

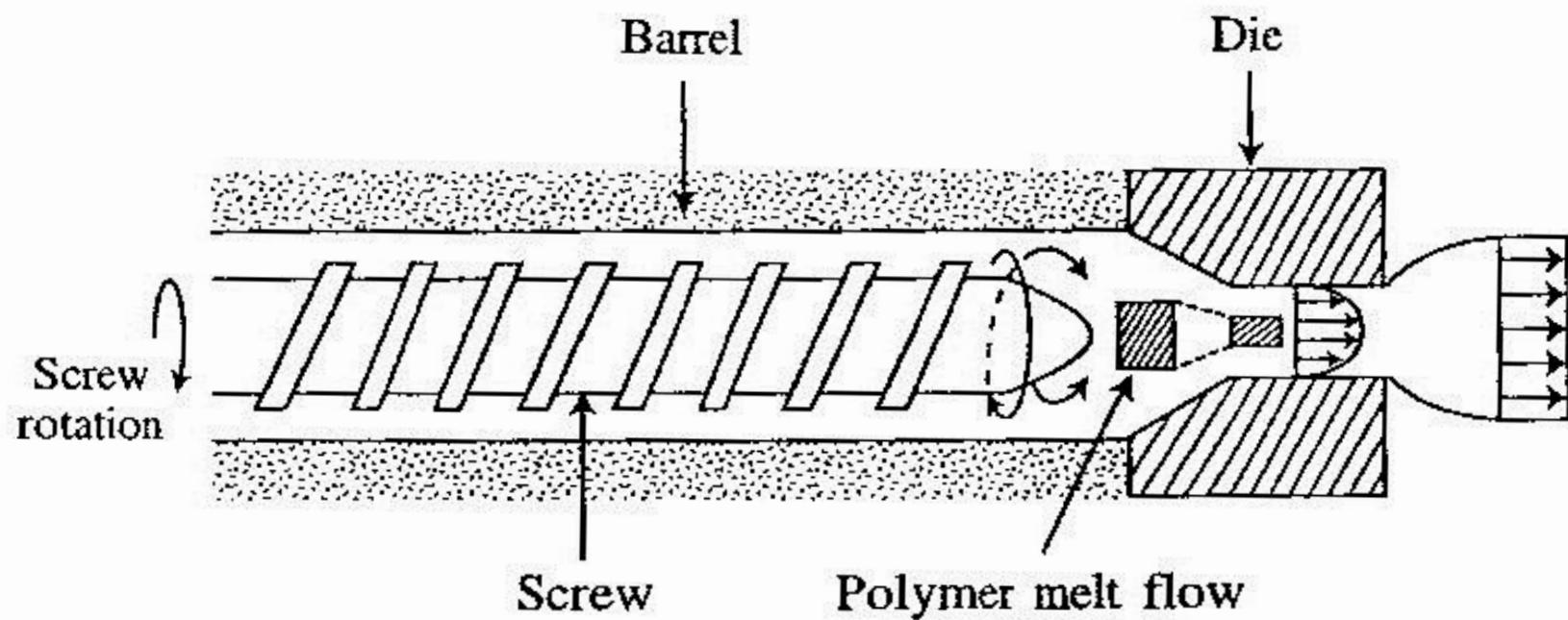


# **MTT 651: Polymer Rheology (Introduction to elongational flow)**

*Prof. Dr. Narongrit Sombatsompop*

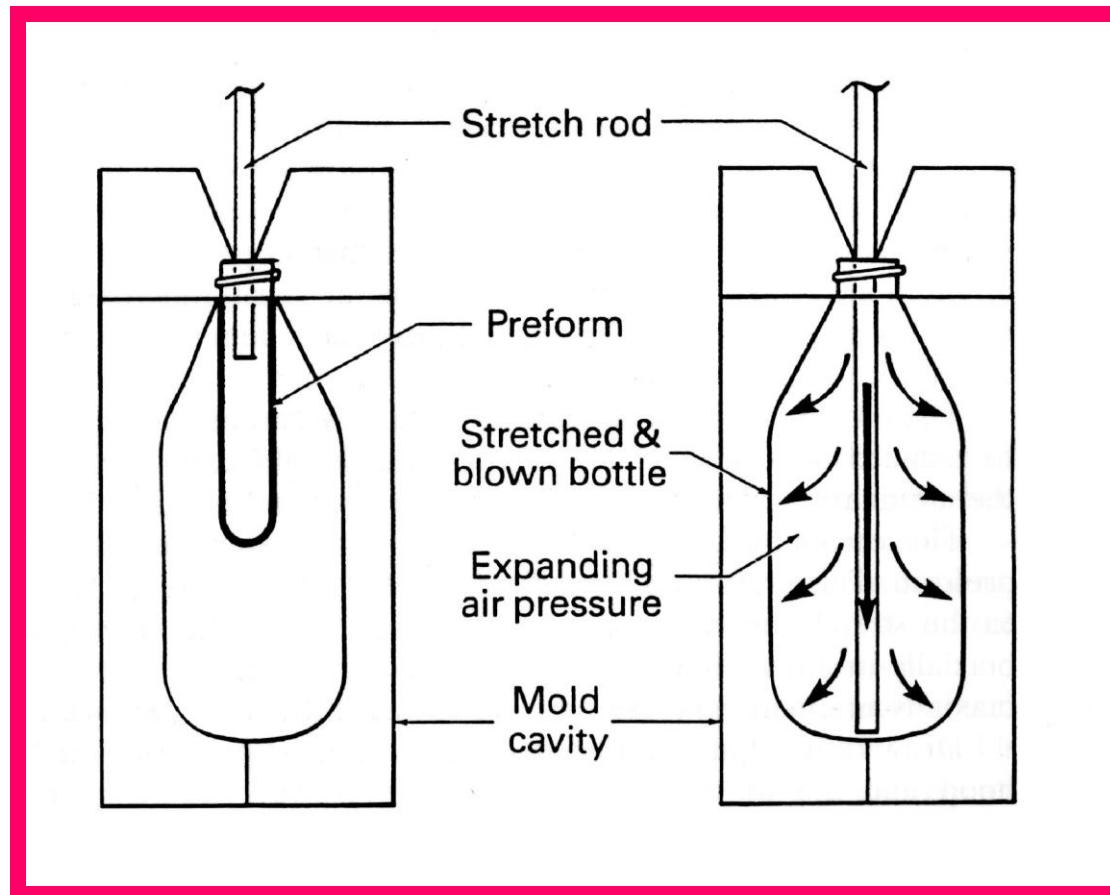
*Polymer PROcessing and Flow (P-PROF) Group*

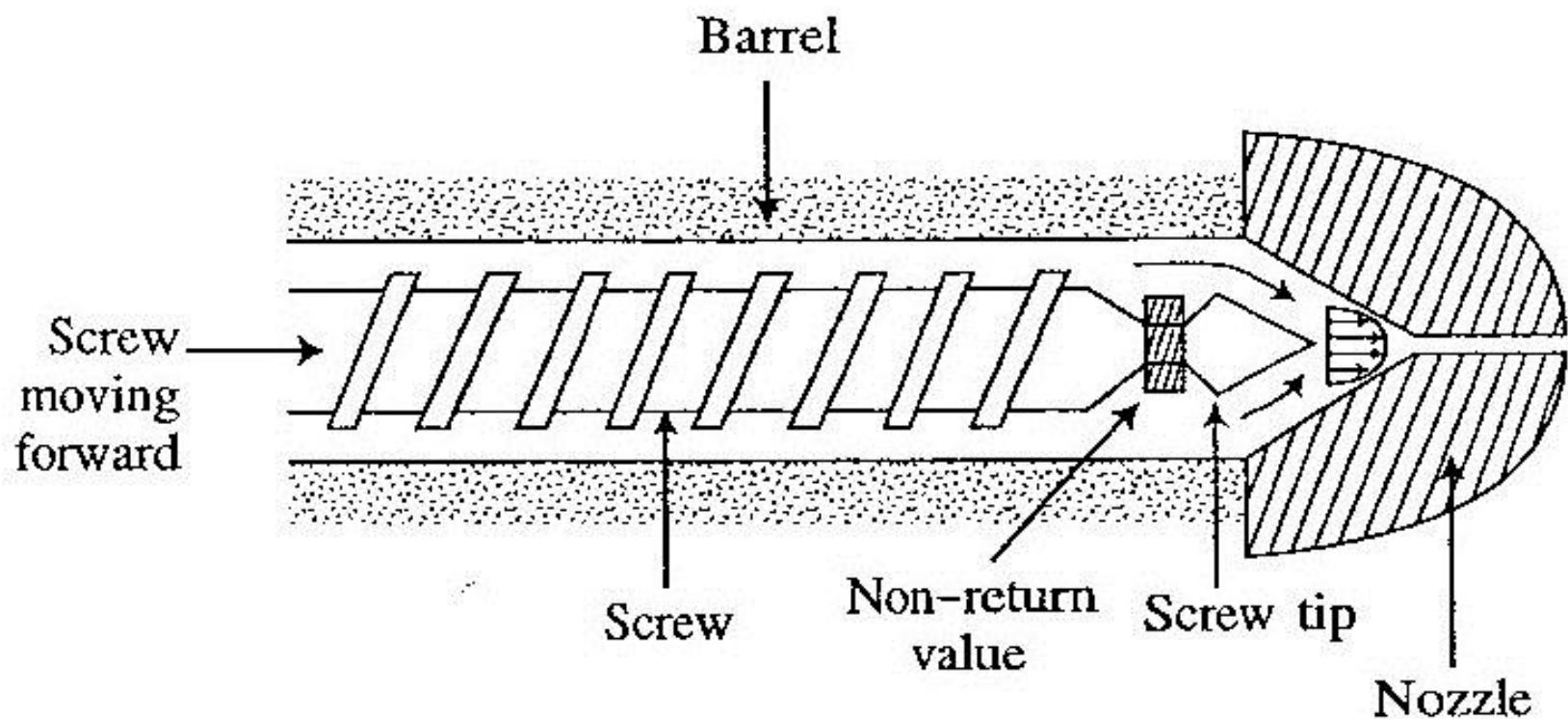
*King Mongkut's University of Technology Thonburi*



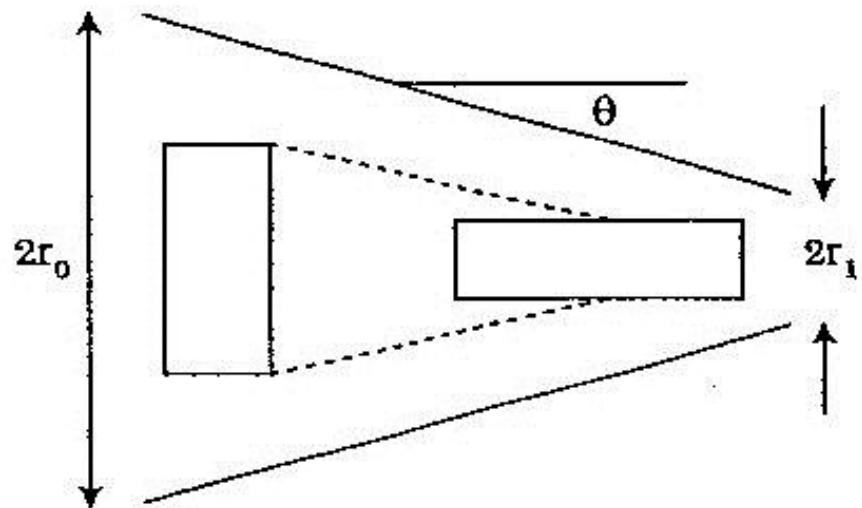
รูป 6.3 การไถลของพอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปในเครื่องอัดรีด  
[Sombatsompob; 2000]

# Extrusion Blow Moulding

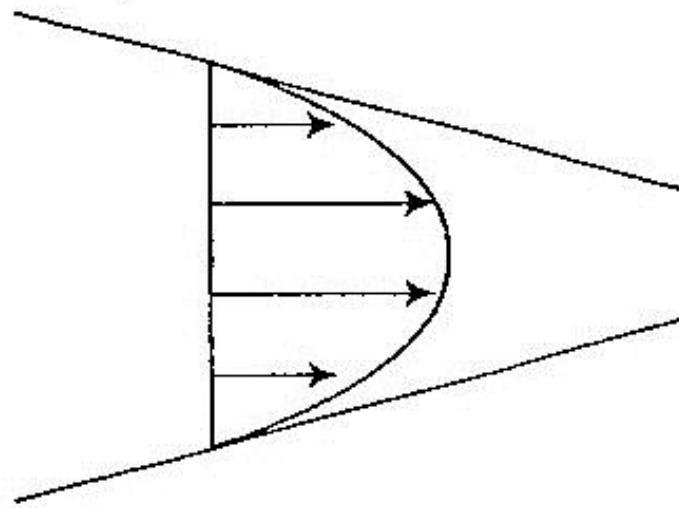




รูป 6.4 การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณหัวฉีดในเครื่องฉีดพอลิเมอร์  
[Sombatsompob; 2000]



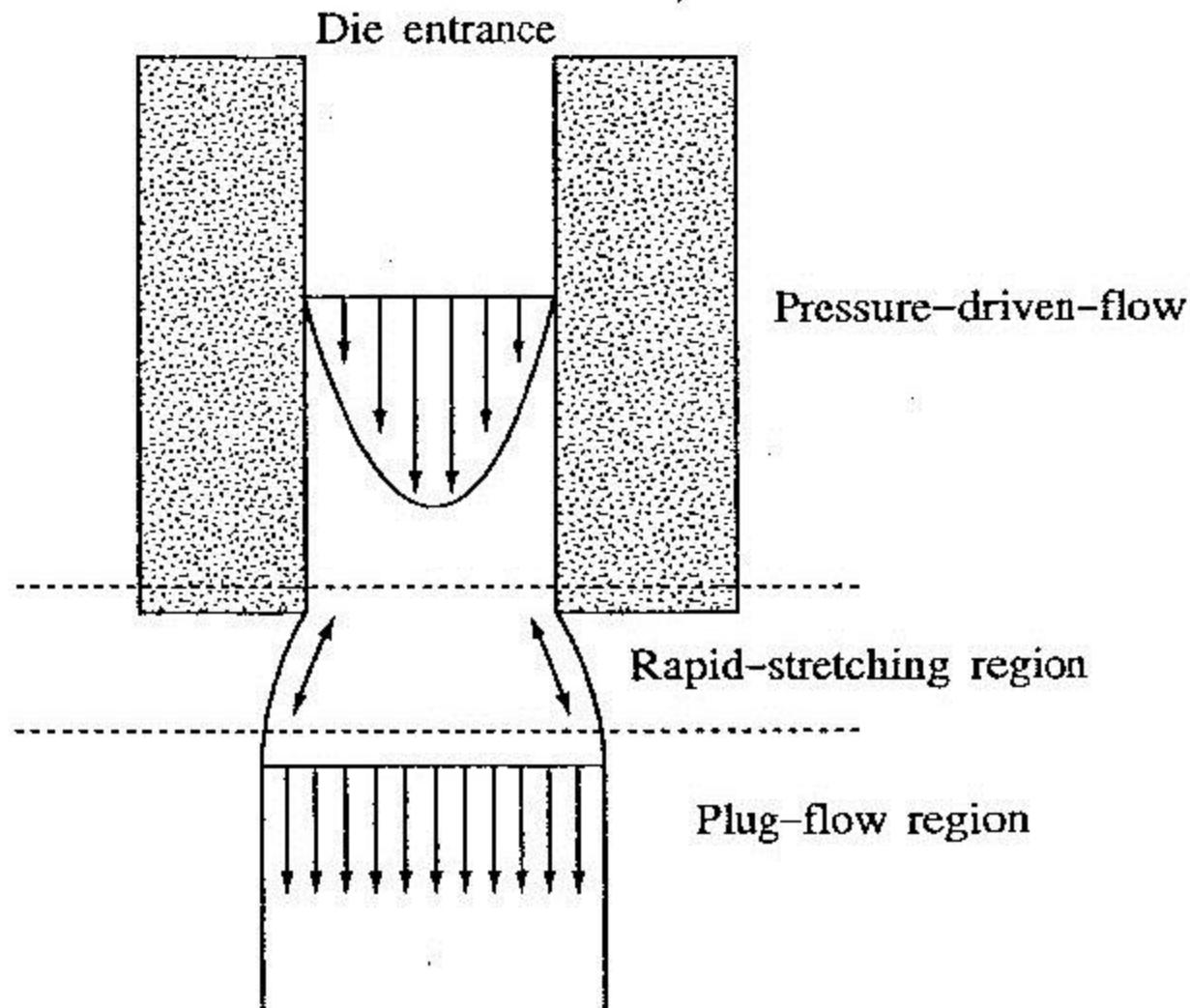
(a) Extensional flow



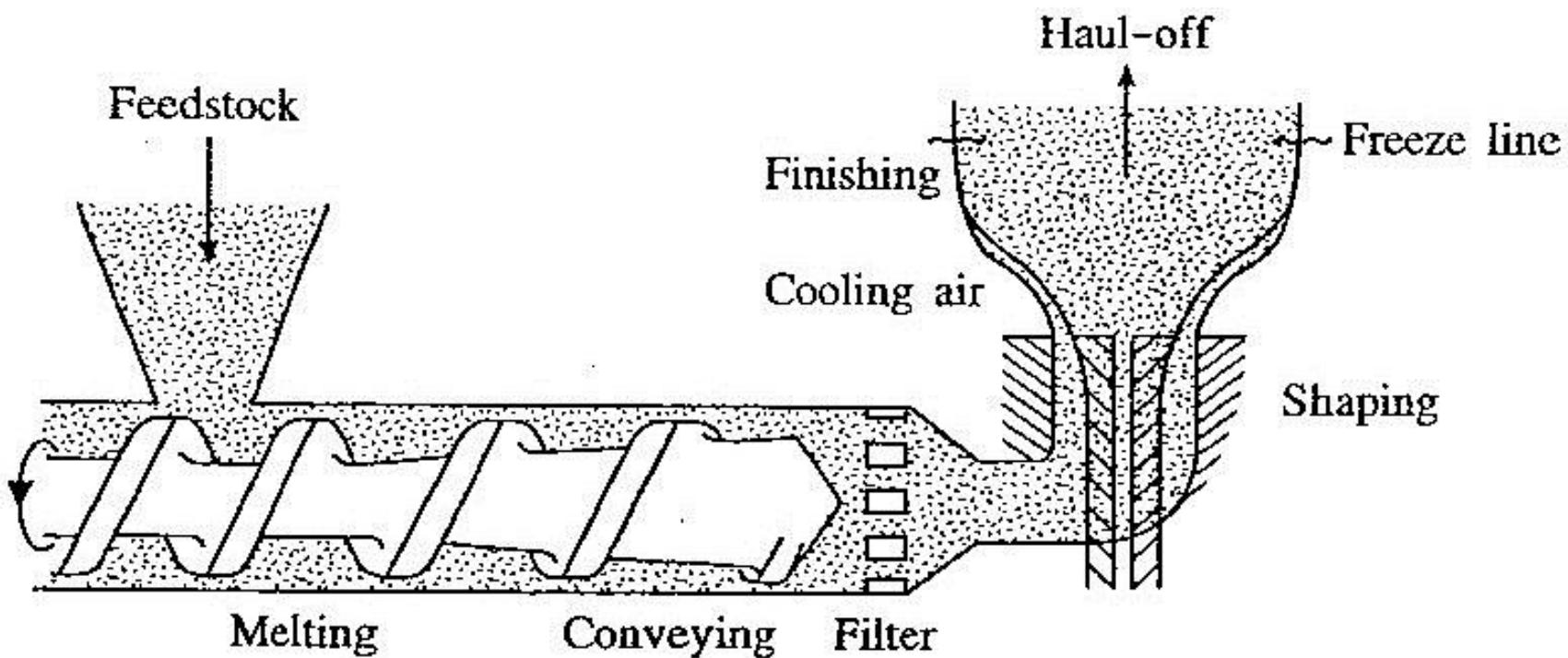
(b) Shear flow

รูป 6.5 ลักษณะการเดินรูปแบบดึงและแบบเนื้อนในหัวขันรูปที่มีพื้นเอียง

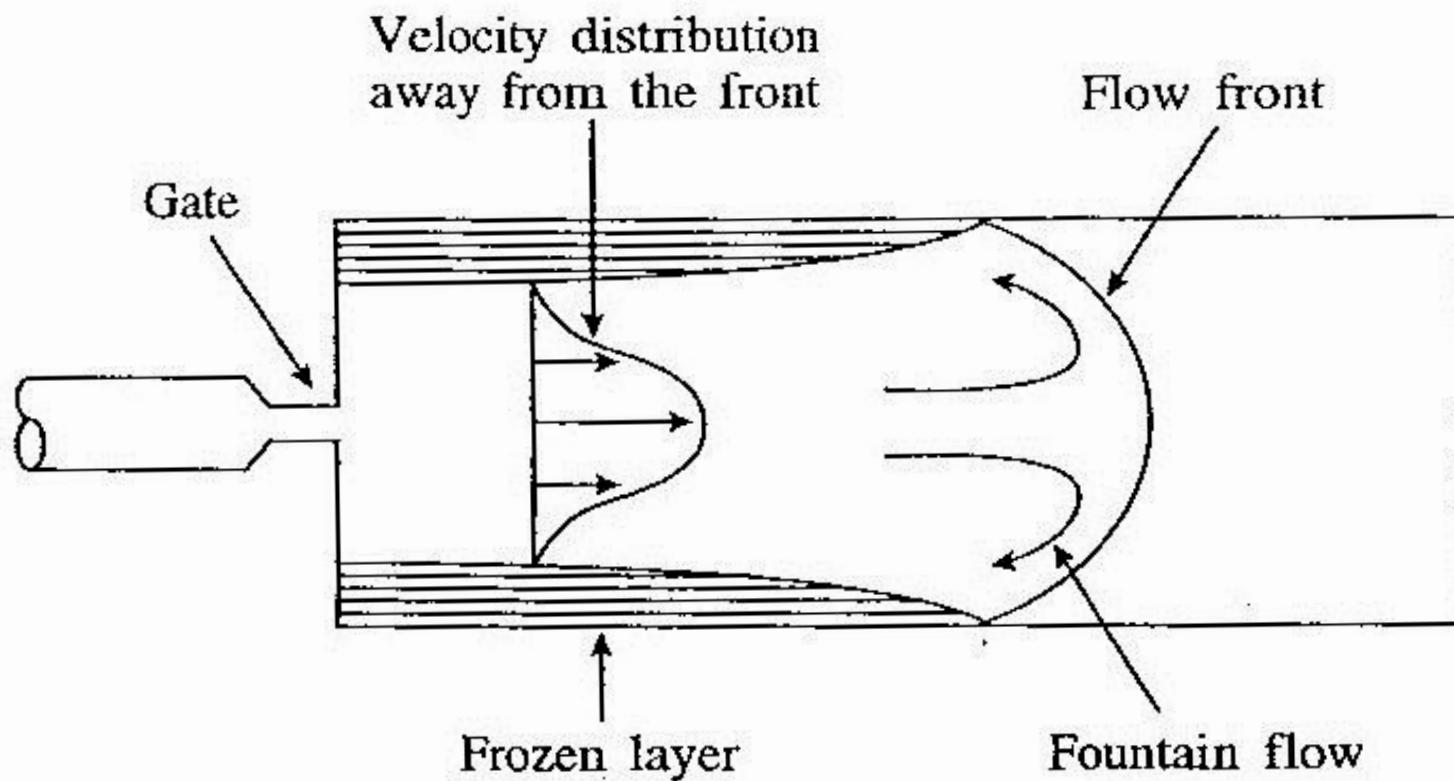
(a)  $\theta > 10^\circ$  และ (b)  $\theta < 10^\circ$  [Cogswell; 1981]



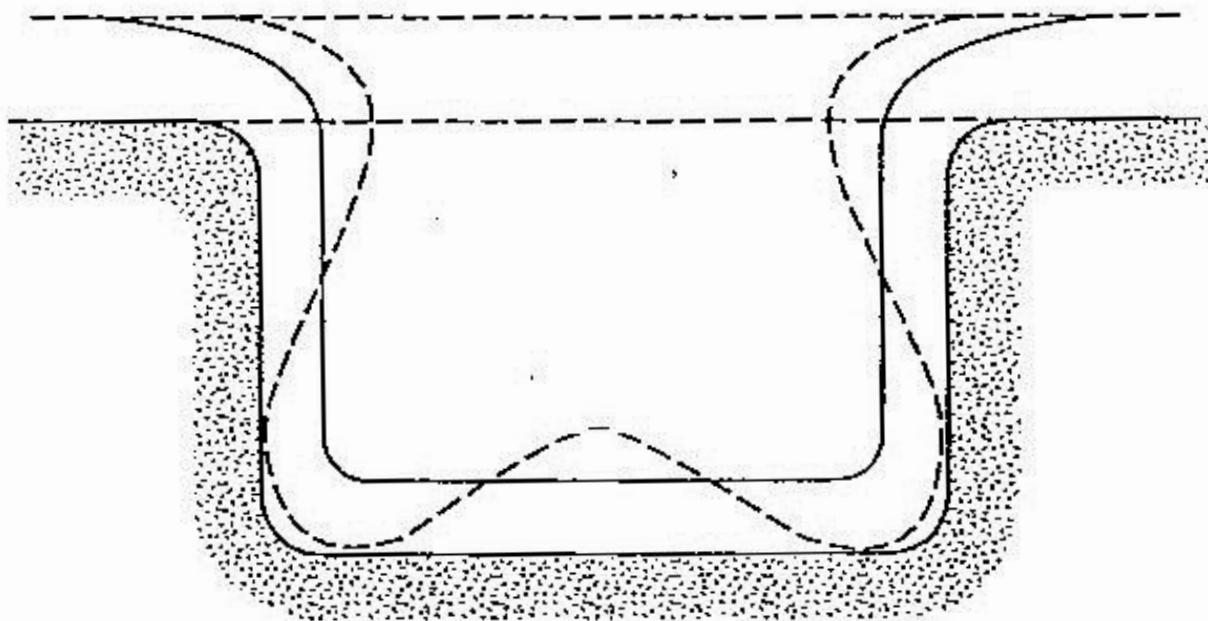
รูป 6.6 การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวออกจากหัวขึ้นรูป [Leblanc; 1986]



รูป 6.7 ลักษณะการเสียรูปแบบขั้นดึงในการอัครีดแบบเป้าฟิล์ม [Cogswell; 1981]



รูป 6.8 ลักษณะการเสียรูปแบบชีดลีนในแม่พิมพ์ฉีดพอลิเมอร์ [Dealy & Wissbrun; 1990]

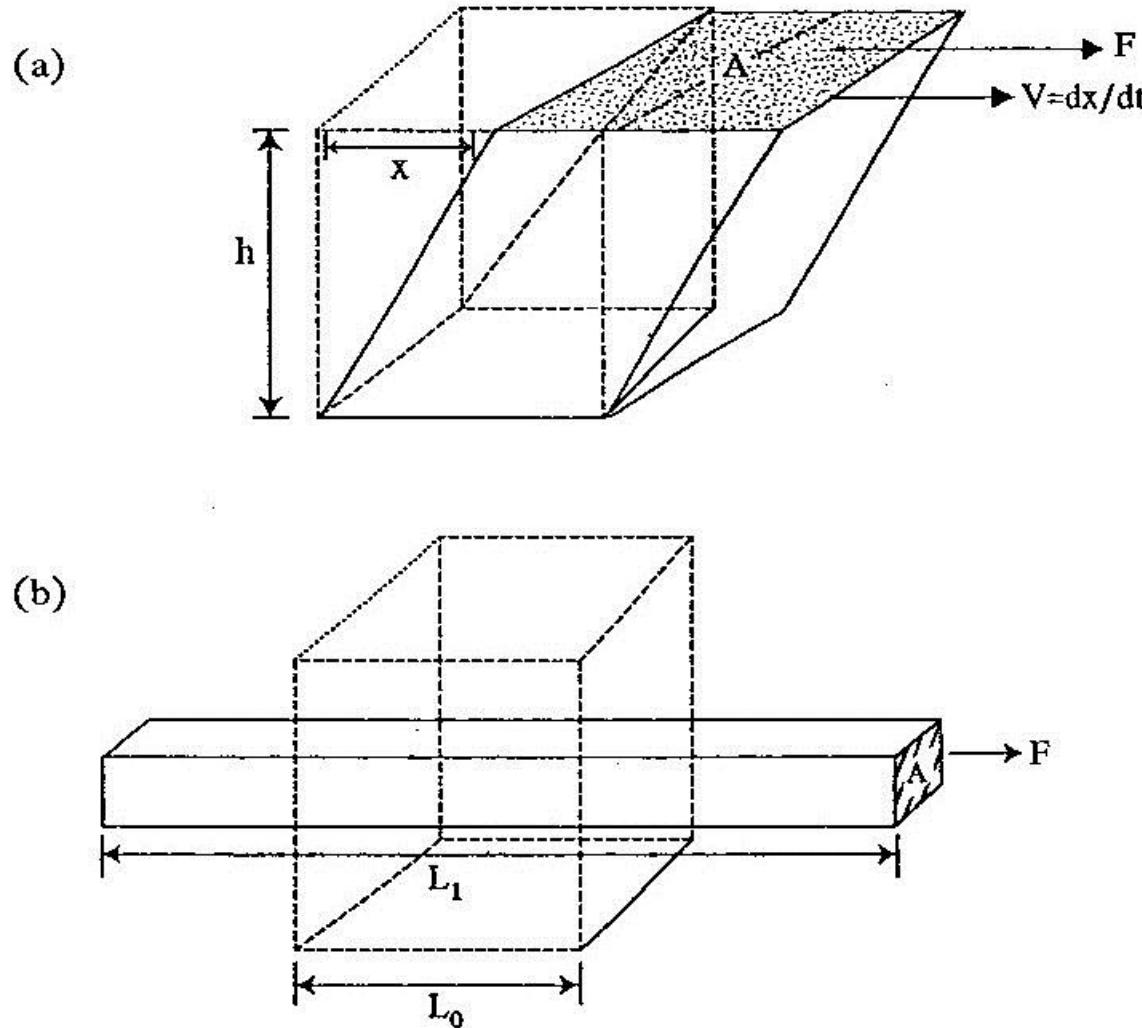


รูป 6.9 ลักษณะการเสียรูปแบบยีดดิ้งในกระบวนการขึ้นรูปด้วยสัญญาการ [Cogswell; 1981]

# Elongation Flow

- Applications in melt spinning, injection and extrusion blow mouldings, blown film, fiber spinning, vacuum forming and extrusion coatings.
- The tensile viscosity ( $\lambda$ ) of polymer melts was first determined by Trouton.
- It is found that the tensile viscosity of a fluid is three time its shear viscosity ( $\eta$ ). Look at the below:
  - A polymer melt cannot be moulding by pouring it into the mould.
  - The bobble does not easily burst in blown film extrusion
- Tensile viscosity ( $\lambda$ ) is the ratio of tensile stress ( $\sigma$ ) to tensile strain rate ( $\varepsilon$ ).

# Elongation Flow



รูป 6.1 ลักษณะการเสียรูปพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไถ (a) แบบเฉือน และ (b) แบบยืดดึง [Agassant et al; 1991, Meissner; 1987]

# Elongation and shear viscosities

- The tensile viscosity of a fluid is usually three time its shear viscosity (at low strain rate  $< 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )

$$\lambda \approx 3\eta$$

$\lambda$  = elongational viscosity

$\eta$  = shear viscosity

# Elongation flow component ( $D_e$ )

Three components of deformation may be considered in tension. These include;

- Bond stretching - Hookean -  $D_s$  - Modulus
- Chain uncoiling - Rubbery -  $D_u$  - Elastic
- Chain slippage - Flowable -  $D_c$  Viscous

$$D_e = D_u + D_c + D_s$$

$D_s > D_u + D_c$  (*increased viscosity*)

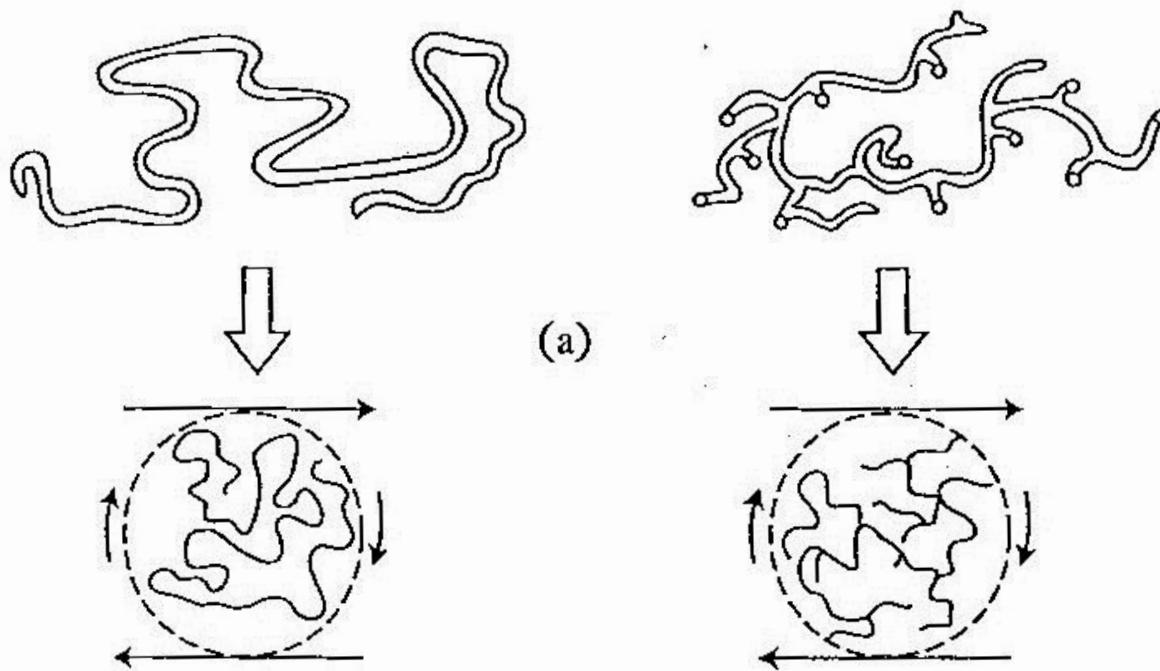
$D_u + D_c > D_s$  (*decreased viscosity*)

$D_e$  = ลักษณะการเสียรูปแบบดึง

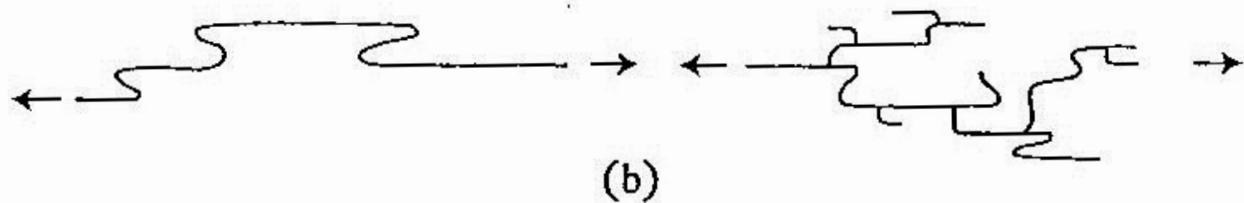
$D_u$  = กระบวนการคลายตัวของโมเลกุล (uncoiling)

$D_c$  = กระบวนการเคลื่อนที่ผ่านสายโมลคูลอื่นๆ (chain slippage)

$D_s$  = กระบวนการยืดตัวของโมลคูล (bond stretching)



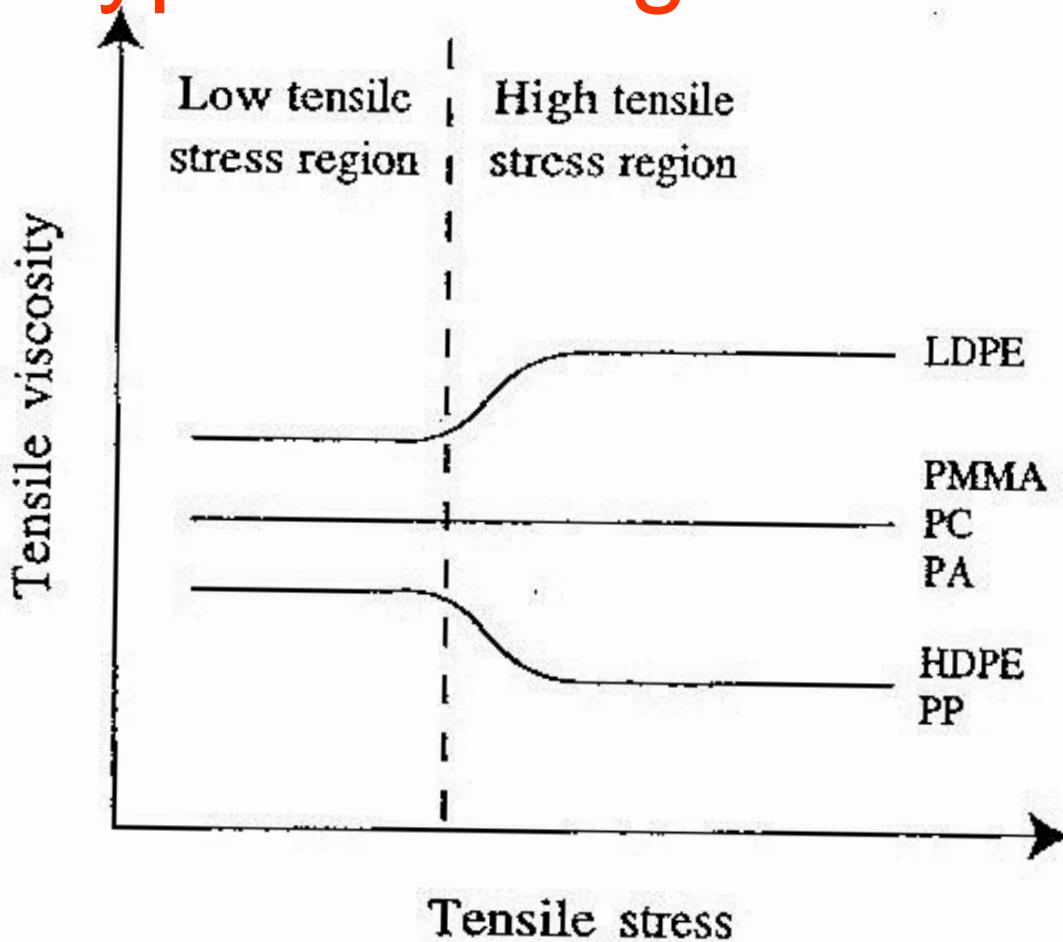
(a)



(b)

รูป 6.2 ลักษณะการเสียรูปกับการเคลื่อนที่ของสายโซ่โนเกลูลของพอลิเมอร์หลอมเหลว  
ขณะไนต์ (a) แบบเฉือน และ (b) แบบยีดดิง [Cogswell; 1981]

# Type of Elongation Flow



รูป 6.10 ประเกทของรูปแบบสมบัติการไหลที่เกิดจากแรงยืด [Brydson; 1981]

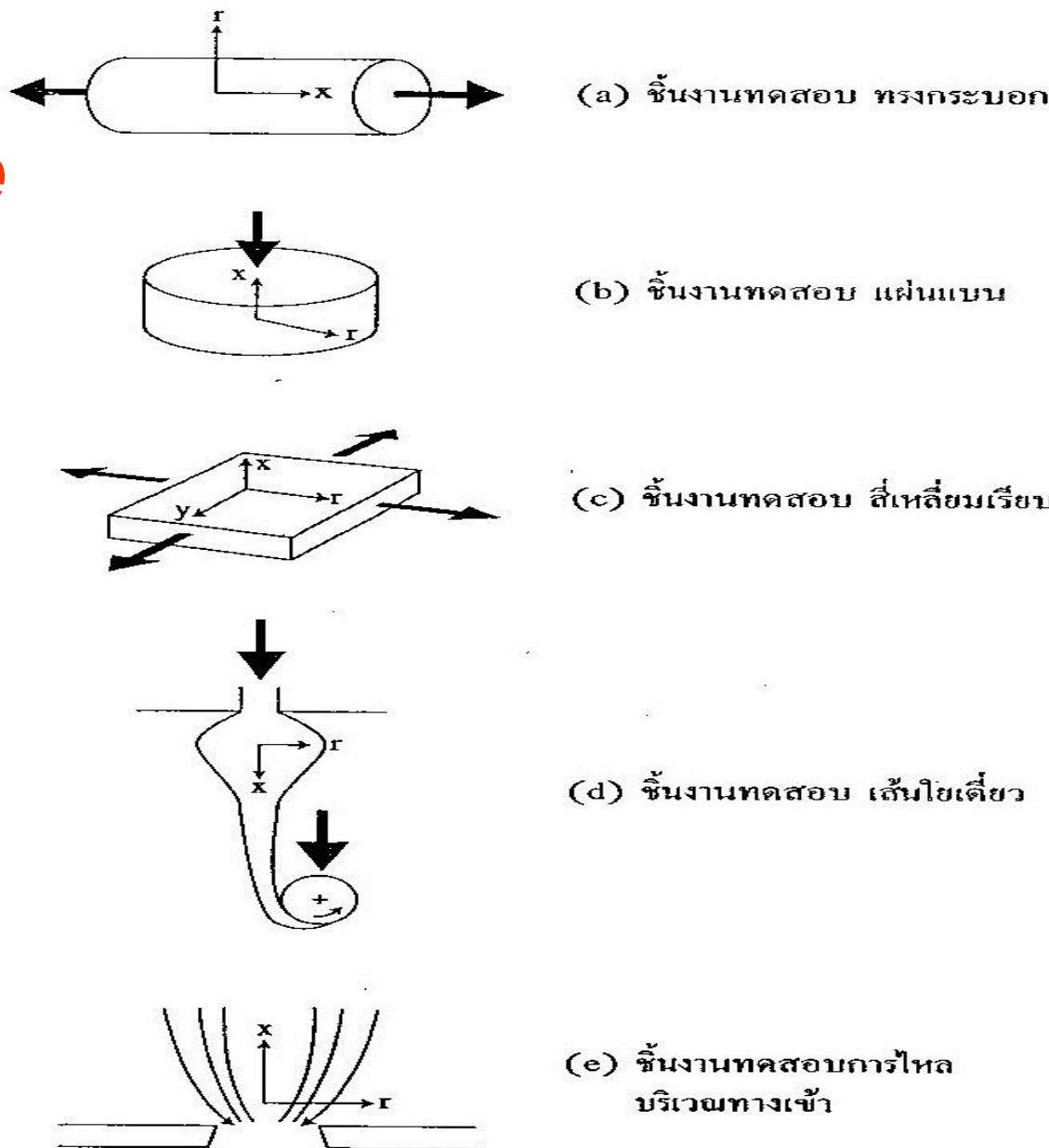
# Type of Elongation Flow

- Troutonian is usually the term used to refer to the elongational deformation of fluids.
- Troutonian is equivalent to the Newtonain in shear flow and, non-Troutonian behaviour is analogous to non-Newtonian one.
- Non-Troutonian can be subdivided into tension stiffening and tension thinning. In tension stiffening non-Troutonian fluids, the tensile viscosity increases with strain rate whereas in tension thinning fluids, the viscosity decreases with the rate of strain.
- Most polymer melts respond to the Troutonian. Branched LDPE and cis 1,4-polyisoprene at the low temperature (~80 oC) exhibits tension stiffening. Linear polyolefins such as HDPE, poly(4-methyl pentene-1) and PP are tension thinning.

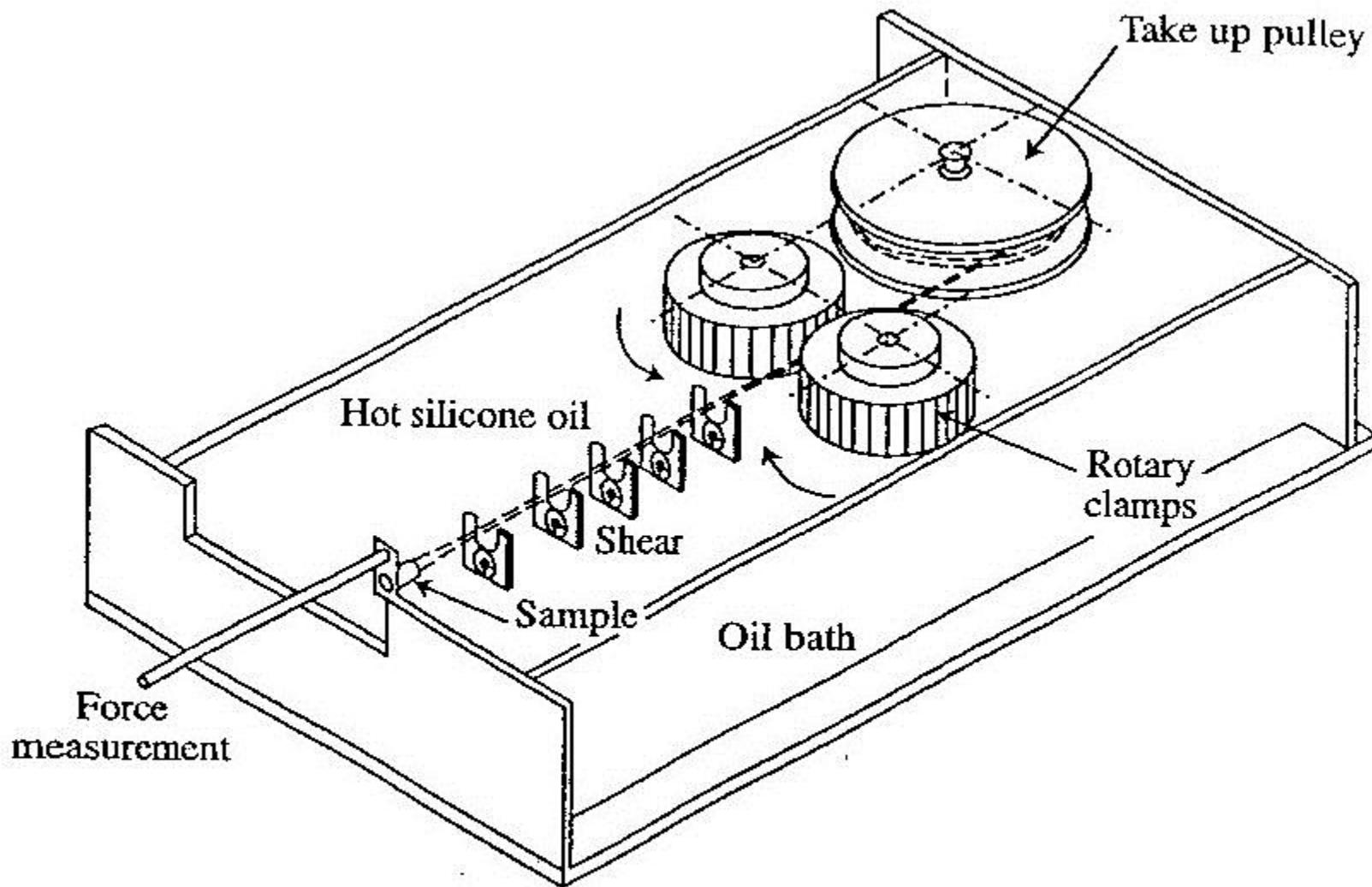
# Tensile test

- This method is known as a constant stress test. A polymer rod is clamped at each end and immersed in an oil bath, one clamp being fixed while the other is allowed to move in the opposite direction to the first.
- The stress is kept at a constant using the cam, while the cross-sectional area of the extending specimen decreases. The results are in the form of a plot between extension and time. **By extrapolating the curve back to zero time the elastic component can be determined.**
- This method has been found to face many difficulties such as clamping the test specimen and limitation of material viscosity and testing time.

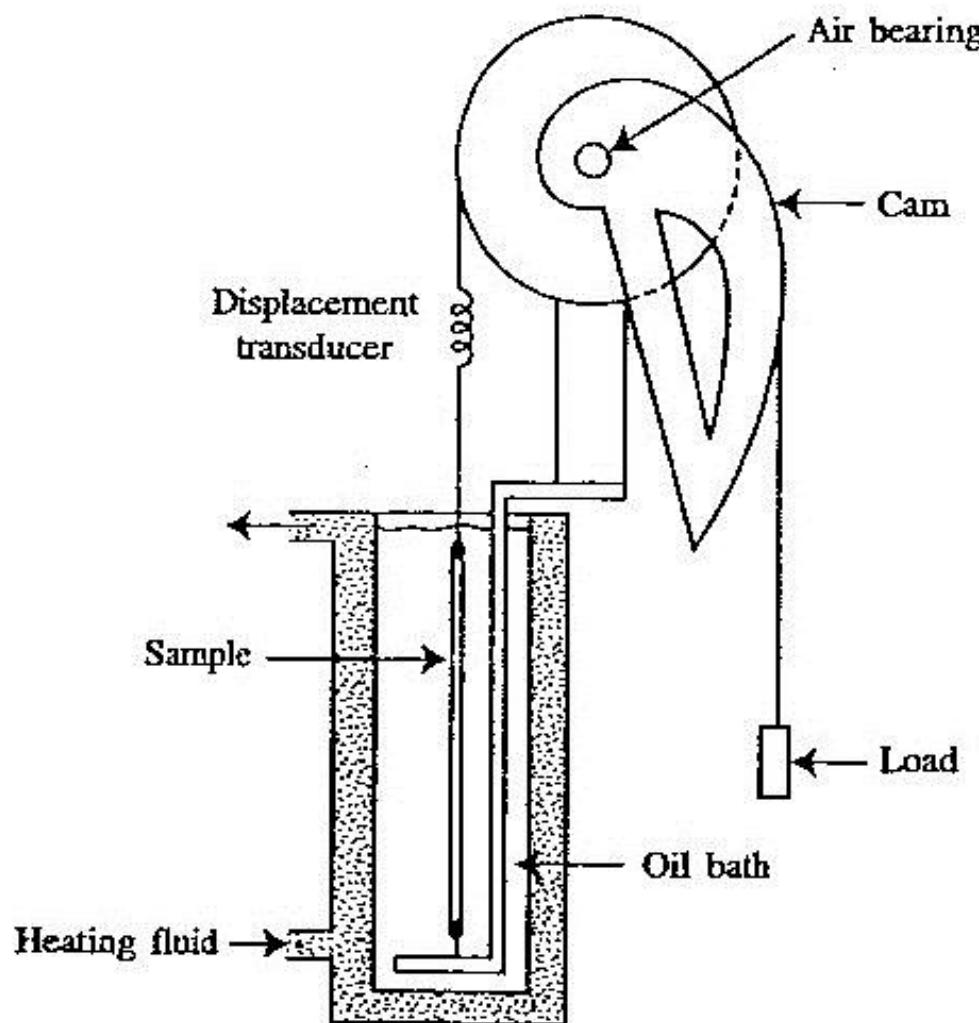
# Tensile test



รูป 6.11 รูปแบบของการทดสอบสมบัติการไฟล์ที่เกิดขึ้นจากการเสียรูปแบบยืดดึง [Carreau et al; 1997]



รูป 6.12 การทดสอบสมบัติการ流れแบบขีดดึงในอ่างของเหลวโดยวิธีการทดสอบแรงดึงในแนวอน [Micic & Bhattacharya; 2000]



รูป 6.13 การทดสอบสมบัติการไฟลแบบยืดดึงในร่องของเหลวโดยวิธีการทดสอบแรงดึงในแนวตั้ง [Dealy & Wissbrun; 1990]

# **Tensile test**

$$\sigma_E = \frac{F}{A}$$

$$\varepsilon_E = \int_{L_0}^{L_1} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_1}{L_0}$$

$$\dot{\varepsilon}_e = \frac{d\varepsilon_E}{dt} = \frac{1}{L_1} \frac{dL}{dt}$$

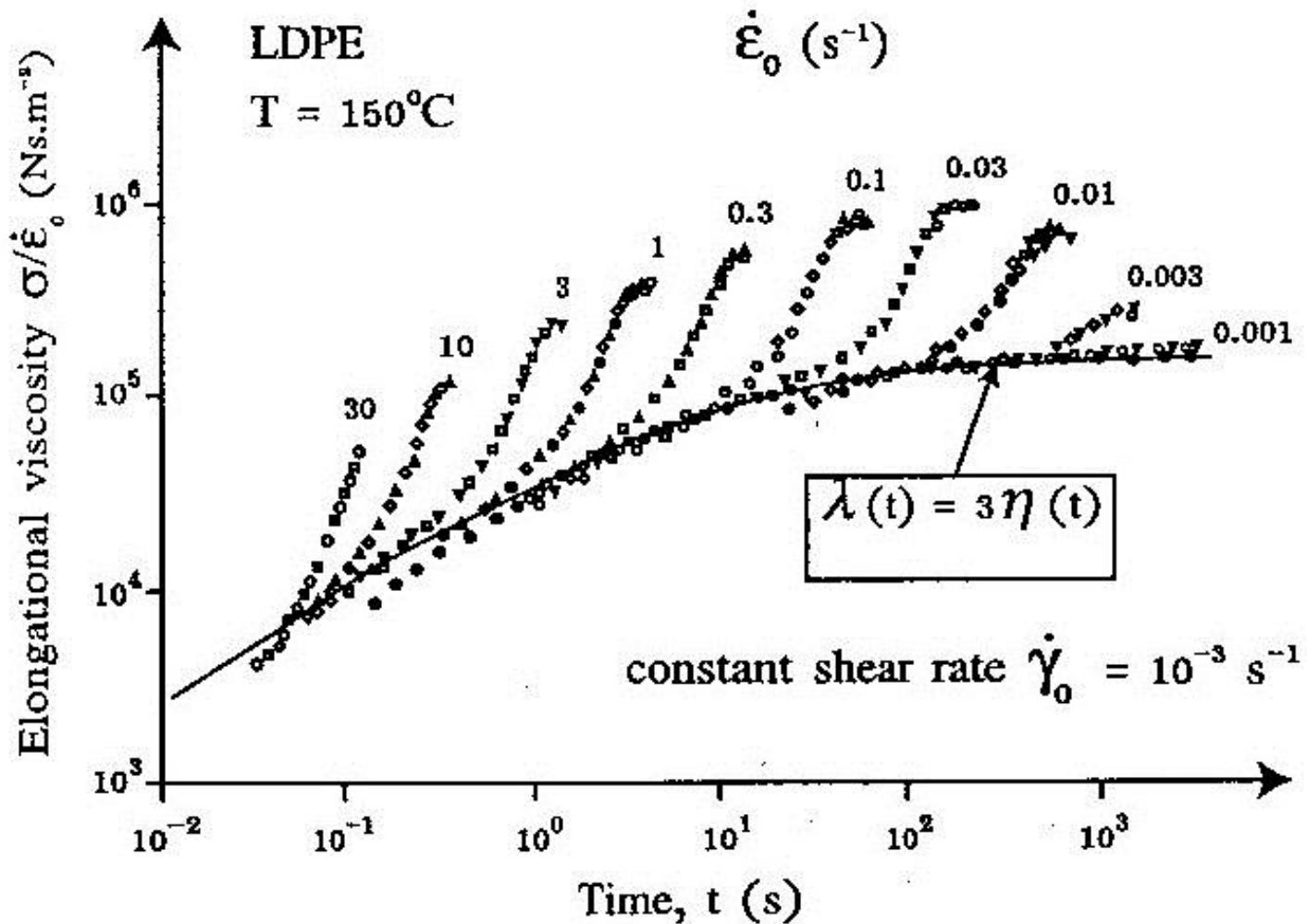
# **Tensile test**

$$\lambda = \frac{\delta_E}{\dot{\varepsilon}_E}$$

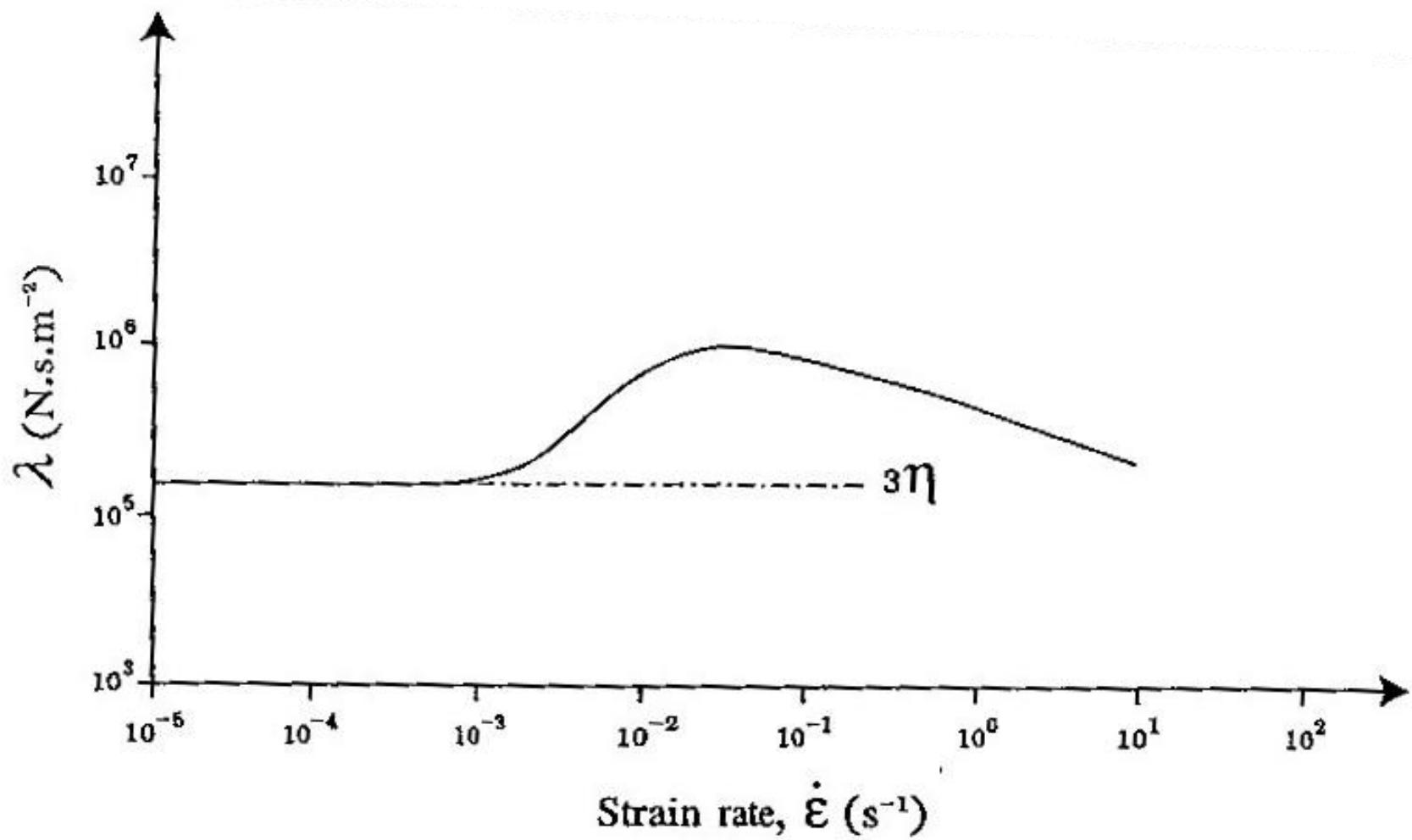
$\lambda$  = ค่าความหนืดที่เกิดจากการเสียรูปแบบยืดดึง  
(elongational viscosity)

$\delta_E$  = ค่าความเค้นยืดดึง

$\dot{\varepsilon}_E$  = ค่าอัตราเครียดยืดดึง



รูป 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดยืดดึงกับเวลาที่อัตราการเย็บรัดคงตัว  $\lambda$   
[Gupta; 2000]



รูป 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดยืดดึงกับอัตราเครียดบีดดึง<sup>\*</sup>  
 [Dealy & Wissbrun; 1990]

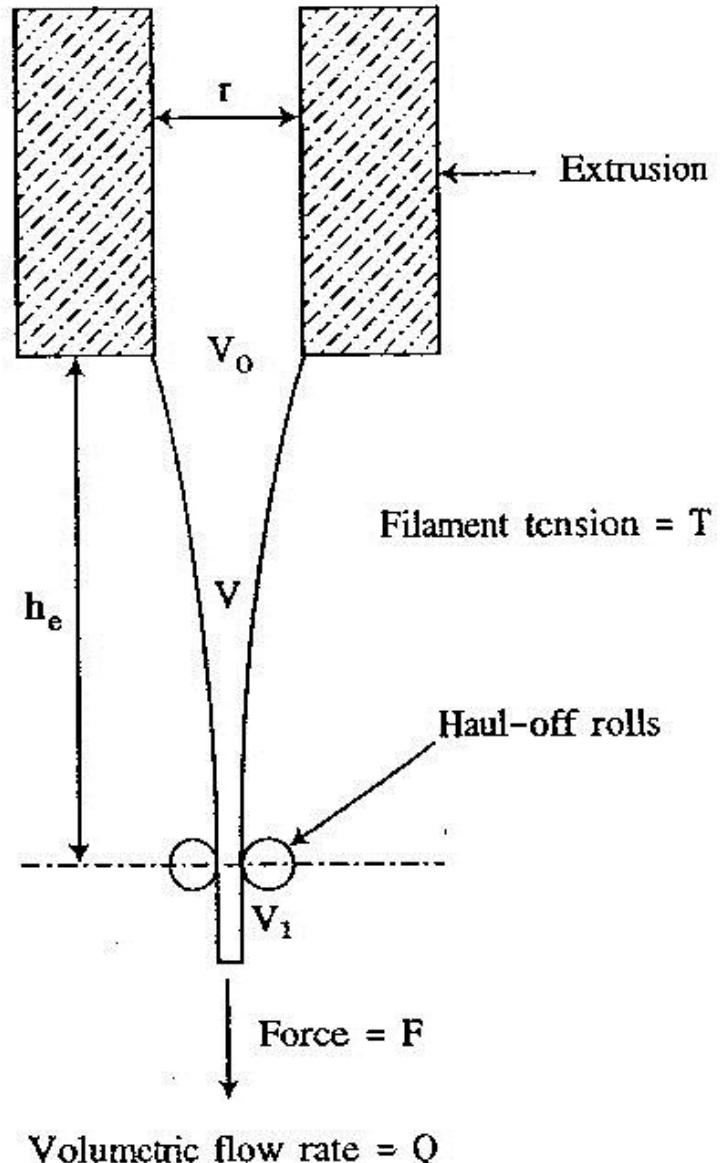
# *Drawing a monofilament*

- Extension process of a single filament is a constant rate test. This must be appreciated that the cross section of the test specimen is changing rapidly during testing.
- The principle is that the stress varies with time along the extension line

# *Drawing a monofilament*

- With the technique of drawing a monofilament, melt strength information needs to be known and recorded.
- This method has been questioned on the variation of elongation rate along the filament line.
- This technique is a very close approximation to determine the apparent elongational viscosity of polymer melts.

## *Drawing a monofilament*



รูป 6.16 การดึงขี้ดเส้นไนเด็กษาพอลิเมอร์หลอมเหลว [Cogswell; 1981]

# *Drawing a monofilament*

$$\sigma_E = \frac{F}{A} = \frac{F_V}{Q}$$
$$\sigma_{E(\max)} = \frac{F_V}{Q}$$

$$\varepsilon_E = \ln \frac{V_1}{V_0}$$

# *Drawing a monofilament*

$$\lambda = \frac{\sigma_{E(\max)} \cdot t}{\epsilon_E} = \frac{h_e F}{Q \epsilon_E}$$

$t$  = เวลาของการทดสอบ

$Q$  = อัตราการไหลด

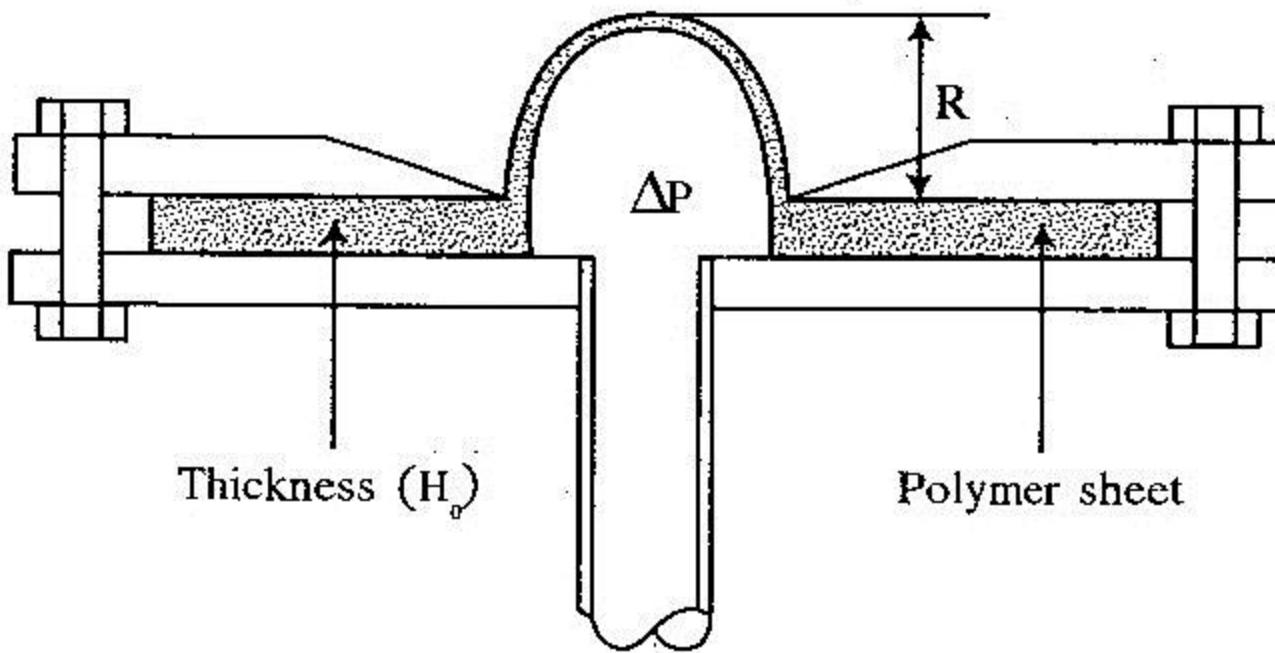
$v_0, v$  และ  $v_1$  = ความเร็วของพอลิเมอร์ที่หัวเข็นรูปที่จุดใดๆ  
และที่ระบบดึงสายพอลิเมอร์ ตามลำดับ

$F$  = แรงที่ใช้ ดึง

$h_e$  = ระยะการอัดรีดของเส้นใย

(จากหัวเข็นรูปถึงระบบดึงสายพอลิเมอร์)

# *Sheet inflation method*



รูป 6.17 วิธีการทดสอบโดยอาศัยการเป่าแผ่นพอลิเมอร์ขึ้นเป็นรูปครึ่งทรงกลม [White; 1990]

# *Sheet inflation method*

$$\dot{\varepsilon}_E = \frac{1}{L} \cdot \frac{dR}{dt}$$

$$\sigma_E = \frac{R}{2H} \cdot \Delta P(t) \cdot e^{2\dot{\varepsilon}}$$

$H_0$  = ความหนาเริ่มต้นของแผ่นพอลิเมอร์

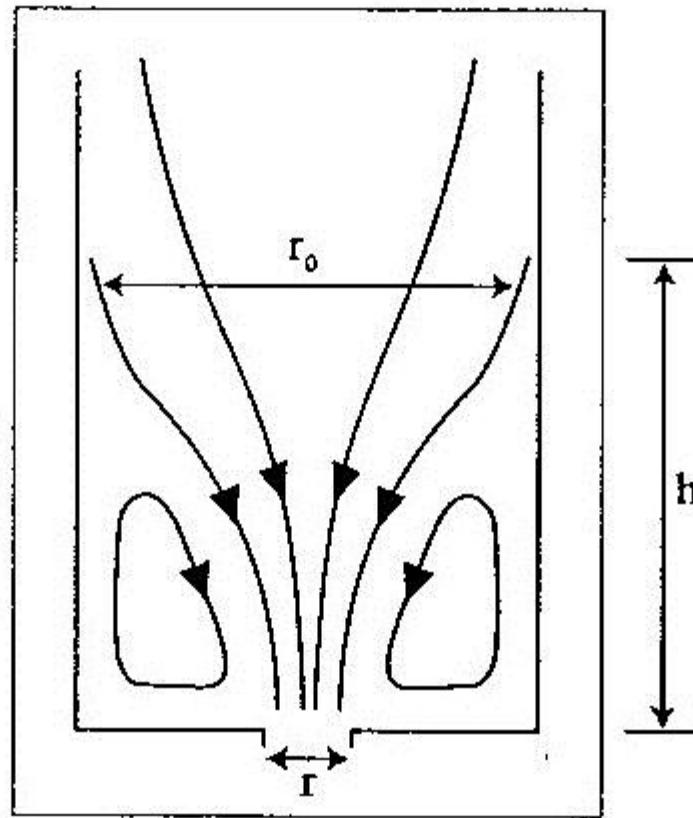
$\Delta P$  = ความดันที่กระทำบนแผ่นพอลิเมอร์

$L$  = ระยะระหว่างจุดที่ทำการทดสอบแผ่นพอลิเมอร์รูปครึ่งวงกลม

$R$  = รัศมีของรูปครึ่งวงกลม

$\sigma_E$  = ความเก็บแน่นของจากยืดดึง

# *Convergent flow*



รูป ๖.๑๘ รูปแบบการไหลบริเวณทางเข้าหัวจีนรูปในการศึกษาสมบัติการไหลแบบยึดคง [White; 1990]

# **Convergent flow**

- This method is based on elastic deformation of the polymer melt as it flows at the die entry of a capillary rheometer under isothermal condition.
- The flow profile in the barrel is assumed to be simple convergent cone flow.
- The elastic strain is considered to be equal to  $\log B_2$  where  $B$  is the maximum die swell for dies of zero length. Total strain is equal to  $\log A_2$  where  $A$  is the ratio of diameter of convergent cone ( $r_o$ ) in the barrel to that ( $r$ ) in the die entry.

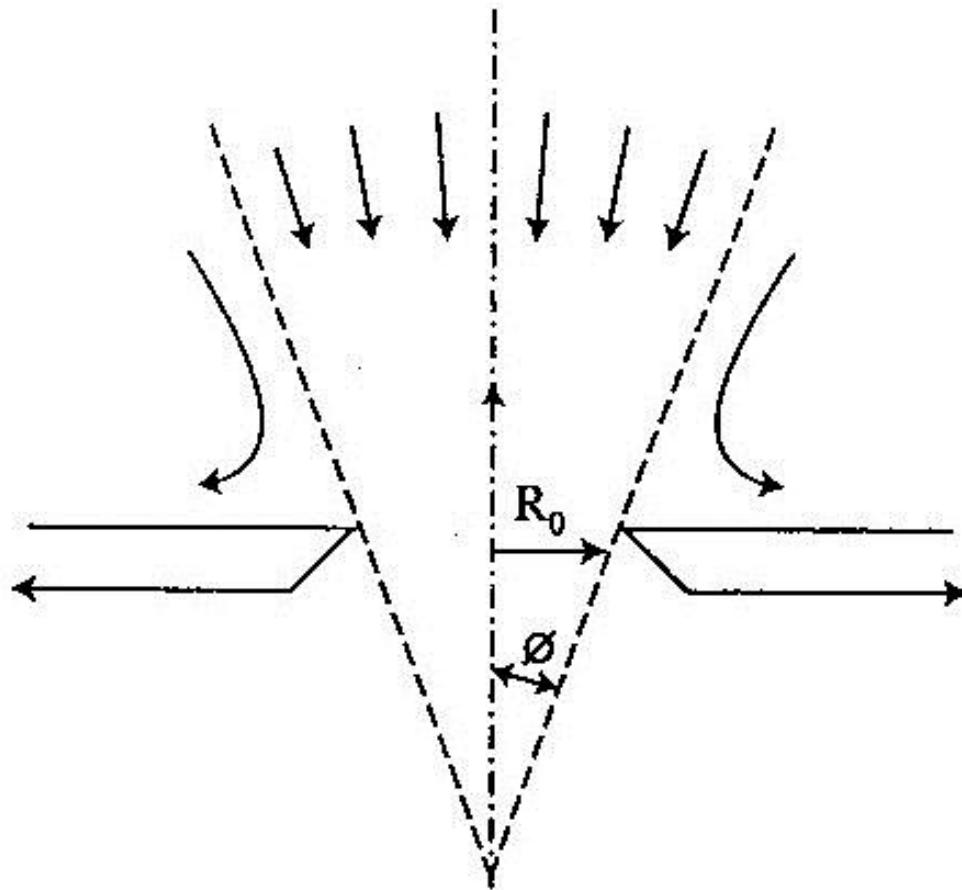
# **Convergent flow**

$$\lambda = \frac{\Delta P \pi R^2 a A r}{Q(\log A^2 - \log B^2)}$$

$A = \frac{r_0}{r_1}$  และ  $a = \frac{h}{r_0}$  (A และ a จะมีค่าประมาณ 3.5 และ 0.25 ตามลำดับ)

และ R คือ รัศมีของหัวขึ้นรูปที่ ๔ ใช้

# *Orifice flow*



รูป 6.19 การไหลตามบริเวณทางเข้าและในบริเวณพื้นที่หัวขึ้นรูป [Gupta; 2000]

# **Orific flow**

$$\lambda = \frac{\Delta P}{\dot{\epsilon} \text{ent}}$$

$$\dot{\epsilon}_E = \frac{Q(\sin^3 \phi)}{\pi R_0^3 (1 - \cos \phi)} \quad (\text{circular die})$$

$$\dot{\epsilon}_E = \frac{Q(\sin \phi)}{2W^2 H} \quad (\text{slit die})$$

Q = อัตราการไหล

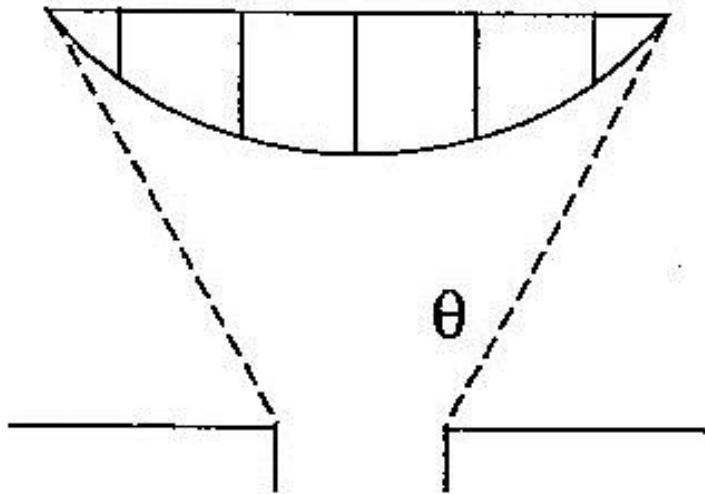
R = รัศมีของหัวขึ้นรูป

$\phi$  = มุมทางเข้าของการไหล

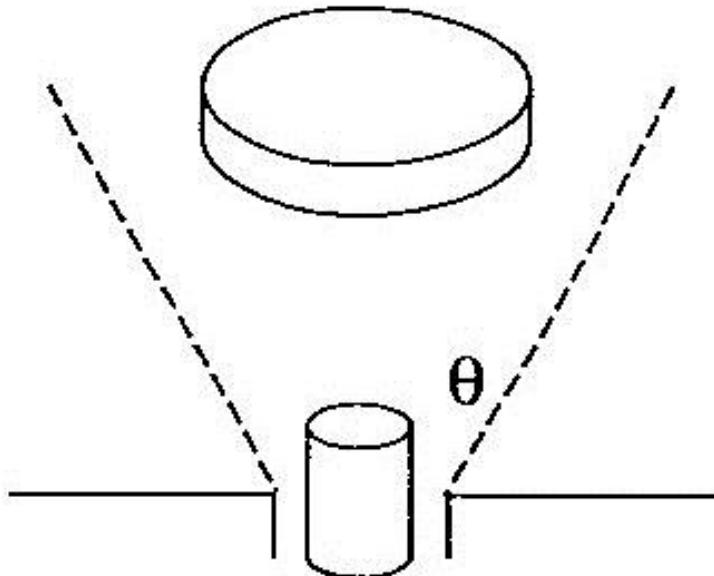
W = ความกว้างของหัวขึ้นรูป

H = ความสูงของหัวขึ้นรูป

# *Shear-extensional flow*



(a) Simple shear component



(b) Extensional component

รูป 6.20 องค์ประกอบของการไหลแบบลู่เข้า (a) บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป และ (b) ระหว่างการเข้าหัวขึ้นรูป [Gupta; 2000]

# ***Shear-extensional flow***

$$\sigma_E = \left[ \frac{3}{8} (n+1) \Delta P_{ent} \right]$$

$$\dot{\varepsilon}_E = \frac{4\tau\dot{\gamma}}{3(n+1)\Delta P_{ent}}$$

$\sigma_E$  = ค่าความเก็บยึดดึง

$n$  = ค่าดัชนีการไอล

$\Delta P_{ent}$  = นุ่มทางเข้าของการไอลความดันตกคร ะ 'อมบริเวณหัวขึ้นรู'

$\dot{\varepsilon}_E$  = ค่าอัตราความเครียดยึดดึง

$\tau$  = ค่าความเก็บเนื้อน

$\dot{\gamma}$  = ค่าอัตราเครียดเนื้อน