หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ถังผสมและใบพัดกวนแบบต่างๆ

2.1. คำนำ

ใบพัดกวนที่ใช้อยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมเคมีนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด แต่ละชนิดก็นำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะพิเศษต่าง ซึ่งผู้ใช้งานจะต้องมีความรู้และความเข้าใจในคุณสมบัติของของเหลวและคุณสมบัติของใบพัดกวนชนิดนั้นๆ ดังนั้นเพื่อให้ผู้ใช้โปรแกรมหรือผู้ที่สนใจได้เข้าใจในหลักการและที่มาในการเลือกชนิดและกำหนดขนาดของใบพัดกวนและนำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้งานให้เกิดประโยชน์สูงสุดในบทนี้จึงได้รวบรวมความรู้ที่เกี่ยวข้องดังนี้:

ก. การผสม ซึ่งได้แก่ความรู้เรื่องคุณสมบัติของของเหลว ทฤษฎีเรื่องการผสม ทฤษฎีเรื่องกำลังงาน.

ข. ส่วนประกอบของถังผสม จะอธิบายถึงส่วนประกอบต่างๆของถังผสม ความสำคัญและหลักเกณฑ์ที่จะต้องคำนึงถึงในการเลือกใช้งาน การกำหนดขนาดและตำแหน่งการติดตั้ง.

ค. ชนิดของใบพัดกวนและการติดตั้ง จะกล่าวถึงคุณสมบัติของใบพัดกวนชนิดต่างๆ ขอบเขตการใช้งานและหลักเกณฑ์ในการเลือกชนิดและกำหนดขนาดของใบพัดกวน.

2.2.ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

2.2.1. ความรู้เรื่องคุณสมบัติของของเหลว

ของเหลวแบ่งตามคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

ก. นิวโทเนียน

ข. นอนนิวโทเนียน

ก.นิวโทเนียน คือ ของเหลวที่มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ คือ ความหนาแน่น ความหนืดสม่ำเสมอและคงที่ จะเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิและความดันเปลี่ยนเท่านั้น.

$$\rho = (x\rho_x) + (Y\rho_y) \tag{2.1}$$

$$\mu = (\mu_x)^x + (\mu_y)^y \tag{2.2.}$$

สมการที่ 2.2. ใช้ได้สำหรับของเหลวที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

$$\mu = \left(\frac{\mu_x}{\mu_y}\right)\left[\frac{1+\left(1.5+(x)\left(\mu_y\right)\right)}{\mu_x \mu_y}\right] \tag{2.3}$$

สมการที่ 3 ใช้สำหรับของเหลวที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่

x = ของเหลวเฟสต่อเนื่อง

y = ของเหลวเฟสกระจาย

ข. นอนนิวโทเนียน คือ ของเหลวที่มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ไม่สม่ำเสมอ แรงเค้นเฉือนหรือความหนืดจะไม่แปรผันโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อระยะทาง ความหนืดจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลเปลี่ยนเท่านั้น ดังนั้นคุณสมบัติของของผสมไม่สามารถคำนวณได้จากสมการ จะต้องวัดจากค่าจริงเท่านั้น.

ความหนืดจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลเปลี่ยนเท่านั้น ดังนั้นคุณสมบัติของของผสมไม่สามารถคำนวณได้จากสมการ จะต้องวัดจากค่าจริงเท่านั้น.

2.2.2. ความรู้เรื่องกระบวนการผสม

กระบวนการผสมแบ่งเป็น 2 กระบวนการ คือ

ก. เบล็นดิง คือ การผสมของเหลวตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ที่สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ ผลที่ได้จะได้ของเหลวเนื้อเดียวกันหรือเรียกว่าของเหลวเฟสเดียว.

ข. อีมัลชัน คือ การผสมของเหลวตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ที่ไม่สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ ผลที่ได้จะได้ของเหลวตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปกระจายตัวอยู่ด้วยกันอย่างสม่ำเสมอซึ่งเรียกว่าของเหลวเฟสกระจาย กระจายตัวอยู่ในของเหลวเฟสต่อเนื่อง.

2.2.3. ทฤษฎีเรื่องกำลังงานที่ใช้ในการกวนของเหลว

ทฤษฎีเรื่องกำลังงานที่ใช้อธิบายและคำนวณหากำลังงานที่ใช้ในการผสม สามารถอธิบายจากความสัมพันธ์ของสมการไร้หน่วย ได้ดังนี้

N = ความเร็วของใบพัดกวน (Impeller Speed)

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัดกวน (Impeller Diameter)

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (Liquid Density)

μ = ความหนืดของของเหลว (Liquid Viscosity)

g = ความเร่งเนื่องเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Gravitational Acceleration)

P = กำลังงานที่ใช้ในการกวน

$$P = f(N, D, \rho, \mu, g) \qquad (2.4)$$

$$P = C N^a D^b \rho^c \mu^d g^e \qquad (2.5)$$

ให้ C = ค่าคงที่ แทนหน่วย มวล ด้วย M, ความยาวด้วย L และเวลาด้วย T ดังนั้นแต่ละเทอมจะแทนค่าด้วยหน่วยได้ดังนี้

$$\frac{ML^2}{T^3} = \left(\frac{1}{T}\right)^a \left(\frac{L}{1}\right)^b \left(\frac{M}{L^3}\right)^c \left(\frac{M}{LT}\right)^d \left(\frac{L}{T^2}\right)^e$$

M: $\quad 1 = c + d$

L: $\quad 2 = b - 3c - d + e$

T: $\quad -3 = -a - d - 2e$

$$C = 1 - d$$

$$b = 5 - 2d - e$$

$$a = 3 - d - 2e$$

จากสมการ (2.2.3.2.) แทนค่า a, b, c จะได้

$$P = CN^{3-d-2e} D^{5-2d-e} \rho^{e-d} \mu^d g^e$$

ดังนั้น $$P = C \rho N^3 D^5 \left(\frac{\mu}{\rho N D^2}\right)^d \left(\frac{g}{N^2 D}\right)^e$$

จัดเทอมใหม่จะได้

$$\frac{P}{\rho N^3 D^5} = C \left(\frac{\rho N D^2}{\mu}\right)^{-d} \left(\frac{N^2 D}{g}\right)^{-e}$$

ให้ $\quad x = -d, \quad y = -e$

$$\frac{P}{\rho N^3 D^5} = C \left(\frac{\rho N D^2}{\mu}\right)^{x} \left(\frac{N^2 D}{g}\right)^{y} \qquad (2.6)$$

$$N_{Re} = f(N_{Re}, N_{Fr})$$

$$N_p = \text{Power Number}\left(\frac{P}{\rho N^3 D^5}\right)$$

$$N_{Re} = \text{Reynolds Number}\left(\frac{\rho N D^2}{\mu}\right)$$

$$N_{Fr} = \text{Froude Number}\left(\frac{N^2 D}{g}\right)$$

สมการ 2.6 เป็นสมการพื้นฐานในการคำนวณหาค่ากำลังงาน ในการผสมโดยใช้ใบพัดกวนชนิดต่างๆ ได้มีผู้ทดลองหาค่าคงที่ต่างๆ เพื่อใช้เป็นสมการในการคำนวณหากำลังงานที่ใช้กวนของเหลวให้ผสมกัน ซึ่งจากการรวบรวมและศึกษาข้อมูล พบว่าสมการดังต่อไปนี้ใช้คำนวณหากำลังงานของใบพัดกวนชนิดต่างๆ จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงที่สุด.

ก. ใบพัดกวนแบบใบพัด (propeller)

$$P = \left(\frac{K_2}{g}\right) \mu N^2 D^3 \qquad (2.7)$$

$K_2 = 41 \quad ; N_{Re} < 300$

ถ้า $300 < N_{Re} < 10{,}000$ ในถังกวนที่ไม่มีแผ่นกั้น จะพบว่า

$$P = \left(\frac{21}{g}\right) \rho N^3 D^5 \left(\frac{N^2 D}{g}\right)^{\frac{2.1-1.8\log N_{Re}}{1.8}} \qquad (2.8)$$

$N_{Re} > 300$ ในถังกวนที่ไม่มีแผ่นกั้น จะพบว่า

$$P = \left(\frac{0.32}{g}\right) \mu N^3 D^5 \qquad (2.9)$$

ρ คือ ความหนาแน่น (ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต)

P คือ กำลังงาน (ฟุต.ปอนด์/วินาที)

μ คือ ความหนืด (ปอนด์/ฟุต . วินาที)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ปอนด์/วินาทีกำลังสอง)

N คือ ความเร็วรอบในการกวน (รอบ/วินาที)

ข.ใบพัดกวนแบบกังหัน (Turbine)

ใบพัดกวนแบบกังหัน ที่จะกล่าวในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มี 2 แบบ คือ

1.กังหันแบบใบตรง (FlatBladeTurbine)

แบบ 2 ใบพัด: $Pg_c = 13.8\,\rho N^3 D^{3.85} W^{1.23}$

แบบ 4 ใบพัด: $Pg_c = 19.4\,\rho N^3 D^{3.85} W^{1.15}$

แบบ 6 ใบพัด: $Pg_c = 23.7\,\rho N^3 D^{3.85} W^{1.09}$

แบบใบพัด > 6: $Pg_c = 23.7\,\rho N^3 D^{3.85} W^{1.09} \left(\frac{n}{6}\right)^{0.7}$, $n =$ จำนวนใบพัด

2. กังหันแบบใบเจีย (PitchBladeTurbine)

แบบ 2 ใบพัด: $Pg_c = 13.8\,\rho N^3 D^{3.85} W^{1.23} (Sin\,\theta)^{2.5}$

แบบ 4 ใบพัด: $Pg_c = 19.4\,\rho N^3 D^{3.85} W^{1.15} (Sin\,\theta)^{2.5}$

แบบ 6 ใบพัด: $Pg_c = 23.7\,\rho N^3 D^{3.85} W^{1.09} (Sin\,\theta)^{2.5}$

แบบใบพัด > 6: $Pg_c = 23.7\,\rho N^3 D^{3.85} W^{1.09} (n/6)^{0.7} (Sin\,\theta)^{2.5}$; $n =$ จำนวนใบพัด

ค. กังหันแบบใบพาย (paddle)

กังหันแบบใบพาย ที่จะกล่าวในวิทยานิพนธ์นี้ มีดังนี้ คือ

1. ใบพายแบบพื้นฐาน (Simple Paddle)

$$Pg_c = 113\ \mu N^2 D^{2.48} W^{0.52}$$

2. ใบพายแบบเกลียวโปร่ง (Helical Ribbon)

$$\frac{Pg}{\rho N^3 D^5} = 150 N_{Re}^{-1}\left(\frac{C}{D}\right)^{-0.8}\left(\frac{S}{D}\right)^{-0.53}\left(\frac{h}{D}\right)\left(\frac{W}{D}\right)^{0.33}$$

3. ใบพายแบบสมอเรือ (Anchor)

$$\frac{Pg}{\rho N^3 D^5} = 85 N_{Re}^{-1}\left(\frac{C}{D}\right)^{-0.31}\left(\frac{h}{D}\right)^{0.4}$$

2.3. ส่วนประกอบของถังผสม

2.3.1. ถัง

ถังจะมีรูปร่างหลายแบบขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับการใช้งาน เช่น ถังทรงกระบอก ถังรูปกรวย ถังกลม ถังแต่ละรูปร่างก็มีขอบเขตการใช้งานและการออกแบบแตกต่างกันแต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการเลือกใบพัดกวนที่ใช้กับถังกวนมาตราฐาน ซึ่งหมายถึงถังทรง1 กระบอก ก้นเรียบ มีอัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางต่อความสูงของของเหลว = 1.

2.3.2. แผ่นกั้น (baffle)

เป็นส่วนประกอบภายในถัง การติดแผ่นกั้นในตำแหน่งที่เหมาะสมกับลักษณะของใบพัดกวนและชนิดของของเหลว ทำให้การกวนมีประสิทธิภาพดีขึ้น คือช่วยป้องกันไม่ให้ของเหลวมีพฤติกรรมการไหลแบบวอร์เทกซ์ (vortex) เกิดขึ้น ซึ่งมักจะเกิดขึ้นในการกวนของเหลวความหนืดต่ำ ในถังกวนทรงกระบอกที่ติดตั้งใบพัดกวนตรงกลางถัง.

จากการทดลองพบว่าการติดแผ่นกั้น 4 แผ่นติดกับผนังของถัง มีโดยมีระยะห่างเท่าๆ กันจะให้ผลดี สำหรับการผสมของเหลวในกระบวนการเบล็นดิงของเหลวที่ให้ค่าเรโนลด์มากกว่า 300 และขนาดของแผ่นกั้นควรจะมีความกว้าง 1/8 - 1/10 ของเส้นผ่าศูนย์กลางของถัง และของเหลวที่มีความหนืดสูงหรือการกวนที่ให้ค่าเรโนลด์น้อยกว่า 300 ไม่จำเป็นต้องมีแผ่นกั้น.

2.4.ชนิดต่างๆ ของใบพัดกวนและการใช้งาน

ใบพัดกวนที่ใช้ในอุตสาหกรรมนั้นมีมากมาย แบ่งตามลักษณะรูปร่างของใบพัดกวนออกเป็นแบบพื้นฐานได้ 3 แบบ คือ

ก. แบบใบพาย (paddle)

ข. แบบใบพัด (propeller)

ค. แบบกังหัน (turbine)

ลักษณะการไหลของของไหลที่เกิดจากการหมุนของใบพัดกวนทั้ง 3 แบบ นี้แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ การไหลวนในแนวแกนของถัง (axial flow) และการไหลในแนวรัศมีของถัง (radial flow)

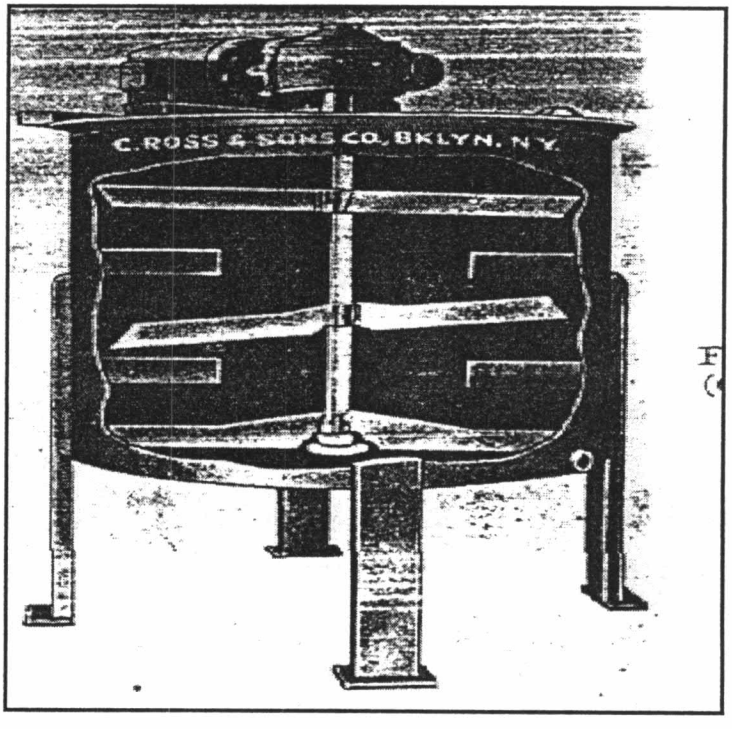
2.4.1. แบบใบพาย (paddle)

ใบพัดกวนแบบใบพายเป็นใบพัดกวนที่ใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรม โดยปรกติจะประกอบด้วย 2 ใบ มีทั้งในแนวดิ่งและแนวขนาน มีอัตราส่วน D/T สูง ใช้งานในช่วงการ

ไหลแบบราบเรียบไปยังการไหลแบบปั่นป่วน โดยไม่ใช้แผ่นกั้น นอกจากนี้ใบพัดกวนแบบใบพายยังใช้ได้กับของเหลวที่มีความหนืดสูง

ใบพัดกวนแบบใบพายที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ก. ใบพายแบบพื้นฐาน (Basic Paddle)



รูปที่ 2.1 ใบพัดกวนแบบใบพายพื้นฐาน

ใบพัดกวนแบบใบพายพื้นฐาน เป็นใบพัดกวนที่ใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรม สามารถใช้งานได้กับของเหลวเกือบทุกชนิด จึงสามารถใช้แทนใบพัดกวนชนิดอื่นได้ อัตราส่วน D/T ขึ้นอยู่กับชนิดและความหนืดของของเหลว เช่น ในการกวนของเหลวแบบนอนนิวโทเนียนที่มีความหนืดสูง อัตราส่วน D/T จะต้องสูง คือ 0.6-0.8 กวนของเหลวที่มีความหนืดต่ำ อัตราส่วน D/T จะต้องต่ำ คือ 0.2-0.4 แต่ใบพัดกวนชนิดนี้จะให้ประสิทธิ

ภาพต่ำ ต้องใช้เวลา และกำลังงานในการกวนสูงกว่าใบพัดกวนชนิดอื่น.

ขอบเขตการใช้งาน

- อัตราส่วน D/T: 0.6 - 0.9 (μ > 5000 เซนติพอยท์)

0.2 - 0.5 (μ < 5000 เซนติพอยท์)

- ความเร็วที่ปลายใบพัด: 250 - 450 ฟุต/นาที

- ใช้กวนของเหลวที่มีความหนืด: 0- 50000 เซนติพอยท์

ข้อดี

- ปฏิบัติการง่าย อายุการใช้งานสูง

- ราคาค่อนข้างถูก

- บำรุงรักษาง่าย

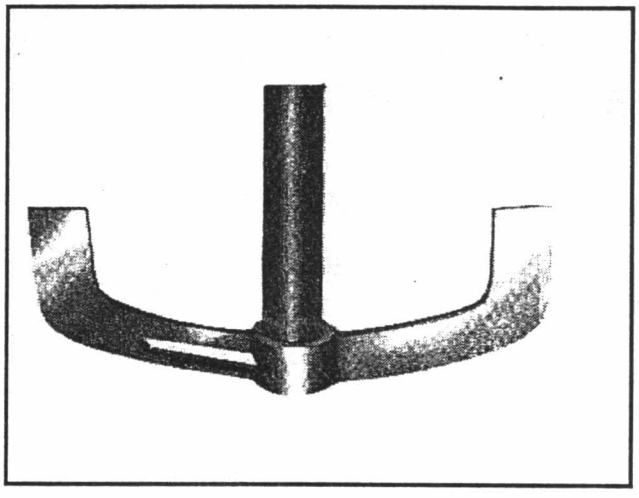
ข้อเสีย

- ติดตั้งยาก เพื่อให้การปฏิบัติการมีประสิทธิภาพสูงสุด

- ที่ความหนืดสูงๆ จะต้องใช้พลังงานสูงเมื่อเปรียบเทียบใบพัดกวนแบบเกลียวโปร่ง

ข. ใบพายแบบสมอเรือ (Anchor)

ใบพัดกวนชนิดใบพายแบบสมอเรือ เป็นใบพัดกวนแบบใบใบพาย ที่ปฏิบัติการที่ความเร็วต่ำ เหมาะสำหรับของเหลวที่มีความหนืดปานกลางถึงความหนืดสูง มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูง ใช้งานได้ดีสำหรับของเหลวแบบนิวโทเนียน ความหนืด 5000 - 50000 เซนติพอยท์ ที่ความหนืดมากกว่านี้จะใช้พลังงานสูงมาก.



รูปที่ 2.2ใบพัดกวนชนิดใบพายแบบสมอเรือ

ขอบเขตการใช้งาน

- อัตราส่วน D/T: 0.8 - 0.95
- ความเร็วที่ปลายใบพัด: 450 ฟุต/นาที
- ใช้กวนของเหลวที่มีความหนืด: 5000 - 50000 เซนติพอยท์

ข้อดี

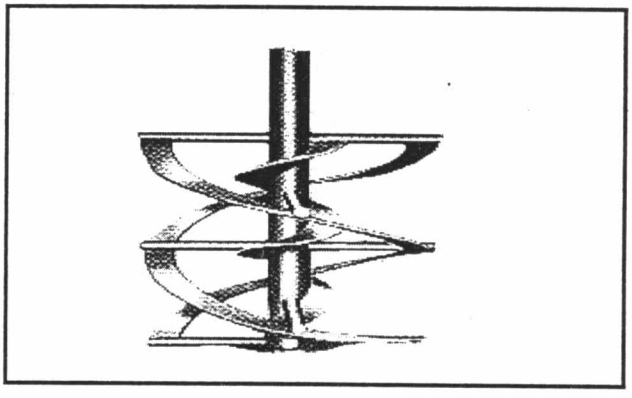
- ปฏิบัติการง่าย อายุการใช้งานสูง
- สามารถถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ขณะปฏิบัติการได้ดี
- บำรุงรักษาง่าย

ข้อเสีย

- ใช้งานได้ในขอบเขตที่จำกัดคือ ใช้ได้ดีเฉพาะของเหลวที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันและเป็นของเหลวแบบนิวโทเนียนเท่านั้น

- ที่ความหนืดสูง (> 50000) จะใช้พลังงานสูงมาก

ค.ใบพายแบบเกลียวโปร่ง (Helical Ribbon)



รูปที่ 2.3.ใบพัดกวนชนิดใบพายแบบเกลียวโปร่ง

ใบพัดกวนชนิดใบพายแบบเกลียวโปร่ง เป็นใบพัดกวนแบบใบพายชนิดพิเศษ ที่ให้ประสิทธิภาพในการกวนของเหลวสูง แต่ราคาแพง และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง ที่ความหนืดสูงมากๆ จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าใบพัดกวนชนิดอื่นๆ.

ขอบเขตการใช้งาน

- อัตราส่วน D/T: 0.9- 0.95
- ความเร็วที่ปลายใบพัด: 450 ฟุต/นาที
- ใช้กวนของเหลวที่มีความหนืด: > 50000 เซนติพอยท์
- อัตราส่วน W/D: 0.1

ข้อดี

- ใช้งานได้ดีในของเหลวที่มีความหนืดสูงมากๆ โดยใช้พลังงานที่ต่ำกว่า

- สามารถถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ขณะปฏิบัติการได้ดี

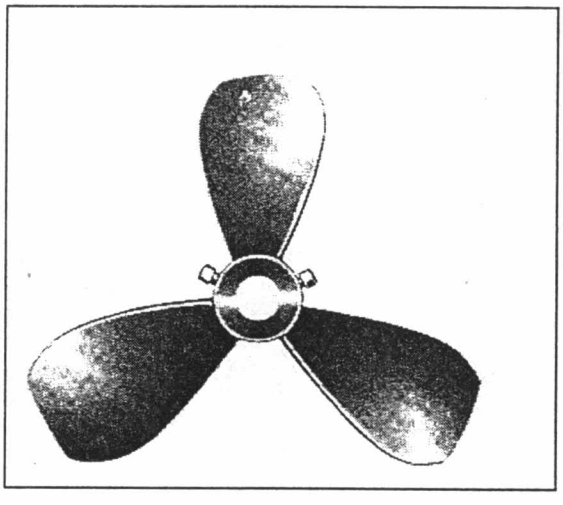
ข้อเสีย

- ราคาแพงมาก

- บำรุงรักษายาก ค่าใช้จ่ายสูง

2.4.3. ใบพัดกวนแบบใบพัด (propeller)

เป็นใบพัดกวนที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการไหลในแนวขนาน (axial flow) มีประสิทธิภาพสูงเมื่อกวนที่ความเร็วสูง ใช้งานได้ดีในของเหลวที่มีความหนืดต่ำ ที่นิยมใช้คือใบพัดแบบสมอเรือ 3 ใบพัด.



รูปที่ 2.4. ใบพัดกวนแบบใบพัด

ขอบเขตการใช้งาน

- อัตราส่วน D/T: 0.33

- ความเร็วที่ปลายใบพัด: 600 - 900 ฟุต/นาที

- ใช้กวนของเหลวที่มีความหนืด: < 5000 เซนติพอยท์

ข้อดี

- ปฏิบัติการง่าย อายุการใช้งานสูง

- ราคาค่อนข้างถูก

- บำรุงรักษาง่าย

- ประหยัดพลังงาน

ข้อเสีย

- ติดตั้งยาก เพื่อให้การปฏิบัติการมีประสิทธิภาพสูงสุด

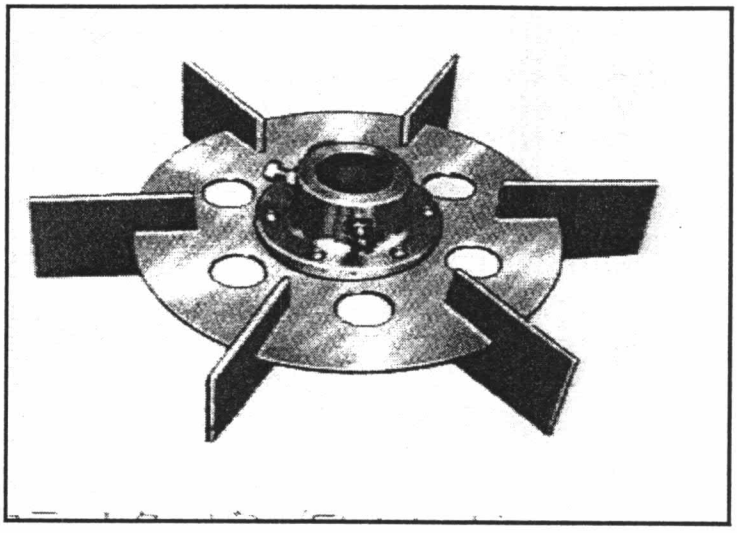
- ใช้ไม่ได้กับของเหลวที่มีความหนืดสูง

2.4.3. ใบพัดกวนแบบกังหัน (Turbine)

ใบพัดกวนที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการไหลในแนวรัศมี (radial flow) ความเร็วในการกวนจะช้ากว่าใบพัดกวนแบบใบพัด สามารถใช้กับของเหลวทุกชนิด จึงนิยมใช้อยู่ทั่วไป ที่เหมาะกับงานผสมของเหลวมีอยู่ 2 ชนิดคือ

ก. กังหันชนิดใบตรง (Flat Blade Turbine)

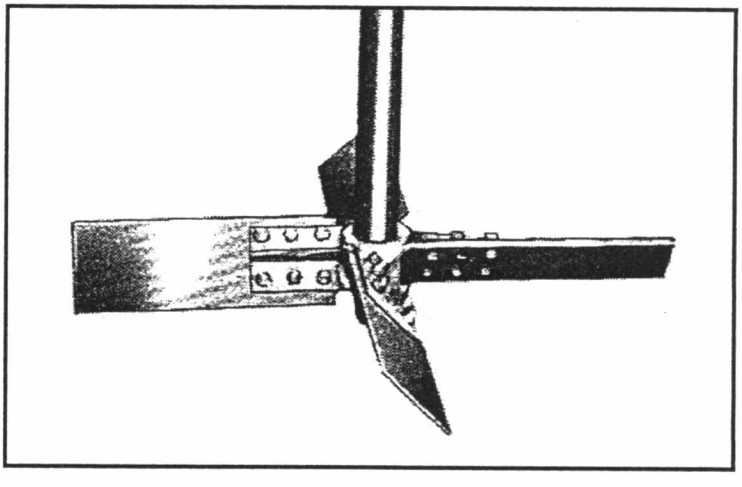
เป็นใบพัดกวน ที่นิยมใช้แพร่หลาย ในอุตสาหกรรมทั่วไป เนื่องจากออกแบบง่าย ราคาไม่แพงนัก สามารถใช้ได้กับของเหลวเกือบทุกชนิด มีแรงเฉือนสูงจึงเหมาะสำหรับกวนของเหลวในกระบวนการอีมัลชัน สำหรับของเหลวที่ไม่ผสมกัน.



รูปที่ 2.5. ใบพัดกวนแบบกังหันชนิดใบตรง

ข. กังหันชนิดใบเจีย (Pitch Blade Turbine)

เป็นใบพัดกวน ที่นิยมใช้แพร่หลาย ในอุตสาหกรรมทั่วไป เนื่องจากออกแบบง่าย ราคาไม่แพงนัก สามารถใช้ได้กับของเหลวเกือบทุกชนิด มีแรงเฉือนสูงจึงเหมาะสำหรับกวนของเหลวในกระบวนการอีมัลชัน สำหรับของเหลวที่ไม่ผสมกัน.



รูปที่ 2.6. ใบพัดกวนแบบกังหันชนิดใบเจีย

ขอบเขตการใช้งาน

- อัตราส่วน D/T: 0.2 - 0.8
- ความเร็วที่ปลายใบพัด: 200 - 450 ฟุต/นาที
- ใช้ได้ทั้งของเหลวที่มีความหนืดต่ำและสูง คือ

ที่ความหนืดต่ำ (< 5000) อัตราส่วน: D/T 0.2 - 0.4

ที่ความหนืดสูง (> 5000) อัตราส่วน: D/T 0.5 - 0.8

- ทำให้เกิดแรงเฉือนสูงจึงเหมาะสำหรับการผสมแบบอีมัลชัน
- อัตราส่วน D/W: 0.1 - 0.5

ข้อดี

- ปฏิบัติการง่าย ที่ความเร็วที่เหมาะสมอายุการใช้งานสูง
- ราคาค่อนข้างถูก
- บำรุงรักษาง่าย

ข้อเสีย

- ใช้พลังงานสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับใบพัดกวนแบบใบพัด
- ใช้ได้ดีเฉพาะที่ความเร็วรอบต่ำ