
Suatu Studi Pemodelan Viskoelastik Material Benang Viz 100% Wool 36 Tex Menggunakan Pendekatan Fisika

Valentinus Galih Vidia Putra¹, Andrian Wijayono¹, Irwan¹, Tina Martina¹,
Cahaya Rosyidan²

¹Jurusan Teknik Tekstil, Politeknik STTT Bandung, Bandung

²Laboratorium Fisika, Universitas Trisakti, Jakarta

* Penulis Penanggungjawab. E-mail : valentinus@kemenperin.go.id

Telp: +62-22-7272580

ABSTRAK

Suatu model matematis viskoelastik untuk menentukan besar koefisien viskos serta koefisien elastik suatu benang tekstil telah dikaji pada penelitian ini. Suatu persamaan matematis benang tekstil viz. 100% wool yang memiliki nomor benang 36 tex atau 36 (g/km) telah dirumuskan menggunakan mekanika klasik. Hasil studi memperlihatkan bahwa pemodelan ini dapat digunakan untuk menentukan sifat viskoelastik material berdasarkan sifat *stress relaxation*.

Kata Kunci : benang viskos, mekanika klasik, *stress relaxation*

ABSTRACT

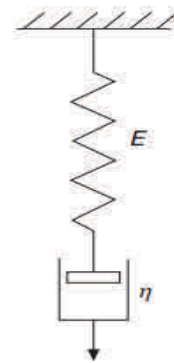
A mathematic model to find viscous of yarn as well as yarn elastic properties has been studied in this research. A mathematics equation of yarn viz. 100% wool having 36 (in unit tex or g/km) of yarn count number has been formulated using classical mechanics. In this research, we have found that this model can be applied to determine the viscoelastic material of yarn based on the properties of yarn as stress relaxation.

Keywords: viscous yarn, classical mechanics, stress relaxation

1. Pendahuluan

Penerapan ilmu fisika khususnya mekanika klasik pada bidang tekstil telah banyak diaplikasikan dan dikerjakan oleh beberapa peneliti [1-11]. Menurut beberapa penelitian, sifat mekanik material benang tekstil bergantung pada suatu fungsi waktu yang dikarenakan adanya sifat alami viskoelastik yang mengkombinasikan adanya suatu sifat viskos dan juga sifat elastik, yaitu *stress relaxation* dan juga *creep behavior*. Kedua sifat tersebut adalah suatu sifat penting untuk menjelaskan sifat dari suatu material benang viskoelastik [8]. Model Maxwell dan Voigt-Kelvin adalah contoh model yang terdiri dari sebuah pegas tunggal dan sebuah dashpot yang disusun seri ataupun parallel. Kelemahan dari kedua model ini adalah ketidakakurasian antara hasil prediksi (pemodelan) terhadap validasi eksperimen. Untuk menjelaskan sifat umum dari material viskoelastik terutama untuk kasus *stress relaxation* dan juga *creep behavior*. Material polimer tekstil biasanya memperlihatkan suatu sifat viskoelastik untuk suatu waktu tertentu dengan pemberian tingkatan tekanan (*stress*) yang sama. Sifat linear viskoelastik biasanya dimodelkan menggunakan suatu model fisika yaitu sebuah pegas yang mengikuti rumusan hukum Hook

deformasi elastik dan juga sebuah dashpot yang mengikuti rumusan fluida Newton dengan besar *stress* berbanding lurus dengan regangan (*strain*). Model Maxwell memiliki sebuah pegas dan dashpot yang disusun secara seri seperti pada Gambar 1. Bentuk pemodelan Maxwell memiliki bentuk pemodelan yang mana besar *stress* memiliki nilai yang sama untuk keseluruhan model, sedangkan besar regangan atau *strain* adalah jumlahan dua buah elemen.



Gambar 1. Bentuk Pemodelan Maxwell

Pada rangkaian seri model Maxwell, maka besar gaya adalah konstan, sehingga *stress* bernilai konstan, maka terdapat perubahan strain sebagai berikut:

$$\sum \frac{ds}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{ds_e}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma_e}{dt} + \frac{\sigma_\eta}{\eta} \quad (2)$$

Karena $\sigma_e = \sigma_\eta = \sigma$, maka

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (3)$$

Untuk kondisi *stress* relaxation, maka regangan atau strain bernilai konstan, sehingga

$$0 = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (4)$$

$$\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} = -\frac{\sigma}{\eta} \quad (5)$$

Sehingga

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{E}{\eta} dt \quad (6)$$

$$\int \frac{d\sigma}{\sigma} = -\int \frac{E}{\eta} dt \quad (7)$$

Yang menghasilkan persamaan

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E}{\eta}t} \quad (8)$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E}{\eta}t} = \sigma_0 e^{-\alpha t} \quad (9)$$

Untuk kondisi *creep behavior*, maka *stress* bernilai konstan

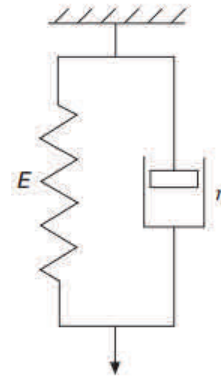
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\eta} t \quad (11)$$

$$s = \frac{\sigma}{\eta} t = m_{grad} t \quad (12)$$

Pemodelan Maxwell pada Pers. (3) memperlihatkan hasil yang kurang baik dalam menggambarkan kondisi sifat material viskoelastik untuk kasus *creep behavior* pada kondisi nilai *stress* konstan. Pada kasus model Voigt-Kelvin (Gambar 2.) dapat dijabarkan sebagai berikut: pada rangkaian paralel, maka besar strain adalah

konstan, sehingga terdapat perubahan *stress*, yaitu:



Gambar 2. Bentuk model Voigt-Kelvin

$$\sum \sigma = 0 \quad (13)$$

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (14)$$

Untuk kasus *stress relaxation* (*strain* konstan), maka

$$\sigma = E\varepsilon \quad (15)$$

Besar σ terhadap waktu akan bernilai konstan. Untuk kasus *creep*, maka *stress* bernilai konstan, sehingga

$$\sigma - E\varepsilon = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (16)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} \left(1 - \frac{E}{\sigma} \varepsilon\right) \quad (17)$$

Hasil penyelesaian persamaan di atas adalah

$$\frac{d\varepsilon}{\left(1 - \frac{E}{\sigma} \varepsilon\right)} = \frac{\sigma}{\eta} dt \quad (18)$$

Misalkan $1 - \frac{E}{\sigma} \varepsilon = u$, maka $du = -\frac{E}{\sigma} d\varepsilon$, sehingga

$$\frac{\sigma du}{E u} = \frac{\sigma}{\eta} dt \quad (19)$$

$$\int \frac{du}{u} = - \int \frac{E}{\eta} dt \quad (20)$$

$$u = u_0 e^{-\frac{E}{\eta} t} \quad (21)$$

$$1 - \frac{E}{\sigma} s = e^{-\frac{E}{\eta} t} \quad (22)$$

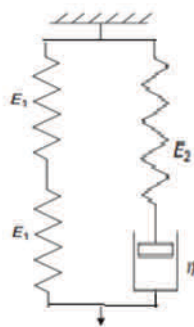
$$\sigma - E s = \sigma e^{-\frac{E}{\eta} t} \quad (23)$$

$$s = \frac{\sigma}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta} t} \right) = \alpha (1 - e^{-bt}) \quad (24)$$

Bentuk pemodelan Voigt-Kelvin pada Pers. (14) tidak dapat menjelaskan kondisi *stress* relaxation pada kondisi strain konstan.

2. Bahan dan Metoda

Pada pemodelan ini material viskoelastik dimodelkan menggunakan suatu sistem 3 pegas dan 1 dashpot yang disusun seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Bentuk Pemodelan Mekanika Klasik Material Viskoelastik

Pada pemodelan ini nilai konstanta pegas adalah E_1 dan E_2 dan besar koefisien viskos adalah η . Penjabaran sistem ini

dapat diselesaikan dengan menggunakan hukum Newton ke-3, maka jika ditinjau pada massa m didapatkan bahwa

$$\sum F = 0 \quad (25)$$

$$F_{\text{ext}} - F_{\text{pegas krt}} = 0 \quad (26)$$

$$F - k\Delta x_1 = 0 \quad (27)$$

$$F = k\Delta x_1 \quad (28)$$

Ditinjau pada titik sambungan dua buah pegas, yaitu

$$\sum F = 0 \quad (29)$$

$$F_{\text{pegas kanan}} - F_{\text{pegas krt}} = 0 \quad (30)$$

$$F_{\text{pegas kanan}} = F_{\text{pegas krt}} \quad (31)$$

$$E\Delta x_r = E\Delta x_1 \quad (32)$$

$$\Delta x_r = \Delta x_1 \quad (33)$$

Sehingga besar pergeseran total adalah

$$\Delta x = \Delta x_r + \Delta x_1 = 2\Delta x_1 \quad (34)$$

Untuk mencari besar koefisien pegas efektif gabungan, maka

$$\sum F = 0 \quad (35)$$

$$F_{\text{ext}} - F_{\text{pegas gabungan}} = 0 \quad (36)$$

$$F = F_{\text{pegas gabungan}} \quad (37)$$

$$F = E_{\text{eff}}\Delta x \quad (38)$$

Substitusikan $F = k\Delta x_1$ ke $F = k_{\text{eff}}\Delta x$, maka

$$E\Delta x_1 = E_{\text{eff}}\Delta x \quad (39)$$

$$E_{\text{eff}} = \frac{E\Delta x_1}{\Delta x} = \frac{E\Delta x_1}{2\Delta x_1} = \frac{E}{2} = \frac{E^2}{2E} \quad (40)$$

$$\frac{1}{E_{eff}} = \frac{2E}{E^2} = \frac{1}{E} + \frac{1}{E} \quad (41)$$

Sehingga didapatkan rumusan umum untuk pegas yang disusun seri adalah

$$\frac{1}{E_{eff}} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_1} = \frac{1}{E} + \frac{1}{E} = \frac{2}{E} \quad (42)$$

Penerapan pemodelan serta prediksi kajian sifat *viscoelastic* pada bidang tekstil adalah suatu studi untuk mengetahui sifat material *viscoelastic* pada serat, benang ataupun kain, sebagai contoh pada sebuah benang viz. 100% wool yang memiliki nomor benang 36 tex atau 36 g/km. Hasil data untuk proses *stress relaxation* (*strain* konstan) adalah sebagai berikut (Tabel 1):

Tabel 1 *stress relaxation*

No	Waktu (10 ³ detik)	Besar <i>stress</i> (cN/ tex)
1	0	6
2	0.25	5.2
3	1	5.1
4	1.5	5
5	3.5	4.9

Bentuk pejabaran persamaan untuk rangkaian seri pada Gambar 3 dapat diselesaikan terlebih dahulu. Dikarenakan rangkaian seri, maka nilai *stress* konstan, sehingga $\sigma_e = \sigma_v = \sigma_2$ dan $\varepsilon_s = \varepsilon_e + \varepsilon_v$

$$\sum \left(\frac{ds}{dt} \right) = 0 \quad (43)$$

$$\frac{ds_s}{dt} = \frac{ds_e}{dt} + \frac{ds_v}{dt} \quad (44)$$

$$\frac{ds_s}{dt} = \frac{1}{E_2} \frac{d\sigma_e}{dt} + \frac{\sigma_v}{\eta} = \frac{1}{E_2} \frac{d\sigma_2}{dt} + \frac{\sigma_2}{\eta} \quad (45)$$

$$\frac{d\sigma_2}{dt} = E_2 \frac{ds_s}{dt} - E_2 \frac{\sigma_2}{\eta} \quad (46)$$

Untuk rangkaian paralel, maka nilai strain bernilai sama, sehingga $\varepsilon_s = \varepsilon_l = \varepsilon$

$$\sum \sigma = 0 \quad (47)$$

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (48)$$

Jika diturunkan sekali terhadap waktu, maka didapatkan

$$\sum \frac{d\sigma}{dt} = 0 \quad (49)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\sigma_1}{dt} + \frac{d\sigma_s}{dt} \quad (50)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = E_{eff} \frac{d\varepsilon_1}{dt} + E_2 \frac{d\varepsilon_s}{dt} - E_2 \frac{\sigma_2}{\eta} \quad (51)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = (E_{eff} + E_2) \frac{d\varepsilon}{dt} - E_2 \frac{\sigma_2}{\eta} \quad (52)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = (E_{eff} + E_2) \frac{d\varepsilon}{dt} - E_2 \frac{(\sigma - \sigma_1)}{\eta} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dt} &= (E_{eff} + E_2) \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{E_2}{\eta} \sigma \\ &\quad + \frac{E_2}{\eta} \sigma_1 \\ &= (E_{eff} + E_2) \frac{d\varepsilon}{dt} \\ &\quad - \frac{E_2}{\eta} \sigma \\ &\quad + \frac{E_2}{\eta} E_{eff} \varepsilon \end{aligned} \quad (54)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = (E_{eff} + E_2) \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{E_2}{\eta} \sigma + \frac{E_2 E_{eff}}{\eta} \varepsilon \quad (55)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_2}{\eta} \sigma = (E_{eff} + E_2) \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2 E_{eff}}{\eta} \varepsilon \quad (56)$$

$$\frac{\eta}{E_2} \frac{d\sigma}{dt} + \sigma = \frac{(E_{eff} + E_2) \eta}{E_2} \frac{d\varepsilon}{dt} + E_{eff} \varepsilon \quad (58)$$

Untuk nilai E_{eff} dan E_2 bernilai sama, maka

$$\frac{\eta}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \sigma = 2\eta \frac{d\varepsilon}{dt} + E\varepsilon \quad (59)$$

Hasil penyelesaian untuk kondisi *stress relaxation* atau *strain konstan* adalah

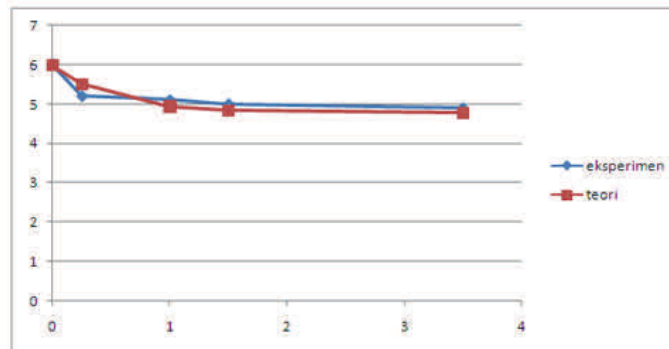
$$\frac{\eta}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \sigma = E\varepsilon \quad (60)$$

dengan besar *stress* adalah sebagai berikut

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E}{\eta} \sigma = \frac{E^2}{\eta} \varepsilon \quad (61)$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E}{\eta}t} + E\varepsilon \quad (62)$$

Menggunakan metode kurva fitting maka dapat dihasilkan kurva pemodelan persamaan (62) yang disajikan pada Gambar 4 dan Tabel 2



Gambar 4. kondisi *stress relaxation* persamaan (62) kurva *stress*(cN) terhadap waktu (10^3 detik)

Tabel 2 Metode kurva fitting persamaan (62)

t 10^3 s	σ eksperi- men	σ_0	$\frac{E}{\eta}$	$E\varepsilon$	σ teori	$(\sigma_{Teo}-\sigma_{exp})^2$	$(\sigma_{Avg}-\sigma_{exp})^2$
0	6	1.2	2	4.78	5.98	0.0004	0.5776
0.25	5.2	1.2	2	4.78	5.50783679	0.09476349	0.0016
1	5.1	1.2	2	4.78	4.94240234	0.024837022	0.0196
1.5	5	1.2	2	4.78	4.83974448	0.025681831	0.0576
3.5	4.9	1.2	2	4.78	4.78109426	0.014138575	0.1156
Rerata 5.24						0.159820919	0.772
						R^2	0.792978084

3. Hasil dan Pembahasan

Suatu sifat mekanik linear viskoelastik biasanya dimodelkan menggunakan suatu model fisika yaitu sebuah pegas yang mengikuti rumusan hukum Hook dari suatu material yang mengalami deformasi elastik dan juga sebuah dashpot yang mengikuti rumusan fluida Newton. Berdasarkan hasil penelitian ini didapatkan bahwa bentuk pemodelan menggunakan Persamaan (62) dapat digunakan untuk memprediksi kondisi *stress relaxation* suatu pemodelan serta prediksi kajian sifat *viscoelastic* pada bidang tekstil untuk mengetahui sifat material viscoelastik pada sebuah benang viz. 100% wool yang memiliki nomor benang 36 tex atau 36 g/km. pada penelitian ini didapatkan hasil nilai R^2 berkisar 0,79 yang memperlihatkan kedekatan antara hasil eksperimen terhadap prediksi teori. Sifat *stress relaxation* adalah suatu sifat penting untuk menjelaskan sifat dari suatu material benang viskoelastik. Model Maxwell dan model Voigt-Kelvin yang terdiri dari sebuah pegas tunggal dan sebuah dashpot yang disusun seri ataupun parallel memperlihatkan hasil yang kurang mewakili data eksperimen. Kelemahan dari kedua model ini adalah ketidakakurasian antara hasil prediksi (pemodelan) terhadap validasi eksperimen. Pada penelitian ini telah dikaji bahwa benang viz. 100% wool yang memiliki nomor benang 36 tex atau

36 g/km merupakan salah satu contoh material viskoelastik. Persamaan gerak untuk pemodelan pada Gambar 3 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\eta}{E_2} \frac{d\sigma}{dt} + \sigma = \frac{(E_{eff} + E_2)\eta}{E_2} \frac{d\varepsilon}{dt} + E_{eff} \varepsilon \quad (63)$$

$$\frac{\eta}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \sigma = 2\eta \frac{d\varepsilon}{dt} + E\varepsilon \quad (64)$$

Berdasarkan hasil pemodelan dan validasi eksperimen, maka didapatkan bahwa besar $\frac{E}{\eta} = 2$ dengan besar $E = 2\eta$. Persamaan (62) memperlihatkan bahwa besar stress terhadap waktu untuk gaya konstan akan memiliki hubungan yang berbanding terbalik dengan kurva eksponensial meluruh.

4. Kesimpulan

Benang tekstil, seperti benang wool tidak hanya memiliki sifat elastik atau sifat viskos, melainkan kombinasi kedua sifat tersebut. Sebagai contoh, jika sebuah tarikan atau *stress* konstan diberikan pada suatu benang, maka akan terdapat suatu regangan/*strain* yang singkat kemudian terjadi suatu regangan secara perlahan seperti pada penjabaran pemodelan material *viscoelastic* pada penelitian ini. Material benang wool yang memiliki sifat viskos dan elastik disebut sebagai material *viscoelastic*. Pada penelitian ini telah dibahas mengenai beberapa pemodelan material *viscoelastic* pada benang. Berdasarkan hasil penelitian ini, baik secara teori dan validasi eksperimen, didapatkan suatu kesesuaian antara hasil

prediksi teori dan validasi eksperimen untuk beberapa pemodelan.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada jurusan Teknik Tekstil Politeknik STTT Bandung dan juga Laboratorium Fisika Universitas Trisakti yang telah mendukung kegiatan penelitian ini sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

6. Referensi

1. Putra, V. G. V., Rosyid, M. F., & Maruto, G. (2017). New theoretical modeling for predicting yarn angle on OE yarn influenced by fibre movement on torus coordinate based on classical mechanics approach. *Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR)*, 42 (3), 359-363.
2. Putra, V. G. V., Rosyid, M. F., & Maruto, G. (2016). A Simulation Model of Twist Influenced by Fibre Movement Inside Yarn on Solenoid Coordinate. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 12(1), 405-412.
3. Hernawati, R. M., Putra, V. G. V., & Fauzi, I. (2015). Predicting the Actual Strength of Open-End Spun Yarn Using Mechanical Model. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 780, pp. 69-74). Trans Tech Publications.
4. Lawrence. (2003). *Fundamentals of Spun Yarn Technology*, CRC Press, New York.
5. Hearle, J. W., Grosberg, P., & Backer, S. (1969). Structural mechanics of fibers, yarns, and fabrics.
6. Hearle, J. W. S., & Gupta, B. S. (1965). Part III: A study of migration in staple fiber rayon yarn. *Textile Research Journal*, 35(9), 788-795.
7. Hearle, J. W. S., Gupta, B. S., & Merchant, V. B. (1965). Migration of fibers in yarns: Part I: Characterization and idealization of migration behavior. *Textile Research Journal*, 35(4), 329-334.
8. Chen, X. (Ed.). (2009). *Modelling and predicting textile behaviour*. Elsevier.
9. Putra, VGV. (2017). Penerapan Kalkulus Tensor apda Kasus Pemintalan Benang, CV. Mulia Jaya Publisher, Yogyakarta.
10. Deussen, H. (1993). *Rotor spinning technology*. Schlafhorst Incorporated.
11. Ward, I. M. (1983). Mechanical properties of solid polymers. 2nd Edn Wiley. New York.