak elektron, sedangkan pada pita valensi akan meninggalkan kekosongan yang ditinggalkan oleh elektron yang disebut dengan *hole* atau lubang. Terbentuknya *hole* (lubang) pada pita valensi dan elektron yang hampir bebas inilah yang akan berperan sebagai penghantar arus listrik, dimana elektron tetap berperan sebagai pembawa muatan negatif dan *hole* tetap berperan sebagai pembawa muatan positif [2].

Terdapat banyak material semikonduktor yang berasal dari paduan beberapa unsur. Unsur semikonduktor yang biasa digunakan dalam pembuatan paduan semikonduktor umumnya berasal dari unsur atom *trivalent* (berelektron valensi tiga) adapun unsur lain yang sering dipakai dalam paduan semikonduktor adalah unsur dengan atom *pentavalent* (berelektron valensi lima). Tingkat energi gap semikonduktor sangat dipengaruhi oleh komposisi bahan penyusun semikonduktor tersebut. Seperti misalnya GaAs 1,4 eV, GaSb 0,77 eV, GaP 2,24 eV, PbSe 0,27 eV, PbTe 0,31 eV, CdTe 1,45 eV dan PbS 0,4 eV. Berdasarkan teorema pita energi sifat listrik bahan semikonduktor sangat dipengaruhi oleh besarnya energi gap bahan semikonduktor dan faktor eksternal berupa temperatur. Oleh karena itu diperlukannya sebuah riset yang bertujuan untuk menyelidiki pengaruh energi gap bahan semikonduktor dan temperatur terhadap sifat listrik bahan semikonduktor tersebut. Dalam riset ini peneliti menggunakan sampel semikonduktor berupa lapisan tipis PbSe, CdTe dan PbTe. PbSe (*Plumbum Selenide*) merupakan bahan semikonduktor berwarna hitam kecoklatan yang dibuat dari paduan dua unsur yaitu Plumbum (Pb) dan Selenium (Se). CdTe (*Cadmium Telluride*) merupakan bahan semikonduktor berwarna kehijauan yang dibuat dari paduan antara dua unsur yaitu cadmium dan telurium. Bahan semikonduktor CdTe biasanya sering digunakan sebagai komponen dasar pembuatan sel surya, hal ini dikarenakan bahan tersebut memiliki efisiensi yang cukup tinggi, yaitu sekitar 19,5 persen. PbTe (*Plumbum Telluride*) merupakan bahan semikonduktor berwarna coklat kehijauan yang dibuat dari paduan antara dua unsur yaitu Plumbum dan Telurium. PbTe sangat cocok digunakan sebagai bahan detektor infra merah. Di samping itu, semikonduktor juga sering dipakai sebagai bahan optoelektronika seperti diode dan LED [3].

Bahan konduktor adalah bahan yang sangat mudah menghantarkan arus listrik. Pada bahan konduktor struktur pita energi konduksi dan valensi saling tumpang tindih

akibatnya pita energi konduksi terisi sebagian elektron. Pita energi yang tumpang-tindih dapat dipandang sebagai pelebaran pita. Elektron yang berada pada pita yang tumpang-tindih mempunyai kesempatan lebih luas untuk berpindah tingkat energi karena adanya tambahan tingkat energi dari orbital yang lebih tinggi[4]. Pada bahan konduktor terdapat faktor eksternal yang sangat berpengaruh terhadap besarnya hambatan penghantar. Salah satu faktor eksternal yang sangat berpengaruh terhadap besar hambatan penghantar adalah suhu atau temperatur. Semakin tinggi temperatur suatu penghantar, nilai resistansinya akan meningkat. Hal ini disebabkan karena adanya pengaruh temperatur terhadap susunan atom-atom bahan. Susunan atom-atom ini akan terganggu jika bahan dipanaskan. Semakin tinggi temperatur bahan maka susunan atom-atomnya semakin tidak teratur, sehingga hambatan bahan semakin besar. Selain itu dengan adanya pengaruh temperatur yang meningkat maka elektron-elektron bebas dalam bahan konduktor akan bergetar. Semakin tinggi temperatur suatu penghantar, semakin tinggi pula getaran elektron-elektron bebas dalam penghantar tersebut. Getaran elektron-elektron bebas inilah yang akan menghambat jalannya muatan listrik (arus listrik) dalam penghantar tersebut [5]. Berdasarkan informasi di atas maka diperlukan penelitian yang berfungsi untuk mengetahui pengaruh eksternal berupa temperatur terhadap konduktivitas bahan konduktor. Dalam riset ini peneliti menggunakan bahan aluminium dan tembaga sebagai sampel bahan konduktor. Aluminium merupakan bahan logam ber lambang Al yang berwarna putih mengkilat dengan nomor atom 13 dan nomor massa 26,9815 dan terletak pada golongan IA dalam sistem periodik unsur. Tembaga merupakan bahan logam dengan lambang Cu dan berwarna coklat keemasan dengan nomor atom 29 dan nomor massa 63,546 dan terletak pada golongan IB dalam sistem periodik unsur.

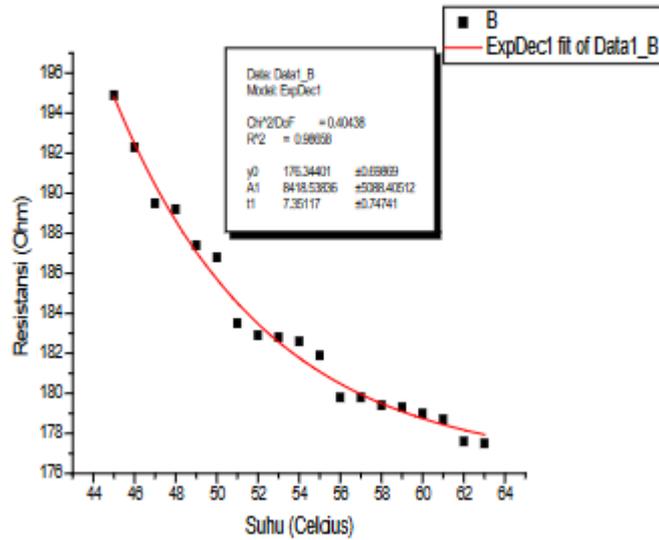
METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen. Setiap sampel semikonduktor dan konduktor dipanaskan dengan menggunakan heater dari temperatur 30°C – 63°C, kemudian diukur nilai formulasi dan faktor koefisien suhu untuk setiap sampel semikonduktor.

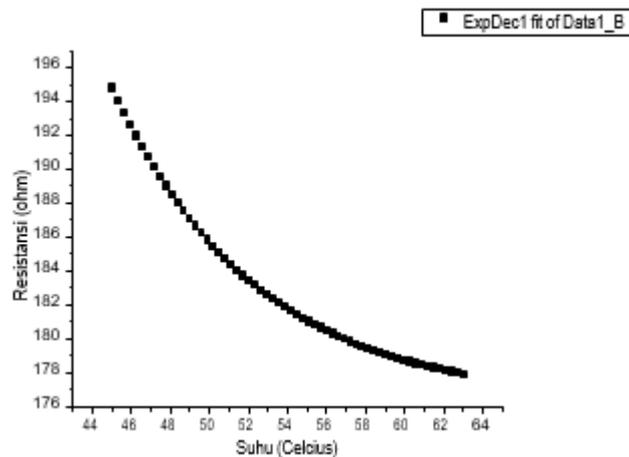
Untuk bahan konduktor analisis grafik dilakukan dengan menggunakan fungsi linear sampai diperoleh bentuk grafik linear resistansi sebagai fungsi temperatur. Dari grafik tersebut kemudian didapatkan formulasi dan faktor koefisien suhu untuk setiap sampel konduktor. Langkah selanjutnya membandingkan formulasi dan faktor koefisien suhu untuk setiap sampel konduktor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran nilai resistansi sampel semikonduktor PbSe, PbTe dan CdTe serta sampel konduktor aluminium, tembaga disajikan dalam Grafik 1 sampai Grafik 12 ;

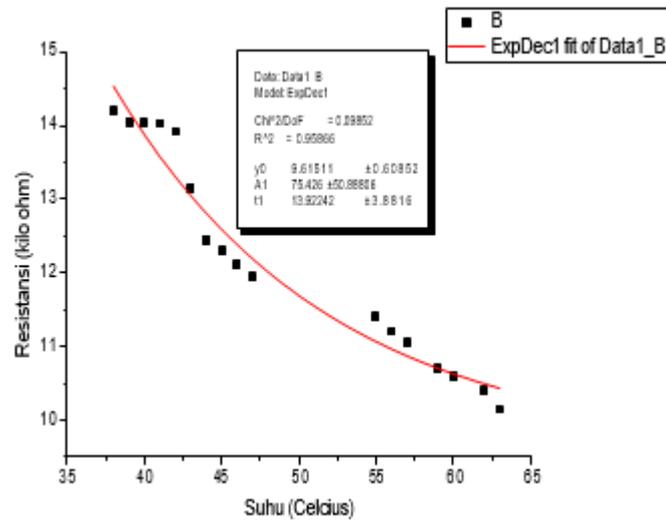


Grafik 1. Grafik hubungan temperatur vs resistansi Bahan semikonduktor PbSe sebelum plot-fiting

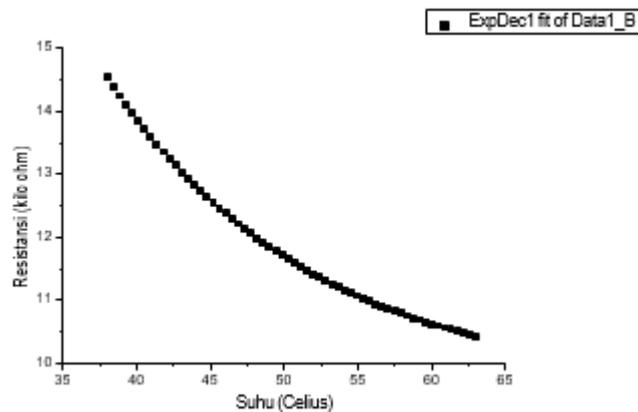


Grafik 2. Grafik hubungan temperatur vs resistansi Bahan semikonduktor PbSe setelah plot-fiting.

Dari Grafik 1 dan 2 terlihat bahwa formulasi untuk sampel PbSe adalah, $y = y_0 + Ae^{-x/t}$ dengan $y_0 = 176,34 \Omega$, $A = 8418,54 \Omega$, dan $t = 7,35 \text{ } ^\circ\text{C}$, dengan y_0 dan A merupakan konstanta sedangkan t adalah faktor peluruhan resistansi, x adalah faktor temperatur dan y faktor resistansi.

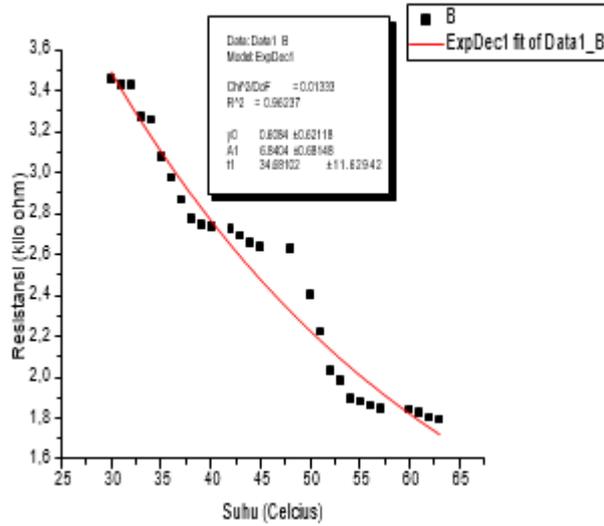


Grafik 3. Grafik hubungan temperatur vs resistansi Bahan semikonduktor PbTe sebelum plot-fiting.

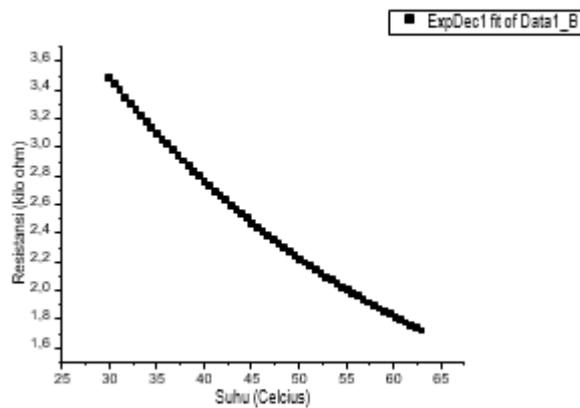


Grafik 4. Grafik hubungan temperatur vs resistansi Bahan semikonduktor PbTe setelah plot-fiting.

Dari Grafik 3 dan 4 terlihat bahwa formulasi untuk sampel PbTe adalah, $y = y_0 + Ae^{-x/t}$ dengan $y_0 = 9,61 \Omega$, $A = 75,43 \Omega$, dan $t = 13,92 ^\circ C$, dengan y_0 dan A merupakan konstanta sedangkan t adalah faktor peluruhan resistansi, x adalah faktor temperatur dan y faktor resistansi.

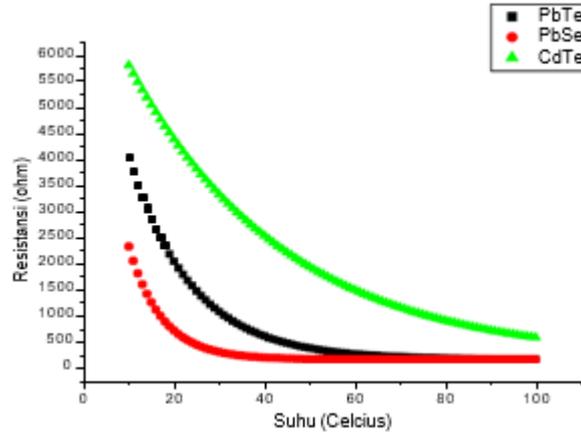


Grafik 5. Grafik hubungan temperatur vs resistansi Bahan semikonduktor CdTe sebelum plot-fiting.



Grafik 6. Grafik hubungan temperatur vs resistansi Bahan semikonduktor CdTe setelah plot-fiting.

Dari Grafik 5 dan 6 terlihat bahwa formulasi untuk sampel PbTe adalah, $y = y_0 + Ae^{-x/t}$ dengan $y_0 = 0,61 \Omega$, $A = 6,84 \Omega$, dan $t = 34,68 \text{ } ^\circ\text{C}$, dengan y_0 dan A merupakan konstanta sedangkan t adalah faktor peluruhan resistansi, x adalah faktor temperatur dan y faktor resistansi.



Grafik 7. Grafik gabungan temperatur vs resistansi Sampel PbSe, PbTe, dan CdTe.

Dari Grafik 7 terlihat bahwa bahan semikonduktor PbSe lebih reaktif terhadap peluruhan resistansi disusul oleh PbTe dan CdTe. Hal ini karena ada perbedaan energi gap pada sampel tersebut, dimana PbSe berenergi gap 0,27 eV, PbTe 0,31 eV dan CdTe 1,45 eV.

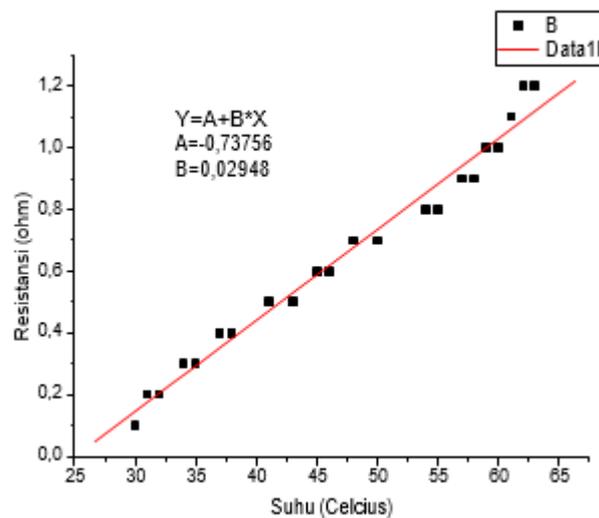
Menurut teorema pita energi di dalam semikonduktor terdapat dua pita yaitu pita valensi yang terisi penuh atau sebagian oleh elektron dan pita konduksi yang hampir kosong. Kedua pita tersebut terpisahkan oleh celah yang sangat sempit atau yang dikenal dengan pita terlarang dengan energi gap yang sangat kecil yaitu antara 1-2 eV. Saat elektron berada dicelahantara pita konduksi dan pita valensi, bagian bawah pita konduksi akan diisi oleh elektron, sedangkan bagian pita valensinya akan berlubang. Hal ini menyebabkan kedua pita hanya terisi sebagian elektron, dan akan mengalirkan arus apabila dikenakan medan listrik [6].

Pada temperatur yang sangat kecil yaitu 0 K maka bahan semikonduktor akan berlaku sebagai bahan isolator dengan pita valensi yang terisi penuh oleh elektron sedangkan pita konduksinya kosong hal ini disebabkan pada temperatur tersebut elektron tidak mendapatkan cukup energi sehingga elektron sulit berpindah menuju pita konduksi meskipun dengan energi gap yang kecil. Ketika energi termal diberikan pada semikonduktor maka elektron-elektron tersebut akan mendapatkan energi tambahan pada pita valensi. Ketika energi termal sama besar atau bahkan lebih besar dari pada energi gapnya maka elektron-elektron tersebut mampu melewati celah energi terlarang dan berpindah menuju pita konduksi sebagai elektron bebas. Akibat adanya peristiwa perpindahan atau generasi elektron tersebut maka pada saat ini pita konduksi akan ditempati oleh elektron sedangkan pada pita valensi akan meninggalkan kekosongan yang ditinggalkan oleh elektron yang disebut dengan hole atau lubang. Terbentuknya hole (lubang) pada pita valensi dan elektron pada pita konduksi ini yang menyebabkan bahan semikonduktor berubah menjadi konduktor, dimana elektron berperan sebagai pembawa muatan negatif dan hole berperan sebagai pembawa muatan positif. Semakin tinggi energi termal yang diberikan pada semikonduktor maka akan semakin besar kemungkinan jumlah elektron yang dapat melewati celah energi terlarang, dengan demikian maka akan semakin banyak pasangan hole-elektron yang terbentuk. Dengan semakin bertambahnya pasangan hole-elektron tersebut maka akan semakin banyak partikel pembawa muatan sehingga nilai konduktansi bahan semikonduktor tersebut semakin meningkat, hal ini menyebabkan bahan semikonduktor tersebut semakin aktif berperan sebagai bahan konduktor [7].

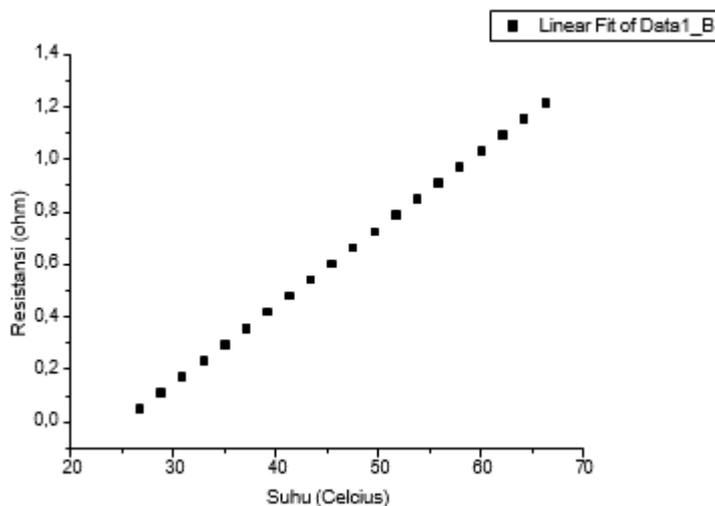
Adanya perbedaan nilai energi gap pada bahan semikonduktor menyebabkan terjadinya perbedaan tingkat respon nilai tansi sebagai fungsi temperatur. Adanya

peningkatan suhu pada bahan tersebut menyebabkan terjadi penurunan nilai resistansi secara eksponensial terhadap fungsi temperatur. Menurut Sudaryanto Sudirham (2013 : 128-130) apabila bahan semikonduktor tersebut mempunyai energi gap yang kecil maka perubahan nilai resistansi bahan tersebut akan semakin responsif terhadap perubahan temperatur, sebaliknya apabila bahan tersebut mempunyai energi gap yang besar maka perubahan resistansi bahan tersebut semakin tidak responsif. Tingkat respons bahan semikonduktor tersebut dapat dilihat dari koefisien perubahan resistansi sebagai fungsi temperatur tersebut. Semakin kecil faktor pembagi suhunya, maka semakin besar koefisien perubahan resistansinya. Semakin besar koefisiennya berarti semakin responsif perubahannya. Berdasarkan perhitungan didapatkan koefisien peluruhan resistansi untuk bahan semikonduktor PbSe, PbTe, dan CdTe berturut-turut adalah sebagai berikut: 7,35°C 13,92°C dan 34,68°C. Sedangkan untuk energi gapnya berturut-turut adalah sebagai berikut ; 0,27 eV, 0,31 eV, dan 1,45. Dari informasi tersebut terlihat bahwa PbSe memiliki respons penurunan resistansi yang paling besar disusul oleh PbTe dan CdTe. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa semakin kecil energi gap suatu bahan semikonduktor maka akan semakin responsif penurunan resistansi terhadap temperatur, yang mana sudah sesuai dengan teori.

Sementara itu hasil penelitian untuk sampel konduktor dapat dilihat pada Grafik 8-12 berikut ini,

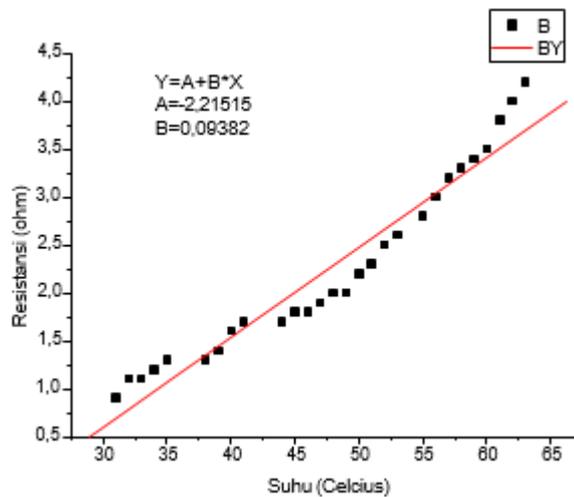


Grafik 8. Grafik hubungan temperatur vs resistansi aluminium sebelum plot-fiting.

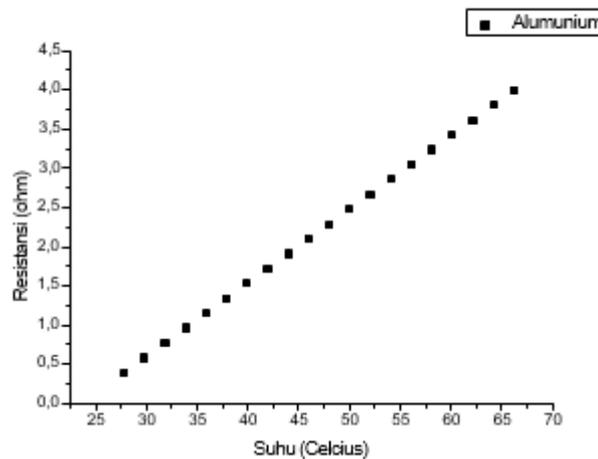


Grafik 9. Grafik hubungan temperatur vs resistansi alumunium setelah plot-fiting.

Dari Grafik 8 dan 9 terlihat bahwa formulasi untuk sampel alumunium adalah, $y = A + BX$ dengan $A = -2,21 \Omega$ dan $B = 0,09 \Omega/^{\circ}C$, dengan A dan B adalah konstanta, x adalah faktor temperatur dan y faktor resistansi.

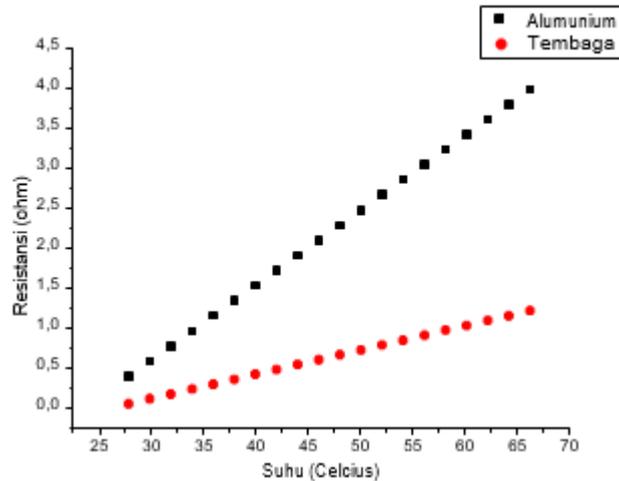


Grafik 10. Grafik hubungan temperatur vs resistansi tembaga sebelum plot-fiting.



Grafik 11. Grafik hubungan temperatur vs resistansi tembaga setelah plot-fiting.

Dari Grafik 10 dan 11 terlihat bahwa formulasi untuk sampel tembaga adalah, $y = A + BX$ dengan $A = -0,74 \Omega$ dan $B = 0,03 \Omega/^{\circ}C$, dengan A dan B adalah konstanta, x adalah faktor temperatur dan y faktor resistansi.



Grafik 12. Grafik gabungan temperatur vs resistansi sampel aluminium dan tembaga

Bahan konduktor adalah bahan yang sangat mudah menghantarkan arus listrik. Pada bahan konduktor struktur pita energi konduksi dan valensi hampir tidak ada energi gap, sehingga elektron dapat secara leluasa bergerak menuju tingkat energi yang lebih tinggi, akibatnya pada pita konduksi akan terisi oleh sebagian elektron. Rapatnya tingkat energi memudahkan elektron berpindah ke tingkat energi yang lebih tinggi dengan hanya sedikit tambahan energi, misalnya dari medan listrik. Inilah yang terjadi pada metal oleh karena itu metal memiliki konduktivitas listrik yang tinggi. Pengisian elektron pada tingkat-tingkat energi dalam atom dimulai dari tingkat energi paling rendah. Pada konduktor yang baik, jumlah elektron-elektron bebas, yaitu elektron-elektron yang mempunyai energi cukup besar (terletak pada lintasan yang paling luar) adalah banyak dan bebas bergerak, misalkan pada bahan tembaga, setiap atom tembaga menyumbangkan 1 elektron bebas[8].

Untuk sampel konduktor peneliti menggunakan bahan logam aluminium dan tembaga, hal ini dimaksudkan untuk membandingkan sifat listrik antara bahan semikonduktor dan bahan konduktor. Bahan aluminium dan tembaga sendiri dipilih karena keduanya terletak dalam golongan sistem periodik yang berbeda, yang mana aluminium terletak pada golongan IIIA, sedangkan tembaga terletak pada golongan IB.

Pada data yang tersaji dalam grafik, diketahui bahwa bahan tembaga, mempunyai koefisien kenaikan resistansi sebesar 0,03 ohm per derajat celcius, sedangkan untuk logam aluminium adalah 0,09 ohm per derajat celcius. Dari informasi tersebut dapat dipastikan bahwa nilai resistansi logam aluminium lebih mudah berubah terhadap pengaruh suhu. Hal ini karena logam aluminium lebih konduktif sehingga lebih mudah menyerap panas dibandingkan dengan logam tembaga, akibatnya respon terhadap perubahan nilai resistansi menjadi lebih responsif.

Seperti yang telah dijelaskan pada halaman sebelumnya bahwa terjadinya kenaikan resistansi pada logam konduktor dikarenakan pada saat logam konduktor mendapat tambahan energi berupa energi panas maka susunan atom-atomnya akan menjadi tidak teratur, akibatnya elektron-elektron bebas yang terdapat dalam atom konduktor tersebut akan bergetar, semakin tinggi energi panas maka elektron tersebut akan bergetar semakin cepat. Akibat adanya getaran elektron ini maka muatan listrik dalam penghantar tersebut menjadi semakin terhambat.

Bahan aluminium merupakan bahan yang lebih mudah menyerap panas jika dibandingkan dengan tembaga, hal ini karena bahan aluminium mempunyai jumlah elektron bebas yang lebih banyak dibanding tembaga yaitu 3 berbanding 1, akibatnya

logam aluminium lebih konduktif dan mudah menyerap energi panas jika dibandingkan dengan logam tembaga. Akibatnya, resistansi logam aluminium lebih cepat meningkat dibandingkan logam tembaga apabila diberi temperatur. Oleh karena itu, logam aluminium lebih mudah berubah sifat kelistrikkannya. Berdasarkan penelitian maka praktikan dapat menyimpulkan bahwa bahan tembaga memiliki sifat konduktor yang lebih baik dari pada bahan aluminium, hal ini karena bahan tembaga memiliki daya serap terhadap temperatur yang rendah sehingga koefisien temperatur bahan tersebut dapat diabaikan. Sehingga bahan tembaga baik digunakan sebagai peralatan elektronika, seperti misalnya sebagai kabel instalasi listrik di perumahan karena sifat daya hantar listriknya yang tidak mudah berubah akibat adanya faktor eksternal seperti misalnya temperatur.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh praktikan maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Adanya faktor eksternal berupa temperatur yang diberikan terhadap lapisan tipis Pb(Se,Te), CdTe ternyata dapat menyebabkan turunnya resistansi bahan tersebut. Hubungan antara resistansi dan suhu untuk bahan PbSe $R(t) = (176,34 + 8418,54 e^{-t/7,34}) \text{ ohm}$, untuk bahan tersebut, berturut-turut yaitu. PbTe $R(t) = (9,61 + 75,34 e^{-t/13,92}) \text{ ohm}$, untuk bahan CdTe $R(t) = (0,61 + 6,84 e^{-t/34,68}) \text{ ohm}$ dengan t adalah suhu.
2. Adanya faktor eksternal berupa temperatur pada bahan konduktor menyebabkan adanya peningkatan resistansi. Hubungan antara resistansi dan suhu untuk bahan aluminium $R(t) = (-2,21 + 0,09t) \text{ ohm}$, untuk bahan tembaga $R(t) = (-0,74 + 0,03t) \text{ ohm}$ dengan t sebagai fungsi suhu.
3. Energi gap pada bahan semikonduktor berpengaruh terhadap respon penurunan resistansi akibat pemberian temperatur. Semakin besar energi gapnya maka semakin kecil respon perubahan resistansinya, demikian juga sebaliknya.

DAFTAR PUSTAKA

- Wiendartun. (2012). *Diktat Fisika Zat Padat I*. Bandung: FMIPA UPI.
- Sumarna. (2010). *Bahan Kuliah Fisika Semikonduktor*. Yogyakarta: FMIPA UNY.
- Beisser, Arthur. (1992). *Concept of Modern Physics*. 6th. Ed. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Smallman, R.J Bishop. (1999). *Modern Physics Metallurgy and Materials Engineering 6th Edition*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Bangun Julianto, et al. (2013). *Pengaruh Suhu Terhadap Hambatan Rangkaian Listrik*. Semarang: FMIPA UNNES.
- Adi, Eka, dkk. (2012). *Makalah Semikonduktor*. Jakarta: FMIPA UNJ.
- Thomas Sri Widodo. (2002). *Struktur Pita Energi Bahan Semikonduktor, Konduktor dan Isolator*. Yogyakarta: FMIPA UGM.
- Sudaryanto Sudirham, Ning Utari S. (2013). *Mengenal Sifat-Sifat Material*. Bandung: Darpublic, Kanayakan D-30.