

PENENTUAN MODULUS YOUNG KAWAT BESI DENGAN PERCOBAAN REGANGAN

Dwi Martini^{1,2)}, Raden Oktova^{2,3)}

¹⁾SMA N 1 Wates, Kab. Kulon Progo, Jl. Terbahsari, Yogyakarta

¹⁾E-mail : dwimart70@yahoo.co.id

²⁾Program Magister Pendidikan Fisika, Program Pascasarjana

Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta

Kampus II, Jl. Pramuka 42 Lt 3, Telp. (0274) 563515 ext 2302, Yogyakarta 55161

³⁾E-mail: r.oktova@uad.ac.id

INTISARI

Salah satu subbab dalam pokok bahasan elastisitas yang dipelajari di kelas XI SMA adalah modulus Young, dan pokok bahasan ini diharapkan akan lebih mudah dipahami oleh siswa jika dilakukan percobaan atau demonstrasi. Untuk itu, telah dibuat suatu alat percobaan untuk menentukan modulus Young kawat logam, dalam hal ini diambil sampel kawat yang terbuat dari besi. Untuk meningkatkan ketelitian, digunakan analisis regresi linier berbobot dengan dua metode: yang pertama, regresi linier perubahan panjang kawat, ΔL terhadap massa beban, m pada panjang mula-mula, L_0 tetap; yang kedua, regresi linier ΔL terhadap L_0 pada massa, m tetap. Untuk perhitungan regresi digunakan program REGLIN yang ditulis dalam bahasa Compaq Visual Fortran 6.5 dan dijalankan dengan sistem operasi Windows XP. Keluaran program regresi ini adalah koefisien-koefisien fungsi linier, yaitu a_0 dan a_1 beserta ralatnya. Dalam perhitungan akhir modulus Young digunakan nilai kemiringan garis hasil regresi linier berbobot, a_1 serta m , L_0 , dan diameter kawat, d . Dengan program yang sama juga dilakukan uji *chisquare* (χ^2) untuk menguji korelasinya, dan terbukti ada korelasi linier ΔL dan m pada L_0 tetap, serta ΔL dan L_0 pada m tetap. Dilakukan pula uji χ^2 untuk mengetahui korelasi antara nilai modulus Young yang diperoleh dan kadar besi, dan terbukti tidak ada korelasi. Agar diperoleh hasil yang teliti untuk menentukan percepatan gravitasi bumi, dilakukan percobaan bandul matematis dengan analisis regresi linier berbobot kuadrat periode terhadap panjang tali, dan diperoleh $g = (9,76 \pm 0,07) \text{ m/s}^2$.

Percobaan modulus Young dilakukan dengan lima sampel kawat besi dengan diameter yang berbeda. Untuk metode pertama, yaitu dengan regresi ΔL terhadap m pada L_0 tetap, diperoleh nilai modulus Young kawat besi $(1,44 \pm 0,02)10^{11} \text{ N/m}^2$. Untuk metode kedua, yaitu dengan regresi ΔL terhadap L_0 pada m tetap diperoleh nilai modulus Young kawat besi $(1,55 \pm 0,02) 10^{11} \text{ N/m}^2$. Dapat disimpulkan bahwa alat percobaan untuk menentukan modulus Young yang dirancang terbukti dapat digunakan untuk menentukan modulus Young dengan hasil yang mendekati nilai acuan, yaitu $2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$.

Kata kunci : modulus Young, kawat besi, regresi linier berbobot.

I. PENDAHULUAN

Percobaan adalah salah satu cara yang tepat untuk memudahkan siswa memahami suatu teori. Metode percobaan bertujuan agar siswa mampu mencari dan menemukan sendiri berbagai jawaban atas persoalan-persoalan yang dihadapinya melalui percobaan yang dilakukan sendiri, sehingga siswa terbiasa untuk berpikir ilmiah (Roestiyah, 2008). Jenis modulus elastisitas bermacam-macam, yaitu modulus puntir, modulus volume dan modulus panjang. Sesuai silabus SMA, modulus elastisitas yang dipelajari adalah modulus panjang atau modulus tarik, yang disebut juga modulus Young, sehingga penelitian ini dibatasi pada percobaan untuk menentukan modulus Young.

Dalam percobaan fisika SMA untuk menentukan modulus Young suatu kawat logam, dicatat data massa beban, panjang awal kawat, pertambahan panjang kawat, dan diameter kawat, kemudian modulus Young dihitung langsung dari rumus yang sesuai. Pada penelitian ini dirancang dan lakukan percobaan serupa, namun kali ini digunakan analisis regresi linier berbobot dengan dua metode yang berbeda, dengan harapan dapat dilakukan uji validitas terhadap persamaan linier teoretis, dan dapat diperoleh nilai modulus Young yang lebih sesuai nilai acuan, yaitu $2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ (Benenson dkk., 2001).

II. DASAR TEORI

a. Elastisitas

Setiap benda akan mengalami perubahan ketika sebuah gaya diberikan padanya. Salah satu bentuk perubahan tersebut adalah perubahan panjang. Sifat benda dimana benda tersebut akan kembali ke bentuk semula ketika gaya yang bekerja pada benda itu dihilangkan disebut sifat elastisitas benda. Elastisitas adalah kemampuan benda untuk kembali ke bentuk awalnya segera setelah gaya yang bekerja pada benda tersebut dihilangkan (Giancoli, 1998:299). Sifat elastik panjang suatu benda diketahui dari besar konstanta elastisitas panjang bahan yang biasa disebut modulus Young.

b. Tegangan dan Regangan

Tegangan tarik menyatakan kekuatan dari gaya yang menyebabkan penarikan sebuah kawat yang biasanya dinyatakan dalam bentuk gaya per satuan luas (Sears dan Zemansky, 2004:335)

$$\sigma = \frac{\text{gaya}}{\text{luas}} = \frac{F}{A}, \quad (1)$$

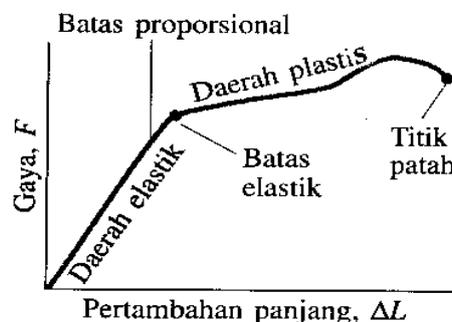
dengan F adalah gaya yang diberikan pada kawat. Dengan penampang kawat berbentuk lingkaran, maka luas penampang kawat dapat dinyatakan dalam diameter,

$$A = \frac{1}{4} \pi d^2. \quad (2)$$

Berbagai percobaan pada pertambahan panjang kawat ΔL kecil menunjukkan bahwa pertambahan panjang kawat sebanding dengan berat atau gaya yang diberikan pada kawat tersebut,

$$F = k\Delta L, \quad (3)$$

dengan k adalah konstanta. Persamaan (3) disebut hukum Hooke. Persamaan tersebut ternyata berlaku untuk semua materi padat, tetapi hanya sampai batas tertentu, karena jika gaya yang bekerja terlalu besar, logam meregang terlalu besar dan akhirnya patah. Gambar 1 menunjukkan grafik yang khas pertambahan panjang terhadap gaya yang diberikan pada logam sampai suatu titik yang disebut batas proporsional. Batas proporsional merupakan batas perubahan kemiringan pada grafik F terhadap ΔL , dan disebut juga batas linier. Pada daerah elastik, grafiknya berupa garis lurus. Setelah melewati batas linier ini grafik menyimpang dari garis lurus. Besar pertambahan panjang ΔL tidak hanya bergantung pada gaya yang diberikan padanya, tetapi juga pada bentuk benda dan ukurannya.



Gambar 1. Grafik gaya yang diberikan terhadap pertambahan panjang (Giancoli, 1998:230).

Percobaan menggunakan kawat baja halus dan besi menunjukkan bahwa molekul-molekul pada kawat bergeser satu sama lain segera setelah beban melampaui batas elastik, dan bahan berubah menjadi plastis (Nelkom dan Parker, 1987:135). Ketika pertambahan panjang masih berada pada batas elastik, yaitu ketika hukum Hooke masih berlaku, atom yang mengalami sedikit pergeseran akan kembali ke posisi semula jika gaya yang diberikan dihilangkan.

Regangan tarik (ϵ) adalah perubahan relatif panjang sebuah kawat yang mengalami tegangan tarik

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (4)$$

Hubungan antara tegangan dan regangan merupakan bentuk kesebandingan satu sama lain,

$$\sigma = E\epsilon, \quad (5)$$

dengan σ adalah tegangan, konstanta kesebandingan E adalah modulus Young, dan ϵ adalah regangan. Dari persamaan (1), (4) dan (5) diperoleh

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (6)$$

Jika pada kawat vertikal diberikan beban bermassa m , maka gaya berupa gaya berat $F = mg$, sehingga

$$\Delta L = \frac{4gL_0}{E\pi d^2} m. \quad (7)$$

c. Histeresis Elastisitas

Jika perbandingan tegangan dan regangan saat penambahan beban berbeda dengan perbandingan tegangan dan regangan saat pengurangan beban, maka terjadi histeresis pada bahan tersebut (Young, 2008:369). Dalam hal ini jika beban yang diberikan dihilangkan, kawat tidak kembali ke panjang semula tetapi lebih panjang dari semula. Adanya histeresis juga tampak dari bertambahnya nilai koefisien modulus Young, dan hal ini terjadi karena penambahan panjang yang semakin kecil.

d. Penentuan Modulus Young

Pada penelitian ini didesain alat yang digunakan untuk menentukan nilai modulus Young kawat besi. Cara kerja alat adalah dengan mengamati pertambahan panjang kawat ketika kawat ditarik dengan sebuah gaya. Gaya diberikan dengan cara memberi beban pada ujung kawat. Terdapat dua metode yang digunakan untuk memperoleh data ΔL , pertama dengan mengamati ΔL dengan panjang kawat mula-mula dan diameter tetap tetapi massa beban divariasikan, dan kedua dengan mengamati ΔL dengan massa beban dan diameter tetap tetapi panjang mula-mula kawat divariasikan.

d.1. Analisis regresi pada panjang kawat mula-mula dan diameter tetap

Hasil pengukuran ΔL dengan panjang mula-mula tetap dan massa divariasikan ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik pertambahan panjang terhadap gaya oleh beban. Hasil pengukuran diolah dengan regresi linier berbobot (Bevington dan Robinson, 2003: 98-114), sehingga diperoleh nilai a_0 dan a_1 . Secara umum persamaannya dituliskan dalam bentuk linier

$$y = a_1 x + a_0, \quad (8)$$

dan dalam hal ini $a_0 = a_{0m}$ dan $a_1 = a_{1m}$. Dari persamaan (7) sebetulnya nilai E dapat dicari dari nilai-nilai d , g , L_0 , m dan ΔL , yang telah diperoleh dari percobaan. Namun demikian perhitungan secara langsung mengandung beberapa kelemahan, yaitu tidak dapat dicek atau diuji apakah rumus teoritis dalam model berlaku umum, dan tidak dapat dideteksi serta dihilangkan adanya ralat sistematis pertambahan massa yang dapat mempengaruhi ketelitian perhitungan E . Inilah alasan utama mengapa diperlukan analisis regresi linier. Jika m divariasikan maka persamaan (7) merupakan persamaan linier seperti persamaan (8) dengan $x = m$ dan $y = \Delta L$, dengan a_{0m} dan a_{1m} merupakan koefisien-koefisien yang dapat dicari dengan regresi linier berbobot

$$a_1 = \frac{\sum \frac{1}{s_i^2} \sum \frac{x_i y_i}{s_i^2} - \sum \frac{x_i}{s_i^2} \sum \frac{y_i}{s_i^2}}{\Delta}, \quad (9)$$

$$a_0 = \frac{\sum \frac{x_i^2}{s_i^2} \sum \frac{y_i}{s_i^2} - \sum \frac{x_i}{s_i^2} \sum \frac{x_i y_i}{s_i^2}}{\Delta}, \quad (10)$$

$$\text{dengan } \Delta = \sum \frac{1}{s_i^2} \sum \frac{x_i^2}{s_i^2} - \left(\sum \frac{x_i}{s_i^2} \right)^2.$$

Ralat a_1 dapat dihitung dari

$$s_{a_1} = \sqrt{\frac{\sum \frac{1}{s_i^2}}{\Delta}}, \quad (11)$$

dan ralat a_0 dapat dihitung dari

$$s_{a_0} = \sqrt{\frac{\sum \frac{x_i^2}{s_i^2}}{\Delta}}, \quad (12)$$

sehingga dari persamaan (6) dapat ditulis

$$a_{1,m} = \frac{4g.L_0}{E.\pi d^2}. \quad (13)$$

Jika dilakukan regresi linier ΔL terhadap m dan diperoleh $a_{1,m}$, maka E dapat dicari dari persamaan

$$E = \frac{4gL_0}{a_{1,m}\pi d^2} \quad (14a)$$

dan ralatnya dapat dihitung dari perambatan ralat

$$s_E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial a_{1,m}}\right)^2 (s_{a_{1,m}})^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial g}\right)^2 (s_g)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial L_0}\right)^2 (s_{L_0})^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial d}\right)^2 (s_d)^2}. \quad (14b)$$

Dalam regresi linier berbobot, dapat diuji baik-tidaknya kecocokan (*goodness of fit*) fungsi linier dengan menghitung parameter χ^2 yang didefinisikan sebagai

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - y_{reg}(i))^2}{s_i^2}, \quad (15)$$

dengan $y_{reg}(i)$ adalah hasil y dari perhitungan regresi.

$$y_{reg}(i) = a_0 + a_1 x_i, \quad (16)$$

dan s_i merupakan ralat untuk masing-masing y_i .

Secara ideal, regresi dikatakan baik jika peluang mendapatkan nilai χ^2 dari himpunan data acak lebih besar dari atau sama dengan $\chi^2_{terhitung}$ mempunyai nilai 0,5 (50%) (Bavington dan Robinson, 2003), dan dalam praktek dapat diterima jika terletak dalam batas antara 10% sampai 90% (Rabinowicz, 1970:52-55 dan 78-79),

$$10\% < P(\chi^2 \geq \chi_{hit}^2) < 90\%. \quad (17)$$

d.2. Analisis regresi terhadap masa beban dan diameter tetap

Metode lain untuk memperoleh ΔL dalam menentukan modulus Young yaitu dengan memvariasi L_0 dengan massa beban tetap, sehingga dari persamaan (6) dapat dituliskan

$$\Delta L = \frac{4gm}{E\pi d^2} L_0. \quad (18)$$

Persamaan (18) merupakan persamaan linier seperti persamaan (8) dengan $y = \Delta L$ dan $x = L_0$, dan dalam hal ini $a_0 = a_{0L}$ dan $a_1 = a_{1L}$, dengan

$$a_{1L} = \frac{4gm}{E\pi d^2}. \quad (19)$$

Jika dilakukan regresi linier ΔL terhadap L_0 dan nilai a_{1L} diperoleh, maka E dapat dihitung dari persamaan

$$E = \frac{4gm}{a_{1,L}\pi d^2}, \quad (20a)$$

dan ralatnya dapat dihitung dari perambatan ralat

$$s_E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial a_{1,L}}\right)^2 (s_{a_{1,L}})^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial g}\right)^2 (s_g)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial m}\right)^2 (s_m)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial d}\right)^2 (s_d)^2}. \quad (20b)$$

e. Penentuan Percepatan Gravitasi Bumi

Untuk menentukan percepatan gravitasi bumi dapat dilakukan percobaan ayunan matematis. Jika panjang tali dinyatakan dengan L dan periode ayunan T , maka pada simpangan yang kecil diperoleh

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}. \quad (21)$$

Dari persamaan (21) dapat diperoleh bentuk persamaan linier

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g} L, \quad (22)$$

dengan $x = L$ dan $y = T^2$, seperti persamaan (8), dan dalam hal ini $a_0 = a_{0,g}$ dan $a_1 = a_{1,g}$, dengan $a_{1,g} = 4\pi^2/g$, sehingga percepatan gravitasi g dapat dihitung dari

$$g = \frac{4\pi^2}{a_{1.g}}, \quad (23)$$

dengan ralat

$$s_g = \sqrt{\left(\frac{-4\pi^2}{a_{1.g}^2} s_{a_{1.g}}\right)^2}. \quad (24)$$

III. METODE PENELITIAN

a. Instrumen Penelitian

Percobaan dilakukan di Laboratorium Fisika SMA Negeri 1 Wates, Kab. Kulon Progo, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, dengan menggunakan alat yang desainnya seperti Gambar 2. Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas kawat besi dengan lima macam ukuran diameter yaitu $(1,81 \pm 0,01)$ mm, $(1,21 \pm 0,01)$ mm, $(0,81 \pm 0,01)$ mm, $(0,73 \pm 0,01)$ mm, dan $(0,51 \pm 0,01)$ mm, serta jangka sorong digital Wipro *hardened* dengan batas keseksamaan sampai 0,01 mm untuk mengukur pertambahan panjang kawat. Selain itu sebuah *waterpass* digital seri DWL-80G Digi-Pass, dengan kepekaan perubahan sudut kemiringan sampai $0,1^\circ$, digunakan untuk mengamati posisi horizontal ujung bawah kawat dengan ujung jangka sorong, serta sebuah mistar dengan skala terkecil 1 mm dan beban.

Tabel 1. Variasi massa beban yang dipakai selama percobaan

No	Beban	Massa (gram)
1	M-1	$(499,5 \pm 0,1)$
2	M-2	$(749,4 \pm 0,2)$
3	M-3	$(999,1 \pm 0,1)$
4	M-4	$(1248,9 \pm 0,2)$
5	M-5	$(1498 \pm 0,2)$
6	M-6	$(1747,9 \pm 0,2)$
7	M-7	$(1997,6 \pm 0,2)$
8	M-8	$(2247,4 \pm 0,2)$
9	M-9	$(2497,1 \pm 0,2)$

Untuk menentukan percepatan gravitasi bumi, alat dan bahan yang digunakan adalah bandul bermassa 100 gram yang digantungkan pada benang dengan panjang dapat divariasikan dari 70 cm sampai dengan 200 cm. Bandul disimpangkan sejauh kurang lebih 10 cm dan dilepaskan, dan selanjutnya dicatat waktu untuk 10 kali ayunan menggunakan *stopwatch*. Percobaan di ulangi 4 kali untuk setiap panjang tali.



Gambar 2. Alat percobaan untuk menentukan modulus Young.

b. Teknik Analisis Data

Seluruh analisis regresi linier berbobot dalam penelitian ini dilakukan dengan bantuan program REGLIN yang ditulis dengan bahasa Compaq Visual Fortran 6.5 dengan sistem operasi Window XP.

Untuk menentukan nilai percepatan gravitasi bumi dilakukan regresi linier berbobot kuadrat periode ayunan bandul terhadap panjang tali, dan diperoleh a_{1g} dan a_{0g} , kemudian nilai g dicari menggunakan persamaan (23).

Untuk menentukan nilai modulus Young digunakan dua metode, yang pertama dengan mengamati perubahan panjang kawat pada panjang kawat mula-mula tetap, dengan massa diubah, kemudian dilakukan regresi linier perubahan panjang terhadap massa. Metode kedua dilakukan dengan mengamati perubahan panjang kawat pada massa beban tetap, dengan panjang mula-mula diubah, kemudian dilakukan regresi linier perubahan panjang terhadap panjang mula-mula. Untuk mengetahui kebaikan regresi linier dilakukan uji χ^2 dengan menghitung parameter χ^2 menggunakan persamaan (15) dan dihitung peluang χ^2 dari himpunan data acak akan lebih besar atau sama dengan χ^2 terhitung, $P(\chi^2 \geq \chi_{hit}^2)$ dengan menggunakan program REGLIN.

b.1. Analisis regresi pada panjang mula-mula dan diameter tetap

Metode pertama untuk menentukan nilai modulus Young adalah dengan melakukan regresi linier ΔL terhadap m pada L_0 tetap. Pada metode ini pertambahan panjang ΔL diukur untuk setiap penambahan massa beban sebanyak sembilan macam nilai massa. Kawat dengan diameter 1,81 mm diberi beban tetap sebesar 1000 gram, kawat dengan diameter 1,21 mm diberi beban tetap sebesar 500 gram, sedangkan untuk kawat berdiameter 0,81 mm, 0,73 mm dan 0,51 mm tanpa beban tetap. Nilai E dihitung dengan persamaan (14.a) berdasarkan a_{1m} dan ralat dihitung menggunakan persamaan (14b). Langkah-langkah percobaan yaitu, panjang mula-mula dan diameter kawat logam diukur, masing-masing dicatat sebagai L_0 dan d . Diameter diukur sebanyak dua puluh kali pada tempat yang berbeda, kemudian dirata-rata. Ujung kawat diberi beban yang bervariasi sebanyak sembilan macam massa. *Waterpass* digital digunakan untuk mengamati posisi horisontal kedua ujung papan. Ujung yang satu dihubungkan dengan kawat logam, dan ujung yang lain tertumpu di atas jangka sorong.

Sebelum diberi beban, jangka sorong dinolkan terlebih dahulu. Mula-mula *waterpass* pada posisi sudut 0° , ketika terjadi pertambahan panjang pada kawat logam, posisi kemiringan *waterpass* akan berubah sudutnya. Untuk mengembalikan ke posisi 0° lagi dilakukan dengan menggeser jangka sorong ke bawah. Angka yang terbaca pada jangka sorong dicatat sebagai ΔL_1 . Selanjutnya beban ditambah, sehingga posisi sudut akan berubah. Untuk mengembalikan ke posisi horisontal, jangka sorong digeser turun lagi. Saat *waterpass* menunjuk 0° , posisi angka pada jangka sorong diamati sebagai ΔL_2 , dan demikian seterusnya sampai beban ke-9. Percobaan diulang sebanyak tiga kali dengan langkah yang sama.

b.2. Analisis regresi pada massa beban dan diameter tetap

Metode ke dua untuk menentukan nilai E adalah dengan melakukan regresi linier ΔL terhadap L_0 pada massa tetap. ΔL diukur ketika beban yang diberikan tetap, panjang mula-mula divariasikan. Regresi linier dilakukan pada pertambahan panjang kawat, ΔL terhadap panjang mula-mula kawat logam, L_0 dengan menggunakan bantuan program REGLIN maka akan dihasilkan nilai a_{0L} dan a_{1L} . Nilai E dihitung dengan persamaan (20.a) dan ralatnya dihitung dengan persamaan (20.b).

Langkah percobaan yang dilakukan, pertama menyusun alat percobaan seperti pada desain percobaan. Diameter kawat logam diukur dan dicatat sebagai d . Panjang kawat mula-mula, L_0 divariasikan. Pada setiap L_0 , ujung bawah kawat logam diberi beban dengan massa tetap. Massa yang dipakai adalah massa M-6, M-5, dan M-4. *Waterpass* digunakan untuk mengamati posisi horisontal kedua ujung papan. Ujung yang satu dihubungkan dengan kawat logam, dan ujung yang lain tertumpu di atas jangka sorong. Sebelum diberi beban, jangka sorong di nolkan terlebih dahulu. Mula-mula *waterpass* pada posisi sudut 0° , ketika terjadi pertambahan panjang pada kawat logam, posisi kemiringan *waterpass* akan berubah. Untuk mengembalikan ke posisi 0° lagi dengan cara menggeser jangkatorong ke bawah. Angka yang terbaca pada jangka sorong dicatat sebagai ΔL , kemudian diulangi lagi dengan L_0 yang berbeda.

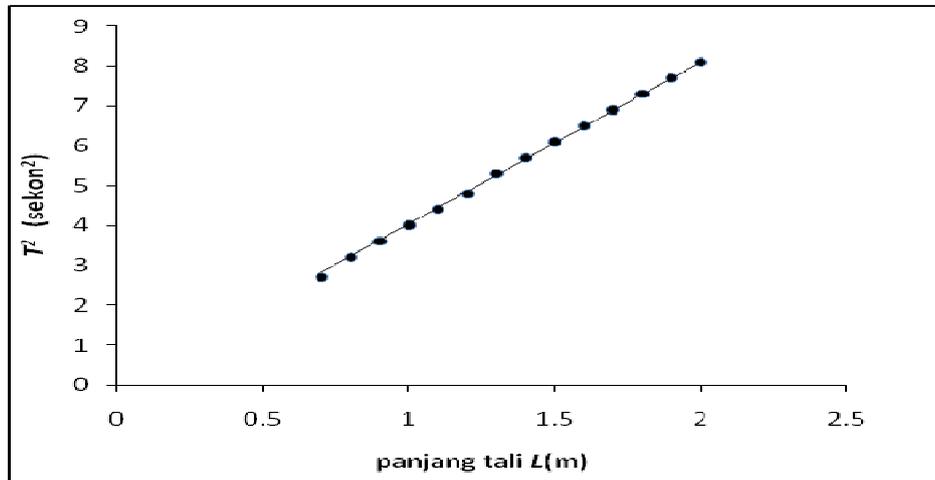
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Penentuan Percepatan Gravitasi Bumi

Langkah awal percobaan penentuan modulus Young kawat logam adalah menentukan percepatan gravitasi di wilayah Kabupaten Kulon Progo. Percobaan penentuan gravitasi dilakukan menggunakan bandul matematis dengan panjang tali yang dapat divariasikan dari 70 cm sampai dengan 200 cm, dan massa beban 100 gram. Untuk ayunan dipilih tali yang cukup halus, untuk meminimalkan gesekan udara. Dengan bantuan

program REGLIN untuk menganalisis regresi linier kuadrat periode ayunan (T^2) terhadap panjang tali (L), diperoleh nilai a_{0g} dan a_{1g} .

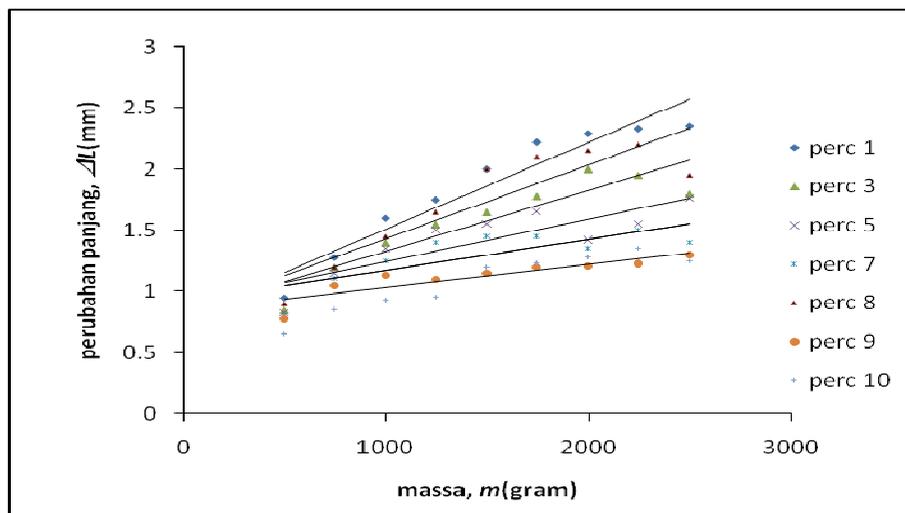
Grafik hubungan kuadrat periode ayunan (T^2) terhadap panjang tali (L) disajikan dalam Gambar 3, dan diperoleh nilai $a_{1,g} = (4,05 \pm 0,03) \text{ s}^2/\text{m}$, $a_{0,g} = (-0,18 \pm 0,24) \text{ s}^2/\text{m}$, dan $g = (9,76 \pm 0,07) \text{ m/s}^2$. Nilai percepatan gravitasi ayng diperoleh sesuai dengan hasil percobaan percepatan gravitasi di kota Yogyakarta sebesar $9,7822 \text{ m/s}^2$ (Oktova, 1987:80).



Gambar 3. Grafik kuadrat periode ayunan terhadap panjang tali beserta garis hasil analisis regresi linier pada penentuan percepatan gravitasi bumi.

b. Penentuan Modulus Young dengan L_0 dan d Tetap

Dari percobaan pendahuluan diketahui ketika percobaan diulang 10 kali ternyata terjadi histeresis pada bahan. Hal ini tampak dari penurunan ΔL pada setiap kali percobaan dan juga dari grafik ΔL terhadap m seperti disajikan pada Gambar 4, yang ditunjukkan terjadi penurunan kemiringan garis. Berdasarkan hasil percobaan pendahuluan tersebut, untuk setiap nilai L_0 dan setiap nilai m , percobaan diulang 3 kali saja untuk mencegah histeresis yang berlebihan, dan regresi linier berbobot ΔL terhadap m menghasilkan nilai a_{0m} dan a_{1m} .



Gambar 4. Grafik perubahan panjang, ΔL terhadap massa, m pada percobaan pendahuluan, yang menunjukkan terjadinya histeresis.

Grafik ΔL terhadap m hasil percobaan menunjukkan kecenderungan yang sama seperti grafik elastisitas pada Gambar 1, dan analisis regresi linier berbobot dilakukan hanya pada bagian linier saja. Bagian linier diambil berdasar grafik ΔL terhadap m pada semua data percobaan. Penentuan bagian linier ini sangat berpengaruh

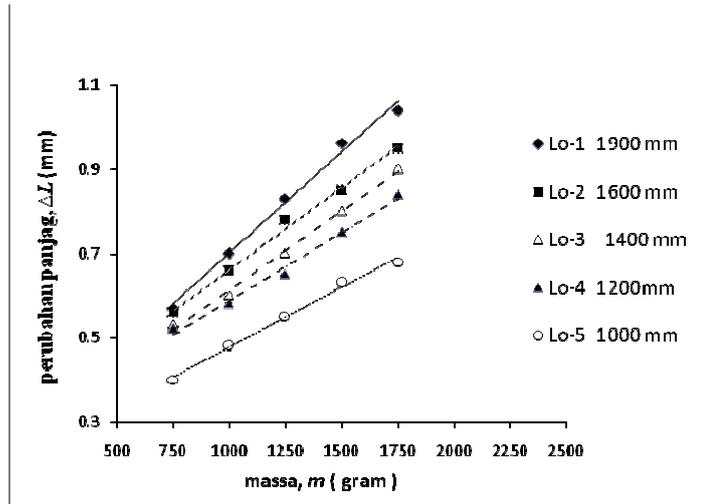
pada nilai E yang diperoleh. Nilai modulus Young dihitung dari nilai a_{1m} yang diperoleh dari hasil regresi tersebut dengan menggunakan persamaan (14.a). Hasil penentuan modulus Young dengan diameter dan L_0 tetap disajikan dalam Tabel 2. Terlihat dari nilai-nilai χ^2 dan $P(\chi^2 \geq \chi^2_{hit})$ bahwa titik-titik data yang dianalisis menunjukkan kecenderungan linier seperti yang diharapkan.

Tabel 2. Hasil penentuan modulus Young dengan diameter dan L_0 tetap.

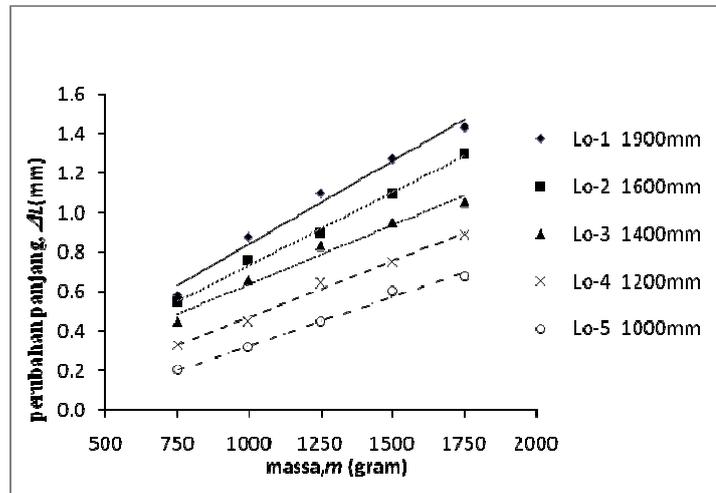
d (mm)	L_0 (mm)	a_{1m} (10^{-4} mm/gr)	a_{0m} (mm/gr)	E (10^{11} N/m ²)	χ^2	$P(\chi^2 \geq \chi^2_{hit})$ (%)	\bar{E} (10^{11} N/m ²)
0,51±0,01	1900	42,69 ± 1,17	-1,33 ± 0,15	2,11 ± 0,10	1,13	77,11	(2,01±0,05)
	1600	37,72 ± 1,75	-1,11 ± 0,22	2,01 ± 0,10	3,95	26,75	
	1400	34,97 ± 0,36	-1,15 ± 0,03	1,91 ± 0,20	2,68	44,36	
	1200	27,70 ± 0,92	-1,16 ± 0,10	2,05 ± 0,10	3,87	42,41	
	1000	24,58 ± 0,53	-1,04 ± 0,07	1,93 ± 0,10	4,82	43,71	
0,73±0,01	1900	25,76 ± 1,27	-0,88 ± 0,16	1,72 ± 0,09	2,68	44,39	(1,60±0,04)
	1600	23,09 ± 1,04	-0,52 ± 0,15	1,62 ± 0,08	3,79	28,49	
	1400	20,53 ± 0,99	-0,41 ± 0,11	1,59 ± 0,09	3,04	38,64	
	1200	17,09 ± 1,08	-0,12 ± 0,13	1,46 ± 0,09	3,53	31,73	
	1000	14,36 ± 0,29	-0,17 ± 0,04	1,62 ± 0,10	3,04	38,57	
0,81±0,01	1900	27,16 ± 0,64	-1,72 ± 0,07	1,32 ± 0,06	2,23	52,57	(1,26±0,03)
	1600	23,98 ± 1,80	-1,48 ± 0,21	1,26 ± 0,10	2,29	51,47	
	1400	21,21 ± 0,94	-1,27 ± 0,11	1,25 ± 0,07	2,40	49,37	
	1200	19,31 ± 0,67	-1,27 ± 0,07	1,18 ± 0,08	2,32	50,95	
	1000	15,20 ± 0,53	-0,88 ± 0,07	1,25 ± 0,09	2,89	40,94	
1,21±0,01	1900	8,65 ± 1,02	-0,02 ± 0,12	1,86 ± 0,20	1,11	77,68	(1,86±0,03)
	1600	7,46 ± 0,35	-0,01 ± 0,04	1,82 ± 0,09	1,03	79,50	
	1400	6,20 ± 0,17	-0,04 ± 0,02	1,92 ± 0,06	3,99	26,28	
	1200	5,46 ± 0,25	-0,08 ± 0,02	1,87 ± 0,09	3,92	27,01	
	1000	4,73 ± 0,13	-0,15 ± 0,02	1,80 ± 0,06	1,67	64,51	
1,81±0,01	1900	4,85 ± 0,22	0,22 ± 0,03	1,48 ± 0,07	2,64	30,39	(1,42±0,03)
	1600	4,21 ± 0,13	0,24 ± 0,02	1,44 ± 0,05	3,84	27,99	
	1400	3,86 ± 0,99	0,22 ± 0,01	1,38 ± 0,16	4,44	21,76	
	1200	3,33 ± 0,21	0,25 ± 0,03	1,36 ± 0,09	1,28	73,43	
	1000	2,88 ± 0,18	0,19 ± 0,02	1,32 ± 0,09	2,86	41,42	

Secara teoretis, nilai a_{0m} sama dengan nol, sementara pada Tabel 2 semua hasil menunjukkan adanya ralat sistematis berupa *zero offset*, dan nilai a_0 negatif berarti penambahan massa pada awal percobaan digunakan untuk meluruskan kawat terlebih dahulu, kecuali pada kawat dengan diameter 1,81 mm, a_{0m} bernilai positif karena pada percobaan telah diberi beban awal untuk meluruskan kawat. Nilai a_{1m} yang diperoleh mempunyai kecenderungan semakin berkurang untuk L_0 yang semakin pendek, yang berarti terjadi penurunan kemiringan garis. Grafik ΔL terhadap m untuk masing-masing diameter kawat disajikan dalam Gambar 5. Dari grafik tampak ada kecenderungan penurunan kemiringan pada L_0 yang semakin kecil, yang berarti telah terjadi histeresis pada bahan. Histeresis terjadi karena percobaan dilakukan berulang-ulang dan dimulai dari L_0 terbesar. Berdasarkan nilai a_{1m} yang diperoleh dari hasil regresi ΔL terhadap m , untuk berbagai L_0 tetap dan berbagai ukuran diameter diperoleh nilai E yang berkisar dari $(1,26 \pm 0,03)10^{11}$ N/m² sampai dengan $(2,01 \pm 0,05)10^{11}$ N/m². Kolom paling kanan adalah rata-rata berbobot, \bar{E} dari nilai-nilai E pada kolom ke-5 untuk masing-masing diameter kawat, dan sepiintas terlihat kemungkinan adanya variasi nilai \bar{E} terhadap diameter kawat. Untuk mengecek apakah terdapat korelasi antara \bar{E} dan diameter kawat, dilakukan uji χ^2 , dan hasil regresi menunjukkan bahwa tidak terdapat hubungan linier, seperti ditunjukkan dengan nilai peluang $P(\chi^2 \geq \chi^2_{hit})$ praktis sama dengan 0%.

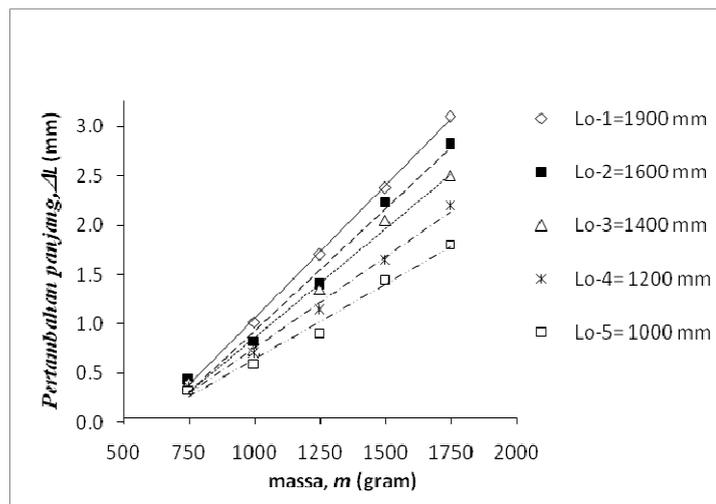
Jika diambil rata-rata berbobot dari seluruh nilai \bar{E} pada berbagai diameter kawat, diperoleh $(1,44 \pm 0,02)10^{11}$ N/m², mendekati nilai acuan untuk besi $2,1 \times 10^{11}$ N/m² (Benenson, 2000:239).



(a)

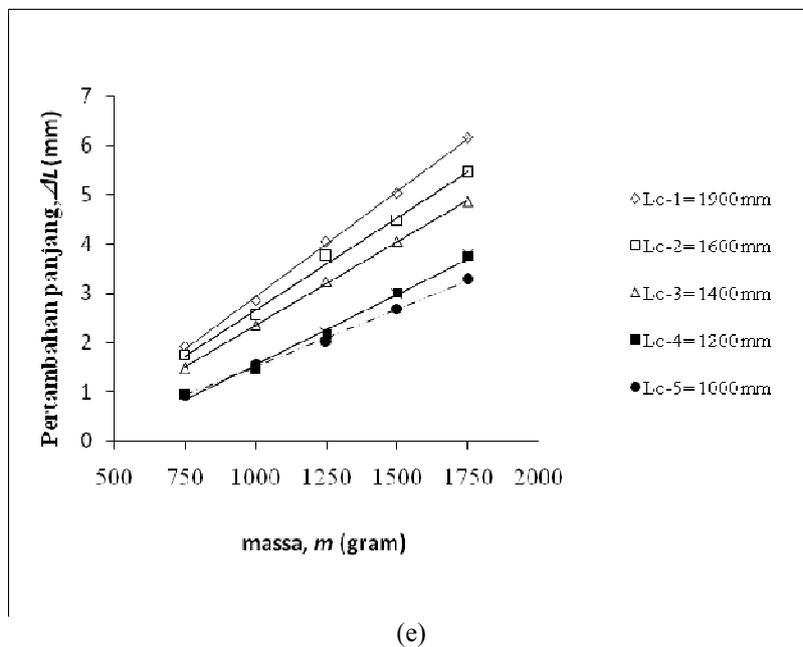
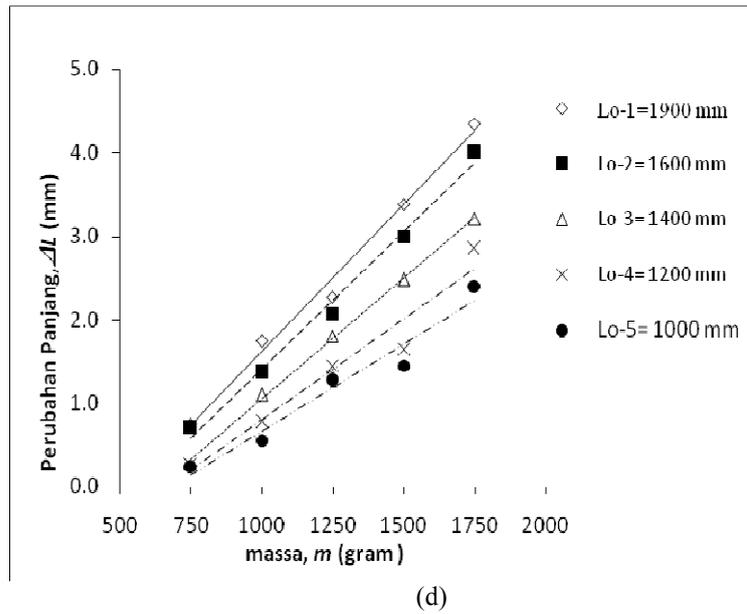


(b)



(c)

Gambar 5. Grafik ΔL terhadap m pada diameter kawat (a) 1,81 mm, (b) 1,21 mm, (c) 0,80 mm.



Gambar 5 (lanjutan). Grafik ΔL terhadap m pada diameter kawat (d) 0,73 mm, dan (e) 0,51 mm.

c. Penentuan Modulus Young dengan m dan d Tetap

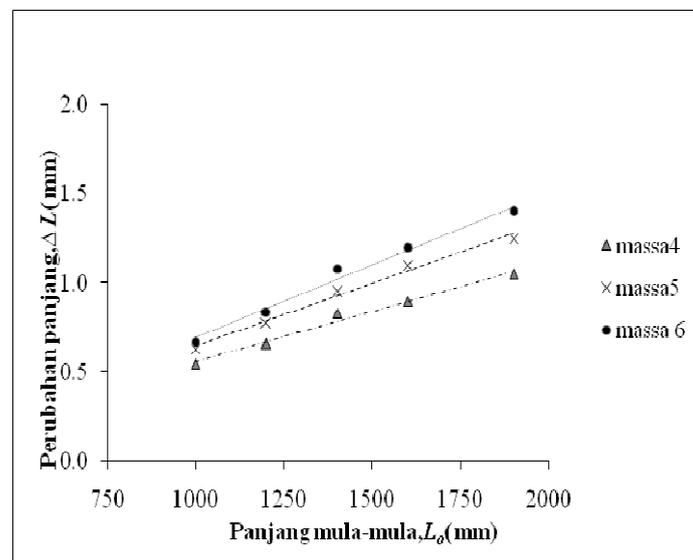
Metode analisis kedua untuk menentukan modulus Young adalah dengan menggunakan analisis regresi linier ΔL terhadap L_0 , pada m dan d tetap. Untuk masing-masing beban diperoleh lima pasang data ($L_0, \Delta L$), dan dari lima macam L_0 masing-masing diberi tiga macam variasi massa yang diambil dari bagian linier grafik ΔL terhadap m , yaitu M4, M5 dan M6. Hasil perhitungan E dengan metode kedua disajikan dalam Tabel 3. Kembali terlihat dari nilai-nilai χ^2 dan $P(\chi^2 \geq \chi^2_{hit})$ bahwa titik-titik data yang dianalisis menunjukkan kecenderungan linier seperti yang diharapkan. Tampak pula bahwa nilai $a_{0,L}$ tidak sama dengan nol dan bernilai negatif, yang berarti gaya pada awal penambahan massa digunakan untuk meluruskan kawat terlebih dahulu, kecuali pada kawat dengan diameter 1,81 mm, karena telah diberi beban awal untuk meluruskan kawat. Akan tetapi hal ini tidak mempengaruhi hasil perhitungan nilai E . Nilai a_1 yang diperoleh mempunyai kecenderungan semakin kecil untuk m yang makin kecil sama dengan metode pertama, semakin

kecil untuk L_0 yang semakin kecil. Grafik ΔL terhadap L_0 pada masing-masing diameter disajikan dalam Gambar 6.

Tabel 3. Hasil penentuan modulus Young dengan massa dan diameter tetap.

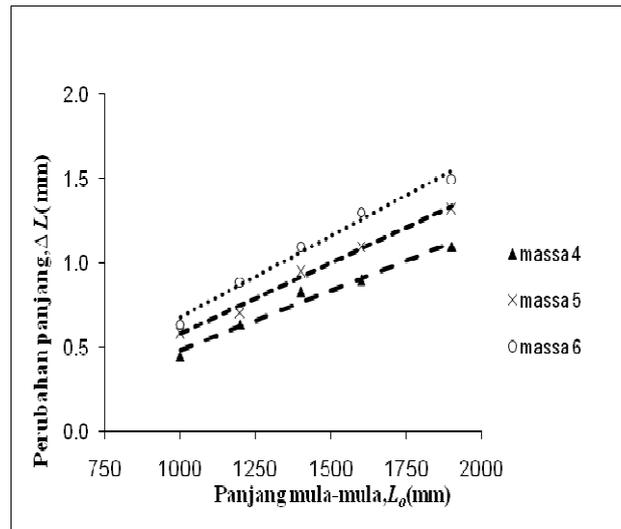
d (mm)	Massa (g)	a_{1L} (10^{-4} mm/g)	a_{0L} (mm/g)	E (10^{11} N/m ²)	χ^2	$P(\chi^2 \geq \chi^2_{hit})$	\bar{E} (10^{11} N/m ²)
0,51±0,01	M-6	40,10 ±1,70	-0,86 ± 0,25	2,08 ± 0,10	1,88	59,71%	2,01±0,05
	M-5	34,77 ±1,47	-1,13 ± 0,21	2,04 ± 0,10	2,62	45,43%	
	M-4	30,91 ±1,17	-1,27 ± 0,17	1,92 ± 0,10	3,36	33,99%	
0,73±0,01	M-6	22,57 ±1,15	-0,33 ± 0,19	1,77 ± 0,09	2,01	57,07%	1,71±0,04
	M-5	21,62 ±1,14	-0,59 ± 0,19	1,62 ± 0,09	2,14	54,38%	
	M-4	16,97 ±0,22	-0,55 ± 0,03	1,72 ± 0,05	3,39	33,56%	
0,81±0,01	M-6	24,70 ±1,56	-1,40 ± 0,24	1,34 ± 0,10	3,66	30,15%	1,21±0,03
	M-5	22,08 ±0,84	-1,37 ± 0,10	1,28 ± 0,07	2,27	51,79%	
	M-4	20,44 ±0,45	-1,81 ± 0,05	1,16 ± 0,04	3,28	35,19%	
1,21±0,01	M-6	8,01 ± 0,86	-0,09 ± 0,13	1,85 ± 0,20	3,55	31,47%	1,84±0,03
	M-5	6,87 ± 0,13	-0,05 ± 0,01	1,85 ± 0,04	3,47	32,54%	
	M-4	5,77 ± 0,19	-0,03 ± 0,03	1,83 ± 0,07	3,78	28,70%	
1,81±0,01	M-6	5,07 ± 0,16	0,18 ± 0,02	1,31 ± 0,04	3,76	28,88%	1,36±0,03
	M-5	3,91 ± 0,12	0,24 ± 0,02	1,45 ± 0,05	3,06	38,27%	
	M-4	3,46 ± 0,26	0,22 ± 0,04	1,36 ± 0,10	2,38	49,74%	

Berdasar nilai a_{1L} dari regresi linier ΔL terhadap L_0 diperoleh nilai \bar{E} untuk masing-masing diameter yang bervariasi dari $(1,21 \pm 0,01)10^{11}$ N/m² sampai dengan $(2,01 \pm 0,04) 10^{11}$ N/m², dan rata-rata berbobot menghasilkan $(1,55 \pm 0,02)10^{11}$ N/m², mendekati nilai yang diperoleh dengan metode pertama. Dari hasil regresi linier E terhadap diameter juga kembali menunjukkan bahwa tidak terdapat hubungan secara linier modulus Young dengan diameter kawat, dengan nilai peluang $P(\chi^2 \geq \chi^2_{hit})$ praktis sama dengan 0%.

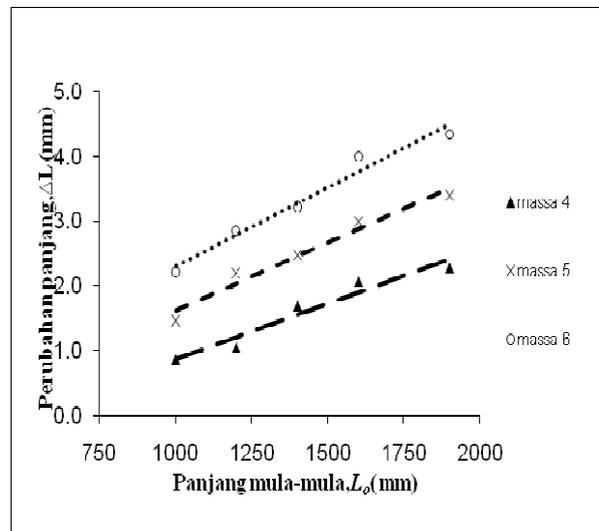


(a)

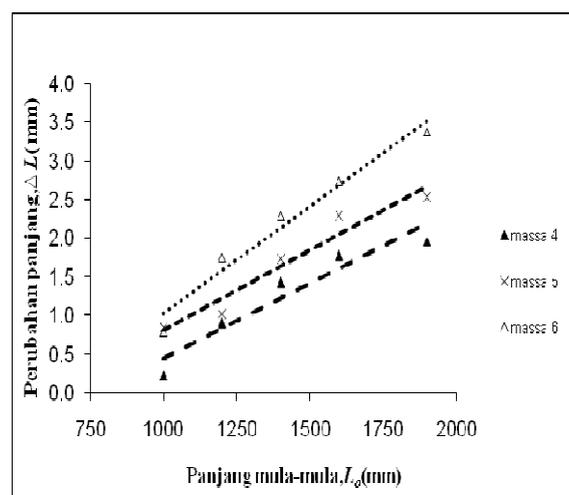
Gambar 6. (a) Grafik ΔL terhadap L_0 pada diameter kawat 1,81 mm.



(b)

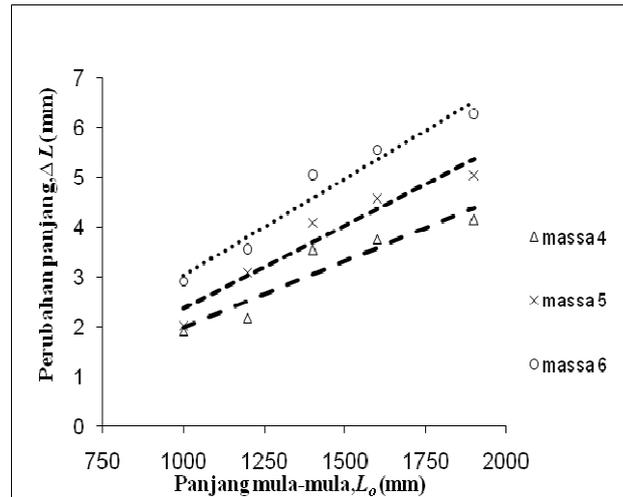


(c)



(d)

Gambar 6 (lanjutan). Grafik ΔL terhadap L_0 pada diameter kawat (b) 1,21 mm, (c) 0,80 mm, dan (d) 0,73mm.



(e)

Gambar 6 (lanjutan). (e) Grafik ΔL terhadap L_0 pada diameter kawat 0,51 mm.

Dari grafik dalam Gambar 6 tampak bahwa ada kecenderungan penurunan kemiringan pada massa yang lebih kecil. Sekilas ada beberapa grafik yang kelihatannya sejajar, tapi sebetulnya tidak, ada penurunan kemiringan garis tetapi cukup kecil, hal ini terlihat karena tidak ada nilai a_1 pada Tabel 3 yang sama.

Berdasarkan hasil penelitian ini, untuk diterapkan sebagai percobaan di SMA disarankan untuk digunakan metode yang pertama, yaitu mengamati perubahan panjang ketika beban divariasi pada L_0 tetap, karena metode tersebut lebih sesuai dengan materi elastisitas di SMA, khususnya tentang hukum Hooke.

KESIMPULAN DAN SARAN

Desain alat yang dihasilkan pada penelitian ini dapat digunakan untuk menentukan nilai modulus Young kawat logam. Hasil percobaan dengan bahan kawat besi dari dua metode berbeda menghasilkan nilai modulus Young sebesar $(1,44 \pm 0,02)10^{11}$ N/m² untuk metode pertama, dan $(1,55 \pm 0,02)10^{11}$ N/m² untuk metode kedua, mendekati acuan sebesar $2,1 \times 10^{11}$ N/m².

Untuk percobaan di SMA disarankan digunakan metode pertama, yaitu mengamati pertambahan panjang kawat ketika diberi beban bervariasi pada panjang awal kawat tetap, karena prosedur percobaan lebih sesuai dengan teori hukum Hooke yang dipelajari di SMA. Selain itu disarankan penggunaan kawat dengan diameter kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Bevington, P. R., dan Robinson, D. K., 2003, "Data Reduction and Error Analysis for The Physical Science, Third Edition", New York : McGraw-Hill.
- Benenson, W., Harris, J. W., Stocker, H., Lutz, H., 2001, "Handbook of Physics", New York : Springer.
- Depdiknas, 2003, "Kurikulum 2004 Standar Kompetensi Fisika", Jakarta.
- Depdiknas, 2006, "Kurikulum 2006 Kurikulum Tingkat Satuan Pendidikan", Jakarta.
- Freeman, W. L., dan Ronald, F. F., 2007, "A Simple Experiment for Determining the Elastic Constant of a fine Wire", *Journal of Physics Teacher* **45**.
- Giancoli, D. C., 1998, "Physics", Alih bahasa Hanum, Yuhilza, Jakarta : Erlangga.
- Nelkom, M., dan Parker, P., 1987, "Advanced Level Physics, Sixth Edition", London : Heineman Educational Books.
- Oktova, R., 1987, "Metode Resonansi Magnetik dengan Regresi Polinom untuk Menentukan Cp/Cv Udara", Skripsi, Yogyakarta : FMIPA UGM. hal. 80.
- Rabinowicz, E., 1970, "An Introduction to Experimentation", Reading : Addison Wesley.

- Roestiyah, 2008, "Strategi Belajar Mengajar", Jakarta : Rineka Cipta.
- Sears, F. W., Zemansky, M. W., 2004, "Fisika Universitas", Jakarta: Erlangga.
- Young, H. D., Freedman, R. A, 2008, "Sears and Zemansky's University Physics: with Modern Physics"
Edisi ke-12, San Francisco: Pearson Addison-Wesley, 583.
- Yoshikawa, D. K., Burstone, C. J., Goldberg, A. J., Morton, J., 1981, "Flexure Modulus of Orthodontic
Stainless Steel Wires", *Journal of Dental Research* **60**(2), 139-145.