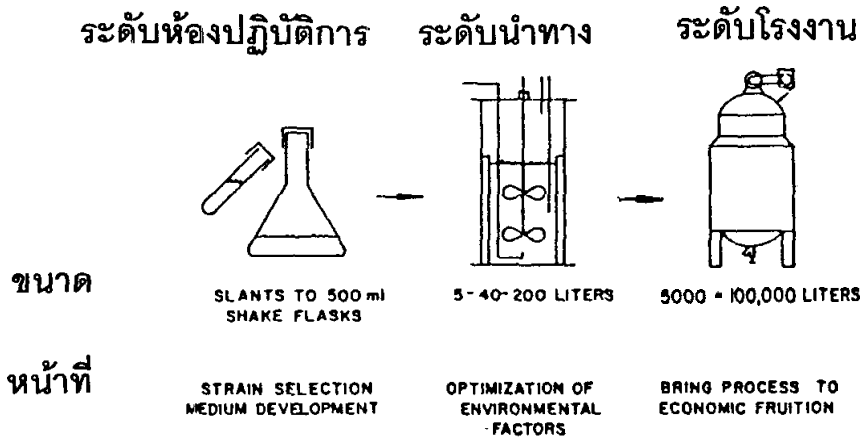


# บทที่ 10

## การขยายขนาดของถังหมัก

การออกแบบอุปกรณ์และถังหมักในกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมนั้น จะต้องเริ่มต้นจากข้อมูลที่ได้ในระดับห้องปฏิบัติการก่อน



รูปที่ 88 แสดงการขยายขนาดของถังหมักจากห้องปฏิบัติการสู่การผลิตในระดับอุตสาหกรรม

การแปลงข้อมูลที่ได้ในระดับห้องปฏิบัติการสู่ระดับนำทางและระดับโรงงานนั้น มีวัตถุประสงค์ที่แตกต่าง ดังนี้

### ระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory scale)

1. เป็นการทดลองที่เน้นหนักในด้านของเชื้อจุลินทรีย์ ชนิดของสารอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสมต่อการผลิต
2. เป็นการปรับปรุงศักยภาพของชีวสารที่ใช้ ไม่ว่าจะเป็นเซลล์จุลินทรีย์ เซลล์สัตว์หรือเซลล์พืช ให้สามารถผลิตสารที่ต้องการได้เพิ่มขึ้น
3. ข้อมูลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่มีความสำคัญในการพิจารณาความเป็นไปได้ และยังเป็นแนวทางในการกำหนดทิศทางการดำเนินการต่อไปในระดับนำทาง

4. การทดลองในระดับห้องปฏิบัติการนี้ สามารถดำเนินการได้ง่ายที่สุด สะดวกและเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

#### ระดับนำทาง (pilot scale)

1. เป็นการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะและปัจจัยทางกายภาพต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมต่อการทำงานของชีวมวล
2. เป็นการทบทวนและตรวจสอบปรากฏการณ์วิกฤตที่อาจเกิดขึ้นได้จากการขยายขนาดจากระดับห้องปฏิบัติการสู่ระดับนำทาง เพื่อลดระดับความสูญเสียจากการเลี้ยง เมื่อเกิดการผิดพลาดจากการขยายขนาดจากระดับปฏิบัติการสู่ระดับโรงงาน
3. ผลิตรากพืชที่ได้ในระดับนี้ สามารถนำไปวิจัยในด้านการตลาดตลอดจนประเมินต้นทุนการผลิตเบื้องต้นได้

#### ระดับโรงงาน (plant scale)

จากข้อมูลที่ได้ตั้งแต่ระดับห้องปฏิบัติการสู่ระดับนำทาง จะทำให้ได้ข้อมูลที่สร้างความมั่นใจและความมั่นคงให้เกิดขึ้นในระดับโรงงาน ทำให้สามารถผลิตสินค้าหรือบริการได้อย่างมีคุณภาพและปริมาณตามกำลังที่ได้วางแผนไว้

#### **พารามิเตอร์ที่ต้องคำนึงถึงในการขยายขนาดของถังหมัก**

##### สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer coefficient $k_L a$ )

ในกระบวนการทางชีวภาพ เช่น กระบวนการหมักในสภาวะที่เชื้อต้องการปริมาณออกซิเจน และต้องมีการควบคุมให้มีปริมาณที่เพียงพอ นั้น ในกรณีเช่นนี้ค่า  $k_L a$  จะเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งทั้งเพื่อการเปรียบเทียบลักษณะของถังหมัก สภาวะการเพาะเลี้ยง โดยข้อมูลที่ได้จะนำมาพิจารณาในการออกแบบและการขยายขนาดของถังหมัก โดยปัจจุบันสามารถผลิตถังหมักที่ให้ค่า  $k_L a$  ได้ถึง 200 มิลลิโมลต่อลิตรต่อชั่วโมงต่อบรรยากาศ

การรักษาค่า  $k_L a$  ให้คงที่ โดยการคาดคะเนค่า  $k_L a$  ในถังหมักที่มีขนาดต่างๆ

กันนั้น สามารถใช้ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์อื่นๆที่มีต่อค่า  $k_L a$  ดังแสดงในสมการที่ 124

$$k_L a = f\left[\left(\frac{P_g}{D_Q^3}\right)^a (V_S)^b \left(\frac{B}{6}\right)^{0.8} \left(\frac{J}{D_t}\right)^{0.3}\right] \quad \text{สมการที่ 124}$$

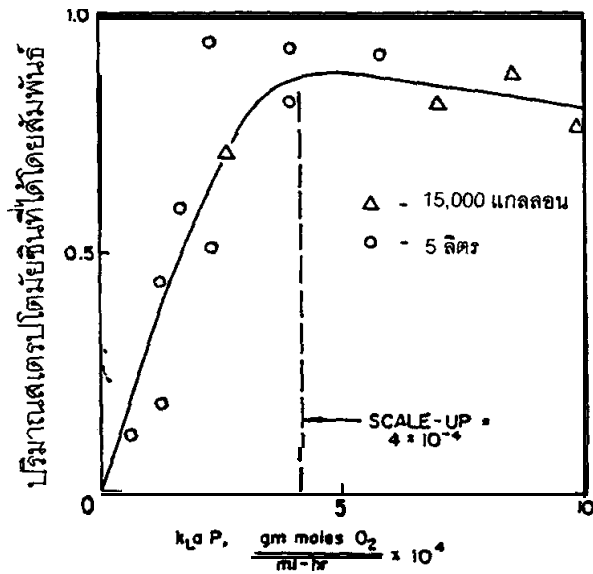
- เมื่อ  $P_g$  เป็นกำลังงานที่ใช้กับระบบที่มีการให้อากาศ  
 $V_S$  เป็นความเร็วของอากาศ  
 $D_t$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน  
 $B$  เป็นจำนวนแผ่นบนใบกวน  
 $J$  เป็นความกว้างของแผ่นกั้น  
 $Q$  เป็นปริมาตรของน้ำหมัก

เมื่อพิจารณาการขยายขนาดของถังหมักที่มีสัดส่วนที่คล้ายคลึงกันแล้ว จะพบว่าความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น แสดงได้ดังสมการที่ 125

$$k_L a = f\left[\left(\frac{P_g}{D_Q}\right)^a (V_S)^b\right] \quad \text{สมการที่ 125}$$

ตารางที่ 43 แสดงค่า  $a$  และ  $b$

ขนาดของถังหมัก (l)	a	b
5	0.95	0.667
500	0.6	0.7
50,000	0.4	-0.5



รูปที่ 89 แสดงผลที่ได้จากการขยายขนาดของถังหมัก เพื่อการผลิต streptomycin โดยการรักษาค่า  $k_L a$  ให้คงที่

กำลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (power per unit volume)

ในการขยายขนาดของถังหมัก โดยที่รูปร่างและสัดส่วนของถังหมักมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันนั้น เมื่อพิจารณาค่าของกำลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร จะพบว่าเกี่ยวข้องกับความเร็วของใบกวน และเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน โดยที่

$$N_2^3 D_2^2 = N_1^3 D_1^2$$

หรือ

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

ในสภาวะที่ลักษณะการไหลเป็นแบบปั่นป่วน

$$P \propto N^3 D_a^5 \rho$$

ดังนั้น

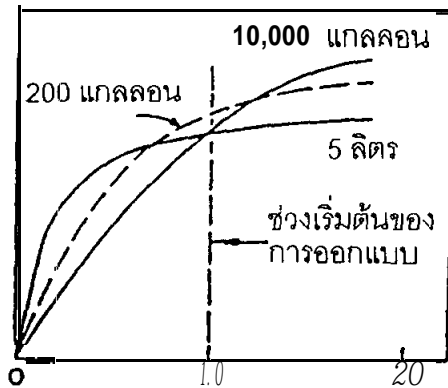
$$\frac{\rho N^3 D_a^5}{V_1} = \frac{\rho N^3 D_a^5}{V_2}$$

$$V_1 \qquad \qquad V_2$$

หรือ

$$N_2 = N_1 \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{1/3} \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{5/3}$$

ผลผลิตของเพนซิลลิน (ยูนิตต่อมิลลิเมตร)

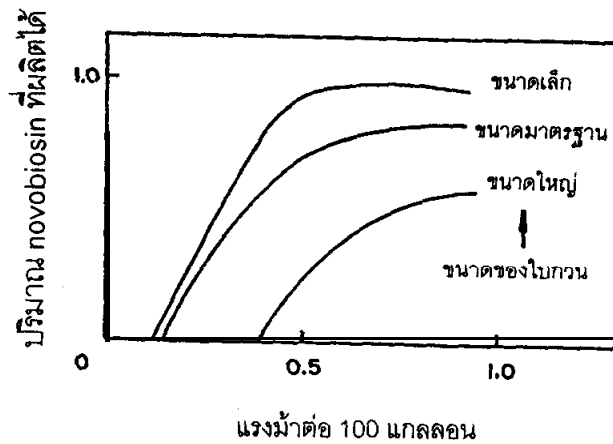


แรงแม่ต่อ 100 แกลลอน

รูปที่ 90 แสดงการขยายขนาดของถังหมัก โดยการคำนึงถึงกำลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

แรงเฉือน (shear force)

ในการเพาะเลี้ยงเชื้อราหรือเซลล์ที่มีความไวต่อแรงกระทบและแรงเฉือน ควรต้องคำนึงถึงแรงเฉือนหรือความเร็วที่ปลายใบกวน ในกรณีที่เป็นกรขยายขนาดของถังหมัก โดยการให้กำลังงานที่ใช้ต่อปริมาตรมีค่าคงที่ จะพบว่าถังหมักขนาดเล็กจะสามารถเพิ่มความเร็วรอบของการหมุนได้มากกว่าการใช้ถังหมักขนาดใหญ่ โดยทั่วไปแล้วค่าความเร็วที่ปลายใบกวนควรมีค่าประมาณ 250 – 500 เซนติเมตรต่อวินาที



รูปที่ 91 แสดงขนาดของไบโกลอนที่มีต่อการผลิต novobiosin

เวลาที่ใช้ในการกวนผสม (mixing time)

ถังหมักที่มีขนาดเล็กหรือมีปริมาตรที่น้อยกว่า 500 ลิตร จะให้ผลการกวนผสมที่ดีกว่าการใช้ถังหมักที่มีขนาดใหญ่หรือมีปริมาตรมากกว่า 500 ลิตร โดย Fox และ Gex ได้สร้างสมการเพื่อคาดคะเนเวลาที่ต้องใช้ เพื่อทำให้เกิดการผสมกันอย่างสมบูรณ์ โดยที่

$$f_t = t_M (ND)^{2/3} g^{1/6} D_r^{1/2} Y^{3/2} T = \text{ค่าคงที่} \quad \text{สมการที่ 126}$$

- เมื่อ  $Re$  มีค่ามากกว่า  $10^5$
- และ  $f_t$  เป็นฟังก์ชันของเวลาที่ทำให้ได้ของผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน
- $N$  เป็นความเร็วรอบ
- $t_M$  เป็นเวลาที่ใช้เพื่อให้เกิดการผสมกันอย่างสมบูรณ์
- $Y$  เป็นความสูงของของเหลว
- $T$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของถังหมัก

$D_i$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน

$g$  เป็นแรงโน้มถ่วงของโลก

ในกรณีการขยายขนาดของถังหมักนั้น มีขนาดที่คล้ายคลึงกัน จะพบว่า

$$\frac{t_{ML}}{t_{MS}} = \frac{N_S^4}{N_L^4} \left( \frac{D_{iL}}{D_{iS}} \right)^{1/6}$$

เมื่ออักษรที่ห้อย เป็น L และ S หมายถึงถังหมักขนาดใหญ่และขนาดเล็กตามลำดับ

ในกรณีที่มีความคล้ายคลึงกันทั้งสัดส่วนและกำลังงานที่ใช้แล้ว จะพบว่า

$$\frac{t_{ML}}{t_{MS}} = \left( \frac{D_{iL}}{D_{iS}} \right)^{11/18}$$

ตารางที่ 41 แสดงเวลาที่ใช้ในการกวนผสม เมื่อมีการขยายขนาดของถังหมัก

ความเร็วรอบ (rpm)	ขนาดถังหมัก (3 ลิตร)	ขนาดถังหมัก (24,000 ลิตร)
30		66
60		41
120	16	26
300	9	
750	5	

## โมเมนต์แฟกเตอร์ (momentum factor)

จากรายงานต่างๆ พบว่า โมเมนต์แฟกเตอร์จะเกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวล โดยที่

$$k_L a = K \left( t_M \right)^{0.203} \frac{P_g^{1.79}}{V} \frac{M_f^{1.08}}{L} N^{0.0437}$$

เมื่อแฟกเตอร์ของโมเมนต์ ( $M_f$ )

$$M_f = (WL) (ND_i) \left| N (D_i - W) \right|$$

โดยที่ L เป็นความยาวของใบกวน

W เป็นความกว้างของใบกวน

V เป็นปริมาตรของน้ำหมัก

## การควบคุมแบบป้อนย้อนกลับ

ลักษณะของการควบคุมแบบป้อนย้อนกลับในระบบการหมักนั้น เพื่อควบคุมและรักษาสภาวะต่างๆ ในกระบวนการหมักให้คงที่ตามที่ต้องการในแต่ละช่วงของการหมัก

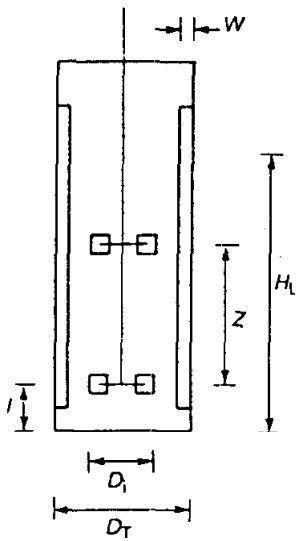
ความเหมือนกันด้านรูปร่าง สัดส่วน จลนพลศาสตร์และพลศาสตร์  
(Geometric, Kinematic and Dynamic Similarities)

## ความเหมือนกันด้านรูปร่าง และสัดส่วน

การขยายขนาดของถังหมักโดยการคำนึงถึงความเหมือนกันด้านรูปร่าง และสัดส่วน เช่น อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางกับความสูงของถังหมักที่คงที่ระหว่างแบบจำลองกับต้นแบบ



ตารางที่ 42 แสดงสัดส่วนของถังหมักที่มีการขยายขนาด



$H_L/D_T$	$D_i$	$l$	$w$	$Z$
1	$D_T/3$	$4i$	$0.1 D_T$	N/A
2	$D_T/3$	$4i$	$0.1 D_T$	$D_T$
3	$D_T/3$	$D_i$	$0.1 D_T$	$D_T$

ความเหมือนกันทางจลนพลศาสตร์

เมื่อมีความจำเป็นต้องการขยายขนาดของถังหมัก โดยการคำนึงถึงความเหมือนกันทางจลนพลศาสตร์แล้ว แสดงว่าความเร็วของของไหลที่จุดต่างๆในถังหมัก มีทิศทางและสัดส่วนเดียวกัน

ความเหมือนกันทางไดนามิก

เมื่อระบบมีความเหมือนกันทั้งรูปร่าง สัดส่วนและจลนพลศาสตร์แล้ว จะทำให้เกิดความเหมือนกันทางไดนามิก หรืออัตราส่วนของแรงที่ให้กับระบบนั้นมีค่าที่เท่ากันในทิศทางเดียวกันด้วย ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำให้เกิดความเหมือนกันได้ในทุกอย่างระหว่างถังหมักที่มีขนาดเล็กและถังหมักที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นวิธีการที่สำคัญ คือ การกำหนดตัวแปร หรือกลุ่มตัวเลขไร้มิติ หรือการกำหนดอิทธิพลหรือปัจจัยที่มีความสำคัญต่อสภาวะการทำงานของกระบวนการนั้น ดังแสดงในตารางที่ 43

ตารางที่ 43 แสดงสัดส่วนของการกววนและการให้อากาศ เมื่อมีการขยายขนาด

พารามิเตอร์	ขนาด 20 แกลลอน	ขนาด 2,500 แกลลอน			
$P_{mo}$	1.0	125	3125	25	0.2
$P_{mo}/v$	1.0	<b>1.0</b>	25	0.2	0.0016
$N$	1.0	0.34	1.0	0.2	0.04
$D_I$	1.0	5.0	5.0	5.0	5.0
$Q$	1.0	42.5	125	25	5.0
$Q/v$	1.0	0.34	<b>1.0</b>	0.2	0.04
$ND_I$	1.0	1.7	5.0	<b>1.0</b>	0.2
$ND_I^2\rho/\mu$	1.0	8.5	25	5.0	<b>1.0</b>

จากผลของการขยายขนาด โดยการกำหนดกลุ่มตัวเลขไว้หน่วยบางกลุ่มให้มีค่าคงที่ เช่น อัตราส่วนกำลังงานต่อปริมาตร (P/V) อัตราการให้อากาศต่อปริมาตร (Q/V) ความเร็วที่ปลายใบกววน (ND) และเลขเรย์โนลด์สเบอร์ (Re) โดยตัวแปรทุกตัวของถังหมักต้นแบบมีขนาดเป็น 5 แกลลอน จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 และจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอิทธิพลที่มีผลต่อการขยายขนาด

ในกรณีที่มีการขยายขนาดโดยการค้ำนึ่งให้ P/V มีค่าคงที่ จะพบว่า ผลของการขยายขนาดจะทำให้ความเร็วรอบและปริมาณอากาศต่อปริมาตรมีค่าที่ลดลง นอกจากนี้ยังทำให้ความเร็วที่ปลายใบกววน และค่าเรย์โนลด์สเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อให้ Q/V มีค่าคงที่ จะพบว่าทำให้ความเร็วรอบมีค่าคงที่ แต่อัตราส่วนของพลังงานต่อปริมาตรและพลังงานที่ต้องการเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วจะทำได้ลำบาก ดังนั้นปกติจึงพบว่าเวลาที่ใช้ในกวนผสมนั้นมักใช้เวลาที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีการขยายขนาด

ส่วนการกำหนดให้ความเร็วที่ปลายใบกววนมีค่าคงที่นั้นจะทำให้ความเร็วรอบ และอัตราส่วนของพลังงานต่อปริมาตรมีค่าลดลง ส่วนค่าเรย์โนลด์สเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และในกรณีที่กำหนดให้ค่าเรย์โนลด์สเบอร์มีค่าคงที่ จะทำให้พลังงานที่ต้องการต่อปริมาตรมีค่าลดลงมาก

และยังมีผลทำให้ตัวแปรเกือบทุกค่ามีค่าที่ลดลงด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติจะไม่นิยมกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์สเป็นค่าคงที่

ในการขยายขนาดใดๆ นอกจากการพิจารณาและกำหนดตัวแปรที่มีอิทธิพลสำคัญต่อกระบวนการให้มีค่าที่คงที่แล้ว ยังต้องพิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อตัวแปรอื่นๆซึ่งอาจมีผลต่อกระบวนการโดยรวมด้วย เช่น ในการขยายขนาดของถังหมักที่ต้องการให้ค่า  $Re$  มีค่าคงที่ เมื่อกำหนดให้คุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆในถังหมักมีค่าที่คงที่แล้ว จะได้

$$(D_i^2 N)_S = (D_i^2 N)_L$$

ตัวอย่างที่ 51 จากตารางที่ 43 จงพิสูจน์ถ้าต้องการขยายขนาดของถังหมักจาก 20 แกลลอน เป็น 2,500 แกลลอน โดยคำนึงถึงค่าเรย์โนลด์สของการขยายขนาดให้มีค่าคงที่

วิธีทำ เมื่อกำหนดให้การขยายขนาดของถังหมักนั้น มีความเหมือนกันทั้งรูปร่างและสัดส่วน

จาก  $V_1 = 20$  ลิตร

$$V_2 = 2,500 \text{ ลิตร}$$

ดังนั้น  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{2,500}{20}$

$$= 125$$

เมื่อ  $V = \frac{\pi D_T^2 H}{4}$

เมื่อ  $D_T$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของถังหมัก

$H$  เป็นความสูงของน้ำหมักที่อยู่ในถังหมัก

เมื่อสัดส่วนของกังหมักมีขนาด  $D_T = H$

ดังนั้น 
$$V = \frac{\pi D_T^3}{4}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \left( \frac{D_{T2}}{D_{T1}} \right)^3$$

$$= 125$$

ดังนั้น 
$$\frac{D_{T2}}{D_{T1}} = 5$$

จากความเหมือนกันด้านรูปร่างและสัดส่วน ดังนั้น

$$\left( \frac{D_1}{D_{T1}} \right) = \left( \frac{D_1}{D_{T2}} \right)$$

เมื่อ  $D_1$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน

เนื่องจากโจทย์กำหนดให้การขยายขนาดนั้น เป็นการรักษาค่าเรย์โนลด์สให้มี

ค่าคงที่

ดังนั้น 
$$Re_1 = 1$$

$$Re_2$$

หรือ 
$$(\rho N D_1^2)_1 = (\rho N D_1^2)_2$$

เนื่องจากคุณสมบัติของสารละลายที่ใช้เหมือนกัน

$$\text{ดังนั้น} \quad (N D_1^2)_1 = (N D_1^2)_2$$

$$\begin{aligned} \frac{N_2}{N_1} &= \left( \frac{D_{11}}{D_{12}} \right)^2 \\ &= \left( \frac{1}{5} \right)^2 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{N_2}{N_1} = 0.04$$

$$\text{จาก} \quad (N D_1^2)_1 = (N D_1^2)_2$$

$$\begin{aligned} \frac{(N D_1^2)_1}{(N D_1^2)_2} &= \frac{D_{11}}{D_{12}} \\ &= \frac{1}{5} \\ &= 0.2 \end{aligned}$$

จากรูปที่ 72 เมื่อ Re มีค่าเท่ากันจะพบว่า  $N_p$  จะมีค่าที่เท่ากันด้วย

$$\text{ดังนั้น} \quad \left( \frac{P_o g_c}{N^3 D_1^5 \rho_1} \right) = \left( \frac{P_o g_c}{N^3 D_1^5 \rho_2} \right)$$

เมื่อหารด้วย  $v = \frac{\pi D_T^3}{4}$  ตลอด

$$\text{จะได้ } \left( \frac{P_o/V}{N^3 D_l^5 / D_T^3} \right)_1 = \left( \frac{P_o/V}{N^3 D_l^5 / D_T^3} \right)_2$$

$$\frac{(P_o/V)_2}{(P_o/V)_1} = \left( \frac{N^3 D_l^5 / D_T^3}{N^3 D_l^5 / D_T^3} \right)_2$$

$$= \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^3 \left( \frac{D_{l2}}{D_{l1}} \right)^5 \left( \frac{D_{T1}}{D_{T2}} \right)^3$$

$$= \left( \frac{1}{5} \right)^6 (5)^5 (1)^3$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{(PV)_2}{(PV)_1} = (1/5)^4$$

$$= 0.0016$$

ในการขยายขนาดของถังหมักทางชีวภาพจากขนาด 20 แกลลอน เป็น 2,500 แกลลอน โดยการรักษาค่าเรย์โนลด์เบอร์รี่ให้มีค่าคงที่ จะต้องใช้

$$P_o/V = 0.0016$$

$$N = 0.04 \text{ รอบต่อนาที}$$

$$\text{และ } ND_l = 0.2$$

ตัวอย่างที่ 52 ถ้าต้องการขยายขนาดของถังหมักที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 ฟุต ที่มีใบกวนเป็นใบพาย 6 ใบพัด และขนาดของใบพัดมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4 นิ้ว ถ้าการหมุนของใบกวนนี้ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน โดยมีค่าเรย์โนลด์สเท่ากับ  $10^4$  ซึ่งทำให้เวลาที่ใช้เพื่อการกระจายสารละลายกรดหรือด่างที่เติมลงไปนั้น สามารถกระจายได้หมดภายใน 15 วินาที โดยกำลังงานที่ใช้เป็น 2 กำลังม้าต่อ 1000 แกลลอน จงคำนวณกำลังงานที่ต้องใช้เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังหมักเท่ากับ 6 ฟุต โดยการคงพารามิเตอร์อื่นไว้

วิธีทำ จากรูปที่ พบว่า  $Re = 10^4$

ค่า  $N_p$  จะมีค่าเท่ากัน

จากโจทย์  $t_1 = t_2$

เมื่อ  $t_1$  และ  $t_2$  เป็นเวลาที่ใช้ในการกวนผสมในถังหมักที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 ฟุต และ 6 ฟุต ตามลำดับ

$$\text{และ} \quad \left( \frac{P_o/V}{N^3 D_i^5 \rho} \right)_1 = \left( \frac{P_o/V}{N^3 D_i^5 \rho} \right)_2$$

$$\frac{(P_o/V)_2}{(P_o/V)_1} = \frac{(D_i^5/D_T^3)_2}{(D_i^5/D_T^3)_1}$$

เนื่องจากการขยายขนาดของถังหมักใช้หลักการเหมือนกันด้านรูปร่างและสัดส่วน ดังนั้น

$$\left( \frac{D_i}{D_T} \right)_1 = \left( \frac{D_i}{D_T} \right)_2$$

ดังนั้น

$$\frac{D_{T2}}{D_{T1}} = \frac{D_{I2}}{D_{I1}} = \frac{6}{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{(P_o/V)_2}{(P_o/V)_1} &= \left(\frac{D_{I2}}{D_{I1}}\right)^5 \left/\left(\frac{D_{T1}}{D_{T2}}\right)^3\right. \\ &= \frac{6^5}{6^3} \\ &= 36 \end{aligned}$$

ดังนั้น กำลังงานที่ต้องใช้ต่อปริมาตร เท่ากับ  $2 \times 36 = 72$  กำลังม้า

---