

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบถังกวน

สามารถ มูลอามาตย์

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

ถังกวนเป็นถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่นิยมใช้สำหรับการหมักในสภาวะที่มีออกซิเจน ส่วนประกอบที่สำคัญของถังกวนได้แก่ ใบกวนซึ่งมีอยู่หลายชนิด นอกจากนั้นถังกวนยังประกอบด้วย อุปกรณ์ที่ช่วยให้การกวนมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น คือ แผ่นแบฟเฟิล (baffle) และ ท่อดราฟ (draft tube) การออกแบบถังกวนจะพิจารณาถึงขนาดรูปร่างของถังและของใบกวนอุปกรณ์ต่างๆ ภายในตัวถัง และที่สำคัญการออกแบบจะต้องพิจารณาถึงกำลังงานที่ใช้ในการกวนเป็นต้น ถังกวนที่ดีควรเป็นระบบที่ให้พลังงานในการกวนต่ำ ในขณะที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนควรมีค่าสูงๆ

Stirred Tank Bioreactor

samart mool-amart

Department of Biotechnology

Faculty of Technology Khon Kaen University.

Abstract

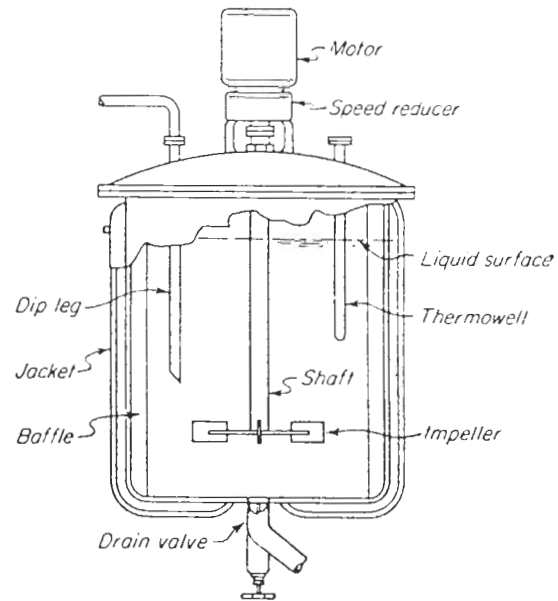
Stirred tank reactor is a major bioreactor type widely employed in aerobic fermentation processes. Its main functional component, viz. mixing device, comprises of various agitator types. It normally has facilities equipped for enhancing the mixing efficiency, i.e. baffles and draft tubes. In designing a stirred tank bioreactor one must consider its shape, size of tanks and impellers as well as all other equipments and facilities attached to the tank. An important parameter to be analysed in the design is its power consumption which has interrelationship with the types of agitator, agitation speeds and rheological properties of liquids. A well-designed bioreactor should exert low mixing energy, whereas providing high levels of mass and heat transfer coefficients

บทนำ

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้ในอุตสาหกรรมหมักมีอยู่หลายแบบด้วยกัน[1] ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบถังกวน (stirred tank bioreactor) เป็นชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันแพร่หลายโดยเฉพาะในกระบวนการหมักที่มีการให้อากาศ เพราะดำเนินการได้สะดวก ใช้ต้นทุนต่ำและมีประสิทธิภาพพอควร ถังกวนมีหลายขนาดอาจมีตั้งแต่ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งส่วนมากทำจากวัสดุจำพวกแก้ว มีขนาดไม่เกิน 20 ลิตร ในกรณีถังกวนที่มีปริมาตรมากกว่านี้ส่วนใหญ่จะทำด้วยเหล็กสแตนเลส อัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของถังกวน จะมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 2:1 ถึง 6:1 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่ต้องการถ่ายเท[2]

อุปกรณ์ต่างๆ ของถังกวน[3]

ถังกวนโดยทั่วไปจะมีขนาดและรูปร่างแสดงอยู่ในรูปที่ 1 ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้



รูปที่ 1 แบบมาตรฐานถังกวน [6]

ถัง

ถังที่ใช้เป็นภาชนะบรรจุของเหลวที่ต้องการกวน มักจะเป็นถังทรงกระบอก ก้นถังมีลักษณะโค้งมนเพื่อลด stagnant region ปลายบนอาจเปิดสู่บรรยากาศแต่ส่วนมากมักจะปิด ในกรณีที่มีใบกวน (impeller) เพียงอันเดียว ความสูงของของเหลวมักจะมีค่าเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของถัง ใบกวนมักจะติดตั้งตรงตำแหน่งกึ่งกลางของถัง

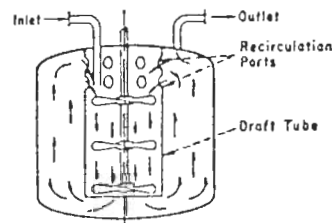
แบฟเฟิล (Baffle)

แบฟเฟิลเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ด้านข้างภายในถังกวน (ดังรูปที่ 1) มีหน้าที่ป้องกันการเกิดการไหลวน (swirling) และป้องกันการเกิด vortex เมื่อใบกวนหมุนด้วยความเร็วสูง ความกว้าง

ของแบฟเฟิลจะเป็น $1/12$ เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางถัง ($W = D_T / 12$) ความยาวของแบฟเฟิลคือ ระยะที่อยู่เหนือกันถึง $d/12$ (d เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน) จนถึงระดับของของเหลว ในกรณีที่มือนาคของแข็งหรือมีการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังถังกวน แบฟเฟิลจะอยู่ห่างจากถังเป็น ระยะ $W/6$ จำนวนแบฟเฟิลมักจะมี 4 อันวางห่างกันเป็นระยะเท่าๆ กัน (บางกรณีก็ใช้ 6 อัน ซึ่ง ให้ผลในการกวนดีกว่า) ในกรณีที่ใบกวนมิได้อยู่ตรงกลางของถังกวน (มักอยู่ระหว่าง $1/2$ - $1/4$ ของ รัศมีถังกวน) ลักษณะการไหลวนจะลดลงจึงไม่จำเป็นต้องใช้แบฟเฟิล

ท่อดราฟ (Draft Tube)

เป็นท่อทรงกระบอกปลายเปิดทั้ง 2 ด้าน ขนาดใหญ่กว่าใบกวนเล็กน้อย ความยาวขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหล ดังในรูปที่ 2 ตัว ท่อดราฟวางอยู่ในลักษณะสวมกับแกนของใบกวน ท่อดราฟนี้ มักใช้ในกรณีที่ต้องการให้มีการไหลหมุนเวียนในแนวแกน คือ ไหลในแนวนบน-ล่างของถังกวน



Draft tubes prevent short-circuiting of liquid from Inlet to outlet in a continuous mixing vessel. (Courtesy A.P. Weber, *Chem. Engr.*, Oct. 1953, McGraw-Hill, p.183.)

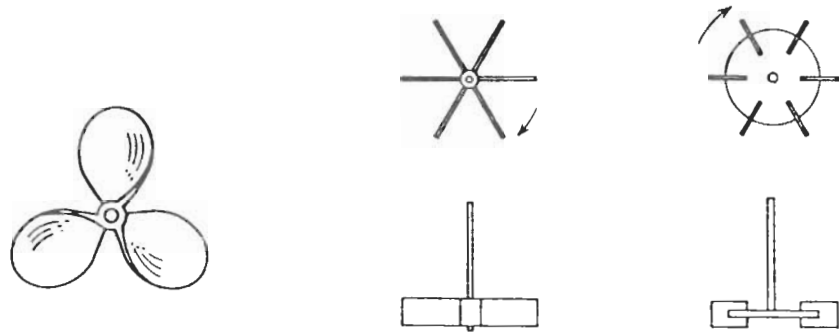
รูปที่ 2 แสดงรูปแบบของการไหลของตัวกวนที่มีท่อดราฟ[6]

ใบกวน (impellers)

ใบกวนมีหลายแบบ อาจแบ่งได้ตามลักษณะที่ทำให้เกิดการไหลของของไหลคือ การไหลในแนวแกนและการไหลในแนวรัศมี ดังนี้

ใบกวนแบบ propellers จัดเป็นพวกใบกวนที่มีการไหลในแนวแกนเหมาะที่จะใช้เป็นใบกวนความเร็วสูงสำหรับใช้ในการกวนของเหลวที่มีความหนืดต่ำ (ไม่เกิน 3 Pa.s หรือ 30,000 cp)

ใบกวน propeller ที่มีขนาดเล็กจะใช้กับความเร็วกดติของมอเตอร์ไฟฟ้าคือ 1,150 หรือ 1,750 รอบต่อนาที ถ้าใบกวนแบบ propeller ขนาดใหญ่ขึ้นความเร็วจะลดลงประมาณ 400-800 รอบต่อนาที ตัวอย่างของใบกวนชนิดนี้แสดงในรูปที่ 3(ก)



(ก.) propeller (ข.) open straight blade turbine (ค.) blade disk turbine

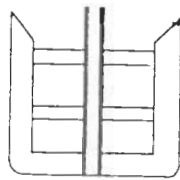
รูปที่ 3 ลักษณะใบกวนแบบต่างๆ [3,4]

ใบกวนแบบ turbine ส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายกับการนำใบพายสั้นๆ หลายตัวมาติดตั้งบนแกนของใบกวนที่มีตำแหน่งเดียวกัน โดยที่ตัวใบ (blade) อาจมีลักษณะตรงหรือโค้งงอขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวนชนิดนี้มีขนาดเล็กกว่าใบกวนชนิด paddle ที่จะกล่าวต่อไปโดยมีขนาดตั้งแต่ 30 ถึง 50 เซนติเมตร ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของถังกวน ปกติใบกวนชนิดนี้จะมีใบกวน 4-6 ใบ ติดอยู่บนแกนของใบกวนในตำแหน่งเดียวกัน

ใบกวนชนิดนี้ใช้กับของเหลวที่มีความหนืดต่ำกว่า 100 Pa.s (10,000 cp) จัดเป็นพวกที่ทำให้เกิดการไหลในแนวรัศมีหรือการไหลในแนวสัมผัส กระแสการไหลแบบนี้อาจทำให้เกิดการไหลวนขึ้นซึ่งทำให้ของเหลวผสมกันไม่ดี ดังนั้นจึงต้องมีการใช้ baffle เพื่อช่วยให้ของเหลวผสมกันได้ดีขึ้น ตัวอย่างของใบกวนชนิดนี้แสดงในรูปที่ 3(ข) และ 3(ค) ซึ่งเป็นชนิด open straight blade และ bladed disk turbine ตามลำดับ

ใบกวนแบบ paddles ใบกวนชนิดนี้ใช้กวนของเหลวที่ต้องการความเร็วในการกวนต่ำหรือปานกลาง ลักษณะใบกวนจะเป็นแผ่นแบนคล้ายใบพาย อาจมีใบกวน 2 ใบ หรือ 4 ใบ ก็ได้ใบกวนอาจตั้งตรงหรือเอียงลาด กระแสการกวนที่เกิดจากใบกวนชนิดตั้งตรงส่วนใหญ่จะเป็นแบบการไหลในแนวรัศมีแทบจะไม่มีกระแสการกวนในแนวตั้งตรง ยกเว้นในกรณีที่ใบกวนทำมุมเอียงจะเกิดกระแสการกวนในแนวตั้งตรงด้วย

ใบกวนชนิดนี้จะใช้กับของเหลวที่มีค่าความหนืดค่อนข้างสูง เช่น ใบกวนแบบ gate (anchor) ซึ่งมักจะใช้ในกระบวนการผลิตสี เครื่องสำอาง แป้ง และสารที่มีความเหนียว โดยใช้กับของเหลวที่มีความหนืดมากกว่า 50,000 cp ถึง 500,000 cp ใบกวนชนิด helical ribbon อาจใช้กับของเหลวที่มีความหนืดมากกว่า 500,000 cp ถึง 1,000,000 cp ตัวอย่างของใบกวนชนิดนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 4



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 ลักษณะใบกวนแบบ (ก) gate paddle (ข) helical ribbon [4,6]

แบบมาตรฐานของระบบการกวนของเหลวโดยใช้ใบกวนชนิด turbine[4]

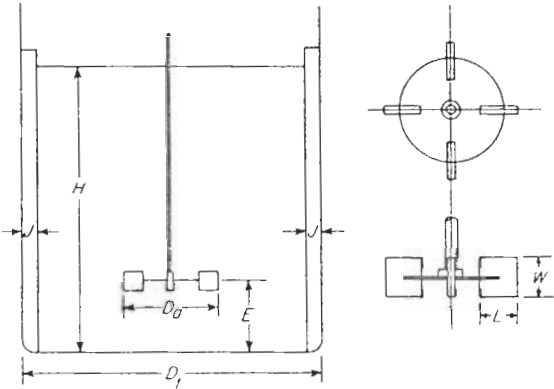
ในการออกแบบถังกวนนั้น ผู้ออกแบบต้องทำการออกแบบระบบการกวนให้ทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ของการกวนโดยต้องประหยัด และมีความน่าเชื่อถือสูง ตัวแปรในการออกแบบนั้นมีหลายอย่างได้แก่ชนิด และตำแหน่งที่ตั้งของใบกวน สัดส่วนขนาดของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ จำนวน และสัดส่วนของขนาด baffle เป็นต้น

ตัวแปรในการออกแบบต่างๆ นี้ จะมีผลต่อปัจจัยหลายอย่าง เช่น อัตราการไหลหรือการกวนของเหลว รูปแบบของความเร็วในการไหลที่เกิดขึ้นจากการกวน รวมทั้งพลังงานที่ต้องการกวน การออกแบบที่ดีต้องขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ ในทางปฏิบัติได้กำหนดแบบมาตรฐานไว้เพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นของการออกแบบ โดยเฉพาะใช้กับปัญหาของการกวนของเหลว

ที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนนัก ในกรณีที่ปัญหาการกวนยุ่งยากมากขึ้นจะต้องมีการดัดแปลงแก้ไขปรับปรุงข้อกำหนดต่าง ๆ ในแบบมาตรฐานนี้อีกที่

แบบมาตรฐานของระบบการกวนของเหลวที่ใช้ใบกวนชนิด turbine แสดงในรูปที่ 5

$$\frac{D_o}{D_i} = 1 \qquad \frac{H}{D_i} = 1 \qquad \frac{J}{D_i} = \frac{1}{12}$$
$$\frac{E}{D_o} = 1 \qquad \frac{W}{D_o} = \frac{1}{5} \qquad \frac{L}{D_o} = \frac{1}{4}$$



รูปที่ 5 แบบมาตรฐานของระบบการกวนของเหลวที่ใช้กับใบกวนชนิด turbine[3]

กำลังที่ใช้ในการกวน[4]

สิ่งสำคัญในการออกแบบถังกวนคือ การหาค่ากำลังงานที่ใช้ในการกวนซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของใบกวน ความเร็วรอบ ความหนาแน่นและความหนืดของของเหลวเป็นต้น

ในระบบการหมักที่มีการกวนและให้อากาศ อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในระบบจะขึ้นอยู่กับกำลังงานที่ให้กับใบกวนเพื่อกวนน้ำหมัก[5] ดังนั้นการหาค่าของกำลังงานที่ต้องการสำหรับการกวนเพื่อให้ได้การกวนที่สมบูรณ์ และการถ่ายเทออกซิเจนที่ดีจึงเป็นสิ่งแรกที่จะต้องทำก่อนที่จะมีการออกแบบระบบหมักต่อไป

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาเฉพาะของเหลวที่มีคุณสมบัติเป็นสารพวก Newtonian fluids (ของเหลวที่มีค่าความหนืดคงที่) เพราะน้ำหมักส่วนใหญ่จัดเป็นพวก Newtonian fluids ยกเว้นเฉพาะน้ำหมักที่ประกอบไปด้วย mycelial cell หรือน้ำหมักที่มี polymeric compound ประกอบอยู่ซึ่งจัดอยู่ในพวก non-Newtonian fluids (ของเหลวที่มีค่าความหนืดเปลี่ยนไปตามเวลา หรือเปลี่ยนแปลงตามรอบของการกวน) การหาค่ากำลังในการกวนสำหรับของเหลวที่เป็น non-Newtonian fluids ค่อนข้างจะยุ่งยากและซับซ้อนพอสมควร

กำลังที่ต้องการสำหรับการกวนสามารถอธิบายได้ด้วยกลุ่มตัวแปรไร้มิติต่างๆ ดังนี้

$$\text{Reynold number, } Re = \frac{Nd^2\rho}{\mu}$$

$$\text{Power number, (หน่วย S.I.) } P_o = \frac{P}{N^3 d^5 \rho}$$

$$\text{Power number, (หน่วยอังกฤษ) } P_o = \frac{Pg_c}{N^3 d^5 \rho}$$

โดยที่

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของ impeller (m)

g_c = Newton's law proportionality factor (32.174 ft.lbm/lb_f.s²)

N = ความเร็วรอบในการทำงาน (rpm)

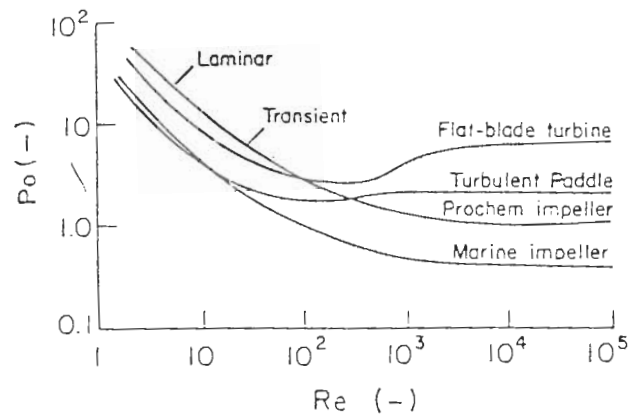
P = กำลังงาน (kw)

ρ = ความหนาแน่น (kg/m³)

μ = ความหนืด (Pa.s)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า P_o และ Re แสดงอยู่ในรูปที่ 6 (เฉพาะกรณีของเหลวที่เป็น Newtonian fluids)

ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow, $Re < 10$) ค่า P_o จะแปรผกผันกับค่า Re ($P_o = 1/Re$) และจะมีค่าขึ้นอยู่กับนิตของใบกวน ส่วนในกรณีที่การไหลเร็วขึ้นเป็นแบบปั่นป่วน ($Re > 10^4$) P_o จะไม่ขึ้นอยู่กับลค่า Re แต่จะขึ้นอยู่กับนิตของใบกวนเท่านั้น ถังปฏิกรณ์ชีวภาพส่วนใหญ่แล้วจะใช้งานในช่วงที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน ค่า P_o ในช่วงของการไหลแบบปั่นป่วนสำหรับใบกวนชนิดต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 1



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของ Power number และ Reynolds สำหรับใบกวนชนิดต่างๆ
(ใบกวน 1 ใบ) ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มี baffle[6]

สรุป

การออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพโดยเฉพาะที่เป็นถังกวนนั้น นอกจากจะต้องคำนึงถึงขนาดของตัวถัง (เช่น อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางถังต่อความสูงของถัง) ชนิดและขนาดของใบกวน แล้วสิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการออกแบบถังกวน คือการหาค่ากำลังของการกวนระบบการกวนที่ดี นั้น ควรจะทำให้สารที่กวนรวมเป็นเนื้อเดียวกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อน ในขณะเดียวกันควรจะต้องประหยัดพลังงานที่ใช้ในการกวนด้วย พลังงานที่ใช้ในการกวนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ขนาดของถังกวน ชนิดและขนาดของใบกวน ชนิดของของเหลวและความเร็วรอบของมอเตอร์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการหาค่ากำลังของการกวนนั้น ในบทความนี้กล่าวถึงเฉพาะของเหลวที่เป็นพวก Newtonian fluids เท่านั้น

ตารางที่ 1

Turbulent Power Number ในถังกวน[6]

Geometry	Po
(Baffled tank)	(-)
Propeller (square pitch, 3-blades)	0.32
Turbine (6-blades)	6.30
Turbine (6-curved blades)	4.80
Flat paddle (2-blades)	1.70
Prochem impeller (5-blades, $D_i = d_T / 2$)	1.0

เอกสารอ้างอิง

1. Cooney, C.L. and A. Humphrey. **"Bioreactor Design"**, Operation and Control. In Comprehensive Bionotechnology, p.1-225 Moo-Young, M., ed. U.K. : Pergamon Press, 1985.
2. A.H.Scragg., **"Biotechnology for Engineers"** New York: John Wiley & Sons.P.283-293, 1988.
3. W.L. McCabe, J.C. Smith and P. Harriott., **"Unit Operation of Chemical Engineering"** 5th ed. McGraw.Hill International Editions, 1993.
4. Christie J. Geankoplis., **"Transport Process and Unit Operations"** 2rd ed. Englewood Cliffs, New Jersey, 1983.
5. Josc L. Moreira, Pedro E. Cruz, Paula C. **"Influence of Power Input and Aeration Method on Mass Transfer in a Laboratory Animal Cell Culture Vessel"** J. Chem. Tech. Biotechnol. 1995, 118-131.
6. **"สัมมนาทางวิชาการหัวข้อ Bioreactor Design & Application"** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบและศูนย์การศึกษาต่อเนื่อง 2538