บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1 เครื่องหมัก

เครื่องหมักเป็นภาชนะหรือถังปฏิกริยาที่สามารถจัดการหรือควบคุมสภาวะทางด้านอาหารและสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตที่ดี หรือให้ผลผลิตตามต้องการของจุลินทรีย์ (Tannenbaum และ Wang, 1975) จุลินทรีย์ที่มีความสำคัญทางอุตสาหกรรมจะมีทั้งพวกเชื้อบักเตรี รา และยีสต์ บักเตรีบางชนิดเจริญเติบโตได้เมื่อมีอากาศ บางชนิดไม่มีอากาศอยู่เลยก็เจริญเติบโตได้ เชื้อราส่วนใหญ่และยีสต์จะเจริญได้ดีเมื่อมีอากาศเพียงพอ ดังนั้น เครื่องหมักจึงแบ่งได้เป็นสองลักษณะตามแบบของจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ ทั้งสองลักษณะของเครื่องหมัก อาจจะอยู่ในเครื่องหมักเดียวกัน ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการใช้งานได้หลายอย่าง ในที่นี้จะเน้นไปทางเครื่องหมักแบบให้อากาศซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อนกว่าแบบไม่ให้อากาศ

การหมักเป็นขบวนการชีวเคมีและจุลชีววิทยา ที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการหมัก โดยที่เอนไซม์จากจุลินทรีย์ เป็นตัวเร่งปฏิกริยาทางชีวเคมี ดังนั้นอัตราเร็วของปฏิกริยาจะถูกควบคุมโดยจุลินทรีย์เองจากอัตราการสังเคราะห์เอนไซม์หรือผลิตภัณฑ์จากจุลินทรีย์เป็นตัวหยุดปฏิกริยา เอนไซม์จะเปลี่ยนวัตถุดิบหรือสารอาหารหรือผลิตภัณฑ์จากปริโตรเลี่ยมให้เป็นผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ เช่น Candida utilis, Saccharomyces cerevisiae, Acetobacter aceti, Aspergillus niger ใช้สารละลายน้ำตาลให้ยีสต์โปรตีน แอลกอฮอล์ กรดน้ำส้ม กรดมะนาว ตามลำดับ Pseudomonas methanica ใช้อีเทน โพรเพน ให้เป็นกรดน้ำส้ม กรดโพรพิโอนิค ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่า การหมักเป็นปฏิกริยาทางชีวเคมีของจุลินทรีย์ที่มีเอนไซม์ เป็นตัวเร่งปฏิกริยาแบบอัตโนมัติ โดยจุลินทรีย์ได้รับอาหารจากสารละลายด้วยวิธีการแผ่กระจายของสารอาหารจากภายนอกเซลล์เข้าไปภายในเซลล์ ตรงส่วนที่เกิดปฏิกริยา แล้วสารที่เกิดจากปฏิกริยาจะแผ่กระจายในทิศตรงข้ามกับสารอาหารสู่สารละลายภายนอกเซลล์ แทนที่จะเป็นการย่อยสารอาหารแข็งโดยตรง ดังนั้นการแผ่กระจายของสาร สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการถ่ายเทมวลสาร แต่จะต่างจากทางด้านฟิสิคัลเคมีตรงที่มีองค์ประกอบทางชีววิทยามาเกี่ยวข้องด้วย ถ้าหากเป็นการหมักแบบให้อากาศจะมีการถ่ายเทของออกซิเจนจากอากาศเข้าสู่ภายในเซลล์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกิดจากปฏิกริยามาเกี่ยวข้องด้วย

การหมักแบบให้อากาศ เมื่อพิจารณาขบวนการทางกายภาพ จะเกี่ยวข้องกับ 1) การผสมของสาร 3 ลักษณะต่างกันซึ่งไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน อันประกอบด้วยเซลล์จุลินทรีย์ สารอาหารเหลวและอากาศ 2) การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากปฏิกริยาชีวเคมีของจุลินทรีย์ และ 3) การให้ออกซิเจนที่เพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์ อันจะเป็นผลโดยตรงมาจากลักษณะและการดำเนินการในเรื่องถังหมักหรือเครื่องหมัก

ปฏิกริยาของเอนไซม์จะเกิดได้ดีเมื่อมีสารอาหาร ออกซิเจน สภาวะทางกายภาพ เรื่องความเป็นกรดด่าง และอุณหภูมิ ที่เหมาะสม ซึ่งอาจจะไม่สอดคล้องกับสภาวะที่เหมาะกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ก็ได้ Aiba, Humphrey และ Millis (1965) กล่าวไว้ว่าสภาวะที่จุลินทรีย์จะให้น้ำหนักเซลล์สูงสุดนั้นไม่จำเป็นที่เซลล์จะต้องให้ผลิตภัณฑ์อย่างอื่นสูงสุดด้วย Hixson และ Gaden (1950) ได้ยกตัวอย่างเกี่ยวกับการผลิตยาปฏิชีวนะ คือ สเตรปโตมัยซินว่าจะให้ผลมากที่สุด เมื่อเซลล์มีการหายใจน้อย แต่ขณะที่เซลล์มีการหายใจสูงสุดจะไม่พบว่ามีสเตรปโตมัยซินเกิดขึ้นเลย การควบคุมให้สภาวะความเป็นกรดด่างและอุณหภูมิพอเหมาะ สม่ำเสมอ ตลอดเวลาของการหมักจะขึ้นกับลักษณะและการดำเนินการในเรื่องเครื่องหมักด้วย

ในการศึกษาเรื่องเครื่องหมัก เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองทางเคมีจะเห็นได้ว่า เครื่องหมักนี้ต้องใช้ระยะเวลายาวนานในการหมัก ดังนั้นเครื่องหมักต้องมีคุณลักษณะที่ไว้ใจได้ เมื่อใช้เครื่องหมักไปนาน ๆ ติดต่อกันหลายชั่วโมง หลายวัน ทั้งในด้านกลไกองค์ประกอบ ด้านการฆ่าเชื้อในระยะเริ่มต้น และรักษาสภาวะที่ปราศจากเชื้อแปลกปลอม ตลอดเวลาการหมัก รวมถึงการทำความสะอาดก่อนหรือหลังการหมัก เครื่องหมักที่ดีนั้นยังประกอบด้วยลักษณะที่สามารถปรับเครื่องมือ เพื่อควบคุมสภาวะการทดลองได้หลายรูปแบบ เช่นทางด้าน ความเป็นกรดด่าง อุณหภูมิ ระบบการให้อากาศ การกวน เป็นต้น (Solomon, 1969)

เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ดี มีหัตนะที่กว้างขวาง และลึกซึ้งในเรื่องเครื่องหมัก จึงควรต้องทราบในเรื่องของหลักการถ่ายเทมวลสารระบบการให้อากาศ การกวน จุลินทรีย์ และชนิดของเครื่องหมัก

2.2 หลักการถ่ายเทมวลสาร

รายละเอียดเกี่ยวกับหลักการถ่ายเทมวลสารนั้นมีมาก แต่พอจะแบ่งการถ่ายเทมวลสารออกเป็น 3 ลักษณะให้ดูด้วยกันคือ

- การถ่ายเทที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสโดยตรงของเฟสที่ไม่ผสมกัน (immiscible phases) เช่น การระเหย การกลั่น(เกี่ยวกับกาซ–ของเหลว) การแยกอะซีโทนจากน้ำด้วยการเขย่าให้สัมผัสกับคาร์บอนเทตระเครอไรด์ (เกี่ยวกับของเหลว–ของเหลว) การสะกัดน้ำมันพืชด้วยตัวทำละลาย (เกี่ยวกับของแข็งของเหลว)

- การถ่ายเทเมื่อมีการสัมผัสกันของเฟสที่ผสมกันได้ (miscible phases) เช่นการกระจายของสาร เมื่อมีความเข้มข้นต่างกัน

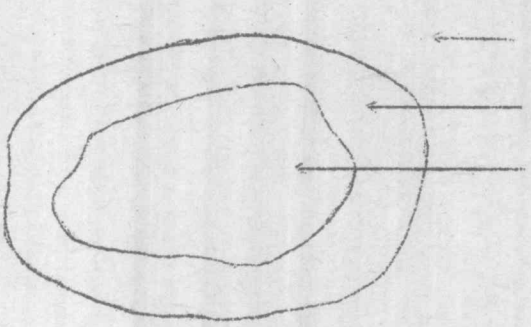
- การถ่ายเทผ่านเนื้อเยื่อ (membrane) เช่น การซึมผ่านเนื้อเยื่อที่มีรูพรุน ขบวนการออสโมซิสในพืช

ในขบวนการหมักแบบให้อากาศนั้นมีสาร 3 ลักษณะที่แยกจากกันคือ เซลล์จุลินทรีย์ น้ำหมัก และอากาศซึ่งจะมาผสมกัน และมีการถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นระหว่างอากาศกับน้ำหมัก และน้ำหมักกับจุลินทรีย์ ในขบวนการถ่ายเทมวลสารนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งเป็นดัชนีที่แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทมวลสาร เกิดได้ดีแค่ไหน ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสารจะขึ้นกับตัวแปรที่สำคัญ อันประกอบด้วย ความหนาแน่นของสารละลาย ความหนืดของสารละลาย เส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศ ขนาดของวัตถุ ความเข้มข้นของสารอาหารและออกซิเจน อัตราการกระจายของอากาศ อัตราการกระจายของอาหาร ความเร็วของการหมุนเวียนของน้ำหมัก ปริมาตรของอากาศ/ปริมาตรน้ำหมัก อุณหภูมิของการหมัก ในขบวนการหมักโดยทั่วไป จำเป็นต้องมีการควบคุมตัวแปรบางอย่าง เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมตัวแปรตัวอื่น เพื่อให้ได้ผลผลิตที่สูง ที่ดี ในเวลาอันสั้น และถูกที่สุดซึ่งมักจะกำหนดเอาอุณหภูมิของการหมักเป็นตัวคงที่ และตัวแปรอื่น ๆ ที่สำคัญและจำเป็นต่อการหมัก มีดังนี้ ความเร็วของการหมุนเวียนของน้ำหมัก ปริมาตรของอากาศ/ปริมาตรน้ำหมัก ขนาดของฟองอากาศ ขนาดของวัตถุ ส่วนความเข้มข้นของสารอาหารและความเป็นกรดด่างของน้ำหมัก ซึ่งเป็นตัวแปรของการหมักด้วยตัวหนึ่ง ส่วนใหญ่จะทำการศึกษาขั้นต้นในขวดเขย่า เมื่อได้ค่าที่ดีแล้วจึงนำมาใช้ในการหมักของเครื่องหมัก โดยกำหนดให้เป็นตัวคงที่ตัวหนึ่ง

2.2.1 การถ่ายเทมวลสารระหว่างจุลินทรีย์กับน้ำหมัก

เพื่อให้ง่ายในการทำความเข้าใจจะเริ่มด้วยแบบของจุลินทรีย์เซลล์เดี่ยว และแยกการถ่ายเทของออกซิเจนไว้กล่าวอีกต่างหากต่อไป

2.2.1.1 แบบของจุลินทรีย์เซลล์เดี่ยว



รูปที่ 2–1 แบบของจุลินทรีย์เซลล์เดี่ยว (Coulson, Richardson, 1971)

การถ่ายเทมวลสารในแบบของจุลินทรีย์เซลล์เดี่ยวนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 2–1 ประกอบด้วย

– ส่วนนอกซึ่งมี ฟิล์มของน้ำหมักรอบเซลล์ ผนังเซลล์และเยื่อหุ้มไซโตพลาสซึม

– ส่วนใน เป็นส่วนที่สารอาหารถูกใช้ไปในปฏิกริยาของเซลล์

<u>ส่วนนอกของการถ่ายเทมวลสาร</u>

การถ่ายเทมวลสารในฟิล์มน้ำหมัก รอบ ๆ เซลล์ หรือน้ำหมักรอบ ๆ ฟิล์มจะมีกลไกแบบการแผ่กระจายของโมเลกุลสารธรรมดา ตามกฎข้อที่หนึ่งของ Fick สำหรับการเคลื่อนย้ายสาร หรือการถ่ายเทสารผ่านผนังเซลล์ เยื่อหุ้มไซโตพลาสซึมนั้นมีความซับซ้อนขึ้น เพราะเกี่ยวกับการถ่ายเทสารผ่านโปรตีนที่มีลักษณะเฉพาะในการยอมให้สารบางอย่างเท่านั้นผ่านเข้าออกได้ ซึ่งต่างจากโปรตีนในเอนไซม์ (Monod, 1949, Cirillo, 1961) จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ประกอบกับการทดลอง (Cohen, Monod, 1957) ได้อธิบายกลไกที่ซับซ้อนนี้ด้วยสมการ

$$r_1 = \frac{\alpha_1 C^*}{\beta 1 + C^*} \qquad (2\text{-}1)$$

เมื่อ r_1 = อัตราการถ่ายเทสารต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวของจุลินทรีย์

C^* = ความเข้มข้นของสารอาหารตรงผิวของจุลินทรีย์และน้ำหมักสมผัสกัน

α_1, β_1 = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร

ส่วนในของการถ่ายเทมวลสาร

การถ่ายเทส่วนในจะเกี่ยวกับปฏิกริยาของเอนไซม์แต่ละชนิด ซึ่งอธิบายได้ด้วยทฤษฎีปฏิกริยาของเอนไซม์ของ Michaelis-Menten

$$r_2 = \frac{\alpha_2 C_1}{\beta_2 + C_1} \qquad (2\text{-}2)$$

เมื่อ r_2 = อัตราที่สารอาหารถูกใช้ไปต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของจุลินทรีย์

C_1 = ความเข้มข้นของสารอาหารภายในเซลล์

α_2, β_2 = สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสาร

ถ้าหากขบวนการที่การถ่ายเทมวลสารถูกควบคุมโดยการถ่ายเทในส่วนนอกอาจจะโดยกฎของข้อที่หนึ่งของ Fick หรือสมการที่ 2-1 และสารที่เข้าสู่ส่วนในผ่านผนังเซลล์แล้วเกิดปฏิกริยาหมดจะได้ว่า

$$r_1 = \frac{r_2 V_m}{a_m} \qquad (2\text{-}3)$$

เมื่อ a_m และ V_m เป็นพื้นที่และปริมาตรของเซลล์เดี่ยวเพราะฉะนั้น

$$\frac{\alpha_1 C^*}{\beta_1 + C^*} = \frac{V_m \alpha_2 C_1}{a_m(\beta_2 + C_1)} \qquad (2\text{-}4)$$

ในกรณีที่ค่า $\frac{V_m \alpha_2}{a_m}$ มากกว่า α_1 แล้ว การถ่ายเทมวลสาร

ในสองส่วนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการทั่วไปคือ

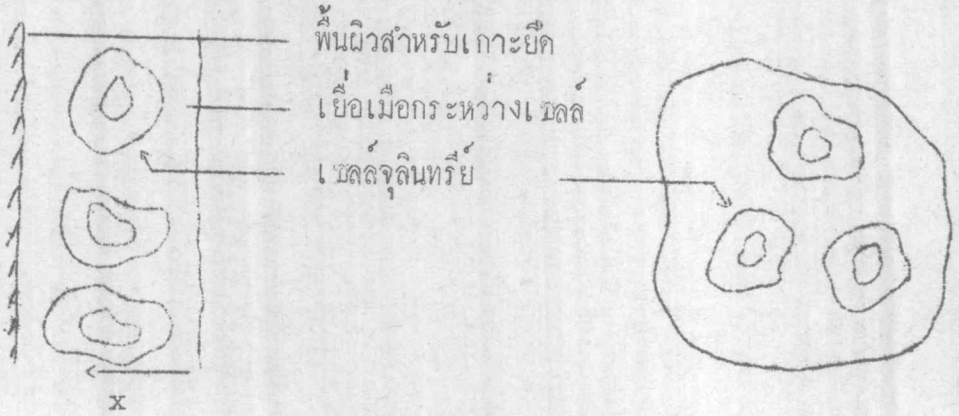
$$r = \frac{\alpha C}{\beta + C} \qquad (2\text{-}5)$$

เมื่อ r = อัตราที่สารอาหารถ่ายเทผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่ของเซลล์ที่สามารถเจริญเติบโตได้ Cirillc (1961) และ Monod (1949) ได้ทำการทดลองและสอดคล้องกับสมการ 2–5

สมการ 2–1 จะมีรูปแบบเหมือนกับสมการของ Michaelis-Menten (สมการ 2–2) แต่การถ่ายเทของสารแทนที่จะขึ้นกับความเข้มข้นของสารภายในเซลล์กลับขึ้นกับความเข้มข้นของสารตรงฟิล์มของน้ำหมักรอบ ๆ เซลล์ ซึ่งสามารถควบคุมโดยจัดให้มีการสัมผัสที่ดีระหว่างจุลินทรีย์และน้ำหมัก เพื่อให้น้ำหมักตรงผิวของเซลล์มีความเข้มข้นที่สม่ำเสมอใกล้เคียงกับน้ำหมักส่วนใหญ่ ซึ่งเกี่ยวข้องกับระบบการให้อากาศและการกวนของเครื่องหมัก

2.2.1.2 แบบของมวลจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ในขบวนการทางอุตสาหกรรมนอกจากจะอยู่ในรูปเซลล์เดี่ยว ๆ แล้วทั้งนี้ไม่รวมพวกจุลินทรีย์หลายเซลล์ จะอยู่ในรูปแบบมวลจุลินทรีย์ 2 ลักษณะด้วยกัน ลักษณะแรกเป็นฟิล์มจุลินทรีย์ (รูปที่ 2–2 ก) อีกลักษณะเป็นก้อนจุลินทรีย์ (รูปที่ 2–2 ข) ที่กระจายอยู่ในน้ำหมัก



รูปที่ 2-2

ก. แบบฟิลม์จุลินทรีย์ ข. ก้อนจุลินทรีย์

(Coulson, Richardson, 1971)

ซึ่งทั้ง 2 ลักษณะมีขนาดฟิลม์และก้อนจุลินทรีย์ที่ใหญ่กว่าเซลล์เดี่ยว ๆ มาก (Green, Cooper Jenkins,1965 และ Mueller, Boyle, lightfoot, 1966) จุลินทรีย์สามารถรวมเป็นฟิลม์และก้อนได้ เพราะเยื่อเมือกของจุลินทรีย์และจุลินทรีย์เองอยู่ในสภาวะที่ได้รับแรงเฉือนจากน้ำหมักต่ำ ดังนั้นการถ่ายเทมวลสารจึงต่างไปจากแบบของจุลินทรีย์เซลล์เดี่ยว (Coulson, Richardson, 1971) เมื่อสมมุติให้จุลินทรีย์กระจายอย่างสม่ำเสมอภายในเยื่อเมือกซึ่งเฉื่อยต่อปฏิกริยาเคมี แบบของจุลินทรีย์นี้จะมีความคล้ายคลึงกับตัวเร่งปฏิกริยาที่มีลักษณะเป็นรูพรุน โดยทั้งสองแบบประกอบด้วยรูพรุนเชื่อมต่อกัน ซึ่งเป็นทางให้มวลสารกระจายก่อนที่จะไปถึงพื้นผิวปฏิกริยา

การถ่ายเทมวลสารของมวลจุลินทรีย์สามารถอธิบายได้ในทางคณิตศาสตร์โดยตั้งสมมุติฐานไว้ดังนี้

1. องค์ประกอบของมวลจุลินทรีย์ทั้งหมด ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แม้ว่ามีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

2. หน้าที่ของเซลล์ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแต่จะขึ้นกับสิ่งแวดล้อม

3. มวลของจุลินทรีย์มีการกระจายอายุของประชากร คุณสมบัติทางชีววิทยา เช่น ความสามารถในการเจริญเติบโตได้ การผ่าเหล่า การปรับตัว การแข่งขัน ที่ไม่ขึ้นกับเวลา

ถ้าให้การกระจายของโมเลกุลของสารอาหารภายนอกเซลล์เท่ากับสารอาหารที่เข้าไปในเซลล์จุลินทรีย์ จะได้ว่า

$$D_e \frac{d^2C}{dx^2} - a_v r = 0 \qquad (2\text{-}6)$$

เมื่อ r = อัตราการผ่านของสารอาหารเข้าไปในจุลินทรีย์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของจุลินทรีย์

a_v = พื้นที่พื้นผิวปฏิกริยาต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของจุลินทรีย์

D_e = สัมประสิทธิ์ของการกระจายของโมเลกุลที่มีผลจริง

จากสมการ 2-5 และ 2-6 ได้ว่า

$$D_e \frac{d^2C}{dx^2} - \frac{a_v \alpha C}{\beta + C} = 0 \qquad (2\text{-}7)$$

สำหรับฟิล์มจุลินทรีย์ ใช้ขอบเขตต่อไปนี้

$$x = L, \quad \frac{dc}{dx} = 0 \qquad (2\text{-}8)$$

$$x = 0, \quad C = C^* \qquad (2\text{-}9)$$

เมื่อ L = ความหนาของฟิลม์จุลินทรีย์ จะได้คำตอบของสมการ 2-7

$$C = f(x, D_e, a_v \alpha, \beta, L, C^*) \qquad (2\text{-}10)$$

จากกฎของ Fick

$$N = -D_e \frac{dC}{dx} \qquad (2\text{-}11)$$

$$N = f(D_e, a_v \alpha, \beta, L, C^*) \qquad (2\text{-}12)$$

เมื่อ N = อัตราที่สารผ่านผิวสัมผัสของจุลินทรีย์และน้ำหนัก มีหน่วยเป็นหน่วยของมวลต่อพื้นที่ต่อเวลา

ในกรณีของก้อนจุลินทรีย์ $L = \frac{V_p}{A_p}$ เมื่อ V_p และ A_p เป็นปริมาตรของก้อนจุลินทรีย์พื้นผิวภายนอกของก้อนจุลินทรีย์ตามลำดับ

จากสมการ 2-12 การถ่ายเทสารอาหารขึ้นกับตัวแปรทางชีววิทยาคือ D_e, $a_v \alpha$, β และตัวแปรทางกายภาพคือ ความหนาของแผ่นฟิลม์จุลินทรีย์ ความเข้มข้นที่ผิวนอกของฟิลม์ ซึ่งสามารถควบคุมได้ง่าย เพราะเกี่ยวกับการออกแบบ ตัวแปรทางชีววิทยานั้นจะขึ้นกับเซลล์จุลินทรีย์ น้ำหนักและสิ่งแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรดด่าง ตัวแปรที่เกี่ยวกับการออกแบบ และสิ่งแวดล้อมนี้จะเกี่ยวกับเรื่องเครื่องหมักโดยตรง

จากแบบของมวลจุลินทรีย์ที่กล่าวแล้ว Atkinson และ Daoud (1968) ได้ทำการศึกษาในรายละเอียดเพิ่มขึ้นจากสมการ 2-12 สำหรับทั้งแบบฟิลม์และก้อนจุลินทรีย์ แต่ในที่นี้จะหยิบยกมาแสดงในแบบก้อนจุลินทรีย์ เฉพาะคำตอบสุดท้ายของสมการเท่านั้นแยกเป็นกรณีได้ดังนี้

1. ถ้าไม่มีขอบเขตด้านการกระจาย คือมีค่า V_p/A_p น้อย

$$R = \frac{k_1 C^*}{\rho_o (1+k_3 C^*)} \qquad (2\text{-}13)$$

2. เมื่อมีขอบเขตของการกระจายคือค่า V_p/A_p มาก

$$R = \frac{k_1 A_p C^*}{k_2 V_p \rho_o} \quad \text{ถ้าหาก } C^* \text{ มีค่าน้อย} \qquad (2\text{-}14)$$

$$R = \frac{k_1}{k_3 \rho_o} \quad \text{ถ้าหาก } C^* \text{ มีค่ามาก} \qquad (2\text{-}15)$$

เมื่อ R = อัตราที่สารอาหารผ่านเข้าสู่จุลินทรีย์ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของจุลินทรีย์

ρ_o = ความหนาแน่นของมวลจุลินทรีย์

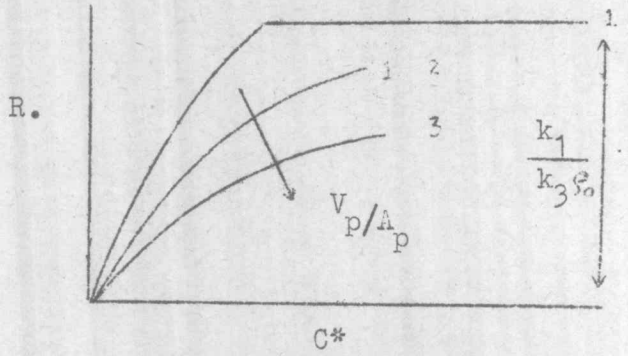
$k_1 = \sqrt{\frac{a_v \alpha}{\beta}}$ เป็นสัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วทางชีววิทยา

$k_2 = \sqrt{\frac{a_v \alpha}{\beta D_e}}$ เป็นสัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วทางชีววิทยา

$k_3 = \sqrt{\frac{1}{\beta}}$ เป็นสัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วทางชีววิทยา

001227

สมการ 2–13



รูปที่ 2–3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราที่สารอาหารผ่านเข้าสู่จุลินทรีย์ (R) กับความเข้มข้นของสารอาหารที่ผิวสัมผัสของจุลินทรีย์และน้ำหมัก (คือค่า C*)

(Coulson, Richardson, 1971)

จากสมการ 2–13 และรูปที่ 2–3 เส้นกราฟหมายเลข 1. เมื่อค่า V_p/A_p น้อยแสดงว่ามีค่าพื้นผิวนอกของก้อนจุลินทรีย์มากเมื่อเทียบกับปริมาตร เป็นไปได้เมื่อจัดให้ก้อนจุลินทรีย์เป็นก้อนกลมหรือคล้ายทรงกลมเล็กมาก ๆ โดยเพิ่มแรงเฉือนที่น้ำหมักมีต่อก้อนจุลินทรีย์ ซึ่งเกี่ยวกับการกวนของเครื่องหมัก จะเห็นว่าค่า R จะขึ้นกับค่า C* ที่ค่า C* ต่ำ ๆ และจะมีค่าคงที่ที่ค่า C* สูงขึ้นเท่ากับค่า R จากสมการ 2–15 เมื่อจัดให้ค่า C* สูง แม้ว่าค่า V_p/A_p จะมากในกรณีที่เป็นก้อนจุลินทรีย์ใหญ่ สรุปได้ว่าในกรณีที่มีความเข้มข้น C* สูงไม่มีความจำเป็นต้องคำนึงถึงขนาดก้อนจุลินทรีย์ ความสำคัญอยู่ที่ความเข้มข้น C* ต่ำ ๆ ถ้าหากก้อนจุลินทรีย์มีขนาดใหญ่ V_p/A_p มาก ค่า R ยิ่งมีค่าน้อยลง (กราฟหมายเลข 2 และ 3) จุลินทรีย์ที่อยู่ตรงกลางก้อนจุลินทรีย์จะไม่ได้รับสารอาหาร เพราะสารอาหารกระจายเข้าไปไม่ถึง ถ้าหากขนาดก้อนเล็กลงมาก ๆ สารอาหารจะกระจายเข้าไปได้ถึงส่วนในสุดของก้อน และทำให้ค่า R สูงขึ้น โดยทั่วไปในการหมักค่าความเข้มข้นของ C* จะต่ำเพราะใช้สารอาหารความเข้มข้นต่ำ ประกอบกับยังไม่มีรายงานถึงขนาดของก้อนจุลินทรีย์ที่พอเหมาะสำหรับให้สารอาหารกระจายเข้าไปได้ถึงส่วนในสุดของก้อนและความเข้มข้น C* ค่าไหนที่มีผลต่อค่า R สำหรับจุลินทรีย์ชนิดหนึ่ง ๆ ดังนั้นหนทางที่ดีที่สุดควรจัดให้ได้ก้อนจุลินทรีย์มีขนาดเล็ก ๆ ไว้

2.2.2 การถ่ายเทออกซิเจนระหว่างอากาศ น้ำหมักและจุลินทรีย์

การหมักหรือการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนนั้น ในทางปฏิบัติมี 2 แบบด้วยกัน คือการหมักที่ผิวจะใช้ภาชนะที่กว้างและตื้น ซึ่งจะให้พื้นผิวต่อปริมาตรในอัตราที่สูง จุลินทรีย์จะได้รับออกซิเจนจากอากาศที่สัมผัสหรือละลายในน้ำหมักได้ในบริเวณตื้น ๆ และการหมักใต้ผิว ในเครื่องหมักหรือถังหมัก โดยมีหรือไม่มีเครื่องช่วยกวน แต่จำเป็นต้องมีระบบการให้อากาศ แบบหลังใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมการหมัก ซึ่งได้ผ่านการทดลองทั้งในห้องทดลองและโรงงานต้นแบบมาแล้ว เนื่องจากมีความสำคัญและประโยชน์ทางอุตสาหกรรม จึงมีการทดลองในห้องทดลองเพื่อหาปริมาณความต้องการออกซิเจน ของจุลินทรีย์เพื่อจะได้หาวิธีการที่จะป้อนอากาศ ซึ่งมีออกซิเจนให้เพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์ และไม่ให้ออกซิเจนเป็นตัวจำกัดในการทำงานหรือการเจริญของจุลินทรีย์ การถ่ายเทออกซิเจนที่เกี่ยวกับจุลินทรีย์แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

1. การดูดซึมทางกายภาพซึ่งเกี่ยวกับการออกแบบ ลักษณะเฉพาะในการดำเนินการของเครื่องหมัก และคุณสมบัติทางกายภาพของสารอาหารเหลว

2. การใช้ออกซิเจน ในทางชีววิทยาของจุลินทรีย์ โดยที่เกี่ยวกับระบบการหายใจของเซลล์ ผ่านทางเอนไซม์ซึ่งเป็นตัวนำออกซิเจนไปยังส่วนที่ต้องการและสารชีวเคมีที่เกิดขึ้นชั่วคราว (Metabolites) เป็นตัวควบคุมการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ ถ้าหากจุลินทรีย์อยู่ในสภาวะที่ความเข้มข้นของออกซิเจนสูงกว่าความเข้มข้นวิกฤต (เป็นค่าความเข้มข้นหนึ่งซึ่งถ้าต่ำกว่าค่านี้จะมีผลต่อการหายใจของเซลล์) อัตราการหายใจของเซลล์จะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของออกซิเจน แต่จะขึ้นกับสารเคมีที่เกิดขึ้นชั่วคราวซึ่งเรียกว่า ความต้องการออกซิเจนของเซลล์เป็นตัวควบคุมในสภาวะที่ความเข้มข้นออกซิเจนต่ำกว่าค่าวิกฤตแล้ว อัตราการหายใจของเซลล์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของออกซิเจน โดยที่ออกซิเจนเป็นตัวจำกัดความเร็วของเอนไซม์ ทั้งนี้สมมติว่าไม่มีความต้านทานในการกระจายของออกซิเจนระหว่างสารอาหารเหลว

และเอนไซม์ที่ใช้ออกซิเจน (Johnson, 1967) ความเข้มข้นของออกซิเจนในที่นี้คือ ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารอาหารเหลวหรือน้ำหมัก ค่าความเข้มข้นวิกฤตของออกซิเจน สำหรับ C. utilis ในเกลืออะซีเตทมีค่า 1.3×10^{-6} โมล่าร์ (Johnson, 1967) สำหรับ S. cerevisiae มีค่า $0.73-3.48 \times 10^{-6}$ โมล่าร์ (Terui et al, 1960) และ 0.45×10^{-7} โมล่าร์ที่ 19 °ซ. (Longmuir, 1954) และ 2.84×10^{-6} โมล่าร์ที่ 30 °ซ. (Wingler, 1941) ค่าความเข้มข้นวิกฤตของออกซิเจนนี้จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับจุลินทรีย์ที่ใช้ สภาวะการเจริญเติบโต และการหมัก

จะเห็นได้ว่าอัตราการหายใจหรือการใช้ออกซิเจนของเซลล์ขึ้นกับองค์ประกอบภายในของจุลินทรีย์เอง และความเข้มข้นของออกซิเจนดังกล่าวแล้ว ยังขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์ อายุ ซึ่งอายุน้อยจะใช้ออกซิเจนมากกว่าเซลล์ที่แก่ ความหนาแน่นของเซลล์ถ้าค่าสูงจะมีการใช้ออกซิเจนมาก ถ้าหากจับกันเป็นกลุ่มก้อนการใช้ออกซิเจนจะน้อยลง องค์ประกอบภายนอกอื่น ๆ ที่มีผลต่อการใช้ออกซิเจนของเซลล์ เช่น สารอาหาร สิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรดด่าง จุลินทรีย์ที่เป็นตัวแปลกปลอม (Hixson, Gaden, 1950)

การใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ ถ้าหากสมมุติว่าเป็นออกซิเจนที่ละลายในสารอาหารเหลวหรือน้ำหมักเท่านั้น โดยไม่คิดว่ามีการถ่ายเทของออกซิเจนโดยตรงจากฟองอากาศไปยังเซลล์แล้ว เมื่อเป็นเช่นนี้ การถ่ายเทของออกซิเจนจะเกี่ยวกับการกระจายของออกซิเจนจากอากาศไปยังสารอาหารเหลว และจากสารอาหารเหลวเข้าไปในเซลล์

การถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศไปยังเซลล์จุลินทรีย์นั้นจะมีความต้านทานหลายอย่าง พอจะแยกได้ดังต่อไปนี้

R_1 = ความต้านทานระหว่างอากาศและพื้นผิวที่อากาศ–ของเหลวสัมผัสกัน หรือเรียกว่า ความต้านทานของฟิลม์อากาศนิ่ง

R_2 = ความต้านทานของพื้นผิวสัมผัส

R_3 = ความต้านทานระหว่างพื้นผิวสัมผัสอากาศ–ของเหลวกับของเหลวส่วนใหญ่ หรือเรียกว่า ความต้านทานของฟิลม์ของเหลวนิ่งรอบฟองอากาศ

R_4 = ความต้านทานผ่านของเหลวส่วนใหญ่

R_5 = ความต้านทานระหว่างของเหลวและผนังเซลล์หรือเรียกฟิลม์ของเหลวนิ่งรอบเซลล์

R_6 = ความต้านทานภายในเซลล์

R_7 = ความต้านทานเนื่องจากเซลล์จับกันเป็นกลุ่มก้อน

R_8 = ความต้านทานทางเคมีและกายภาพที่เกี่ยวกับปฏิกริยาของน้ำย่อยภายในเซลล์

ค่าความต้านทาน R_3 จะมีความสำคัญเด่นกว่าอันอื่น และสามารถหาได้ จากสมการการถ่ายเทของออกซิเจน (Webb, 1964)

$$r_d = k_L(A)\,(C_i - C_L) \qquad (2\text{-}16)$$

เมื่อ $R_3 = \dfrac{1}{k_L}$

ถ้าหากสมมติว่าออกซิเจนที่ถ่ายเทจากอากาศผ่านตัวกลางไปยังเซลล์ไม่ถูกกักเก็บไว้ระหว่างทางและทั้งหมดถูกใช้ไปในการหายใจของเซลล์แล้ว จะได้ว่าอัตราการถ่ายเทของออกซิเจนจากอากาศจะเท่ากับอัตราการหายใจ (r_r)

$$r_r = r_d = k_L(A)\,(C_i - C_L) \qquad (2\text{-}17)$$

จากสมการ 2-16 ค่าของอัตราการถ่ายเทออกซิเจน (r_d) จะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในของเหลว (k_L) พื้นผิวสัมผัสทั้งหมดระหว่างฟองอากาศและของเหลว (A) ความแตกต่างของความเข้มข้นของออกซิเจนในของเหลว(C_i) กับความเข้มข้นออกซิเจนที่ละลายในของเหลวส่วนใหญ่ (C_L)

ค่าของ k_L ตามทฤษฎีการเริ่มใหม่ของพื้นผิวสัมผัสของอากาศ (ก๊าซ) และของเหลว (Danckwerts 1951, 1955) เขียนไว้ว่า

$$k_L = \sqrt{\frac{D_{AB}}{\Delta T}} \qquad (2\text{-}18)$$

เมื่อ D_{AB} = สัมประสิทธิ์ (ส.ป.ส.) การกระจายของก๊าซ A
คือ อากาศในของเหลว B

ΔT = เป็นคาบของฟิลม์ของเหลวที่ล้อมรอบฟองก๊าซ มีหน่วยเป็นหน่วยของเวลา

ค่าของ D_{AB} จะขึ้นกับอุณหภูมิ ความดันของก๊าซ A และขึ้นกับอุณหภูมิความหนืดความหนาแน่นของของเหลว B ด้วย ส่วนค่า ΔT เป็นระยะเวลาที่ฟิลม์ของเหลวรอบฟองก๊าซเคลื่อนผ่านฟองก๊าซ ถ้ามีค่าน้อยจะให้ค่า k_L สูง เช่นในกรณีของเหลวอยู่ในสภาพปั่นป่วนหรือฟองก๊าซเคลื่อนในของเหลวด้วยความเร็วมาก จะมีปริมาณฟิลม์ของเหลวผ่านฟองก๊าซมาก แต่ละฟิลม์จะใช้เวลา (ΔT)น้อย

จากทฤษฎีการทะลวงของ Danckwerts และ Higbie (1935) ได้ว่า

$$k_L = 2\sqrt{\frac{D_{AB}\ V_B}{\pi\ d_B}} \qquad (2\text{-}19)$$

เมื่อ V_B = ความเร็วเคลื่อนขึ้นของฟองอากาศที่ผ่านของเหลว B

d_B = เส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศที่ผ่านของเหลว B

จากสมการ 2-19 ค่า k_L นอกจากขึ้นกับค่า D_{AB} แล้วยังขึ้นกับค่าขนาดและความเร็วของฟองอากาศที่ผ่านของเหลวด้วย

ยังพบว่าสารที่เติมลงในของเหลวทำให้ค่า k_L เปลี่ยนไปด้วยเพราะจะเปลี่ยนค่า D_{AB} เช่น เปปโทนเมื่อเติมลงไปเพียงนิดเดียวทำให้ค่า k_L ลดลง และสารลดแรงตึงผิวจะทำให้ทั้งค่า k_L และค่า A ลดลงด้วย (Aiba, Humphrey Millis, 1965)

โดยสรุปแล้วอัตราการถ่ายเทออกซิเจน หรือการละลายออกซิเจนในของเหลวหรือน้ำหมักจะขึ้นกับ พื้นผิวสัมผัสของฟองอากาศ-ของเหลวขนาดและความเร็วของฟองอากาศที่ผ่านของเหลว เวลาที่ฟองอากาศอยู่ในของเหลวอุณหภูมิของอากาศ ความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศ และในของเหลว อัตราการให้อากาศ คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลว อัตราการหายใจของจุลินทรีย์ อุณหภูมิ ความเป็นกรดด่างของของเหลว และความเข้มข้นแสงอาจเกี่ยวข้องด้วย (Cooper, Fernstrom, Miller, 1944 , Solomon, 1969 และ อำนวย สุขเหมือน, 1978)

2.3 การให้อากาศและการกวน

การให้อากาศในเครื่องหมักมีความจำเป็นและสำคัญสำหรับการหมักแบบใต้พื้นผิวของจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน เพราะถ้าอาศัยออกซิเจนจากอากาศที่ละลายในน้ำหรือน้ำหมักโดยธรรมชาติแล้วจะมีน้อยมาก และมีเฉพาะบริเวณที่ใกล้ ๆ กับพื้นผิวสัมผัสของอากาศกับของเหลวเท่านั้น ส่วนใต้ผิวของน้ำหมักลึกลงไปจะไม่มีออกซิเจนอยู่เลยสำหรับให้จุลินทรีย์ได้ใช้ได้ การให้อากาศ

จึงมีจุดประสงค์หลักเพื่อให้ออกซิเจนเพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์ตลอดเวลาของการหมัก ไม่ให้เป็นตัวจำกัดในการเจริญหรือการทำงานของเซลล์ และผลที่ตามมาการให้อากาศยังช่วยกวนให้น้ำหมักจุลินทรีย์ และอากาศเองผสมผสานเข้ากันดี เครื่องหมักแบบถังกวนมีระบบการให้อากาศโดยใช้เครื่องช่วยกวนตีอากาศให้เป็นฟองเล็ก ระบบนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกวนให้น้ำหมักจุลินทรีย์และอากาศ ผสมผสานกันอย่างดี ช่วยให้การถ่ายเทมวลสารผ่านเข้าออกจากเซลล์ได้ดีขึ้นด้วย เครื่องหมักแบบคอลัมน์หรือแบบหอสูงเป็นวิวัฒนาการต่อจากถังกวน จะไม่มีเครื่องช่วยกวน แต่การกวนเกิดจาก การให้อากาศที่เป็นฟองเล็ก ๆ

อากาศที่ใช้จะได้จากเครื่องอัดอากาศ ที่ผ่านเครื่องฆ่าเชื้อหรือเครื่องกรองเชื้อจุลินทรีย์แล้วอาจจะเป็นใยแก้วหรือสำลี ในห้องทดลองมักจะใช้สำลีเพราะหาได้ง่ายราคาถูก แม้จะมีข้อเสียบ้าง ตรงที่ความชื้นจากอากาศทำให้สำลีชื้นและราอาจขึ้นได้ และสำลีมีความต้านทานต่อการกระจายของอากาศทำให้ได้อากาศที่ผ่านไปมีออกซิเจน น้อยกว่า 20 % โดยปริมาตร การกระจายของออกซิเจนจะเป็นสัดส่วนกลับกับความหนาแน่นของก้อนสำลี นอกจากนั้นสำลียังกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ได้มากด้วย (Solomon, 1969)

เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นวิกฤติของออกซิเจนเช่น ความเข้มข้นวิกฤตสำหรับ C. utilis ในอซิเตท 0.041 ส่วนในล้านส่วนน้ำหมัก (มิลลิกรัมต่อลิตร) (Johnson, 1967) สำหรับ S. cerevisiae 0.091 มิลลิกรัมต่อลิตร (Wingler, 1941) กับค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำหมัก ของถังกวน ค่าความเข้มวิกฤติจะมีค่าน้อยมาก เช่นเทียบกับความเข้มข้นออกซิเจนละลายในน้ำหมักของถังกวนที่ให้อากาศ 2.88 หน่วยปริมาตรอากาศต่อปริมาตรของน้ำหมักต่อนาที ซึ่งมีค่า 3.57 มิลลิกรัมต่อลิตร ตอนเริ่มการหมักยีสต์ขนมปัง และมีค่าคงที่ 0.72 มิลลิกรัมต่อลิตรหลังจากการหมักชั่วโมงที่สาม โดยมีอัตราความเร็วของใบกวน 300 รอบต่อนาที ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนด้วยการให้อากาศแบบถังกวนนี้มี

ประสิทธิภาพเพียงพอที่จะจัดให้ปริมาณออกซิเจนไม่เป็นตัวจำกัดในการทำงานของจุลินทรีย์ สำหรับเครื่องหมักแบบคอลัมน์นั้นยังไม่มีรายงานถึงตัวเลขความเข้มข้นออกซิเจนที่จะให้กับน้ำหมักได้

ในการให้อากาศกับน้ำหมักจะมีการถ่ายเทของออกซิเจนเกิดขึ้น อัตราการถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศไปยังน้ำหมักนี้สามารถวัดได้ด้วย วิธีทางเคมีที่ใช้ปฏิกริยาของสารละลายโซเดียมซัลไฟท์กับออกซิเจนโดยตรง (Cooper, Fernstrom, Miller 1944) อัตราเร็วของปฏิกริยานี้จะขึ้นกับความเป็นกรดด่างของสารละลายจะเกิดได้ดีเมื่อสภาวะเป็นด่างเล็กน้อยหรือเป็นกลาง และอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่อัตราเร็วจะเพิ่มเป็นทวีคูณเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 0–10 °ซ. และเพิ่มน้อยมากในช่วง 20–40 °ซ. จะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของซัลไฟท์ และซัลเฟต เมื่อซัลไฟท์มีความเข้มข้น 0.03–1.0 นอร์มอล และอัตราเร็วของปฏิกริยาจะเร็วขึ้นเมื่อใช้อิออนของโลหะหนัก เช่น ทองแดงหรือโคบอลท์ โดยทันทีที่มีออกซิเจนในสารละลาย ซัลไฟท์จะถูกออกซิไดซ์ทันใดนั้น วิธีซัลไฟท์–ออกซิเดชั่นนี้เป็นที่นิยมกัน วิธีอื่น ๆ นอกนั้นอาจจะใช้ เมอแคปแทน (mercaptan)แทนโซเดียมซัลไฟท์ หรือใช้วิธีทางชีววิทยาวัดอัตราการเจริญเติบโตของ Aerobactor aerogenes (Webb, Van, 1964)

อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในส่วนที่สัมพันธ์กับตัวแปรและการดำเนินการของเครื่องหมักจะขึ้นกับอัตราการให้อากาศ พื้นผิวสัมผัสของของเหลว–อากาศที่เชื่อมโยงกับขนาดของฟองอากาศ ปริมาตรและความลึกของของเหลว รวมทั้งระยะเวลาที่ฟองอากาศอยู่ในของเหลว ซึ่งเกี่ยวพันกับความลึกของของเหลวและความเร็วของฟองอากาศในของเหลว โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารทางปริมาตร $k_L a$ (Aiba, Humphrey, Millis, 1965)

2.3.1 <u>ส.ป.ส.การถ่ายเทมวลสารทางปริมาตร ($k_L a$) ในถังหมักแบบคอลัมน์</u>

สำหรับการให้อากาศกับเครื่องหมักหรือถังหมักแบบคอลัมน์ของเหลวที่ใช้เป็นน้ำ ขนาดของฟองอากาศอยู่ระหว่าง 0.5–2.0 มิลลิเมตร และการถ่ายเทของออกซิเจนวัดด้วยวิธี ซัลไฟท์ออกซิเดชั่นจะได้ว่า

$$k_L = \frac{\beta_3 \nu_B}{H_L^{1/3}} \times \frac{1}{N_{Sc}^{1/2}} \qquad (2\text{-}20)$$

$$a = \frac{Q H_L}{10 d_B \nu_B^{V}} + \frac{\beta'}{H_L} \qquad (2\text{-}21)$$

เมื่อ a = พื้นผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศของเหลวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลวมีหน่วยเป็น เมตร^2/เมตร^3

β_3 = ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบของตัวกระจายอากาศ

β' = ค่าคงที่อย่างง่าย

H_L = ความลึกของของเหลว, เมตร^3

Q = อัตราการให้อากาศ, เมตร^3/นาที

V = ปริมาตรของของเหลว, เมตร^3

d_B = เส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศ

N_{Sc} = เชอร์วูดนัมเบอร์ $= \frac{\mu}{\rho D}$

μ = ความหนืดของของเหลว, กิโลกรัม/เมตร วินาที

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว, กิโลกรัม/เมตร^3

D = สัมประสิทธิ์การกระจายอากาศสู่ของเหลวนั้น

ในกรณีที่ค่า H_L อยู่ระหว่าง 3–5 เมตร จะไม่มีผลเนื่องจากผิวของของเหลว ดังนั้น เทอมทางขวาของสมการ 2–21 มีค่าน้อยมากตัดทิ้งได้จึงรวมสมการ 2–20 และ 2–20 ได้ว่า

$$k_L a = \frac{\beta_3 H_L^{2/3} Q}{10 \sqrt{d_B} N_{S_c}}$$

2.3.2 ส.ป.ส. การถ่ายเทมวลสารทางปริมาตร ($k_L a$) ในเครื่องหมักแบบถังกวน

$$\frac{k_L D_i}{D} \propto \left(\frac{n D_i^2 \rho}{\mu}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{r} \qquad (2\text{-}23)$$

$$a \propto \left\{\frac{(P_g/V)^{0.4} \rho^{0.2}}{\sigma^{0.6}}\right\} \left(\frac{\nu_s}{\nu_B}\right)^{0.5} \qquad (2\text{-}24)$$

D = ส.ป.ส. การกระจายของออกซิเจนในน้ำ, เมตร^2/ชั่วโมง

D_i = ความยาวของใบกวน, เมตร

n = ความเร็วหมุนของใบกวน, รอบ/วินาที

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว, กิโลกรัม/เมตร^3

μ = ความหนืดของของเหลว, กิโลกรัม/เมตร วินาที

a = พื้นผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศ–ของเหลว ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลวมีหน่วยเป็น เมตร^2/เมตร^3

P_g = พลังงานที่ถูกใช้ไปในการกวนของเหลวที่มีอากาศ, กิโลกรัม เมตรต่อวินาที

V = ปริมาตรของของเหลว, เมตร^3

σ = ความตึงผิว, ไดน์/เซนติเมตร

ν_s = ความเร็วเฉลี่ยของอากาศ, เมตร/ชั่วโมง (อัตราการให้อากาศ, ปริมาตร/เวลา หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวางของถังกวน)

V_B = ความเร็วเคลื่อนขึ้นของฟองอากาศในของเหลว, เมตร/วินาที

ถ้าให้ค่าของ ρ , μ, D, D_i, และ V_B คงที่จะได้ว่า

$$K_L a \quad (P_g/V)^{0.4} v_s^{0.5} n^{0.5} \qquad (2\text{-}25)$$

2.3.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ ส.ป.ส. การถ่ายเทมวลสารทางปริมาตร ($k_L a$)

อุณหภูมิทำให้การละลายของออกซิเจนในของเหลวเปลี่ยนไปส่งผลสะท้อนไปยังการถ่ายเทมวลสารซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการละลายของออกซิเจนในของเหลวนั้น จากการทดลองของ Jackson และ shen (1978) โดยใช้ถังหมักแบบถังลึกหรือแบบหอสูงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.8 เมตร ความสูง 13 เมตร เพื่อหาค่า $k_L a$ ของออกซิเจนในน้ำที่อุณหภูมิ 0–30 °ซ. ค่าของ $k_L a$ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ โดยที่ค่า $k_L a$ จะเปลี่ยนไป 2%/°ซ.

2.3.4 ขนาดและความเร็วเคลื่อนขึ้นของฟองอากาศในเครื่องหมักแบบคอลัมน์

ในเครื่องหมักแบบคอลัมน์ที่มีการให้อากาศโดยใช้หัวกระจายอากาศแบบท่อเล็ก ๆ อันเดียวมีปลายเปิดขึ้น ซึ่งจัดให้เส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ใหญ่พอเพื่อตัดผลของผนังในของคอลัมน์ที่มีต่อฟองอากาศที่เคลื่อนขึ้นจากหัวกระจายอากาศซึ่งอยู่ส่วนล่างของคอลัมน์ ภายในคอลัมน์ไม่มีสิ่งกีดขวางต่อการเคลื่อนขึ้นของอากาศ ของเหลวในที่นี้เป็นน้ำ ซึ่งการเลื่อนไหลของของเหลวเกิดจากฟองอากาศเท่านั้น (Krevelen, และ Hoftijzer, 1950) จะได้ความสัมพันธ์ของขนาดฟองอากาศแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนขึ้นของฟองอากาศได้ดังนี้

1. ในแถบของสตรีมไลน์ (Stream line)

$$d_B = \left(\frac{6\sigma d}{g\Delta\rho}\right)^{1/3} \qquad (2\text{-}26)$$

2. ในแถบของเทอบิวเลนซ์ (turbulence)

$$d_B = \left(\frac{72\ \rho}{\pi^2\ g\ \Delta\rho}\right)^{1/5} V_G\ 0.4 \qquad (2\text{-}27)$$

ในแถบสตรีมไลน์ เมื่อ $E_x = \frac{18}{R_e}$ หรือ $\frac{g\ d_B\ \Delta\rho}{\nu_B^2\ \rho} = \frac{18}{\nu_B d_B \rho}$ (2-28)

และเทอบิวเลนซ์ เมื่อ $E_x = 2$ (2-29)

สำหรับอัตราเร็ววิกฤติของการให้อากาศ (อัตราเร็วที่เปลี่ยนจากแถบสตรีมไลน์ไปเป็นเทอบิวเลนซ์พิจารณาเมื่อ

$$\frac{V_G^6\ \rho^2\ g^2\ \Delta\rho^2}{\sigma^5\ d^5} = 20 \qquad (2\text{-}30)$$

โดยที่

d_B = เส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศ

σ = ความตึงผิวของของเหลว

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเล็ก ๆ ซึ่งเป็นตัวกระจายอากาศ

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

$\Delta\rho$ = ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอากาศและของเหลว

V_G = อัตราการให้อากาศในหน่วยปริมาตรอากาศต่อหนึ่งช่องเปิดของหัวกระจายอากาศ

ν_B = ความเร็วเคลื่อนขึ้นของฟองอากาศในของเหลว

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว

μ = ความหนืดของของเหลว

$$E_x = \frac{g\ d_B\ \Delta\rho}{\nu_B^2\ \rho} \qquad (2\text{-}31)$$

$$R_e = \frac{\nu_B\ d_B\ \rho}{\mu} \qquad (2\text{-}32)$$

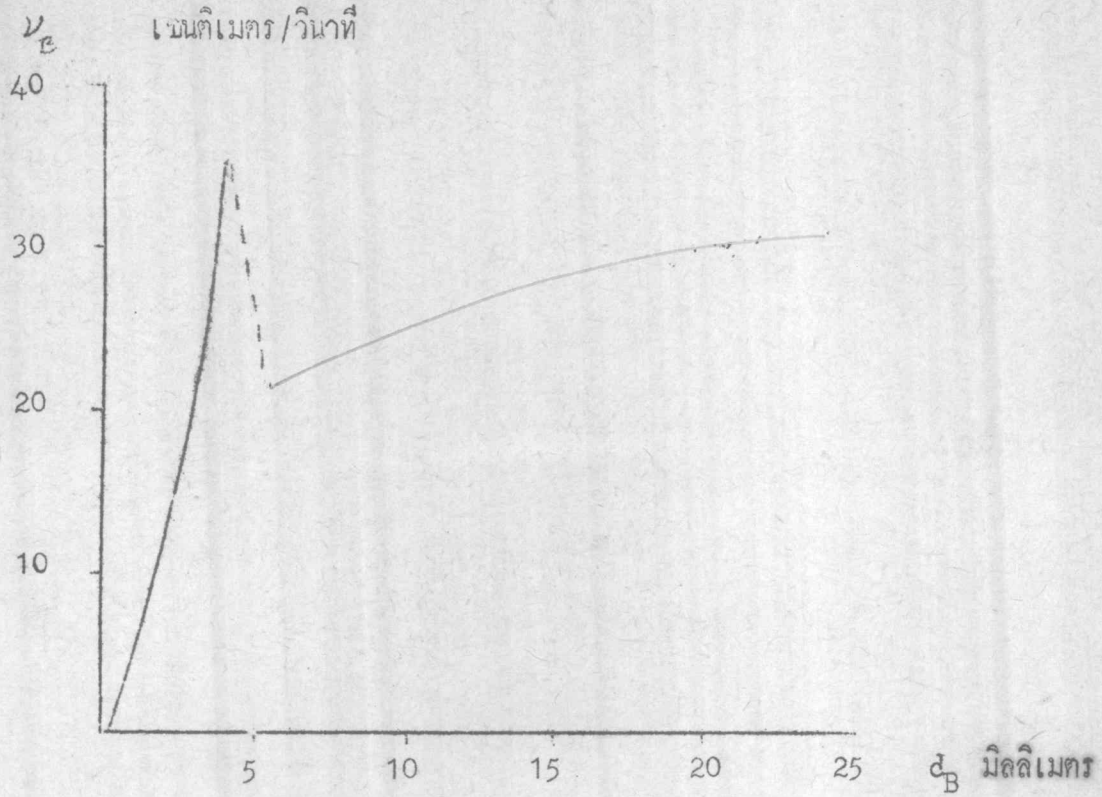
จากสมการที่ 2–26 และ 2–27 จะเห็นได้ว่าส่วนของสตรีมไลน์ขนาดของฟองอากาศจะขึ้นกับขนาดของตัวกระจายอากาศเท่านั้นจะไม่ขึ้นกับอัตราการให้อากาศ ขณะที่ในส่วนของเทอบิวเลนซ์นั้นขนาดของฟองอากาศจะขึ้นกับอัตราการให้อากาศอย่างเดียว ไม่เกี่ยวกับตัวกระจายอากาศ ลักษณะของฟองอากาศในแถบสตรีมไลน์จะเป็นฟองเดี่ยวที่แยกจากกัน และจะเป็นฟองที่ต่อกันคล้ายลูกโซ่ในแถบเทอบิวเลนซ์

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกับความเร็วของฟองอากาศที่เคลื่อนขึ้นในของเหลวในแถบสตรีมไลน์ แบ่งได้เป็น 3 ส่วนด้วยกันตามขนาดของฟองอากาศ สังเกตได้จากรูปที่ 2–4

1. ฟองเล็กเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 1.5 มิลลิเมตร ฟองจะเป็นรูปทรงกลมเคลื่อนขึ้นในแนวดิ่ง ความเร็วเคลื่อนขึ้นจะเพิ่มอย่างรวดเร็ว เมื่อขนาดของฟองอากาศเพิ่มเพียงเล็กน้อย

2. ฟองขนาดกลางเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 1.5–6 มิลลิเมตรในส่วนนี้ รูปร่างของฟองจะไม่เป็นทรงกลมที่เดียว ซึ่งสังเกตเห็นได้ การเคลื่อนขึ้นเป็นแบบเกลียว ความเร็วเคลื่อนขึ้นจะลดลงขณะที่ฟองมีขนาดเพิ่มขึ้น

3. ฟองขนาดใหญ่เส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 6 มิลลิเมตร การเคลื่อนขึ้นของฟองอากาศเป็นแนวดิ่ง แต่รูปร่างของฟองเปลี่ยนไปมากไม่เป็นทรงกลมหรือใกล้เคียงอีกต่อไป รูปร่างจะคล้ายดอกเห็ด ความเร็วเคลื่อนขึ้น จะเพิ่มเพียงเล็กน้อย ขณะที่ฟองมีขนาดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเคลื่อนขึ้นและขนาดของฟองอากาศในน้ำ (Krevelen และ Hoftijzer, 1950)

ในเครื่องหมักแบบคอลัมน์ทั่ว ๆ ไปที่มีลักษณะใกล้เคียงกับที่กล่าวมาแล้วสามารถที่จะใช้ความสัมพันธ์จากการศึกษาทาง Krevelen และ Hoftijzer (1950) ได้ ดังนั้นในอุตสาหกรรมการหมักที่ต้องให้อากาศมักจะใช้ขนาดของฟองอากาศ ในช่วง 1.5-2.0 มิลลิเมตร ซึ่งให้ค่าความเร็วเคลื่อนขึ้นของฟองอากาศระหว่าง 20-30 เซ็นติเมตร/วินาที โดยที่ลักษณะของฟองเป็นแบบเดี่ยว ๆ ในแถบสตรีมไลน์ สำหรับน้ำหมักที่มีความเข้มข้นเจือจาง เมื่อให้อัตราการให้อากาศมีขนาด 1 หน่วยปริมาตรอากาศต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที (Aiba, Humphrey และ Millis, 1965)

2.4 ชนิดของเครื่องหมัก

เครื่องหมักชนิดต่าง ๆ ในการออกแบบเพื่อศึกษาในห้องทดลองที่เกี่ยวกับประสิทธิภาพของการถ่ายเทออกซิเจน การผสมผสานภายในเครื่องหมัก การเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์ มักจะให้เครื่องหมักมีสัดส่วนที่แน่นอนคงที่ ที่สามารถหาค่าตัวแปรอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากรูปร่างและสัดส่วนของถังหมักหรือเครื่องหมัก เช่น อัตราการให้อากาศ อัตราเร็วในเครื่องช่วยกวน ตัวกระจายอากาศ เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการขยายเครื่องหมักให้ใหญ่ขึ้น ในการดัดแปลงจากระบบไม่ต่อเนื่องให้เป็นแบบกึ่งต่อเนื่องหรือต่อเนื่อง สำหรับการศึกษาในโรงงานต้นแบบต่อไปถึงการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อการค้า

เครื่องหมักแบ่งเป็นชนิดใหญ่ตามลักษณะการให้อากาศและการกวนได้ 3 ชนิดด้วยกันคือ ชนิดถังกวน คอลัมน์ และแบบผสมระหว่างถังกวนและคอลัมน์

2.4.1 เครื่องหมักชนิดถังกวน

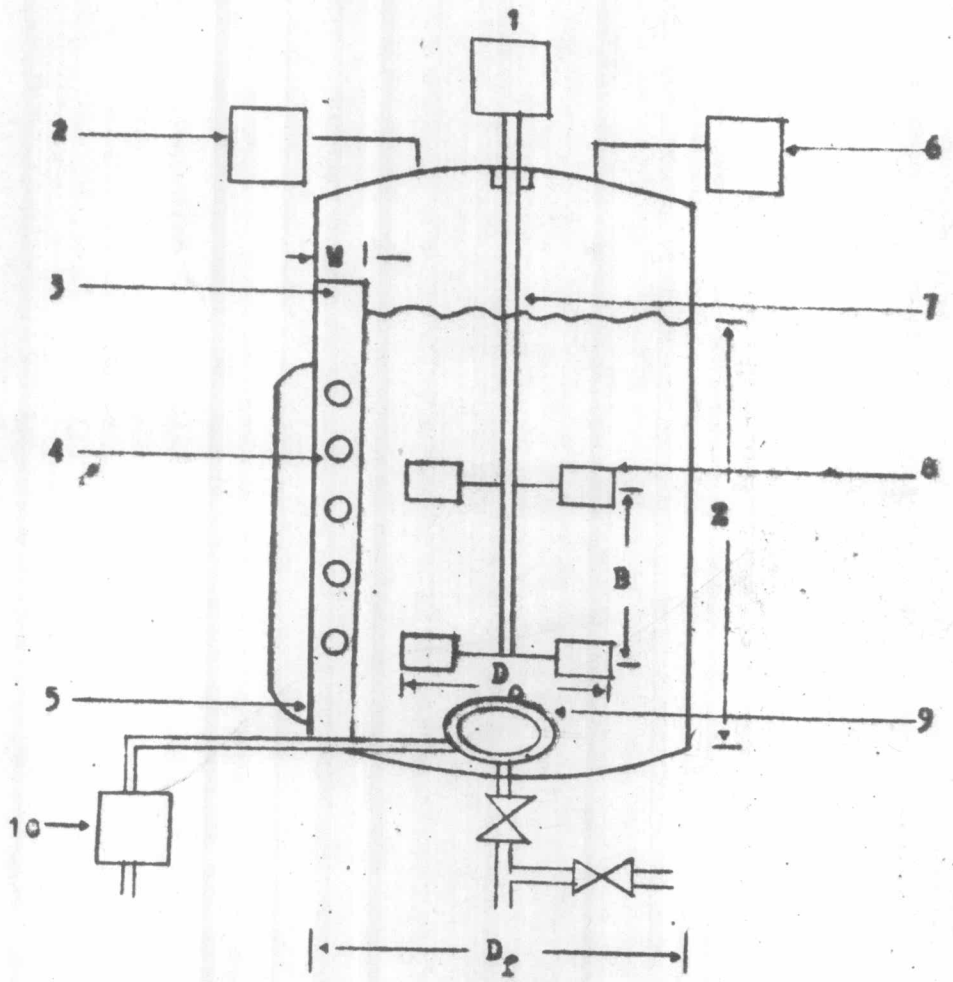
ถังกวนเป็นเครื่องหมักชนิดที่นิยมใช้กัน เป็นชนิดทั่วไปที่ใช้ในการศึกษาทดลองในโรงงานต้นแบบและในวงการอุตสาหกรรมการหมัก ตั้งแต่ระยะเริ่มแรกจนถึงสมัยปัจจุบัน ใช้ได้ทั้งการหมักแบบใช้และไม่ใช้อากาศ เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำส้มสายชู เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ ยีสต์ขนมปัง นมเปรี้ยว และยาปฏิชีวนะต่างๆ เป็นต้น ลักษณะของถังกวนเป็นภาชนะรูปทรงกระบอก ตั้งตรงในแนวดิ่ง ตัวถังอาจเป็นพลาสติก แก้วและโลหะ ขึ้นกับจุดประสงค์ของการออกแบบในการใช้งาน ตามโรงงานอุตสาหกรรมการหมัก มักจะใช้โลหะเป็นเหล็กปราศจากสนิม เพราะให้ความคงทนแข็งแรงดี สำหรับในการศึกษาทดลองในห้องทดลอง หรือการเรียนการสอนนั้น นิยมใช้ถังหมักที่ทำด้วยแก้ว เพราะหาได้ง่าย สะดวก สามารถดัดแปลงสร้างได้เอง ที่สำคัญสามารถเห็นและติดตามลักษณะของการหมักได้ ส่วนประกอบของถังกวนสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

1. ระบบการให้อากาศ อากาศจากเครื่องอัดอากาศจะผ่านเครื่องฆ่าเชื้อหรือเครื่องกรองทำด้วยใยแก้วหรือสำลี ผ่านเครื่องวัดอัตราเร็วของอากาศ และท่อส่งอากาศซึ่งมีรูเปิดขึ้นในแนวดิ่งเพียงท่อเดียว ซึ่งเป็นแบบที่ง่ายที่สุด หรือแบบท่อกลมวงแหวนของ Finn (1954) อยู่ใต้ใบกวนดังรูปที่ 2-5

2. ระบบการกวน ประกอบด้วยใบกวนแกนเชื่อมระหว่างใบกวน แกนกลางขึ้งหมุนด้วยมอเตอร์ ใบกวนมีหลายชนิดอาจเป็นใบพาย ใบพัด ที่ตั้งตรงในแนวดิ่ง และมีแผ่นกั้นซึ่งติดอยู่กับผนังด้านในของถังกวนช่วยป้องกันไม่ให้เกิดวังน้ำวน ยังเป็นตัวช่วยทำให้เกิดการผสมผสานที่ดีขึ้นด้วย การทำงานของใบกวนจะช่วยเตือาอากาศจากท่อส่งอากาศใต้ใบกวนให้แตกกระจายเป็นฟองเล็ก ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทของออกซิเจนจากฟองอากาศลงสู่น้ำหมัก ควบคู่ไปกับการช่วยให้น้ำหมัก จุลินทรีย์หรือเชื้อหมักและอากาศผสมผสานกันทำให้ความเข้มข้นมวลสารต่าง ๆ ภายในถังหมักใกล้เคียงกัน ดังนั้นความเร็วในการกวนจะมีความสำคัญ ควบคุมทั้งการถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศสู่น้ำหมักและการผสมภายในถังหมักพร้อม ๆ กัน

3. ระบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวกับการเติมสารอาหาร สารอาหารเสริมลงในถังหมัก การถ่ายน้ำหมักจากถังหมัก และระบบควบคุมสภาพการหมัก อันมี การควบคุมความเป็นกรดด่าง อุณหภูมิ การกำจัดฟองที่เกิดจากการหมัก หรือความหนืดข้นของน้ำหมัก ซึ่งระบบนี้จะมีความยากง่ายหรือใช้เครื่องมือพิเศษแบบอัตโนมัติในการดำเนินงานจะขึ้นกับผู้ทดลองที่จะหามาได้ หรือประดิษฐ์ดัดแปลงใช้เอง ขึ้นกับระบบการหมักเป็นแบบ ไม่ต่อเนื่อง กึ่งต่อเนื่อง หรือต่อเนื่องด้วย

ถังหมักแบบถังกวน มีลักษณะเฉพาะตัว ตรงที่ประสิทธิภาพในการถ่ายเทของออกซิเจนจากอากาศสู่น้ำหมัก เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของใบกวนในระบบการกวน และความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ป้อนเข้าไป (ได้จากอัตราการป้อนอากาศ, ปริมาตร/เวลาหารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวางของตัวถังหมัก) ในส่วนที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วเฉลี่ยจะใช้ได้ เมื่อความเร็วเฉลี่ย



1. มอเตอร์
2. ถังน้ำ
3. แผ่นกั้น
4. ท่อน้ำเย็น
5. ที่หุ้มถัง
6. ถังสารอาหารเหลว
7. แกนกลางใบกวน
8. ใบกวน
9. ตัวพ่นอากาศรูปวงแหวน
10. เครื่องกรองอากาศ

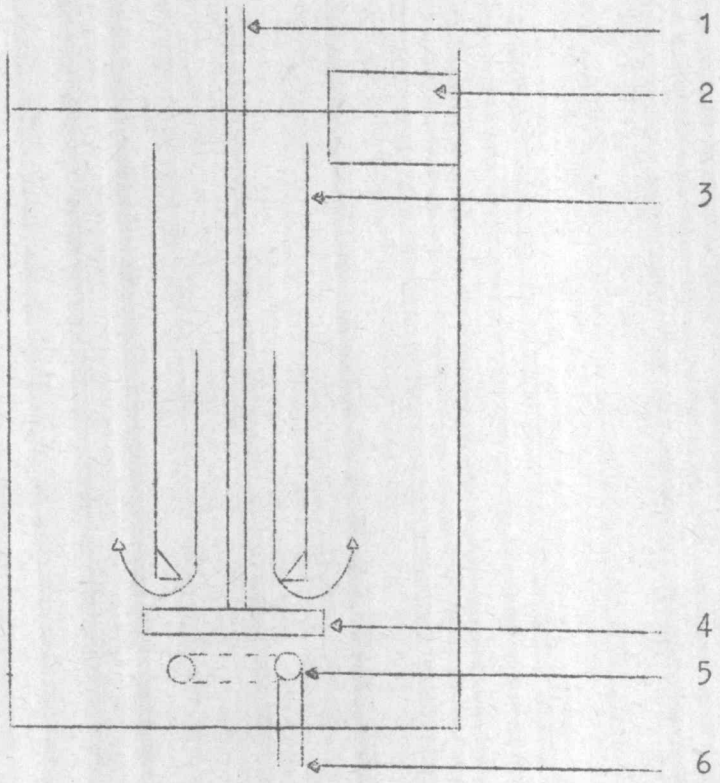
D_o/D_f = 0.30-0.50

B/D_o = 1.0-1.2

Z/D_f = 1.0-2.0

W/D_f = 0.08-0.12

รูปที่ 2-5 ส่วนต่าง ๆ ของเครื่องหมักชนิดถังกวน (Finn, 1954)



1 แกนกลางใบกวน

2 แผ่นกั้น

3 ท่อภายในสำหรับให้เกิดการไหลเวียนของของเหลว

4 ใบกวน

5 วงแหวนสำหรับให้อากาศ

6 ท่อส่งอากาศ

รูปที่ 2-6 ภาพแสดงเครื่องหมักชนิดถังกวนของ Waldhof-Mannheim.

(Webb, 1964)

ต่ำกว่าประมาณ 200 เซนติเมตรต่อนาที ถ้าสูงกว่าค่านี้ การถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศสู่น้ำหมักจะคงที่และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราของอากาศ เนื่องมาจากการกระจายของฟองอากาศไม่สม่ำเสมอและจับกันเป็นฟองใหญ่ขึ้น นอกจากนั้นเมื่อความลึก Z/D_f (Z, D_f เป็นค่าความลึกของน้ำหมักและเส้นผ่าศูนย์กลางของถังหมัก) ของน้ำหมักเพิ่มจาก 1 เป็น 2 การถ่ายเทของออกซิเจนจากอากาศสู่น้ำหมักจะเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 50 % เพราะฟองอากาศจะมีเวลาอยู่ในน้ำหมักมากขึ้น (Cooper, Fernstrom,Miller, 1944)

ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศสู่น้ำหมักสำหรับถังกวนจะมากกว่า 3.8 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง สูงกว่าเครื่องหมักแบบคอลัมน์ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 1.3 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และแบบแอร์ลิฟท์ซึ่งอยู่ระหว่าง 1.6–3.8 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (Tannenbaum, Wang, 1975) ทั้งนี้เพราะถังกวนสามารถเพิ่มความเร็วของใบกวนได้มาก เป็นการเพิ่มให้น้ำหมักมีแรงเฉือนต่ออากาศเพิ่มขึ้นจะได้ฟองอากาศที่เล็กลงมีพื้นผิวสัมผัสสำหรับการถ่ายเทออกซิเจนมากขึ้น ดังนั้นถังกวนจึงเหมาะสำหรับเชื้อหมักที่ต้องการออกซิเจนสูง

ถังหมักแบบถังกวนนี้เป็นไปไม่ได้ที่จะให้อากาศกระจายไปยังส่วนต่าง ๆ ของน้ำหมักโดยปราศจากการกวน (Finn, 1954) การให้อากาศจะไปกระตุ้นการเจริญเติบโตของเซลล์เชื้อหมัก ถ้าหากประสิทธิภาพในการกวนและการให้อากาศดีจะทำให้มีการใช้น้ำตาลมากขึ้น (Johnson, olson, 1949, Reiser,1954 และ Bunker,1963) และผลผลิตยีสต์เพิ่มขึ้น (Vananuvat, Kinsella, 1975) ถังกวนสามารถที่จะให้ความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำหมักได้สูงกว่า 0.1–0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นวิกฤตของออกซิเจนสำหรับเชื้อหมักแบบใช้ออกซิเจน (Hixson, Gaden, 1956)

ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตยีสต์ ผลิตภัณฑ์จากเชื้อหมัก กับอัตราการให้อากาศและการกวนสำหรับเชื้อหมักเดียวกัน จะแปรเปลี่ยนไปตามลักษณะเฉพาะของถังกวน เช่น จำนวนและชนิดใบกวน เพราะใบกวนจะมีผลต่อการผสมภายในถังหมัก ถ้าหากถังกวนมีขนาด $Z/D_f = 1$ การใช้ใบกวน

เพียงอันเดียวจะเพียงพอสำหรับการผสมผสานให้เข้ากันดีในถังหมัก แต่ถ้าหาก Z/D_f มากกว่า 1 ควรจะมีใบกวนมากกว่าหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การผสมผสานในแนวรัศมีของถังจะดี แต่ในแนวความสูงของถังจากโคนถึงปลายถังการผสมจะไม่เพียงพอ ใบกวนแต่ละอันจะมีปริมาตรการกวนเฉพาะตัว การแลกเปลี่ยนปริมาตรระหว่างใบกวนจะมีน้อยถ้าหากค่า Z/D_f มากกว่า 2 แล้ว การผสมผสานจะไม่ดีเลยตามความสูงของถัง อาจจะไม่มีปัญหาสำหรับถังกวนในระบบไม่ต่อเนื่อง แต่ระบบต่อเนื่องยังไม่เป็นที่ยอมรับกัน เพราะแบบต่อเนื่องจำเป็นต้องให้มีการผสมเป็นเนื้อเดียวกันโดยเร็ว (Solomon, 1969) อันนี้เป็นข้อเสียประการหนึ่งในเรื่องความสูงของถังกวน

ข้อเสียอีกประการหนึ่งของถังกวน แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนสู่น้ำหมักดี ก็ต้องใช้พลังงานมากในการใช้มอเตอร์เพื่อหมุนใบกวน ขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ในการหมุนใบกวนสำหรับถังกวนขนาดเล็กและขนาดกลางจะอยู่ในช่วงของการใช้กำลังไฟฟ้า 6–8 วัตต์ ต่อปริมาตรน้ำหมัก 1 ลิตร แม้ว่าในถังหมักขนาดใหญ่จะลดลงเหลือประมาณ 1–2 วัตต์ต่อลิตรน้ำหมักก็ตาม กำลังไฟฟ้าที่ต้องการในการกวน ขนาดและจำนวนชุดของใบกวนที่จำเป็นต้องใช้มิได้ขึ้นกับสัดส่วนทางเรขาคณิต แต่จะขึ้นกับความสูงของถังหมักความหนืดของน้ำหมักและประสิทธิภาพในการทำให้ออกซิเจนละลายลงสู่น้ำหมัก (ไพบูลย์ ด่านวิรุทัย, 2520) การใช้มอเตอร์ยังทำให้ยุ่งยากในการติดตั้ง เพื่อให้ถังหมักปราศจากเชื้อแปลกปลอมจากภายนอก ตลอดเวลาการหมักซึ่งใช้เวลานาน นอกจากนั้นยังเพิ่มภาระในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมด้วย

2.4.2 <u>เครื่องหมักชนิดหอสูง</u>

เครื่องหมักชนิดหอสูง อาจจะเรียกว่าถังลึก คอลัมน์ คอลัมน์ฟองอากาศ หรือชนิดท่อก็ได้ ทั้งนี้เพราะมีวิวัฒนาการมาจากท่อปฏิกริยาเคมี ลักษณะของเครื่องหมักจะเป็นทรงกระบอกยาว วางในแนวดิ่ง ไม่มีเครื่องช่วยกวน การผสมภายในเครื่องหมักจะขึ้นกับระบบการให้

อากาศ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่ต่างจากถังกวน ซึ่งการให้อากาศจะขึ้นกับการกวนท่อให้อากาศ หรือตัวกระจายอากาศจะมีความสำคัญ เช่นเดียวกับใบกวนและความเร็วในการกวนในถังกวน ไม่มีวังน้ำวนดังนั้น แผ่นกั้นจึงไม่มีความจำเป็นในเครื่องหมักหอสูง ตัวกระจายอากาศจะอยู่ที่ฐานล่างของคอลัมน์ อากาศจากเครื่องอัดอากาศผ่านเข้าสู่เครื่องฆ่าเชื้อหรือเครื่องกรอง เครื่องวัดอัตราการให้อากาศ ตัวกระจายอากาศและเข้าสู่น้ำหมักตามลำดับ ขณะที่ฟองอากาศเคลื่อนขึ้น น้ำหมักส่วนที่อยู่ใกล้ฟองอากาศจะเคลื่อนขึ้นไปด้วย ขณะที่น้ำหมักรอบนอกออกไปเคลื่อนลง ทำให้มีการผสมผสานกันขึ้น (Jackson, shen, 1978)

ตัวกระจายอากาศจะเป็นตัวควบคุมขนาดของฟองอากาศ เมื่ออัตราการให้อากาศต่ำ และเมื่ออัตราการให้อากาศสูงขึ้น ขนาดของฟองอากาศจะไม่ขึ้นกับตัวกระจายอากาศอีกต่อไป (Krevelen, Hoftijzer, 1950) แบบของตัวกระจายอากาศ อาจเป็นแบบแผ่นหรือทรงกลม มีรูพรุน แบบแผ่นที่เจาะให้มีรูขนาดและระยะห่างเท่า ๆ กัน แบบท่อเดี่ยวหรือหลาย ๆ ท่อที่มีรูเปิดเล็ก ๆ ตอนปลายท่อ และแบบท่อกลมรูปวงแหวน เจาะรูขนาดและระยะเท่า ๆ กันขนาดของรูของตัวกระจายอากาศมักเจาะให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.04–0.40 เซนติเมตร (Webb, 1964) ปกติจะใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูประมาณ 0.08 เซนติเมตร (white, 1954) เพื่อให้ได้ฟองอากาศขนาด 1.5–10 มิลลิเมตร ซึ่งจะให้ความเร็วฟองอากาศที่เคลื่อนขึ้นในน้ำหมักระหว่าง 20–30 เซนติเมตรต่อวินาที (Krevelen, Hoftijzer, 1950 และ Aiba, Humphsey, Millis, 1965) ตัวกระจายอากาศแบบมีรูพรุนจะให้ฟองอากาศขนาดเล็ก ๆ ดีกว่า ตัวกระจายอากาศแบบเจาะรู หรือแบบตาข่ายผลผลิตยีสต์ขนมปังเมื่อใช้ตัวกระจายแบบรูพรุนจะได้มากกว่าแบบหลังด้วยอย่างไรก็ตาม แม้ว่าตัวกระจายแบบรูพรุนจะใช้ได้ดีในห้องทดลอง แต่ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งขนาดของคอลัมน์จะยาวมากขึ้นตัวกระจายอากาศแบบรูพรุน จะให้ฟองเล็ก ๆ ดี ในระยะใกล้ ๆ กับตัวกระจายอากาศเท่านั้น ยิ่งสูงจาก

จากหัวกระจาย ฟองเล็ก ๆ จะรวมกันเป็นฟองใหญ่ขึ้นได้ ข้อเสียอีกประการหนึ่งสำหรับแบบรูพรุนตรงที่เกิดการอุดตันได้ง่ายจากเชื้อหมักภายหลังการใช้งาน หรือถ้าทิ้งไว้ราอาจขึ้นได้ (White, 1954 และอำนวย สุขเหมือน,2521) ในการออกแบบหรือเลือกใช้ตัวกระจาย นอกจากคำนึงถึงขนาดของฟองอากาศที่จะได้รับแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงการกระจายของฟองอากาศอย่างสม่ำเสมอในคอลัมน์ด้วย

ขนาดของคอลัมน์จะมีความสูง 8–9 เมตร ในทางการค้าอาจจะสูงถึง 20 เมตร (Jackson, shen, 1978) เนื่องจากมีขนาดความสูงมากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่าแบบถังกวน ดังนั้นจะใช้เนื้อที่หรือพื้นที่ดินน้อย เหมาะกับการใช้งานในบริเวณที่มีปัญหาเรื่องที่ดิน และจากการลดการใช้พลังงานในการกวน นอกจากจะช่วยลดต้นทุนในการผลิต การดูแลบำรุงรักษาแล้วยังสอดคล้องกับสถานะการณ์ปัจจุบันที่ขาดแคลนน้ำมันซึ่งเป็นตัวให้พลังงานขั้นต้นด้วย

เครื่องหมักแบบหอสูงสร้างได้ง่าย ราคาถูก การควบคุมไม่มากและยุ่งยาก เพราะไม่มีเครื่องช่วยกวน แม้ว่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำหมักจะมีขีดจำกัด ที่น้อยกว่าแบบถังกวน ปัจจุบันมีการนำเครื่องหมักแบบนี้ไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมการหมักหลายอย่างด้วยกัน เช่น การผลิตเบียร์ น้ำส้มสายชู กรดมะนาว ยีสต์โปรตีน และในระบบการกำจัดน้ำเสีย (Greenshields, Smith, 1974)

เครื่องหมักแบบหอสูง มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนสู่น้ำหมักที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการให้อากาศ ความสูงหรือความลึกของน้ำหมัก ความหนาแน่นของน้ำหมัก และเป็นสัดส่วนกลับกับขนาดของฟองอากาศ ปริมาตรของน้ำหมัก และความหนืดของน้ำหมัก (จากสมการ 2–22) ดังนั้นถังหมักแบบนี้ไม่เหมาะสำหรับน้ำหมักที่มีความหนืดสูง เพราะนอกจากให้ออกซิเจนละลายสู่น้ำหมักต่ำแล้ว อาจมีปัญหาในการผสมผสานภายในน้ำหมักด้วย

เนื่องจากแรงเฉือนของน้ำหมักที่มีต่อเซลล์ต่ำในเครื่องหมักแบบนี้ ดังนั้น เซลล์ที่แขวนลอยในน้ำหมักจะจับกันเป็นก้อน เป็นแบบมวลจุลินทรีย์ แทนที่จะเป็นแบบเซลล์เดี่ยว ๆ (ดู 2.2.1) และรูปร่างของจุลินทรีย์จะไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก

ข้อเสียของถังหมักแบบคอลัมน์ ก็คือถ้าน้ำหมักมีความลึกมาก ทำให้น้ำหมักส่วนบนและล่างมีความเข้มข้นแตกต่างกันได้ แม้ว่าจะมีการผสมผสานที่ดีก็ตาม แต่ต้องใช้ระยะเวลาหนึ่งสำหรับการผสมที่ดี และปริมาณออกซิเจนในฟองอากาศจะมากตรงส่วนล่าง แล้วค่อย ๆ ลดลงตามความสูงของคอลัมน์ และน้อยมาก ตรงผิวของน้ำหมักตอนบน เมื่อเป็นเช่นนี้ทำให้เซลล์ที่อยู่ส่วนล่างใกล้กับระบบการให้อากาศจะรับออกซิเจนได้มากกว่า เซลล์ที่อยู่สูงขึ้นไป (Jackson, shen ,1978) เซลล์ส่วนล่างจะมีการหายใจสูง จะเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์และความร้อน ทำให้การผลิตอาจต่ำลงได้ (wiley, 1954) และในระหว่างการหมักจะมีการเติมสารกำจัดฟองพวกสารละลายซิลิโคน และปรับความเป็นกรดด่างของน้ำหมักด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากทางด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งอาจเป็นพิษต่อเซลล์ทางตอนบนของน้ำหมักได้

จากเหตุผลที่จะให้มีการผสมผสานของน้ำหมักส่วนบนและส่วนล่างของคอลัมน์ดีขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำหมักได้มากขึ้น Lefrancois (1955) เป็นคนแรกที่ได้ออกแบบปรับปรุงเครื่องหมักแบบหอสูงให้ดีขึ้น เรียกว่าเครื่องหมักแบบแอร์ลิฟท์ และต่อมาก็มีเครื่องหมักแอร์ลิฟท์แบบใหม่ (อำนวย สุขเหมือน, 2521)

เครื่องหมักแบบหอสูงนี้ได้มีการศึกษาทดลองนำไปใช้ในระบบกึ่งต่อเนื่องและต่อเนื่องทั้งในห้องทดลองและโรงงานต้นแบบ พบว่ามีทางเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

2.4.1 เครื่องหมักแอร์ลิฟท์

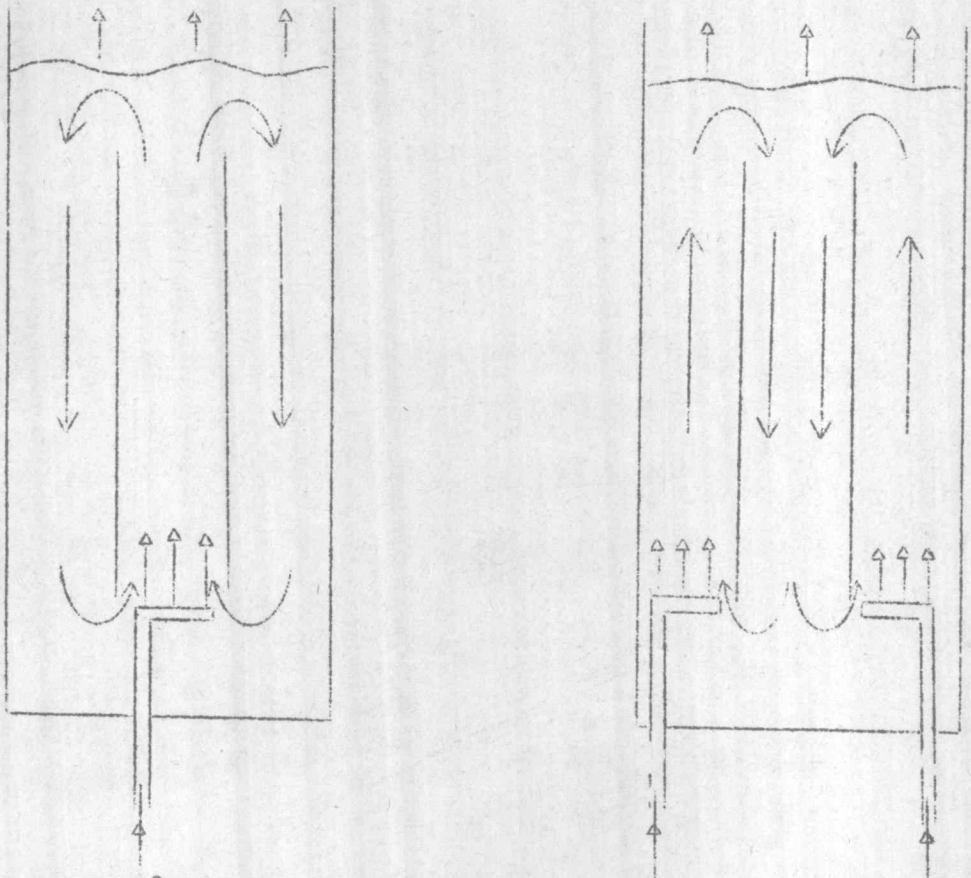
ทั้งแบบของ Lefrancois (Tannenbaum, Wang, 1975) รูปที่ 2-7 และของ อำนวย สุขเหมือน รูปที่ 3-1 ได้อาศัยหลักความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างน้ำหมักและน้ำหมักผสมอากาศ ทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำหมักผ่านหัวกระจายอากาศตลอดเวลา ให้น้ำหมักได้สัมผัสกับอากาศบริสุทธิ์ที่เพิ่งออกจากหัวกระจาย ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนสูง จากการไหลเวียนของน้ำหมักทำให้การผสมผสานเกิดได้ดีและเร็วขึ้น

Wang และ Daniel (1969) ได้ศึกษาต่อจาก Lefrancois พบว่าอัตราส่วนการให้อากาศ (ปอนด์ของออกซิเจนที่ละลายในน้ำหมักต่อกำลังม้า-ชั่วโมง) สูงสุดเมื่ออัตราส่วนพื้นที่ตัดขวางของน้ำหมักที่ไหลลงต่อไหลขึ้นมีค่า 0.8 ทั้งนี้ได้ทำการทดลองที่อัตราส่วนพื้นที่ภาคตัดขวางนั้น อยู่ระหว่าง 0.6-2.0 ถ้าจะให้อัตราการไหลวนเปลี่ยนไปก็ทำได้โดยเปลี่ยนระดับของท่ออันใน อัตราการไหลวนจะลดลงเมื่อลดระดับท่ออันในลง เมื่ออัตราการให้อากาศมีค่าคงที่ และในการทดลองเมื่อขยายขนาดของเครื่องหมักจะได้อัตราส่วนการให้อากาศสูงสุดเมื่อ

1. ความสูงของท่ออันในน้อยกว่าระดับของน้ำหมักที่ผสมกับอากาศ อยู่เท่ากับความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ของเครื่องหมัก

2. อัตราส่วนความสูงของคอลัมน์ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ มีค่าต่ำสุด

3. สำหรับเครื่องหมักบางขนาด เมื่อปริมาตรน้ำหมักน้อยและอัตราส่วนของความสูงของคอลัมน์ ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์มีค่าสูง พบว่าอัตราส่วนของการให้อากาศ มีค่าเพิ่มขึ้นได้ เมื่อแบ่งท่ออันในเป็นช่อง ๆ หรือใช้ท่ออันในหลาย ๆ ท่อ

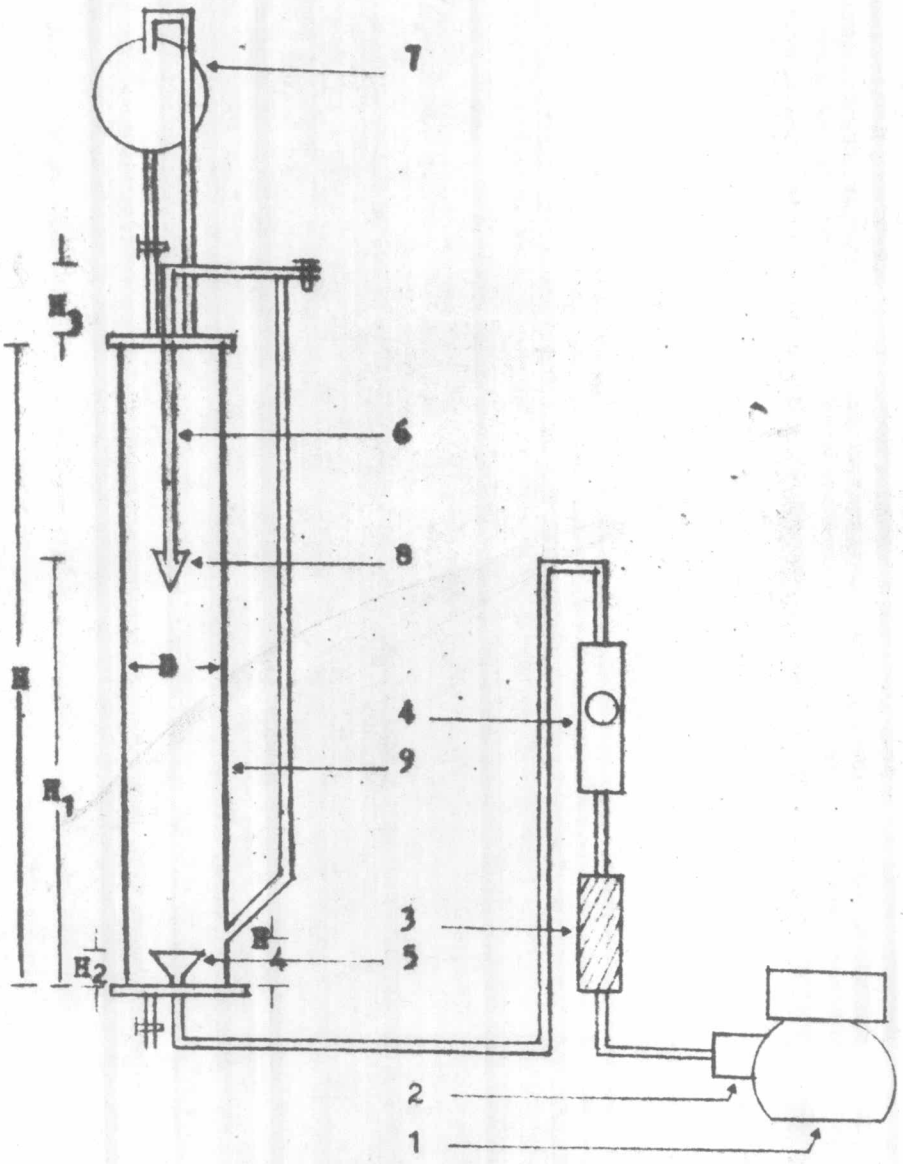


รูปที่ 2-7 แสดงลักษณะการไหลเวียนของของเหลวในเครื่องหมักแอร์ลิฟท์ ของ Lefrancois (1955)
(Tannenbaum, Wang, 1975)

เครื่องหมักแอร์ลิฟท์ (อำนวย สุขเหมือน, 2521) จะมีรูปแบบที่แตกต่างออกไป โดยน้ำหมักจะไหลหมุนเวียนผ่านท่อป้อนย้อนกลับ ซึ่งเป็นท่อเล็ก ๆ อยู่ภายนอกคอลัมน์ อัตราการไหลเวียนของน้ำหมักของเครื่องหมักแบบนี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการให้อากาศ เครื่องหมักแอร์ลิฟท์สามารถบรรลุผลในการช่วยให้เกิดการผสมผสานของน้ำหมักตลอดความยาวของคอลัมน์ได้ดีขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่น้ำหมักได้มากกว่าแบบคอลัมน์ แต่ยังน้อยกว่าถังกวน

2.4.3 เครื่องหมักชนิดผสม

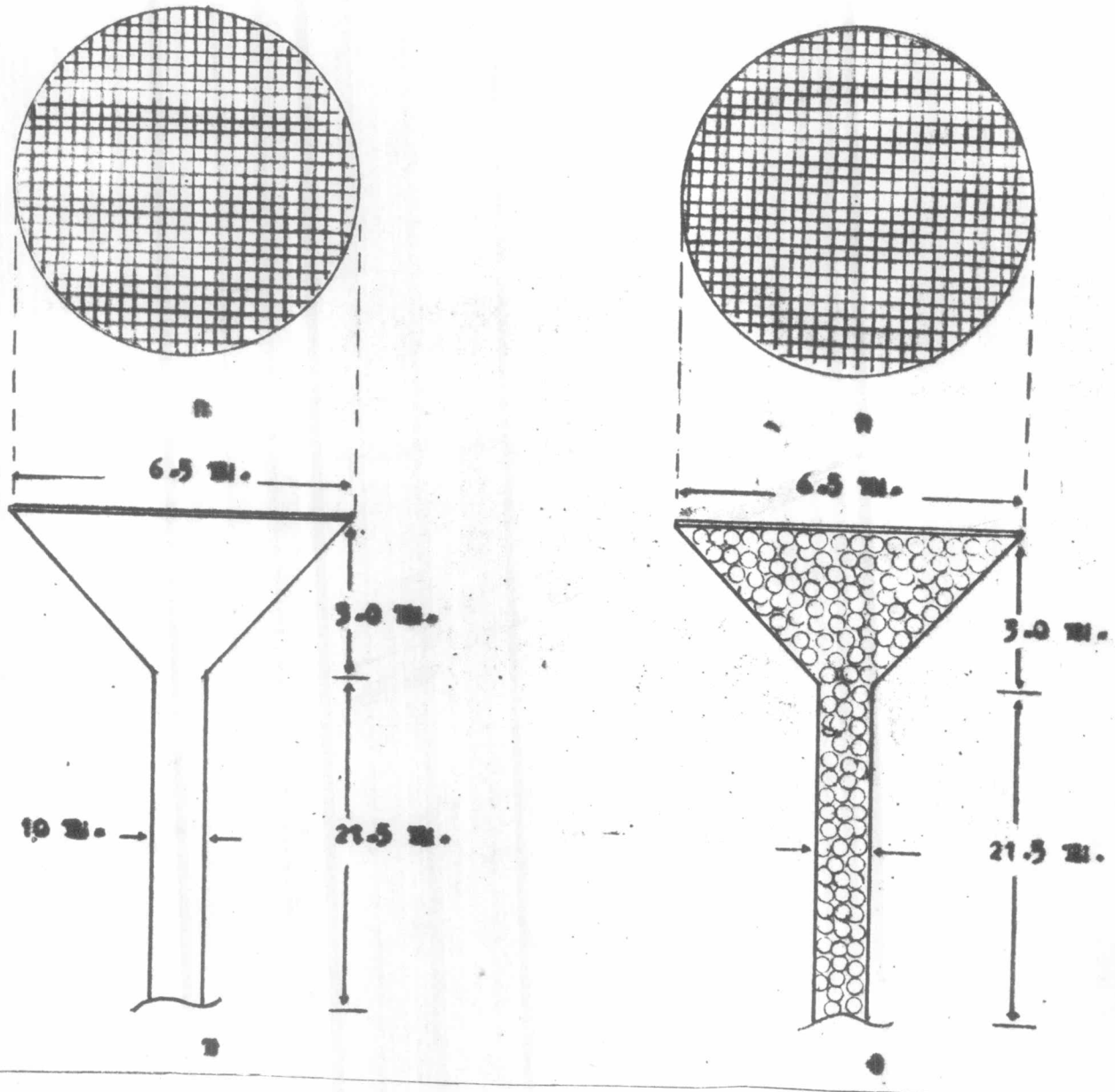
เป็นเครื่องหมักชนิดถังกวนและหอสูงมาผสมกันมีใบกวนและตัวกระจายอากาศพร้อม ๆ กัน



รูปที่ 3–1 แสดงส่วนต่าง ๆ ของเครื่องหมักชนิดคอลัมน์ (อำนวย สุขเหมือน, 2521)

1. เครื่องอัดอากาศ 2. เครื่องปรับความดัน 3. เครื่องกรองอากาศ
4. เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ 5. ตัวกระจายอากาศ 6. ห่อป้อนย้อนกลับ
7. ระบบกันฟองล้น 8. กรวยป้องกันอากาศเข้าสู่ห่อป้อนย้อนกลับ 9. คอลัมน์แก้ว

ความสูงของคอลัมน์ (H) 120.0 ซ.ม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายในคอลัมน์ 8.7 ซม.
เส้นผ่าศูนย์กลางภายในห่อป้อนย้อนกลับ 0.7 ซม.

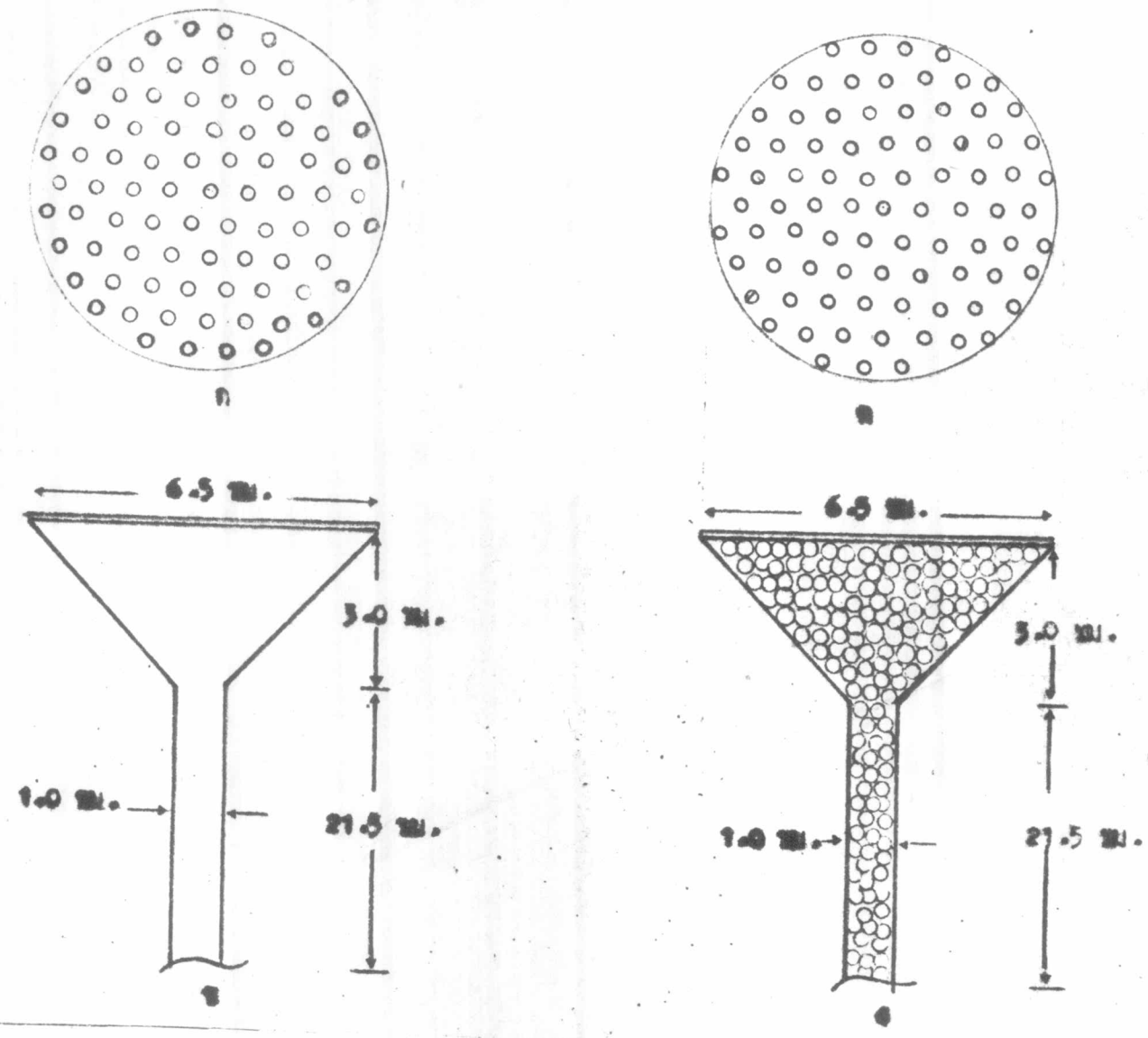


รูปที่ 3–2 ก. ภาพมองจากด้าน บนของหัวกระจายอากาศแบบตะแกรงโลหะขนาด 40 ตา

ข. ภาพมองจากด้านข้างของหัวกระจายอากาศแบบตะแกรงโลหะ

ค. ภาพมองจากด้านบนของหัวกระจายอากาศแบบตะแกรงโลหะบรรจุลูกแก้ว ตะแกรงขนาด 40 ตา และลูกแก้วขนาด 2.0 มิลลิเมตร ทำด้วยแก้วบรรจุอัดแน่นอย่างอิสระ

ง. ภาพด้านข้างของหัวกระ จายอากาศแบบตะแกรงโลหะบรรจุลูกแก้ว

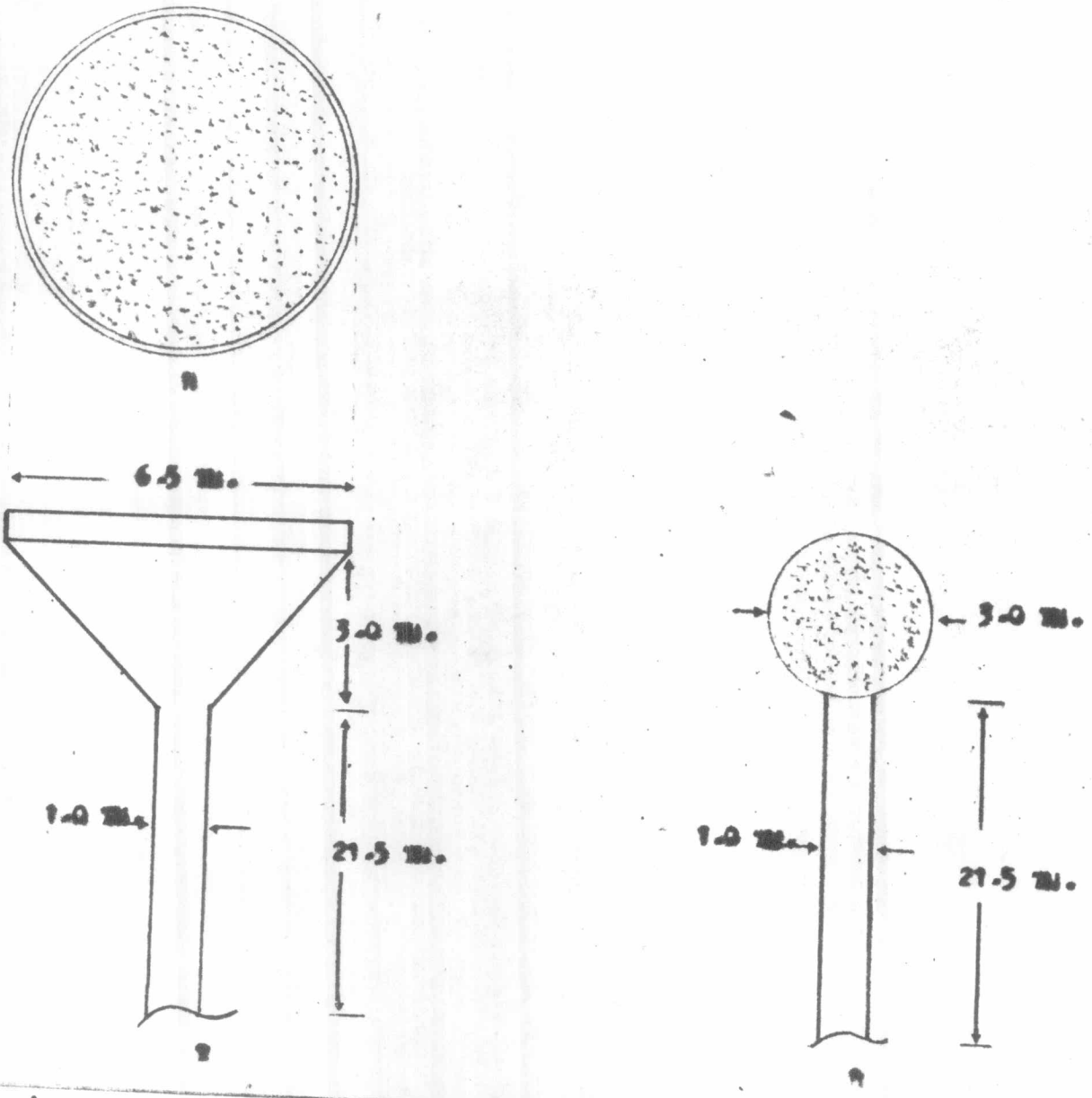


รูปที่ 3–3 ก. ภาพมองจากด้านบนของตัวกระจายอากาศแบบแผ่นโลหะเจาะรู ซึ่งเจาะรูขนาดเท่ากัน 0.16 เซนติเมตร และระยะห่างเท่า ๆ กัน 0.70 เซนติเมตร

ข. ภาพมองจากด้านข้างของหัวกระจายอากาศแบบแผ่นโลหะเจาะรู

ค. ภาพมองจากด้านบนของหัวกระจายอากาศแบบแผ่นโลหะเจาะรูบรรจุลูกแก้ว ขนาดและระยะระหว่างรูที่เจาะจะเท่ากับแบบแผ่นโลหะเจาะรู ดังรูป ก. ลูกแก้วขนาด 2.0 มิลลิเมตร บรรจุแบบอัดแน่นอย่างอิสระ

ง. ภาพด้านข้างของหัวกระจายอากาศแบบแผ่นโลหะเจาะรูบรรจุลูกแก้ว



รูปที่ 3-4 ก. ภาพด้านบนของหัวกระจายอากาศแบบแผ่นแก้วรูพรุน ขนาดความพรุน 40-90 ไมครอน

ข. ภาพด้านข้างของหัวกระจายอากาศแบบแผ่นแก้วรูพรุน

ค. ภาพด้านข้างของหัวกระจายอากาศแบบทรงกลมรูพรุน