

Benzetim Yönteminin Bilgisayar Yardımıyla Eriyikten PET Lifi Çekmeye Uygulanması*

Ragıp PEKDİKER

Kimya Y. Müh.
Sönmez Filament A.Ş., BURSA

Eriyikten lif çekme yöntemiyle polietilentereftalat (PET) bazı polyester liflerin üretimi, bazı araştırmacılar tarafından model kurma ve benzetim yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Bu yolla proses parametreleri ile lif özellikleri arasındaki bağıntılar elde edilmiştir. Bu bağıntılar bilgisayar yardımıyla kullanılarak istenen lif özelliklerini gerçekleştirecek şekilde proses parametrelerinin optimizasyonu yapılabilmektedir.

APPLICATION OF COMPUTER SIMULATION IN PET MELT SPINNING

Melt spinning of PET to convert it into filaments has been studied by a number of workers using various process modeling and simulation methods. By this way, the correlations between process parameters and properties of filaments were found. Optimization of process parameters to get required properties of filaments is possible by using these correlations by computer.

* DUTTA, A., "Application of Computer Simulation in PET Melt Spinning", *America's Textiles/Fiber World Edition*, 78-88, (April 1986)'dan çevrilmiştir.

1. GİRİŞ

Günümüzde dünya sentetik elyaf ve iplik üretiminin % 50'sini polyester (polietilentereftalat) lifleri oluşturmaktadır. Bu lifler eriyikten lif çekme yöntemine göre üretilmekte, sonra gerdirme ve sabitleme gibi işlemlerden geçirilmektedir. Kesikli elyaf ya da sonsuz iplik üretiminde ilk işlem olması nedeniyle gerek eriyikten lif çekim koşulları ve gerekse kullanılan polimerin yapısı nihai iplik ya da elyafın özelliklerini (denye, mukavemet, modül, kopma uzaması, boyanabilirlik, boy kısaltması, vb.) büyük ölçüde etkilemektedir.

Bu öneminden ötürü, eriyikten PET lifi çekme yöntemi pek çok bilimsel araştırmaya konu olagelmıştır. Bu çalışmalardan önemli kalitatif bulgular elde edilmiş ve Ziabicki tarafından özetlenmiştir.

Bu araştırmalarda, uygulamadaki önemi nedeniyle, belirli parametrelerle çalışma durumunda gerdirilmemiş ham ipliğin özelliklerini önceden tahmin ederek işletmeler için pahalıya malolan deneme-yanılma yöntemini ortadan kaldırmak amaçlanmıştır. Bunu gerçekleştirebilmek için ise eriyikten lif çekme işlemi sırasında birbirleriyle ilişkili olan aerodinamik, ısı iletimi, uzama deformasyonu ve molekülse yönelme bağıntılarını kantitatif olarak belirlemek gerekmektedir.

İlk olarak Kase ve Matsuo yapılan bu tür bir araştırma, sonraları Hamana et al, Prastaro ve Perrini, Yasuda et al, Gagon ve Denn tarafından adım adım geliştirilmiştir.

Eriyikten lif çekme işleminin benzetim yöntemiyle incelenmesi sonucunda polimer özellikleri, çalışma parametreleri ve gerdirilmemiş ham ipliğin özellikleri arasındaki karmaşık bağıntılar ortaya çıkarılabilmektedir. Ancak uygulamadaki potansiyel önemine karşın bu bağıntılardan proses optimizasyonu, proses analizi/problemler tanımlama - giderme ve ürün geliştirme gibi konularda yararlanılması üzerinde bugüne kadar fazla durulmamış olması oldukça şaşırtıcıdır.

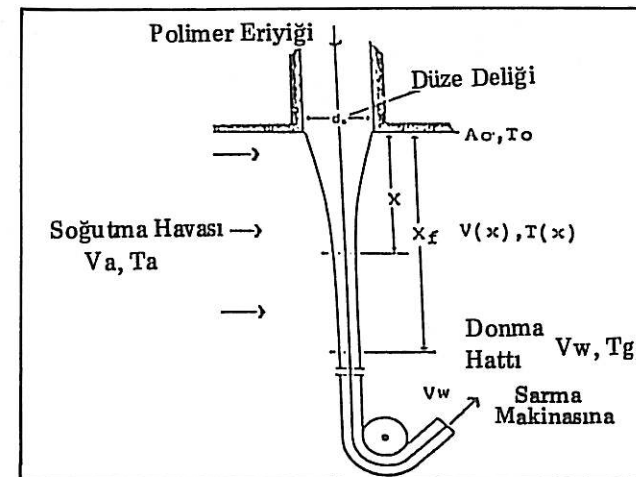
Yukarıda açıklananların ışığı altında Dutta ve Nadkarni eriyikten PET lifi çekimindeki kritik parametrelerin belirlenmesinde benzetim yöntemini kullanmayı düşünmüşlerdir. Yavaş kristallenme özelliğinden ötürü, polipropilen, polietilen, naylon-6, vb. gibi öteki polimerlerden farklı olarak, 3000 metre/dakika'nın altındaki orta hızlarda eriyikten lif çekim yöntemiyle elde edilen gerdirilmemiş ham PET ipliği genel olarak amorf yapıdadır. Bunun bir sonucu olarak bu iplikteki molekülse yönelmenin, sıcaklığın camlaşma noktasına eşit olduğu anki iplik gerilimine doğrudan bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır.

Bu sonucun deneysel olarak kanıtlanmasından sonra Dutta ve Nadkarni bu bağıntının, deneysel hata payı sınırları içinde, amorf yapıdaki lifler için geçerli tek bağıntı olduğunu ileri sürdüler. Çift kırılma indisisiyle ölçülebilen yönelme derecesi mukavemet, modül, kopma uzaması, boy kısaltması, vb. gibi gerdirilmemiş ham iplik özelliklerini belirlediğinden, çalışma parametreleri ile iplik gerilimi ve dolayısıyla yukarıdaki iplik özellikleri arasındaki bağıntıyı ortaya çıkarmak için bilgisayar yardımıyla benzetim yöntemi uygulandı. Aşağıda açıklanacağı gibi, izlenen bu benzetim yöntemiyle sistem donanımında önemli bir değişiklik yapmaksızın ya da iplik kalitesini düşürmeksizin üretim kapasitesini artırma olanağı sağlanabilmektedir.

Başlangıçtaki araştırmalarımız gerdirilmemiş ham iplik özelliklerinin hem polimer özelliklerine ve hem de çalışma koşullarına bağlı olduğunu göstermektedir. İlk adımda doğrudan optimizasyon yapabilecek verilere sahip olunmadığından, öncelikle değişik lif özellikleri veren değişik çalışma parametreleri kombinasyonları fiili üretim deneme çalışmalarıyla elde edilmelidir. İkinci adımda bilgisayar yardımıyla çalışma parametreleri ile lif özellikleri arasındaki bağıntı ortaya çıkarılmalıdır. Bu bağıntı yardımıyla istediğimiz belirli bir lif özelliğini sağlamak için çalışma parametrelerinin ne olması gerektiği önceden ve tatmin edici bir kesinlikle hesaplanabilecektir. Bu yazıda 3000 m/dak'nın altındaki sarım hızlarında çalışılan amorf lifler için bu metodoloji açıklanacaktır.

2. MODEL KURMA VE BENZETİM

Model kurmada temel yaklaşımımız, çapraz yönde püskürtülen havayla soğutulan tek bir lifte (Şekil 1) oluşan gerilimin analizi olacaktır.



Şekil 1. Polimer eriyiğinin düze deliğinden akıtılarak lif haline getirilmesi

Polimer eriyiğini Newtonian bir akışkan kabul ederek lif kesit alanı (A), hız (V), sıcaklık (T), gerilim (F), akış debisi (W), polimer eriyiği ve soğutma havası yoğunluğu (ρ, ρ_a), polimer eriyiği esneme ve kesme viskozitesi (η_e, η_o), ısı iletim katsayısı (h), hava sürüklenme katsayısı (σ_f) arasındaki bağıntılar aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilir:

$$W = \rho \cdot A \cdot V \dots\dots\dots (1)$$

$$dV/dX = F \cdot \rho \cdot V / W \cdot \eta_o \dots\dots\dots (2)$$

$$dT/dX = -4 \cdot h \cdot (T - T_a) / \rho \cdot C_p \cdot V \cdot d \dots\dots\dots (3)$$

$$dF/dX = \pi \cdot d \cdot \rho_a \cdot V^2 \cdot C_f / 2 + F \cdot \rho \cdot V / \eta_o - w \cdot g / V \dots\dots\dots (4)$$

Bu eşitlikler aşağıdaki koşullara uymalıdır: düze çıkışında

$$(X = X_o), T = T_o, V = V_o \dots\dots\dots (5a)$$

camlaşma noktasında

$$(X = X_f), T = T_f, V = V_f \dots\dots\dots (5b)$$

Bu eşitliklerde yer alan fiziksel özellikler sıcaklığa bağlıdır:

$$\sigma = p_1 + p_2 - T \dots\dots\dots (6)$$

$$C_p = p_3 + p_4 - T \dots\dots\dots (7)$$

Esneme viskozitesi için Trouton yasası geçerlidir:

$$\eta_o = 3 \cdot \eta_e \dots\dots\dots (8)$$

Kesme viskozitesi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\eta_e = A \cdot (IV)^{A_2} \cdot (\exp(C_2/T + 273) + C_3/T - T_o) \dots\dots\dots (9)$$

Isı iletim ve hava sürütlenme katsayıları da benzer şekilde ifade edilebilir:

$$h = A_n \cdot (V/A) \cdot (1 + (8 \cdot V_a/V)^2)^{C_n} \dots\dots\dots (10)$$

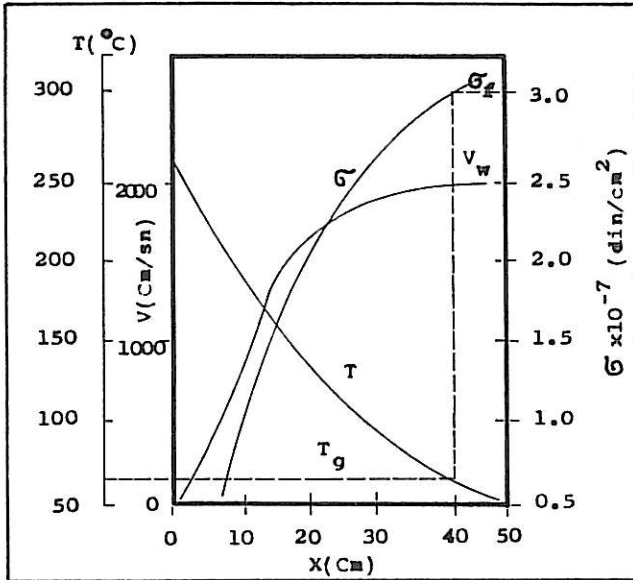
$$C_f = B_c \cdot (R_o)^{B_c} \dots\dots\dots (11)$$

Burada $R_o = V \cdot d / V_a \cdot d_r$.

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan $P_1, P_2, P_3, P_4, A_1, A_2, C_2, A_h, B_h, C_h, B_c, b_c$ parametreleri önceki yayınlardan sağlanabilir (14). Ayrıca $C_3 = 100$ ve $T_g = 67^\circ C$ olarak kabul edilmiştir.

Düzedden çıktıktan başlayarak lifteki değişimleri anlayabilmek için life ait değişkenlerin düzedden uzaklığa bağlı fonksiyonlarını bilmek gereklidir. Bu, (1) - (5) bağıntılarını, (6)-(11) bağıntılarını da göz önüne alarak çözmekle olanaklıdır. Diferansiyel eşitliklerin doğrusal olmayan karmaşık yapısını

dan ötürü basit analitik yöntemlerle çözüme ulaşamaz ve bu nedenle bilgisayarda nümerik çözüm yöntemi kullanmak gerekir. Şekil 2, bilgisayar yardımıyla bulunan değişken profillerini grafik biçimde göstermektedir. Daha da önemlisi, bilgisayar çözümünün camlaşma noktasındaki gerilmeyi de vermesidir. Lif gerilmesi camlaşma noktasındaki gerilmeyle orantılıdır, gerdirilmemiş ham ipliğin çift kırılma indisi de camlaşma noktasındaki gerilmeyle ilişkilidir. Bunlar deneysel olarak da kanıtlanmıştır.

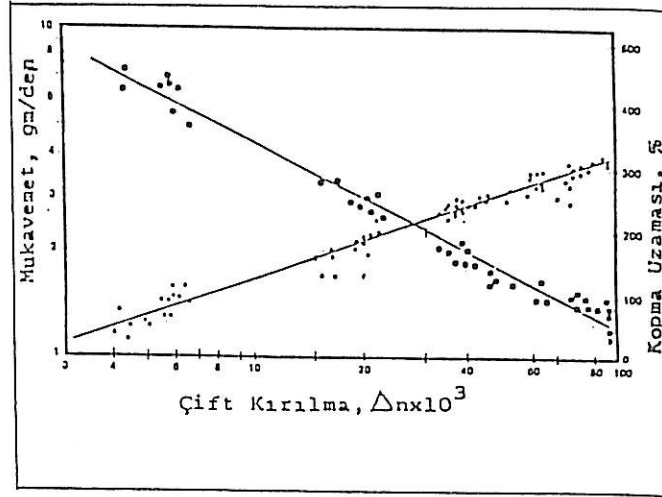


Şekil 2. Düzeden uzaklığa bağlı olarak lif sıcaklığının, hızının ve geriliminin değişimi

Şekil 3, gerdirilmemiş ham lif özelliklerinin (mukavemet, kopma uzaması, çekilebilirlik, vb.) çift kırılma indisi tarafından belirlendiğini göstermiştir. Çift kırılma ise donma noktasındaki gerilmeyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle bilgisayar çözümünden elde edilebilen donma noktası gerilimi gerdirilmemiş ham ipliğin özelliklerini önceden bilebilme olanağı sağlar. Donma noktası gerilimi polimerin yapısı (intrinsik viskozite) ve proses şartları (akış debisi, eriyik sıcaklığı, düze delik çapı, sarım hızı, soğutma havası hızı ve sıcaklığı) tarafından belirlendiğinden ötürü çalışma parametreleri gerdirilmemiş lif özelliklerini tahmin edilebilir.

3. σ_f (DONMA NOKTASI GERİLİMİ) İLE ÇALIŞMA PARAMETRELERİ ARASINDAKİ BAĞINTI

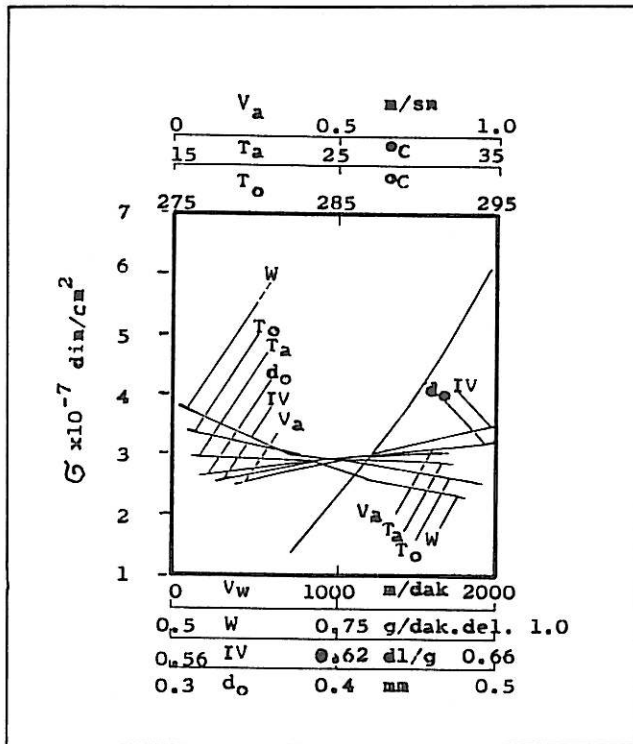
Sabit gerilim modeline göre yaptığımız önceki çalışmalarımız sonucunda σ_f 'in hem polimer özelliklerine ve hem de çalışma koşullarına bağlı



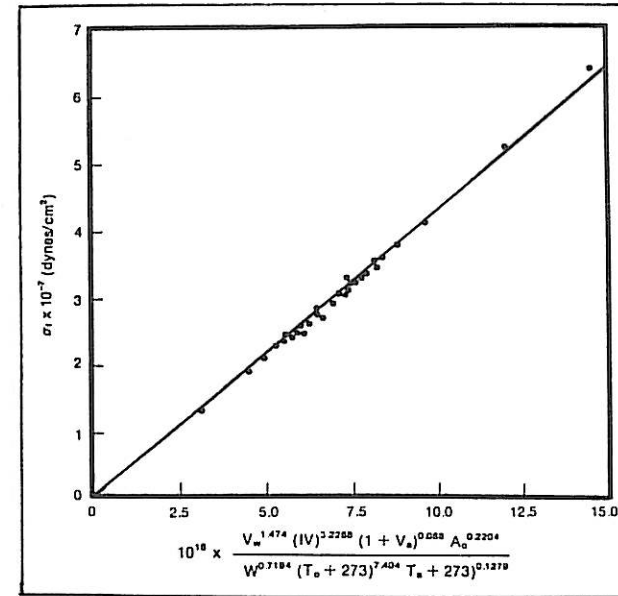
Şekil 3. Çift kırılma indisine bağlı olarak lif özelliklerinin değişimi

olduğunu görmüştük. Benzetim yönteminden yararlanarak değişik koşullardaki σ_f değerleri elde edilmiş ve şekil 4'te gösterilmiştir. Bu bilgi 35 ayrı çalışma parametre grubunun analiziyle sağlanmıştır. Şekil 4'te gösterilen bilgilerden aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir:

$$\sigma_f = 4,326 \times 10^{24} \times \frac{V_w^{1,474} \cdot (IV)^{3,2268} \cdot (1+V_a)^{0,088} \cdot A_0^{0,2204}}{W^{0,7194} \cdot (T_0 + 273)^{7,409} \cdot (T_a + 273)^{0,1279}} \text{ din/cm}^2 \quad (12)$$



Şekil 4. Çalışma parametreleri ve polimer özelliklerine bağlı olarak donma geriliminin değişimi



Şekil 5. Çalışma parametreleri ve polimer özelliklerine bağlı olarak donma geriliminin değişimi

Bu bağıntının geçerliliğini kanıtlamak için Şekil 4'teki grafiği oluşturur veri noktaları Şekil 5'te başka biçimde yeniden grafikleştirilmiştir. (12) bağıntısı ile gösterilen ampirik korelasyonun bilgisayar benzetimiyle tahmin edilen lif özelliklerine uyduğu bu şekilde açık olarak görülmektedir.

4. GERDİRİLMEMİŞ LİF ÖZELLİKLERİNİN HESAPLANMASI

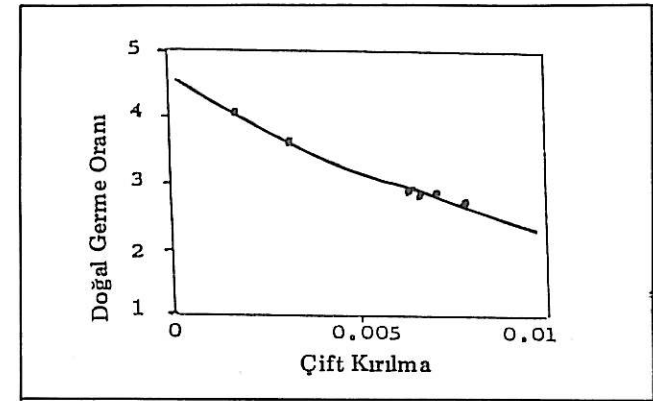
Çift kırılma indisi olarak ölçülen lif yönlenme derecesinin donma noktasındaki gerilimle bağıntılı olduğu yukarıda belirtilmişti. Bu bağıntı aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\Delta n = C \cdot \sigma_f^6 \quad (13)$$

Buradaki c ve b sabitleri sistemden sisteme değişir, bu nedenle her ayrı sistem için belirlenmeleri gerekir. Ayrıca (12) bağıntısındaki çarpan ve üssel katsayıların da sistemden sisteme değişeceğini ve her ayrı sistem için belirlenmesi gerektiğini ifade etmeliyiz. Bu şekilde, bilinen çalışma parametreleri (12) eşitliğinde kullanılarak önce donma noktası gerilimi bulunur. Ardından (13) eşitliğinden çift kırılma indisi hesaplanır. En son olarak Şekil 3'ün yardımıyla gerdirilmemiş ham lif özellikleri bulunur.

5. GERDİRİLMİŞ LİF ÖZELLİKLERİNİN HESAPLANMASI

Yukarıda, çekilmemiş lifin özelliklerinin ampirik eşitlikler yardımıyla hesaplanması açıklanmıştır. Bi-



Şekil 6. Doğal çekim oranının çift kırılma indisine bağlı olarak değişimi

linen çekilmemiş lif özelliklerinden çekilmiş lif özelliklerini hesaplamak mümkündür. Örneğin doğal gerdirme oranı (NDR) ile çift kırılma indisi arasında, Marshall ve Thompson'a göre aşağı gösterilen bir ilişki vardır:

$$NDR = 1 + 3,6693 \cdot \exp(-101,51 \cdot \Delta n) \quad (14)$$

Gerdirilmemiş lif denyesi (SD) ise:

$$SD = 9000 \cdot W / V_w \quad (15)$$

Gerdirilmiş lif denyesi (DD):

$$DD = SD / NDR \quad (16)$$

(16) eşitliğinden bulunan DD değeri gerçek değerden daha yüksek çıkar. Bunun nedeni fiili çekim oranının doğal çekim oranından % 10-20 daha yüksek olmasıdır. Bu nedenle uygulamada ölçülen denye hesaplanan denyeden biraz daha düşük çıkacaktır.

Bazı durumlarda ve belirli bir çift kırılma indisi aralığında doğal gerdirme oranı-çift kırılma ilişkisi aşağıda gösterildiği gibidir:

$$NDR = A / (\Delta n)^a \quad (17)$$

Burada A ve a pozitif sabitlerdir. Ne var ki bu eşitlik NDR için aşağıdaki sınır değerlerini vermez:

$$\Delta n \rightarrow 0, \quad NDR = \text{Sabit}$$

$$\Delta n \rightarrow \infty, \quad NDR = 1$$

Bu nedenle (17) eşitliği kullanıldığında (16) bağıntısından negatif DD değeri gibi gerçek dışı sonuçlar çıkar.

Denye dışında gerdirilmiş lif mukavemeti de kolayca hesaplanabilir:

Gerdirmiş lif muk.=Gerdirmemiş lif muk. x Doğal çekim oranı

$$\text{Gerdirmiş lif muk.} = \frac{\text{Kopmadaki yük}}{\text{Gerdirmiş lif denyesi}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\text{Gerdirmiş lif muk.} = \frac{\text{Gerdirmemiş lif denyesi} \times \text{Gerdirmemiş lif muk.}}{\text{Gerdirmiş lif denyesi}}$$

(18) eşitliğinden hesaplanan gerdirilmiş lif mukavemetinin sadece bir tahmin olduğunu vurgulamalıyız. Nitekim fiili mukavemet, bu hesaplanan değerden %10-20 dolaylarında daha yüksek çıkmaktadır.

6. AÇIKLAYICI ÖRNEKLER

Gerdirmemiş PET lifi özelliklerinin çalışma parametrelerinden yola çıkarak hesaplanması yukarıdaki bölümlerde anlatıldı. Bu yöntemin eriyikten PET lifi çekme işlemine uygulanmasına göstermek amacıyla aşağıda iki özgün ve açıklayıcı örnek verilecektir. Bu örneklerde (14) bağıntısındaki c ve b katsayılarının sırasıyla $5,9804 \times 10^9$ ve 0,7905 olduğu kabul edilecektir.

6.1. Örnek 1

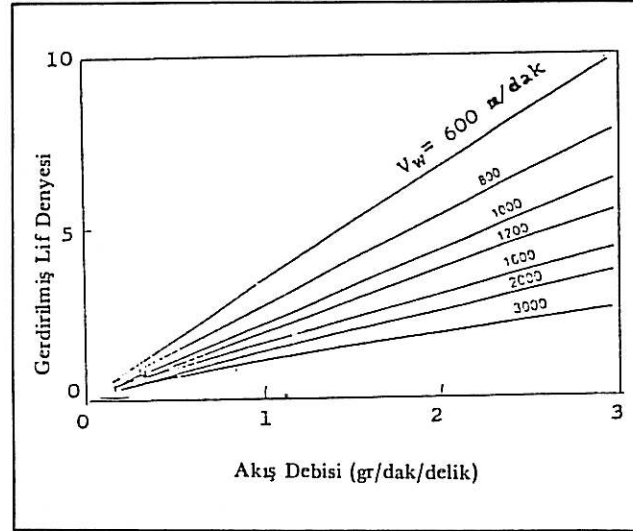
Eriyikten PET lifi çekme işleminde (düze sıcaklığı = 285°C, IV = 0,600, delik çapı = 0,03 mm., soğutma havası sıcaklığı = 20°C, soğutma havası hızı = 0,75 m/sn.) 2,0 denyelik gerilmiş lif üretmek isteniyor. Sarım hızı 1500 m/dak. ile sınırlı olduğuna göre çalışmada ulaşabilecek maksimum kapasite nedir?

(12)-(16) bağıntıları uygun şekilde birleştirildiğinde gerilmiş lif denyesi için aşağıdaki eşitlik bulunur:

$$DD = \frac{9000 \cdot W}{V_w \cdot [1 + 3,6693 \cdot \exp(-1,0378 \cdot 10^{-4} \cdot V_w^{1,1652} \cdot W^{-0,5687})]} \quad \dots\dots\dots (19)$$

(19) eşitliğinden görüleceği gibi istenen çekilmiş lif denyesini tutturabilmek için sarım hızı ve debinin ne olması gerektiği basit analitik yöntemle bulunamaz, ancak bilgisayar yardımıyla hesaplanabilir. Elde hazır bir referans olması için (19) eşitliğinden yararlanarak elde edilen grafik Şekil 7'de gösterilmiştir.

Yukarıdaki problemde verilen koşullarda 1500 m/dak. sarım hızında 2,0 denyelik gerdirilmiş lif üretirkenki debi (kapasite) (18) eşitliği yardımıyla 1,15 gr/dak/delik olarak bulunur.



Şekil 7. Değişik sarım hızlarında akış debisine bağlı olarak gerilmiş lif denyesinin değişimi

6.2. Örnek 2

Yine eriyikten PET lifi çekme işleminde maksimum sarım hızı ve debi sırasıyla 1400 ve 0,8 dir. IV=0,600 ve düze delik çapı=0,03 olduğuna göre gerdirilmiş lif denyesini 1,5 tutturabilmek için öteki çalışma parametreleri ne olmalıdır?

(15) eşitliğinden $SD = (9000) \cdot (0,8)^0 \cdot (1400) = 5,14$ denye

(16) eşitliğinden $NDR = (5,14)^0 \cdot (1,5) = 3,43$ denye

(14) eşitliğinden $\Delta \bar{n}$ bulunur ve (13) eşitliğinde kullanılırsa $\sigma f = 2,3965 \cdot 10^7$ bulunur. Bu değer (12) eşitliğinde yerine konur ve eşitlik bilgisayar yardımıyla çözlürse:

$T_0 = 295^\circ\text{C}$, $V_a = 0,6$ m/sn. ve $T_a = 30^\circ\text{C}$ bulunur.

Bilgisayar destekli benzetim yöntemi daha bir çok işletme sorunlarının çözümünde yukarıdaki örneklerde görüldüğü gibi kullanılabilir. Bu yöntemin işletme denemelerini ortadan kaldırdığı kuşkusuz söylenemez. Ancak istenen lif özellikleri için uygun başlangıç parametreleri verdiğinden bu denemelerin sayısını azaltır.

Buraya kadar açıkladığımız benzetim yöntemi, başlangıçta belirttiğimiz gibi tek bir lifi göz önüne alan bir modele dayanmaktadır. Uygulamada ise onlarca, yüzlerce ve hatta binlerce lif aynı düzenin deliklerinden aynı anda ve yanyana akmaktadır. Bu sistemlerin konfigürasyonuna bağlı olarak liflerin soğumaları liften life farklılık göstermekte ve lif özellikleri buna bağlı olarak liften life belirli sınırlar içinde farklı olmaktadır. Bu durumun analizi ise daha karmaşık bir modeli gerektiren ayrı bir çalışma konusudur.

KAYNAKÇA

- DAVIS, G.W., EVERAGE, A.E., and TALBOT, J.R., Polyester Fibers: High Speed Melt Spinning, Fiber Producer, 22-28 (Feb. 1984)
- DENN, M.M., Spinning: Where are we and where are we going? Fiber Producer, p.20, (Aug. 1983)
- DUTTA, A., and NADKARNI, V.M., Identifying Critical Process Variables in PET Melt Spinning, Textile Res. J., 54, 35-42 (1984)
- GAGON, D.K., and DENN, M.M., Computer Simulation of Steady Polymer Melt Spinning, Polym. Eng. Sci, 21, 844-853 (1981)
- GEORGE, H.H., Model of Steady State Melt Spinning at Intermediate Takeup Speeds, Polym. Eng. Sci, 22, 292-299 (1982)
- GEORGE, H.H., HOLT, A., and BUCKLEY, A., A Study of Structural Development in High Speed Spinning of Poly(ethylene terephthalate), Polym. Eng. Sci, 23, 95-99 (1983)
- HAMANA, I., MATSUI, M., and KATO, S., Filament Formation in Melt Spinning, Melland Textilber., 50 382-388 and 499-503 (1969)
- KASE, S., and MATSUO, T., Studies on Melt Spinning I, J. Polym. Sci, A3, 2541-2544 (1965)
- KASE, S., and MATSUO, T., Studies on Melt Spinning II, J. Polym. Sci, 11, 251-287 (1967)
- MARHSALL, I., and THOMPSON, A.B., The Cold Drawing of High Polymers, Proc. Roy. Soc. London A221, 541-557(1954)
- HDASTARO, A., and PARRINI, P., A Mathematical Model for Spinning of Molten Polymers, Textile Res. J., 45, 118-127 (1975)
- SHENOY, A.V., and NADKARNI, V.M., Use of PET Melt Spinning Simulation for Process Optimization, Textile Res. J., 54, 778-781(1984)
- YASUDA, H., ISHIHARA, H., and YANEGAWA, H., Computer Simulation of Melt Spinning and Its Application to the Actual Process. Sen-I-Gakkaishi, 34, 20-27(1978)
- YASUDA, H., SUGIYAMA, M., and YANAGAWA, H., Simulation of the Orientation and its Distribution across a filament Using the Steady State Single Filament Melt Spinning Theory, Sen-I-Gakkaishi, 35, 370-375(1979)