



MTT 651: Polymer Rheology (Rheology in Die Based Processing)

Prof. Dr. Narongrit Sombatsompop

Polymer PROcessing and Flow (P-PROF) Group

King Mongkut's University of Technology Thonburi

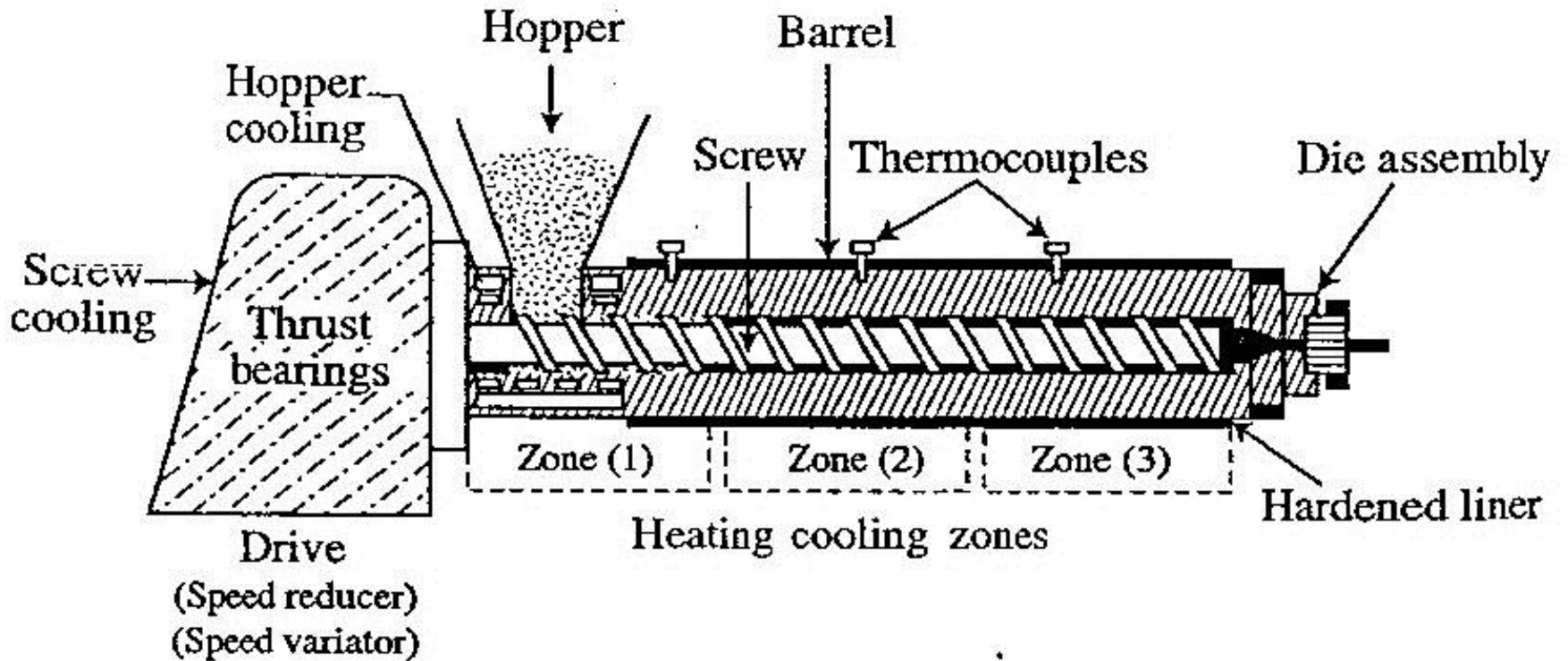
Estimated power requirement in polymer processing

$$\text{Power} = Q[(C_p \cdot \Delta T) + P]$$

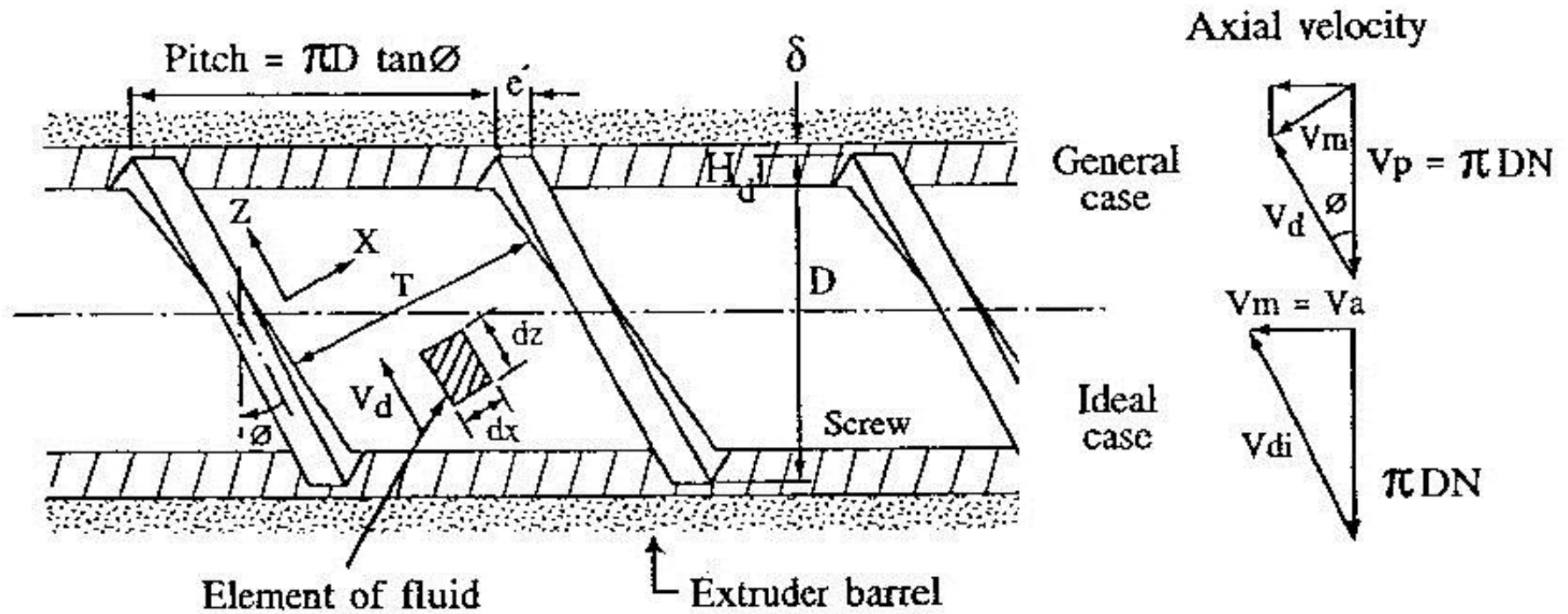
Q = อัตราการผลิต (kg/s)

C_p = ค่าความร้อนจำเพาะ (J/kg °C)

Extrusion process



รูป 7.1 ส่วนประกอบของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนชนิดเดียว [Sombatsompop; 1997]



รูป 7.4 ภาพตัดส่วนประกอบของเกลียวท่อนที่อยู่ในห้องหลอมเหลวในเครื่องอัดรีด
 [Crawford; 1987]

$$Q_t = Q_d - Q_p - Q_1$$

Q_d = การไหลแบบลาก (drag flow)

Q_p = การไหลเนื่องมาจากความดัน (pressure flow)

Q_1 = การไหลย้อนกลับ (leakage flow)

$$Q_d = 1/2\pi^2 D^2 N H_d \sin \phi \cos \phi$$

Q_d = อัตราการไหลแบบลาก(drag flow)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียวหนอน

H_d = ความลึกของเกลียวหนอน

N = ความเร็วรอบการหมุนของเกลียวหนอน

ϕ = มุมเอียงของเกลียวหนอน

$$Q_p = \frac{\pi^2 D H_d^3 \sin^2 \phi}{12\eta} \left(\frac{dp}{dl} \right)$$

Q_p = การไหลเนื่องจากความดัน (pressure flow)

dp = ความแตกต่างของความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องอัดรีด

dl = ความแตกต่างของระยะทางการไหลในเครื่องอัดรีด

η = ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว

$$Q_L = \frac{1}{12\eta} \frac{\Delta P}{e' \cos \phi} \frac{\pi D}{\cos \phi} \delta^3$$

δ = ระยะห่างระหว่างผนังห้องหลอมเหล็กถึงปลายเกลียวหนอน

e' = ความกว้างของเกลียวหนอนหรือของช่องการไหลน้ำตัดสี่เหลี่ยม

$$Q_t = Q_d - Q_p - \cancel{Q_1}$$

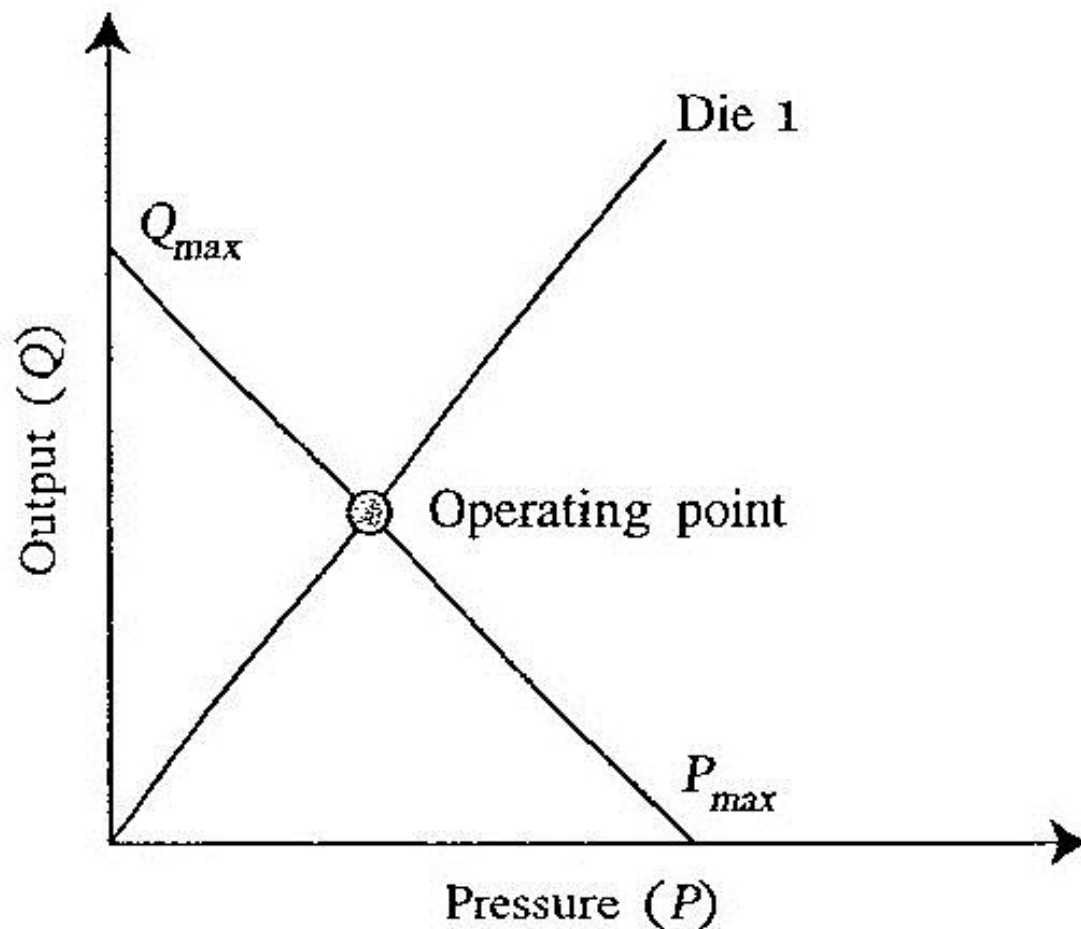
$$Q_t = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H_d \sin \phi \cos \phi - \left(\frac{\pi D H_d^3 \sin^2 \phi}{12 \eta} \right)$$

$$Q_t = \alpha N \left(\frac{\beta p}{\eta} \right)$$

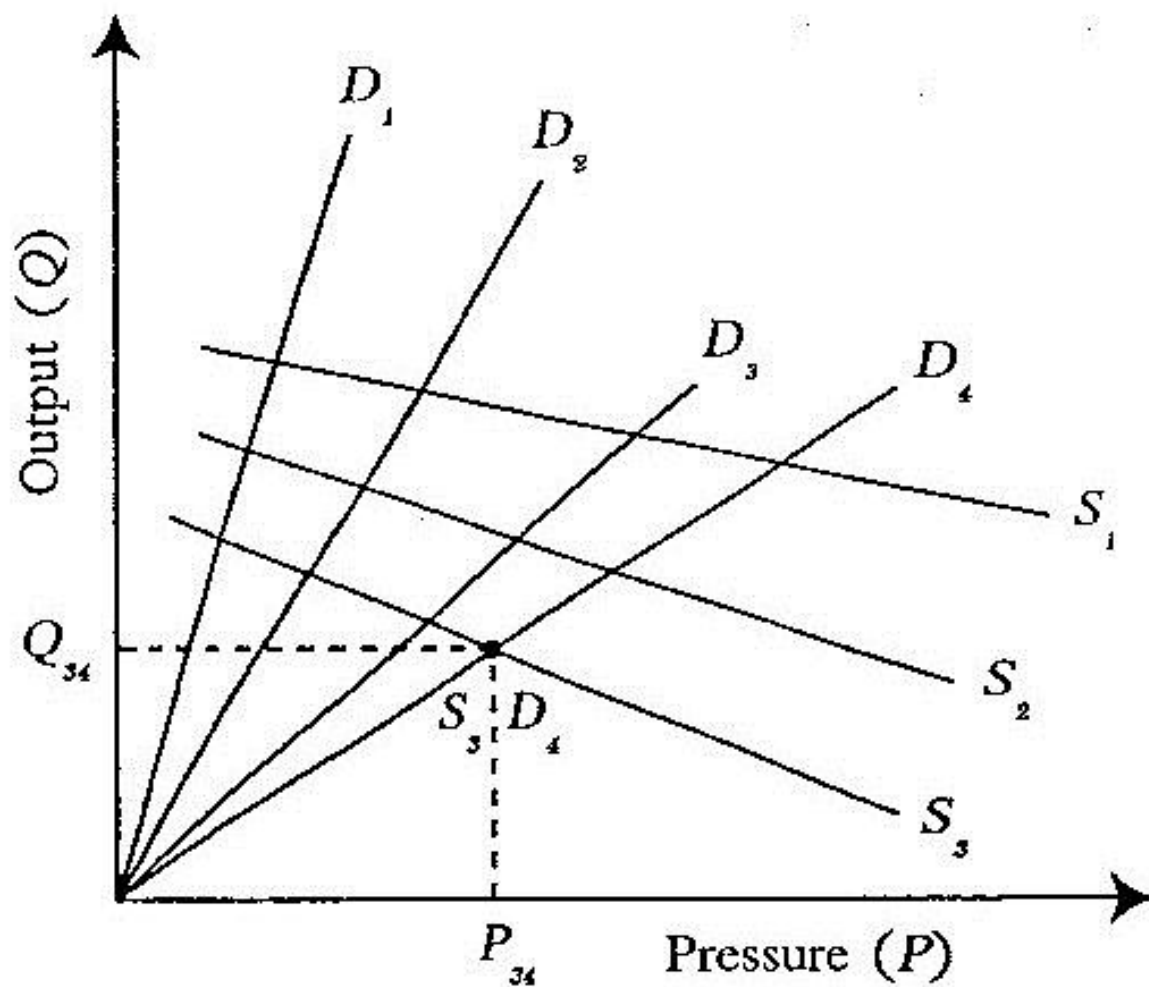
$$Q = Q_{\max} = 1/2 \pi^2 D^2 N \sin \phi \cos \phi H_d$$

$$1/2 \pi^2 D^2 N H_d \sin \phi \cos \phi = \frac{\pi D H_d^3 \sin \phi P}{12 \eta L}$$

$$P = P_{\max} = \frac{6 \pi D L N \eta}{H_d^2 \tan \phi}$$



รูป 7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะเฉพาะของเกลียวหนอนและหัวขึ้นรูปเพื่อกำหนดจุดสภาวะการผลิตของกระบวนการอัดรีด [Crawford; 1987]



รูป 7.7 จุดสภาวะการผลิตกับการเลือกใช้เกลือหนอนและหัวขึ้นรูปขนาดต่าง ๆ ของกระบวนการอัดรีด

Screw efficiency

$$\xi = \frac{3\psi(1-\psi)\cos^2\phi}{4-3\cos^2\phi(1-\psi)}$$

$$\psi = \frac{H_d^2}{6\eta V \cos\phi} \frac{P}{L}$$

Power requirement (E_p) in extrusion

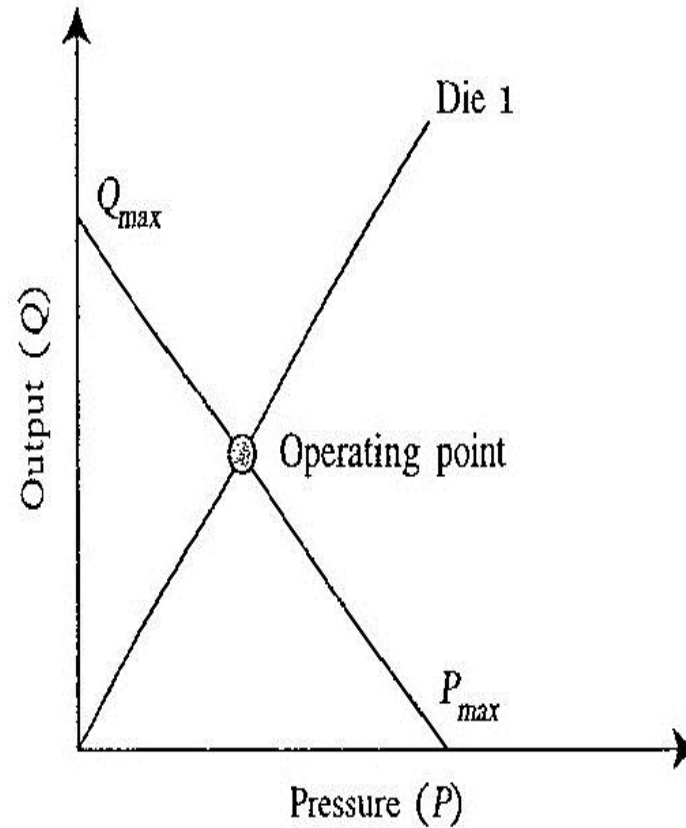
$$E_p = \frac{\eta\pi^3 N^2 D^3}{H_d} \left(\cos^2 \phi + 4\sin^2 \phi + 3\Psi \cos^2 \phi \right) L$$

Die characteristics in extrusion

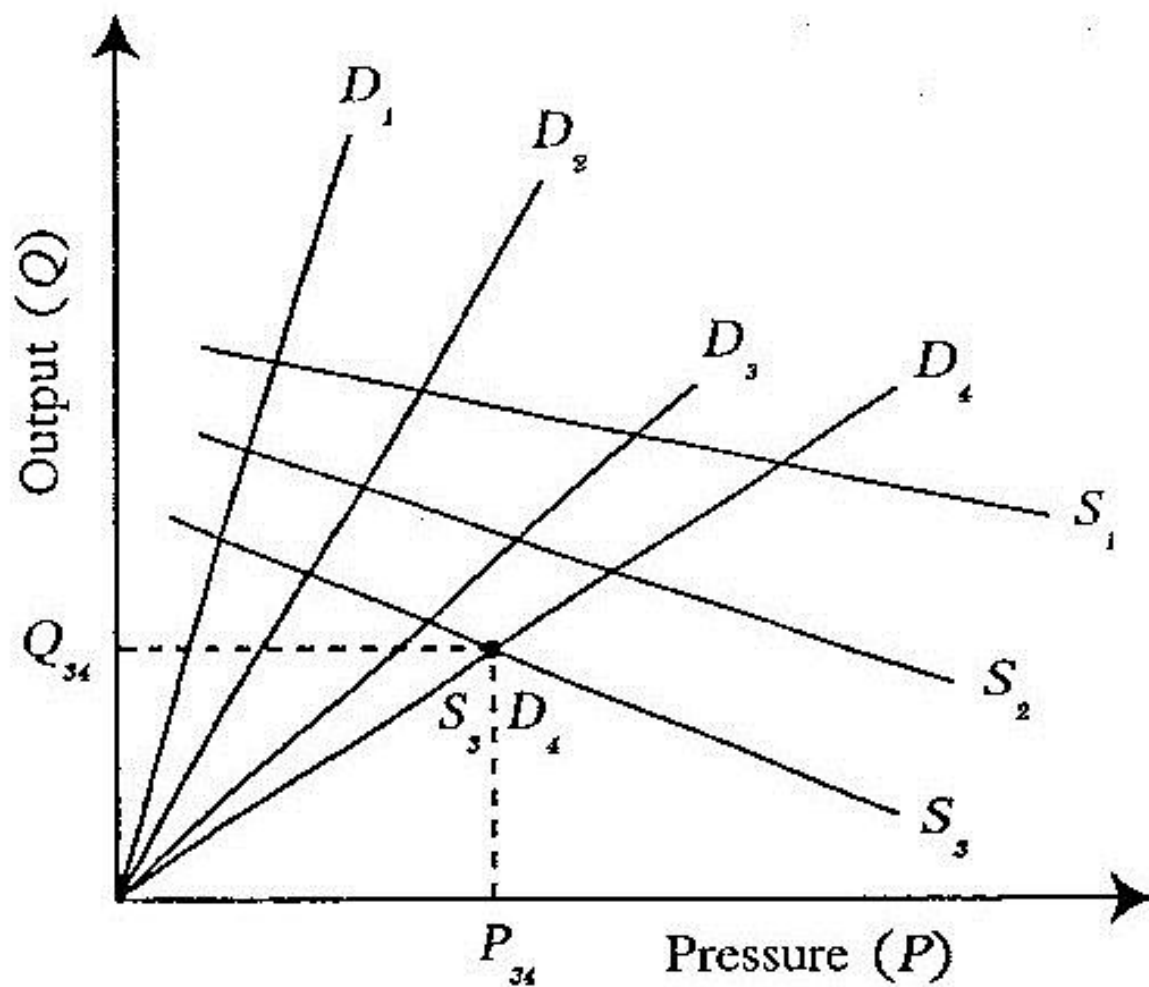
$$Q = \frac{K' \Delta P}{\eta}$$

$$K' = \frac{\pi R^4}{8L}$$

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta L} \Delta P$$



รูป 7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะเฉพาะของเกลียวทอนและหัวขึ้นรูปเพื่อกำหนดจุดสภาวะการผลิตของกระบวนการอัดรีด [Crawford; 1987]



รูป 7.7 จุดสภาวะการผลิตกับการเลือกใช้เกลือหนอนและหัวขึ้นรูปขนาดต่าง ๆ ของกระบวนการอัดรีด

Materials characteristics

$$N_{\text{DEB}} = \frac{t_r}{t_p}$$

t_r = เวลาที่พอลิเมอร์ใช้ในการคลายตัว (s)
 t_p = เวลาที่พอลิเมอร์ไหลอยู่ในกระบวนการผลิต (s)

$$t_m = \frac{\eta}{E}$$

η = ค่าความหนืด
 E = ค่าโมดูลัส

Complex die characteristics (G)

ในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องตรวจวัดความดัน และต้องการคำนวณหาค่าความดันตกคร่อม มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพิจารณารูปร่างของ **die** โดยเฉพาะอย่างยิ่ง **die** ที่มีรูปร่างค่อนข้างซับซ้อน

โดยทั่วไป เราพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (volumetric flow rate, Q) กับความดันตกคร่อม (pressure drop, ΔP) ของของไหล

Complex die characteristics (G)

$$Q = KG^n \Delta P^n$$

$$\Delta P = \frac{Q^{1/n}}{K^{1/n} G}$$

K = ค่าคงที่การไหล

n = ค่าดัชนีการไหล

G = ค่าคงที่ของหัวขึ้นรูป

For circular die (เมื่อ R และ L คือรัศมีและความยาวของ die)

$$G = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/n} \cdot \frac{R \left(\frac{1}{n} + 1\right)}{2L}$$

For slit die at $W/H > 20$ (เมื่อ W และ H คือ ความกว้างและความสูง die)

สมการนี้จะใช้ได้ต่อเมื่ออัตราส่วนของ W/H ต้องมากกว่า 20 มิฉะนั้น

จะต้องพิจารณาค่า ตัวแปรรูปร่าง (shape factor)

$$G = \left(\frac{W}{6}\right)^{1/n} \cdot \frac{H \left(\frac{2}{n} + 1\right)}{2L}$$

For annular die at $\frac{\pi(R_0 + R_i)}{(R_0 - R_i)} \geq 37$

$$G = \left(\frac{\pi}{6}\right)^{1/n} \cdot \frac{(R_0 + R_i)^{1/n} (R_0 - R_i)^{\left(\frac{2}{n} + 1\right)}}{2L}$$

R_0 and R_i are outer and inner die diameters

Die Shape Factor (F)

$$F = 1.008 - 0.7474 \left[\frac{H}{W} \right] + 0.1638 \left[\frac{H}{W} \right]^2$$

$$F = 1.008 - 0.7474 \left[\frac{R_0 - R_i}{\pi(R_0 + R_i)} \right] + 0.1638 \left[\frac{R_0 - R_i}{\pi(R_0 + R_i)} \right]^2$$

ดังนั้นค่า **G** ที่จะนำไปใช้ในการคำนวณ **pressure drop** จะเป็นค่า **G** ที่ผ่านการแก้ไขแล้วเรียกว่า **G_{corrected}** ซึ่งมีค่าดังสมการ

$$G_{\text{corrected}} = F \cdot G_{\text{uncorrected}}$$

Overall Temperature rise

$$\Delta T = \frac{\Delta P}{\rho C_p}$$

ρ = ค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์หลอมเหลว (g.cm^{-3})

C_p = ค่าความจุความร้อนของพอลิเมอร์หลอมเหลว (J.g^{-1})

Temperature rise in screw zones

$$\Delta T = \frac{5}{9} \left[\frac{1}{4.13J^2 - 0.024} \right]$$

$$J = 14.7 \times 10^{-4} \left(\frac{D^2}{Q} \right) \sum \frac{L}{H}$$

J = screw constant, D is screw diameter
L and H are length and height

Scale-up

$$\frac{Hm_2}{Hm_1} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{(1-s)/(2-3s)}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{-(2-2s)/(2-3s)}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{(3-5s)/(2-3s)}$$

$$\frac{Hf_2}{Hf_1} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{(1-s)/(2-3s)}$$

$$s = 0.5 \left(1 - \frac{1}{n} \right)$$

Hm = ความลึกของเกลียวหนอนที่ โชนมิเตอร์รีง

Hf = ความลึกของเกลียวหนอนที่ โชนป้อนเม็ดพลาสติก

s = ค่าคงที่ของค่าคงที่ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

Use of MFI in extrusion process

$$\Delta P = \frac{2Lf_1f_2}{H(\text{MFI})^n} \left(\frac{Q}{H^3} \right)^n$$

L = ความยาวของหัวขึ้นรูปที่ใช้

H = ความสูงของหัวขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมหรือรัศมีของหัวขึ้นรูปหน้าตัดกลม

n = ค่าคงที่ดัชนีการไหล

f_1 = ค่าคงที่ลักษณะหัวขึ้นรูป

f_2 = ค่าคงที่ลักษณะของไหลพอลิเมอร์ที่ใช้

Use of MFI in extrusion process (cont.)

กรณีหัวขึ้นรูปหน้าตัดกลม

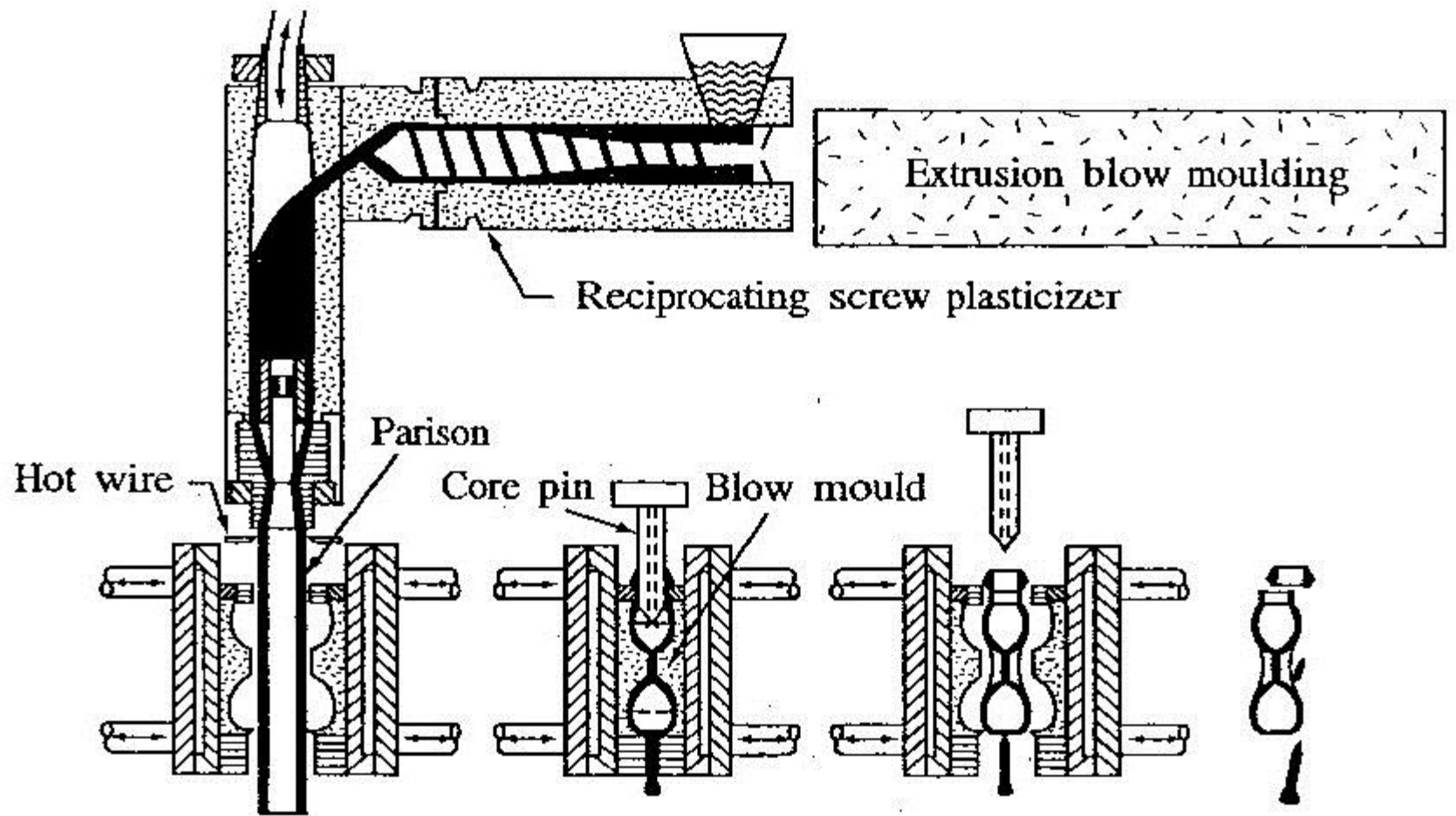
$$f_2 = K \left(\frac{3n + 1}{\pi n} \right)^n$$

กรณีหัวขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยม

$$f_1 = \frac{2}{2^{n+1}}$$

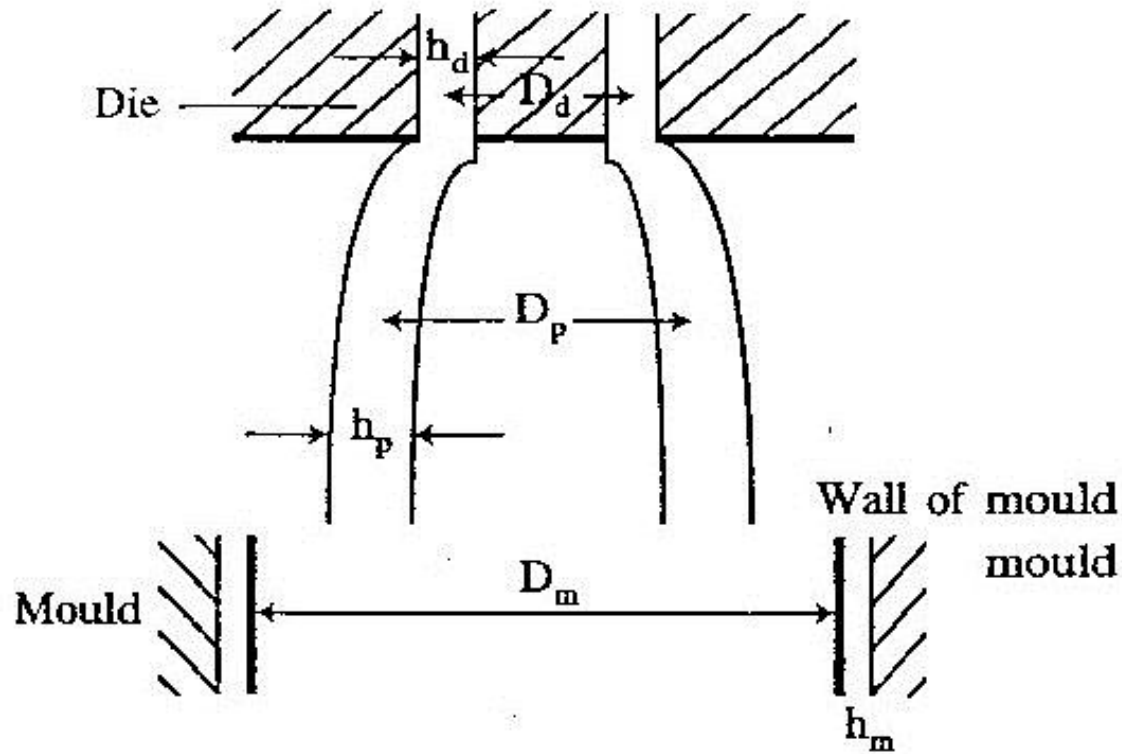
$$f_2 = K \left(\frac{4n + 2}{n} \right)^n$$

K = ค่าคงที่การไหล



(1) Extrude parison (2) Blow station (3) Demould (4) Trimming

รูป 7.8 กระบวนการอัดรีดแบบเป่าขึ้นรูปเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ขวดพลาสติก
[Sombatsompop; 1997]



รูป 7.9 พอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลออกมาจากหัวขึ้นรูปวงแหวนในกระบวนการผลิตอัดรีดแบบเข้าขึ้นรูป [Morton-Jones; 1993]

$$h_m = \frac{\left(\frac{D_p}{D_d} \right)^3 \cdot h_d \cdot D_d}{D_m}$$

h_m = ความหนาเฉลี่ยของฟิล์มที่ขูด

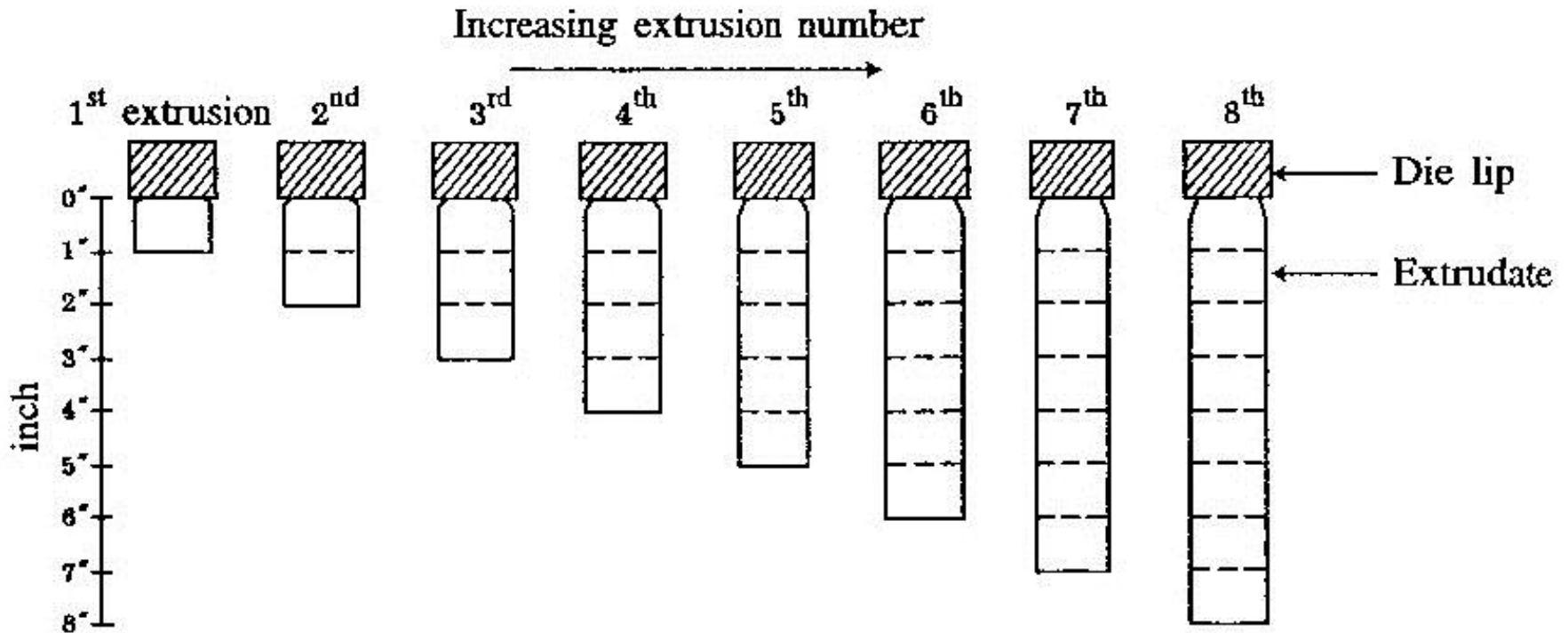
h_d = ขนาดความกว้างของช่องแหวนของหัวขึ้นรูป

D_d = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหัวขึ้นรูปคก้าง
ของช่องวงแหวนของหัวขึ้นรูป

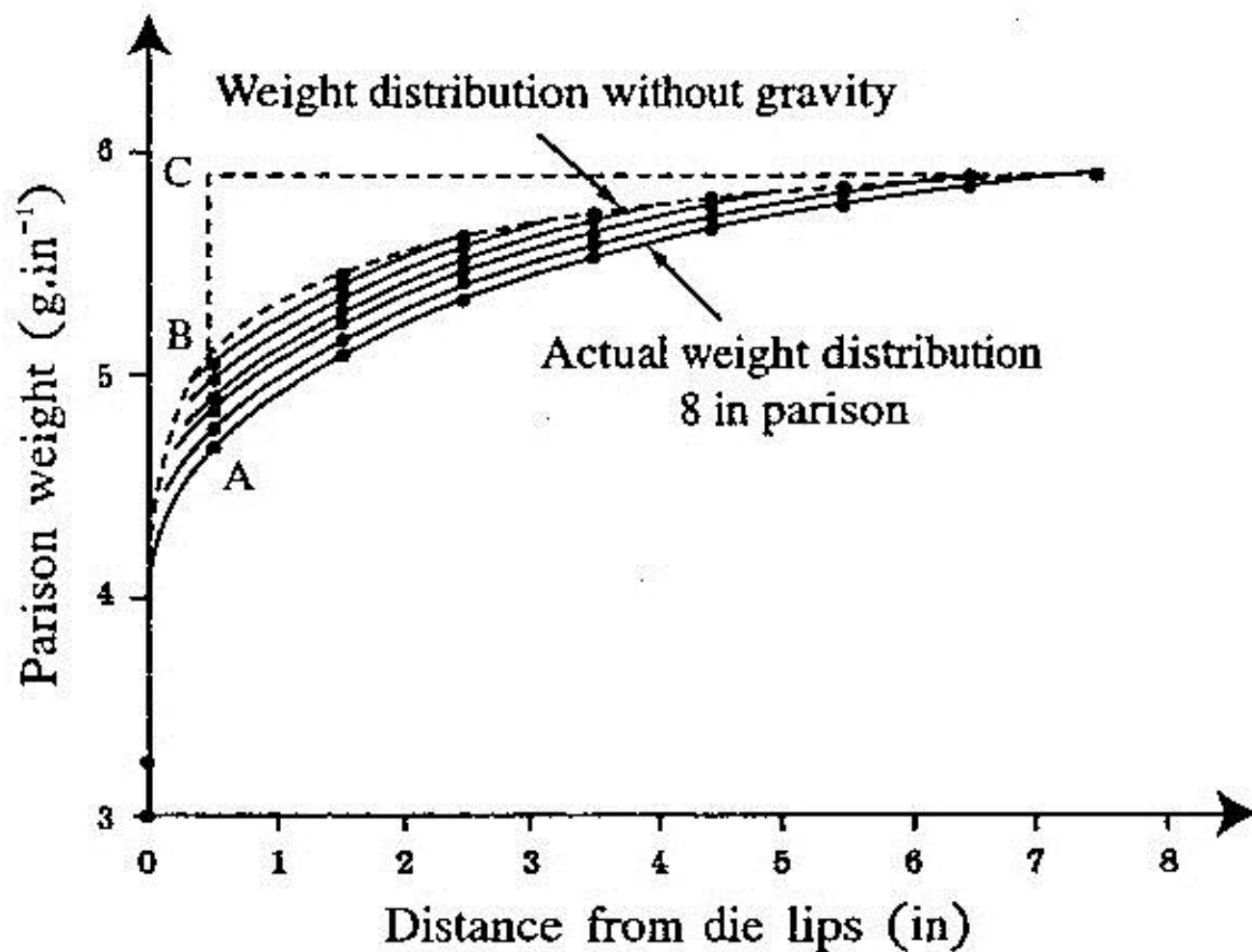
D_p = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเพาژชั้น

D_m = เส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์

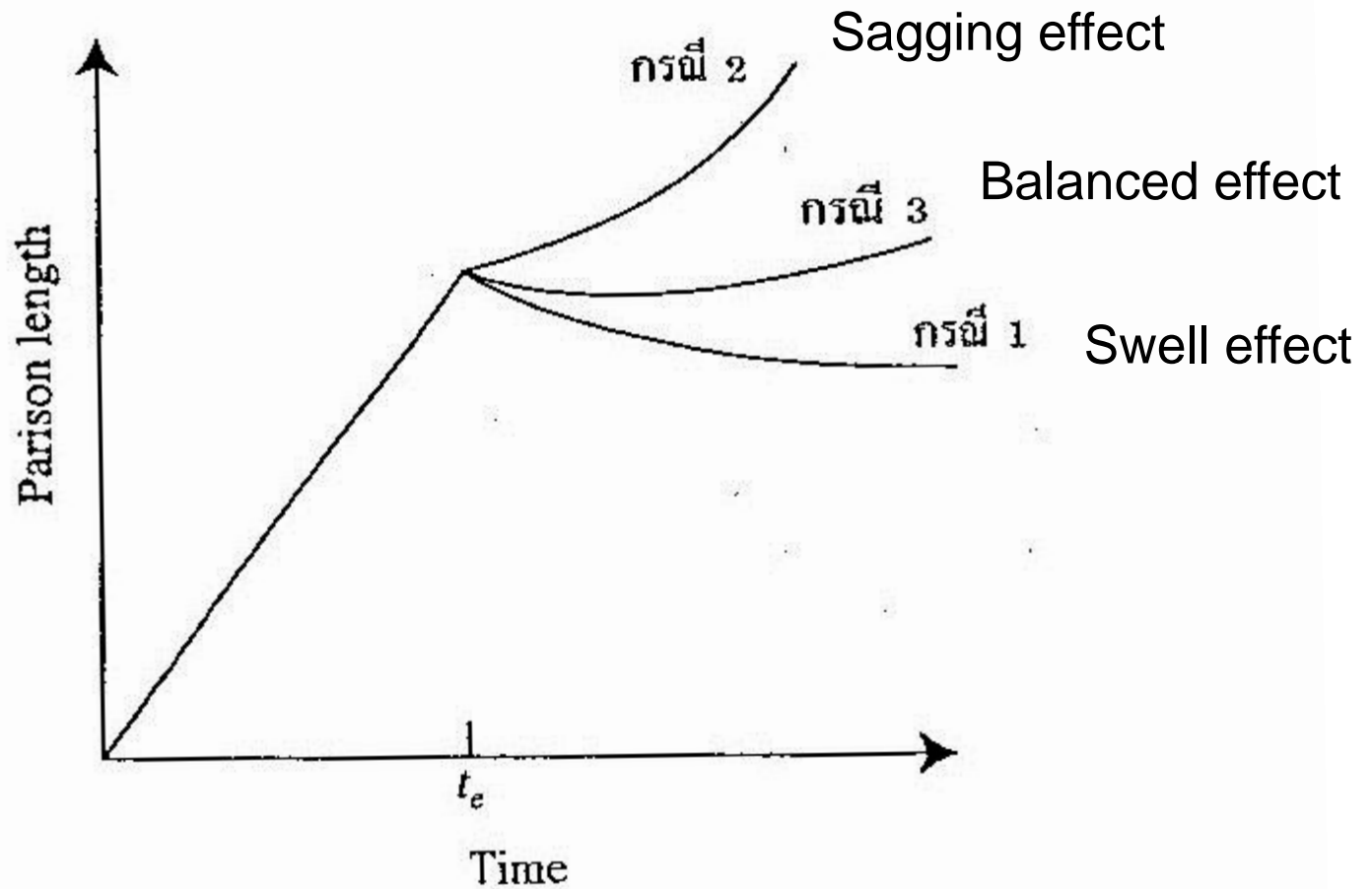
Sagging and swelling effects in extrusion



รูป 7.10 การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณการบวมตัว และการย้อยตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะอัดรีด

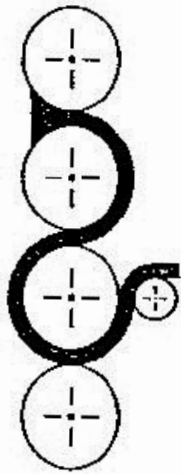


รูป 7.11 การกระจายตัวของน้ำหนักและความยาวของแท่งพาริชัน [Brydson; 1981]

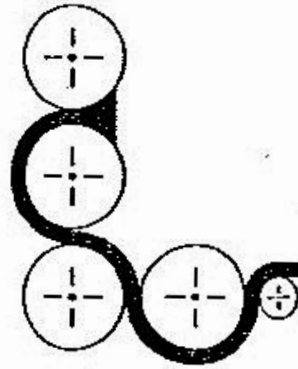


รูป 7.12 ความยาวแท่งพริซันกับเวลาขณะอัดรีดและเมื่อการอัดรีดสิ้นสุด [Dealy & Wissbrun; 1990]

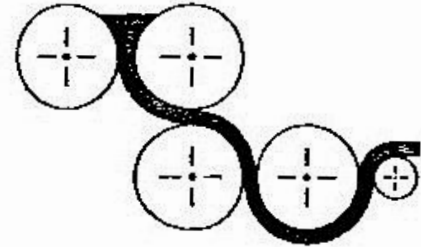
Calendering



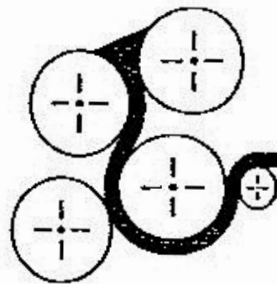
I-shape



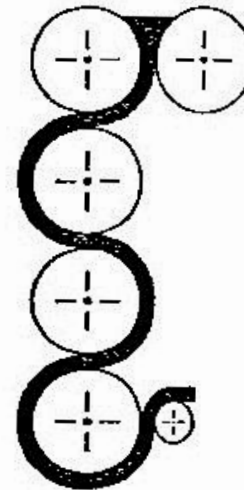
Vertical L-shape



Z-shape

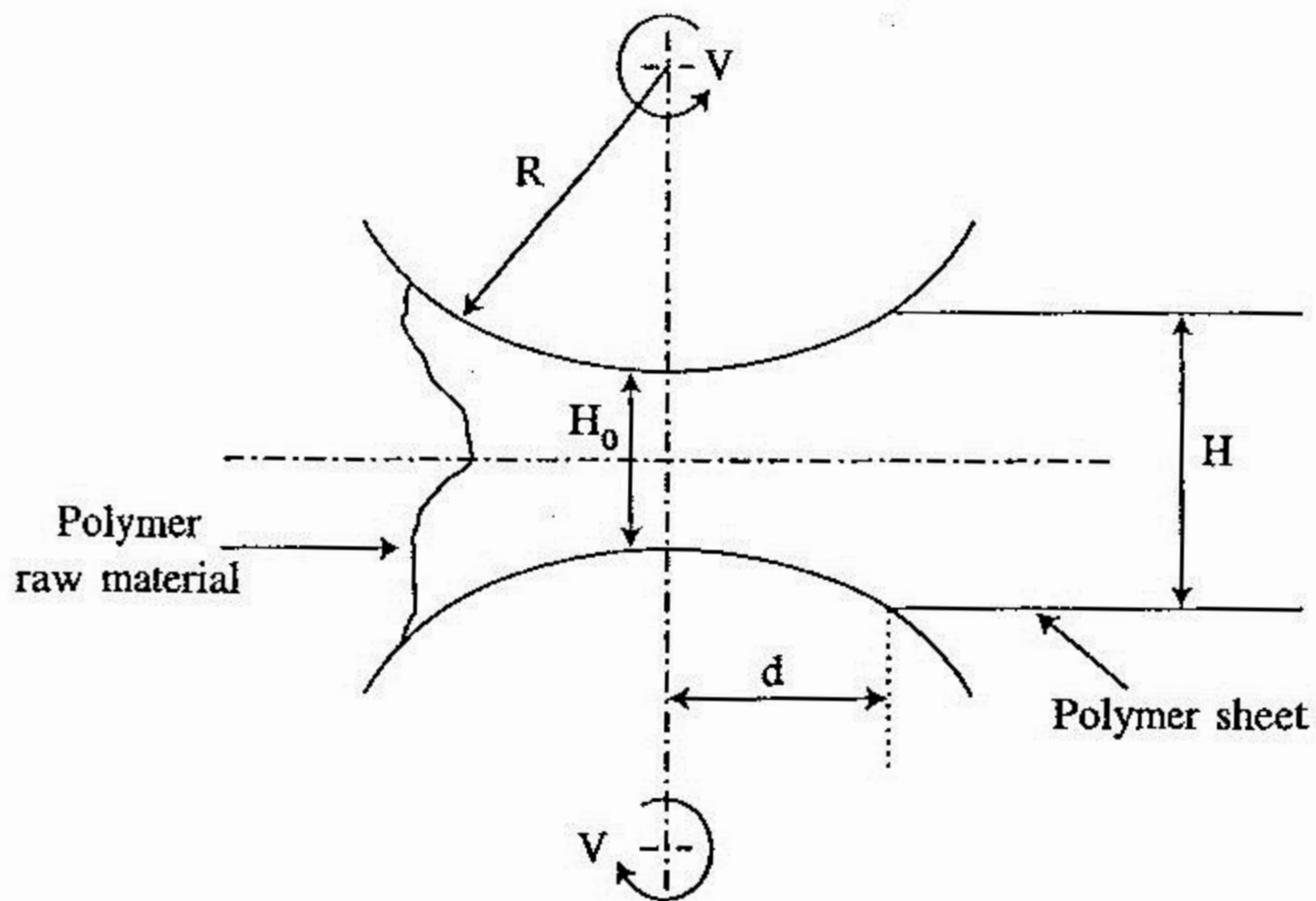


S-shape



Reverse L-shape

รูป 7.13 รูปแบบการจัดวางลูกกลิ้งในกระบวนการผลิต calendering [Morton-Jones; 1993]



รูป 7.14 การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวในเครื่องอัดรีดแบบลูกกลิ้ง [Belofsky; 1995]

Q&P Calculations in calendering

$$Q = HWV$$

$$P_{\max} = \frac{16\eta Vd^3}{RH_0}$$

N = ค่าความเร็วรอบของลูกกลิ้ง (rpm)

V = ความเร็วเชิงเส้นของทโหลของพอลิเมอร์ ($V = 2\pi RN$) (m.s^{-1})

R = รัศมีของลูกกลิ้ง (m)

H_0 = ระยะห่างระหว่างคู่ลูกกลิ้ง (m)

H = ความหนาของแผ่นพอลิเมอร์ที่พื้นออกมาจากลูกกลิ้ง (m)

W = ค่าความกว้างของแผ่นพอลิเมอร์ที่พื้นออกมาจากลูกกลิ้ง (m)

d = ระยะระหว่างจุดกึ่งกลางลูกกลิ้งถึงตำแหน่งที่แผ่นพอลิเมอร์พื้นจากลูกกลิ้ง (m)

Flow curves for calendering

$$\tau = \frac{H_0 P_{\max}}{2L}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{6Q}{WH_0^2}$$

- L = ระยะทางทั้งหมดที่พอลิเมอร์สัมผัสกับผิวหน้าของลูกกลิ้ง
หรือมีค่าเท่ากับ 2 d (m)
- Q = อัตราการไหลของพอลิเมอร์
- P_{max} = ความดันสูงสุด