

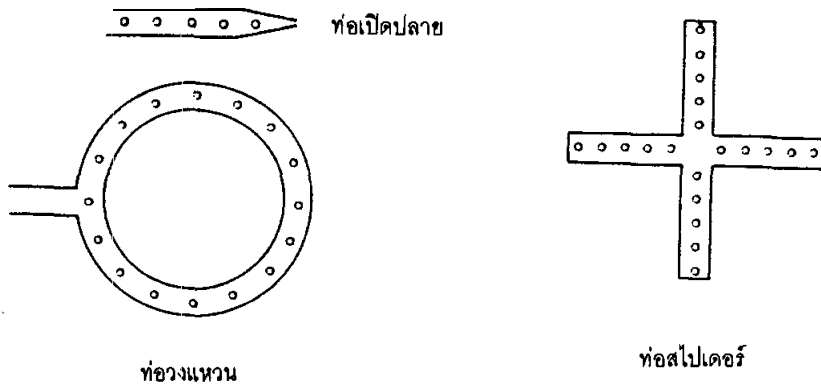
การพ่นให้อากาศ การกวน และคุณสมบัติของอาหารเลี้ยงเชื้อ

เนื่องจากขนาดของฟองอากาศเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญ และมีผลต่ออัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่เกิดขึ้น ขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากท่อพ่นให้อากาศ ซึ่งได้มีการออกแบบไว้มากมาย เช่น แบบท่อเปิดปลาย (dip pipe) ท่อวงแหวน (ring sparge) หรือท่อสไปเดอร์ (spider sparge) นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะของอากาศที่ป้อนในถังหมักเป็น พารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบ เพื่อจะใช้ปริมาณอากาศนี้เป็นแรงขับเคลื่อนของมวลสารต่างๆในถังหมัก เช่น กระบวนการหมักแบบบับเบิล (Bubble fermentor) และแบบยกตัวของอากาศ (Air-lift fermentor) ซึ่งกระบวนการทั้งสองจะไม่มีการใช้กลไกอื่นในการทำให้ให้น้ำหมักหมุนเวียนหรือเกิดการเคลื่อนที่ แต่ในกรณีที่เป็น ถังหมักประเภทดังกล่าวที่มีการพ่นให้อากาศนั้น จะพบว่ากลไกในการเกิดฟองอากาศนั้น จะมีความสำคัญรองลงมาเมื่อเทียบกับผลที่เกิดจากใบกวน ซึ่งมีผลทำให้ฟองอากาศแตกกระจายเป็นฟองอากาศที่มีขนาดเล็กลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามถ้าฟองอากาศที่มีขนาดเล็กๆนี้รวมตัวกันเป็นฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการ เพราะเป็นลักษณะที่ทำให้ค่า a และ ϵ มีค่าที่ลดลง เมื่อพิจารณาผลของการพ่นให้อากาศและการกวนต่อลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 67 เมื่อระบบมีการกวนด้วยความเร็วรอบ (N_i) ที่ต่ำ และอัตราการป้อนอากาศ (F_g) ที่สูง จะพบว่าลักษณะของฟองอากาศจะเกิดขึ้นโดยรอบแกนกวน การเกิดฟลัดของใบกวน (Impeller flooding) หมายถึง ความสามารถในการเกิดฟองอากาศน้อยกว่าปริมาณที่ผลิตได้ การเกิดฟลัดนี้ควรเลี่ยงที่จะให้เกิดขึ้น เพราะทำให้การกวนผสมและการกระจายของอากาศต่ำ และเมื่อความเร็วของใบกวนเพิ่มขึ้น อากาศจะกระจายตัวลงไปในของเหลวได้เพิ่มขึ้น โดย N_{ig} เป็นความเร็วรอบต่ำสุดที่ต้องการ เพื่อให้ให้อากาศกระจายตัวได้ทั่วถังหมักอย่างสมบูรณ์ ซึ่งความเร็วที่ปลายใบกวนเพื่อการกระจายฟองอากาศที่เหมาะสมนั้น จะอยู่ในช่วง 1.5 - 2.5 เมตรต่อวินาที

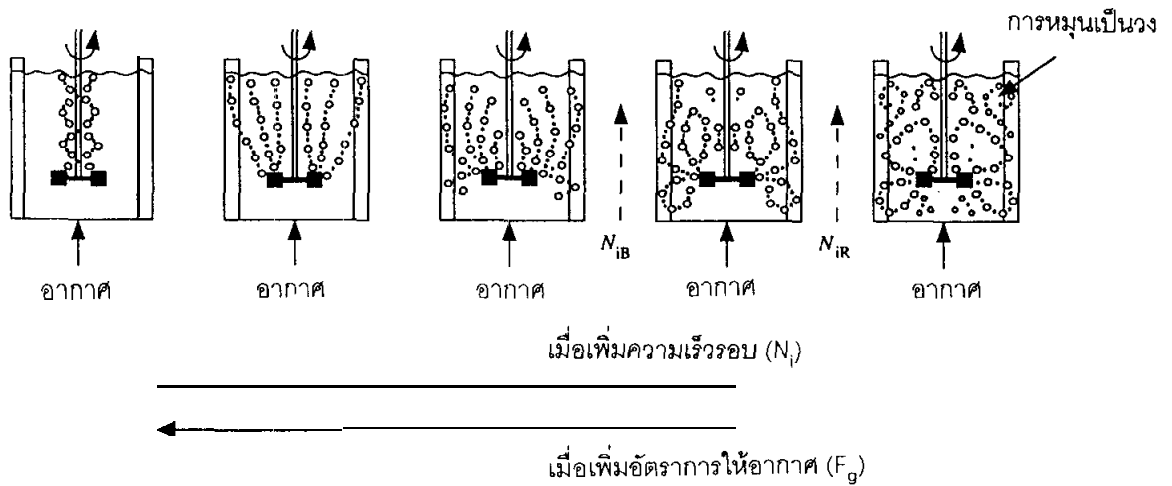
$$\text{โดยความเร็วที่ปลายใบพัด (tip speed)} = \pi N_i D_i$$

เมื่อ N_i เป็นความเร็วรอบของใบกวน

และ D_i เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน

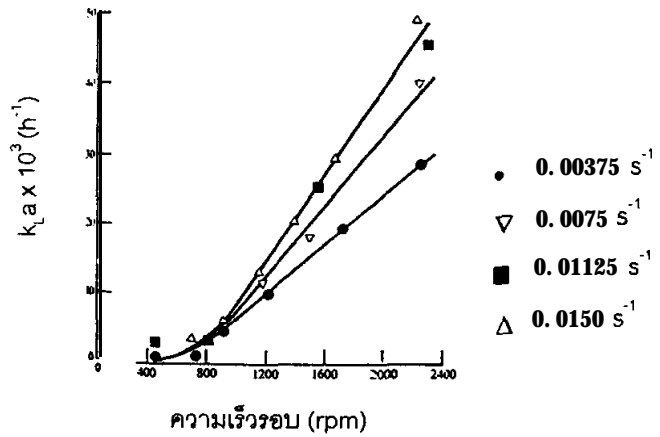


รูปที่ 66 แสดงลักษณะของท่อพ่นให้อากาศ

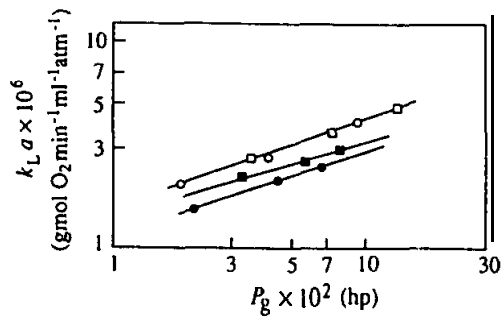


รูปที่ 67 แสดงผลของอัตราการป้อนอากาศและอัตราการกววนที่มีต่อลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้น

ในกระบวนการหมักโดยทั่วไป จะพบว่า การเพิ่มความเร็วยรอบจะมีผลต่อค่า $k_L a$ ดังแสดงในรูปที่ 68 ในขณะที่การเพิ่มจำนวนของใบพัดบนแกนกวนนั้น ไม่มีผลมากนักต่อค่า $k_L a$ ถึงแม้ว่ากำลังงานที่ต้องใช้จะเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณของก๊าซที่ผ่านไปยังใบกวนด้านบนนั้นจะน้อยกว่าใบกวนทางด้านล่าง จึงไม่ได้มีส่วนในการกระจายของฟองอากาศ



รูปที่ 68 แสดงผลของความเร็วยวรอบต่อค่า $k_L a$



- Two impellers, apparent viscosity = 500 cP
Impeller spacing/ impeller diameter = 2.06
- Three impellers, apparent viscosity = 500 cP
Impeller spacing/ impeller diameter = 1.37
- Two impellers, apparent viscosity = 700 cP
Impeller spacing/ impeller diameter = 2.06
- Three impellers, apparent viscosity = 700 cP
Impeller spacing/ impeller diameter = 1.37

รูปที่ 69 แสดงผลของจำนวนใบพัดและพลังงานที่ต้องใช้ต่อค่า $k_L a$

สารป้องกันการเกิดฟอง

ในการเพาะเลี้ยงเซลล์ส่วนใหญ่ มักพบว่าการกวนและการให้อากาศมีผลต่อการเกิดฟอง เนื่องจากโปรตีน พอลิแซคคาไรด์ และกรดไขมัน ที่มี การเกิดฟองดังกล่าวจึงถือเป็นเรื่องทั่วไปของการเพาะเลี้ยงที่มีการให้อากาศ แต่ถ้การเกิดฟองนี้มีปริมาณที่มากจนทำให้ฟองไหลล้นออกมาทางด้านบนของถังหมักแล้ว จะทำให้เกิดการปนเปื้อน และมีผลต่อการดูดตันของท่ออากาศที่จะไหลออกได้ ของเหลวตลอดจนตัวเซลล์ที่ติดตามฟองอากาศนี้ จะทำให้ปริมาตรของน้ำหมักลดลง นอกจากนั้นยังสามารถทำให้เซลล์ที่ติดอยู่ที่ฟองนั้นถูกจับไว้ ทำให้สูญเสียการทำงานของเซลล์เหล่านั้น จึงควรมีการเติมสารกันฟองลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ แต่เนื่องจากสารกันฟองมีผลต่อลักษณะของฟองและการรวมตัวของฟองอากาศ ซึ่งมีผลต่อค่า $k_L a$ โดยส่วนใหญ่แล้วสารกันการเกิดฟองที่เติมลงไปนั้น เพื่อลดแรงตึงผิวของฟองอากาศ ทำให้ขนาดของฟองอากาศลดลงมีผลทำให้ค่า a เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสารกันการเกิดฟองส่วนใหญ่มักจะลดพื้นที่ผิวระหว่างก๊าซกับของเหลว ทำให้ค่า k_L มีค่าที่ลดลงมากกว่าการเพิ่มขึ้นของค่า a จึงมีผลทำให้ค่า $k_L a$ มีค่าที่ลดลงด้วย และทำให้อัตราการถ่ายเทออกซิเจนลดลงตามไปด้วย

อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลอย่างมากในการเพาะเลี้ยงที่มีการให้อากาศ เนื่องจากอุณหภูมิมิผลต่อความสามารถในการละลายได้ของออกซิเจน (C_{AL}^*) และสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเท k_L การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ C_{AL}^* ลดลง ดังนั้น $(C_{AL}^* - C_{AL})$ จะมีค่าที่ลดลงด้วย ในขณะที่เดียวกันสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจายของออกซิเจนในฟิล์มของของเหลวที่อยู่โดยรอบฟองจะเพิ่มขึ้น มีผลต่อการเพิ่มค่า k_L ดังนั้นผลของอุณหภูมิโดยรวมที่มีต่อการถ่ายเทออกซิเจน จึงขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิ ในช่วงอุณหภูมิมิระหว่าง 0 - 40 องศาเซลเซียส การละลายได้ของออกซิเจนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น Truesdale และคณะ (1950) ได้ศึกษาการละลายได้ของออกซิเจนในน้ำบริสุทธิ์ในช่วงอุณหภูมิมิระหว่าง 0 ถึง 26 องศาเซลเซียส และแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$C_{AL}^* = 14.161 - 0.3943 T + 0.007714 T^2 - 0.0000646 T^3 \quad \text{สมการที่ 113}$$

เมื่อ C'_{AL} เป็นปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้ในน้ำบริสุทธิ์ (mg l^{-1})

T เป็นอุณหภูมิ

เนื่องจากในกระบวนการหมักไม่ได้ใช้น้ำบริสุทธิ์หรือออกซิเจนที่บริสุทธิ์ จึงทำให้ความดันย่อยของออกซิเจนที่มีในอากาศและปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้ มีผลอย่างมากต่อการถ่ายเทออกซิเจนที่เกิดขึ้น

จากกฎของเฮนรี (Henry's law) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายได้ในของเหลวที่สภาวะสมดุล จะขึ้นกับความดันย่อยของก๊าซที่อยู่เหนือผิวของเหลวนั้น

หรือ
$$C'_L = \frac{p_{O_2}}{H_{O_2(T)}} \quad \text{สมการที่ 114}$$

เมื่อ C'_L เป็นความเข้มข้นของออกซิเจนที่อยู่ในสภาวะสมดุลกับความดันย่อยของออกซิเจน

p_{O_2} เป็นความดันย่อยของออกซิเจน

$H_{O_2(T)}$ เป็นค่าคงที่ของเฮนรีที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

ตารางที่ 37 แสดงค่าคงที่ของเฮนรีสำหรับออกซิเจนที่ละลายได้ในน้ำที่บริสุทธิ์
ที่ความดัน 1 บรรยากาศของกาซออกซิเจน

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้ (kg m ⁻³)	ค่าคงที่ของเฮนรี (atm m ³ kg ⁻¹)
0	7.03 x 10 ⁻²	14.2
20	4.50 x 10 ⁻²	22.2
25	4.14 x 10 ⁻²	24.2
26	4.07 x 10 ⁻²	24.6
28	3.95 x 10 ⁻²	25.3
30	3.84 x 10 ⁻²	26.1
35	3.58 x 10 ⁻²	27.9
40	3.37 x 10 ⁻²	29.7

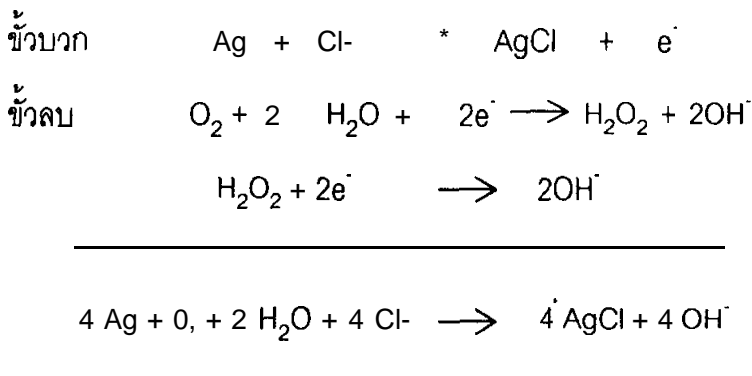
ตารางที่ 38 แสดงปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้ (kg m ⁻³)
0	1.48 x 10 ⁻²
20	9.45 x 10 ⁻³
25	8.69 x 10 ⁻³
26	8.55 x 10 ⁻³
28	8.29 x 10 ⁻³
30	8.05 x 10 ⁻³
35	7.52 x 10 ⁻³
40	7.07 x 10 ⁻³

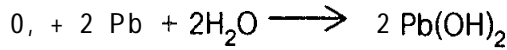
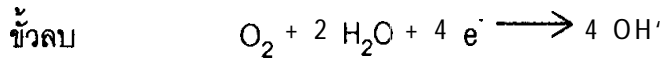
การวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้

การวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้ในถังหมัก จะวัดโดยใช้อิเล็กโทรด ซึ่งโดยทั่วไปจะมีที่ใช้ 2 แบบ คือ Polarographic probe และ Galvanic probe ในการออกแบบของอิเล็กโทรดทั้งสอง จะประกอบด้วยเมมเบรนซึ่งสามารถให้ออกซิเจนแพร่ผ่านได้ โดยออกซิเจนจะแพร่ผ่านเมมเบรนไปยังคาโทด ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาและเกิดกระแสส่งต่อไปยังอานินด โดยสัดส่วนที่สัมพันธ์กับความดันย่อยของออกซิเจนหรือปริมาณออกซิเจนที่มีในน้ำหมัก เวลาที่ใช้ในการตอบสนอง ซึ่งลักษณะของอิเล็กโทรดที่ใช้ขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทำลายเชื้อ และควรใช้เวลาเพื่อตอบสนองการเปลี่ยนแปลงได้ในช่วง 10 -100 วินาที โดยเวลาดังกล่าวนี้จะลดลงเมื่อมีการกวนระบบให้มีการปั่นป่วนมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ความหนาของฟิล์มของของเหลวที่ผิวของเมมเบรนมีความหนาที่ลดลง Polarographic probe และ Galvanic probe จะเป็นการวัดความดันย่อยของออกซิเจนที่ละลายได้ หรือความเครียดของออกซิเจนที่ละลายในน้ำหมัก ไม่ได้วัดเป็นความเข้มข้นของออกซิเจน เนื่องจากเป็นการเทียบโดยการใช้อากาศและก๊าซไนโตรเจนในการปรับค่าเป็น 100% และ 0% ตามลำดับ ดังนั้นค่าที่ได้จากการวัดจึงเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เทียบได้ การเปลี่ยนค่าที่วัดได้โดยอิเล็กโทรดเป็นความเข้มข้นของออกซิเจน จำเป็นต้องทราบค่าการละลายได้ของออกซิเจนในของเหลว ความดัน และอุณหภูมินั้นๆด้วย

Polarographic probe จะทำงานได้ต่อเมื่อมีการผ่านกระแสไฟฟ้าไปที่ตัววัดก่อน โดยทั่วไปลักษณะของตัววัดจะประกอบด้วยขั้วบวกที่เป็นแพลตตินัม ซึ่งมีซิลเวอร์กับซิลเฟอร์คลอไรด์เป็นขั้วลบ โดยปฏิกิริยาของแต่ละขั้วที่เกิดขึ้น แสดงได้ดังนี้



ส่วน Galvanic probe จะมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้วดังนี้



ตัวอย่างที่ 47 ในการเลี้ยงเชื้อ *Aspergillus niger* พบว่าค่าวิกฤตของปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้ในน้ำ (C_{crit}) มีค่าเท่ากับ 0.022 มิลลิโมลต่อลิตร และอัตราการใช้ออกซิเจนเป็น 1.98×10^{-4} กิโลโมลต่อวินาทีต่อลูกบาศก์เมตร จงคำนวณสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$) โดยกำหนดให้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ของเฮนรีเป็น 0.793 บรรยากาศ ลิตรต่อมิลลิลิตร

วิธีทำ

จากกฎของเฮนรี

$$C_L^* = \frac{p_{\text{O}_2}}{H_{\text{O}_2(T)}} \quad \text{สมการที่ 114}$$

ในสภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ความดันย่อยของออกซิเจนเท่ากับ 0.209 บรรยากาศ

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad C_L^* &= \frac{0.209 \text{ atm}}{0.793 \text{ atm l / mmol}} \\ &= 0.264 \text{ mmol / l} \\ &= 2.64 \times 10^{-4} \text{ kmol / m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad N_{\text{O}_2} &= k_L a (C_L^* - C_L) \\ &= 1.68 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

ถ้ากำหนดให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้ในน้ำมีอยู่ปริมาณที่มากกว่าค่าวิกฤต

ร้อยละ 20

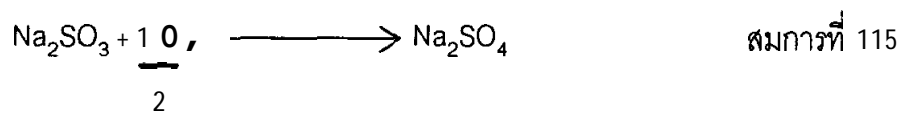
$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad C_L &= 1.2 \times 0.022 \times 10^{-3} \text{ kmol/m}^3 \\ &= 2.64 \times 10^{-5} \text{ kmol/m}^3 \\ k_L a (26.4 - 2.64) \times 10^{-5} &= 1.68 \times 10^{-4} \\ k_L a &= 0.707 \text{ kmol/ s/m}^3 \end{aligned}$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$)

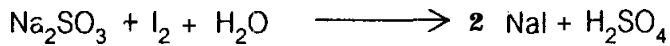
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่แสดงประสิทธิภาพของการถ่ายเทออกซิเจนที่เกิดขึ้นในถังหมัก และเป็นพารามิเตอร์ที่ต้องคำนึงถึงในการขยายขนาดของถังหมัก ถ้าค่า $k_L a$ มีค่ามากแสดงว่าอัตราการส่งผ่านออกซิเจนมายังน้ำหมักได้มาก โดยวิธีการคำนวณค่า $k_L a$ นั้น มีหลายวิธี

วิธีออกซิเดชันของโซเดียมซัลไฟต์ (Sulphite Oxidation Method)

วิธีออกซิเดชันของโซเดียมซัลไฟต์ เป็นวิธีทางเคมีที่ใช้คำนวณอัตราการถ่ายเทออกซิเจน โดยอาศัยการออกซิเดชันของโซเดียมซัลไฟต์เป็นโซเดียมซัลเฟต โดยมีคอปเปอร์ไอออน (Cu^{+2}) หรือโคบอลท์ไอออน (Co^{+2}) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งแสดงได้ดังนี้



ปริมาณโซเดียมซัลไฟต์จากในสารละลายมีปริมาณโซเดียมซัลไฟต์ที่เพียงพอ หรือมีความเข้มข้นมากกว่า 0.04 นอร์มัล จึงไฟต์ที่ลดลงไปในหนึ่งหน่วยเวลา จะเท่ากับอัตราการถ่ายเทมวลของออกซิเจนที่เข้ามาทำปฏิกิริยา และเนื่องทำให้ไม่มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำเหลืออยู่ในสารละลายนั้น หรือ $C_L = 0$ โดยปริมาณโซเดียมซัลไฟต์ที่เหลือ จะคำนวณได้โดยการนำสารละลายนี้ไปไตเตรตกับสารละลายไอโอดีน โดยมีน้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ โดยที่



ดังนั้นการเกิดออกซิเดชันหรืออัตราการลดลงของปริมาณโซเดียมซัลไฟต์ จึงสามารถเทียบได้กับอัตราการถ่ายเทออกซิเจนหรือเท่ากับ $K_L a$ คูณกับ C^* นั้นเอง

โดยที่

$$K_L a = \frac{-(dC_L/dt)}{C^*}$$

วิธีนี้สามารถใช้วัดประสิทธิภาพของการถ่ายเทออกซิเจนในถังหมักได้โดยตรง และเป็นประโยชน์ในการใช้เปรียบเทียบอัตราการกวน และอัตราการให้อากาศในถังหมักที่มีขนาดที่แตกต่างกันได้ ทั้งนี้เพื่อให้การถ่ายเทออกซิเจนมีประสิทธิภาพและเป็นแนวทางในการออกแบบถังหมักต่อไป แต่ข้อเสียของวิธีออกซิเดชันของโซเดียมซัลไฟต์นั้น เนื่องจากเป็นเพียงปฏิกิริยาทางเคมีจึงไม่สามารถแสดงสถานะทางชีวภาพที่แท้จริงได้ และค่า $K_L a$ ที่คำนวณได้ มักมีค่าที่สูงกว่าวิธีอื่น

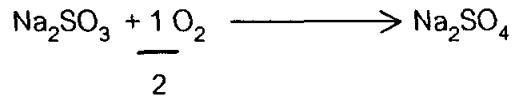
ตัวอย่างที่ 48 การคำนวณค่า $K_L a$ ด้วยวิธีออกซิเดชันของโซเดียมซัลไฟต์ โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลไฟต์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ จำนวน 10 ลิตร โดยมีสารละลายของคอปเปอร์ไอออนที่ความเข้มข้น 0.003 โมลาร์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากให้อากาศเข้าไปในถังหมักเป็นเวลา 10 นาที ก่อนที่จะหยุดการให้อากาศ พร้อมกับดึงเอาสารละลายในถังหมักออกมา 10 มิลลิลิตร จากตัวอย่างดังกล่าวพบว่า มีสารละลายโซเดียมซัลไฟต์เหลืออยู่ 0.21 โมลต่อลิตร เมื่อการทดลองดังกล่าวทำในสภาวะที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ จงคำนวณปริมาณออกซิเจน และค่า $K_L a$

วิธีทำ ปริมาณโซเดียมซัลไฟต์ที่ทำปฏิกิริยาในช่วง 10 นาที

$$= 0.5 - 0.21$$

$$= 0.29 \text{ mol/l}$$

จากสมการปฏิกิริยาเคมี



$$\begin{aligned} \text{ปริมาณออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยา} &= 0.29 \times \frac{1}{2} \\ &= 0.145 \text{ mol/l} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นอัตราการถ่ายเทออกซิเจน} &= \frac{(0.145 \text{ mol O}_2/\text{l}) (32 \text{ g O}_2/\text{mol})}{(600 \text{ s})} \\ &= 7.73 \times 10^{-3} \text{ g/l/s} \end{aligned}$$

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ที่สภาวะสมดุล

$$\begin{aligned} C_L^* &= \frac{p\text{O}_2}{H_{\text{O}_2}(T)} \\ &= \frac{(1 \text{ atm})(0.209 \text{ mol O}_2/\text{mol air})}{(793 \text{ atm l/mol})(1 \text{ mol}/32 \text{ g O}_2)} \\ &= 8.43 \times 10^{-3} \text{ g/l} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} K_L a &= \frac{N_{\text{O}_2}}{C_L^* - C_L} \\ &= \frac{7.73 \times 10^{-3} \text{ g/l/s}}{(8.43 \times 10^{-3} \text{ g/l} - 0)} \\ &= 0.917 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

วิธีสมดุลของออกซิเจน (Oxygen-balance Method)

ในสภาวะสมดุล จะพบว่าความแตกต่างของปริมาณออกซิเจนที่ผ่านเข้าไป และที่ผ่านออกมาจากถังหมักนั้น จะเท่ากับปริมาณออกซิเจนที่ถูกถ่ายเทลงไปในน้ำหมัก

$$\text{โดยที่} \quad N_A = \frac{1}{V_L} [(F_g C_{AG})_i - (F_g C_{AG})_o]$$

เมื่อ V_L เป็นปริมาตรของน้ำหมัก

F_g เป็นอัตราการไหลของอากาศ

C_{AG} เป็นความเข้มข้นของออกซิเจนที่มีในอากาศ

ตัวห้อย i และ o เป็นอากาศที่ไหลเข้าและออกจากถังหมัก ตามลำดับ

เนื่องจากปริมาณก๊าซโดยทั่วไปจะวัดในรูปของความดันย่อย จากกฎของก๊าซอุดมคติ จะได้

$$N_A = \frac{1}{RV_L} \left[\frac{F_g P_{AG}}{T} - \frac{F_g P_{AG}}{T} \right]$$

เมื่อ R เป็นค่าคงที่ของก๊าซ

P_{AG} เป็นความดันย่อยของออกซิเจน

T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์

เนื่องจากความดันย่อยของออกซิเจนในอากาศที่ผ่านเข้าและออกจากถังหมักนั้น มักมีค่าที่แตกต่างกันไม่มาก ดังนั้นการวัดค่าความดันย่อยของออกซิเจนนั้น จึงต้องวัดให้ถูกต้อง เช่น การวัดด้วยเครื่องแมสสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ เป็นต้น

วิธีไดนามิก (Dynamic Method)

วิธีไดนามิกเป็นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของออกซิเจนในขณะที่ระบบอยู่ในสภาวะที่ไม่สมดุล ข้อได้เปรียบของวิธีนี้ คือ การใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่ถูกต้องกว่า เมื่อพิจารณาที่เวลา t_0 ของการเพาะเลี้ยงแบบเบชท์ โดยการกำจัดปริมาณออกซิเจนที่มีโดยการแทนที่ด้วยก๊าซไนโตรเจน หรือโดยการหยุดการให้อากาศ ผลดังกล่าวจะทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้จะมีปริมาณที่ลดลง และเมื่อมีการป้อนอากาศลงไปในน้ำหมักอีกครั้งด้วยอัตราการป้อนอากาศที่คงที่ จะทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยการควบคุมดังกล่าวต้องให้มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้อยู่ในปริมาณที่มากกว่า C_{crit} ซึ่งจะไม่ส่งผลต่ออัตราการใช้ออกซิเจนของเซลล์

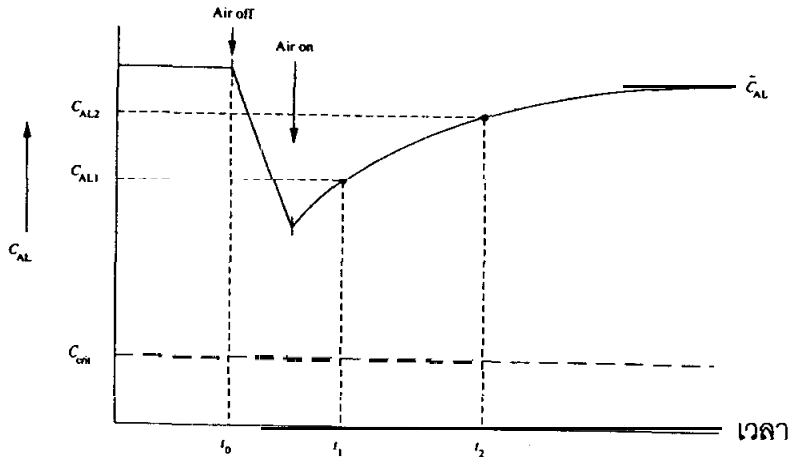
ถ้าพิจารณาให้ปริมาณออกซิเจนที่ป้อนลงไปในน้ำหมักนั้น มีอัตราที่เร็วกว่าอัตราการเจริญของเซลล์แล้ว ปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้จะเข้าสู่สภาวะสมดุล \bar{C}_{AL} เช่นเดียวกับสมดุลระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ป้อนและปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไปในระบบที่ตำแหน่ง C_{AL1} และ C_{AL2} ซึ่งเป็นปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้ที่วัดได้หลังจากการป้อนออกซิเจนแล้วที่เวลา t_1 และ t_2 ตามลำดับ โดยการคำนวณ $k_L a$ ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองนี้ในช่วงที่มีการป้อนออกซิเจนนั้นจะเป็นในสภาวะที่ระบบยังไม่เข้าสู่สภาวะสมดุล ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้จะเท่ากับอัตราการถ่ายเทออกซิเจนจากฟองอากาศลงสู่น้ำหมักกับอัตราการใช้ออกซิเจนของเชื้อ โดยที่

$$\frac{dC_{AL}}{dt} = k_L a (C_{Ai} - C_{AL}) - q_o X \quad \text{สมการที่ 116}$$

เมื่อ $q_o X$ เป็นอัตราการใช้ออกซิเจน

q_o เป็นอัตราจำเพาะของการใช้ออกซิเจน

เมื่อพิจารณาในสภาวะคงที่โดยที่ $C_{AL} = \bar{C}_{AL}$



รูปที่ 70 แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้ เนื่องจากการวัดโดยวิธีไดนามิก

จะได้
$$\frac{dC_{AL}}{dt} = 0$$

ดังนั้น
$$q_o X = k_L a (C_{AL}^* - C_{AL})$$
 สมการที่ 117

เมื่อแทนสมการที่ 117 ในสมการที่ 116 จะได้

$$\frac{dC_{AL}}{dt} = k_L a (C_{AL} - C_{AL})$$
 สมการที่ 118

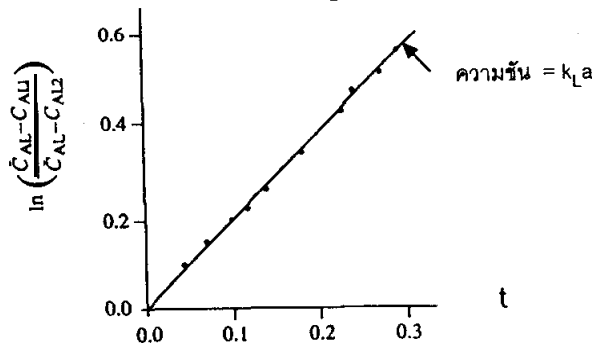
เมื่อกำหนดให้ $k_L a$ มีค่าคงที่ในช่วงที่พิจารณา

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 118 ในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2

จะได้
$$k_L a = \frac{\ln \left(\frac{\bar{C}_{AL} - C_{AL1}}{\bar{C}_{AL} - C_{AL2}} \right)}{t_2 - t_1}$$
 สมการที่ 119

จากสมการที่ 119 สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{\bar{C}_{AL} - C_{AL1}}{\bar{C}_{AL} - C_{AL2}}$

กับ t โดยความชันที่ได้จะมีค่าเท่ากับ $k_L a$



รูปที่ 71 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{\bar{C}_{AL} - C_{AL1}}{\bar{C}_{AL} - C_{AL2}}$ กับ t

ตัวอย่างที่ 49 ในถังหมักที่มีการกวน เพื่อการเพาะเลี้ยง *Bacillus tringinsis* โดยการควบคุมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เพื่อการผลิตสารที่ยับยั้งแมลง โดยหลังจากการหยุดการป้อนอากาศสักครู่ จะพบว่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้ลดลง เมื่อมีการป้อนอากาศใหม่ และรอจนระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล พบว่าความเครียดของออกซิเจนที่ละลายได้เป็นร้อยละ 78 ของระบบที่อิมตัวด้วยอากาศ

เวลา	5	15
ความเครียดของออกซิเจน (ร้อยละของอากาศอิมตัว)	50	66

จงคำนวณค่า $k_L a$ โดยวิธีไดนามิก ถ้าระบบที่เข้าสู่สภาวะสมดุลมีความเครียดของออกซิเจนเป็นร้อยละ 70 ของระบบที่อิมตัวด้วยอากาศ

วิธีทำ จาก

$$k_L a = \frac{\ln \frac{\bar{C}_{AL} - C_{AL1}}{\bar{C}_{AL} - C_{AL2}}}{t_2 - t_1}$$

กรณีที่สภาวะสมดุลมีความเครียดของออกซิเจนที่ละลายได้ เป็นร้อยละ 78 ของระบบที่อิ่มตัว

$$k_L a = \frac{\ln \frac{78 - 50}{78 - 66}}{(15 - 5) \text{ s}}$$

$$= 0.085 \text{ s}^{-1}$$

กรณีที่สภาวะสมดุลมีความเครียดของออกซิเจนที่ละลายได้ เป็นร้อยละ 70 ของระบบที่อิ่มตัว

$$k_L a = \frac{\ln \frac{70 - 50}{70 - 66}}{(15 - 5) \text{ s}}$$

$$= 0.16 \text{ s}^{-1}$$

พลังงานที่ต้องใช้ในการกวน

พลังงานที่ต้องใช้ในการกวน ในระบบที่ไม่มีการให้อากาศ

พลังงานที่ต้องใช้ในการกวนของเหลวในระบบที่ไม่มีการให้อากาศ จะขึ้นกับคุณสมบัติของของเหลว นั้น เช่น ความหนาแน่น ความหนืด อัตราการกวน ชนิดและรูปร่างของใบกวน เป็นต้น โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ มักแสดงในรูปของกลุ่มตัวเลขไร้หน่วย (Power number, N_p) ดังนี้

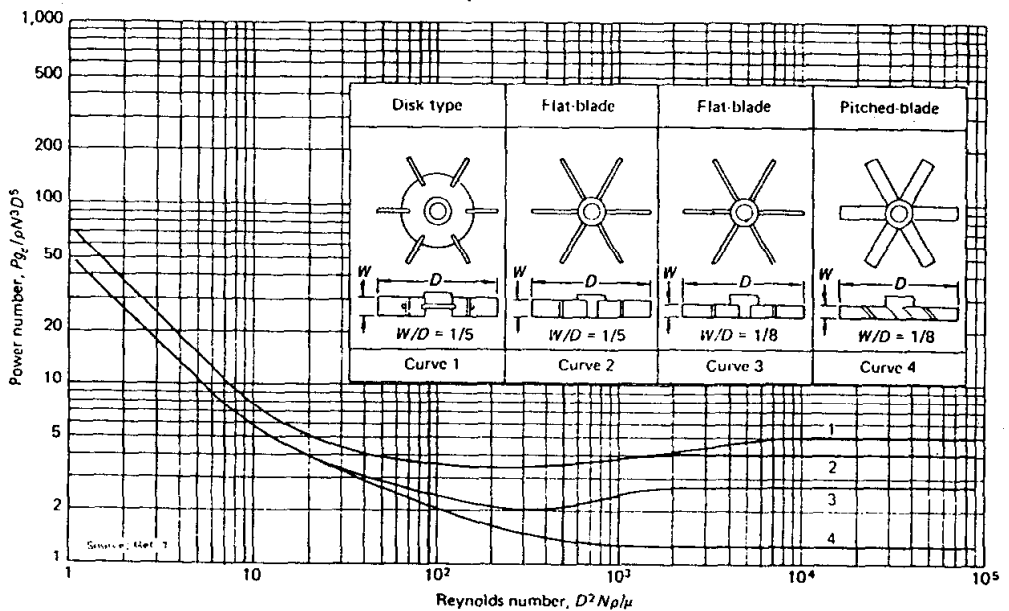
$$N_p = \frac{P_o g_c}{N_i^3 D_i^5 \rho} \quad \text{สมการที่ 120}$$

- เมื่อ P_o เป็นแรงที่ให้จากภายนอก หรือกำลังงานที่ให้กับระบบ
 g_c เป็นค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วงของโลก
 N_i เป็นความเร็วการหมุนของใบกวน
 D_i เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน
 ρ เป็นความหนาแน่นของของเหลว

การส่งผ่านของแรงหรือกำลังงานที่ให้กับระบบนี้ ขึ้นกับลักษณะของการไหล ถ้าลักษณะการไหลเป็นแบบราบเรียบ จะทำให้เกิดแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว แต่ถ้าลักษณะการไหลเป็นแบบปั่นป่วน นอกจากการเกิดแรงเฉือนแล้ว ยังเกิดแรงปะทะด้วย Ruston และคณะได้รวบรวมข้อมูลของใบกวนชนิดต่างๆ ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า N_p และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของใบกวน (Re_i) ดังแสดงในรูปที่ 72

โดยที่

$$Re_i = \frac{D_i^2 N_i \rho}{\mu}$$



รูปที่ 72 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N_p กับ Re_i ของใบกวนชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 72 จะพบว่าลักษณะของการไหลที่เกิดขึ้นนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่มีลักษณะการไหลเป็นแบบราบเรียบ จะพบว่า N_p จะลดลงเมื่อ Re_i มีค่าที่เพิ่มขึ้น โดยที่

$$N_p = K_1 (Re)^{-1}$$

และ
$$P_o = \frac{K_1 N_i^2 D_i^3}{g_c} \quad \text{สมการที่ 122}$$

เมื่อ K_1 เป็นค่าคงที่

จากสมการที่ 121 จะพบว่ากำลังงานที่ให้กับระบบจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความหนืดและไม่ขึ้นกับความหนาแน่นของของเหลว

ช่วงที่การไหลมีลักษณะการไหลอยู่ระหว่างการไหลแบบราบเรียบกับการไหลแบบปั่นป่วน จะพบว่าค่า N_p และ Re_i นั้น ไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ที่แน่นอนได้ ส่วนช่วงที่มีการไหลแบบปั่นป่วน จะพบว่าค่า N_p จะไม่ขึ้นกับค่า Re_i และความหนืด โดยที่

$$P_o = \frac{K_2 N^3 D_i^5 \rho}{g_c}$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ จะพบว่าเป็นประโยชน์ในการขยายขนาดของถังหมัก หรือการเพิ่มกำลังงานในการกวน หรือเมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบที่ใช้ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะใช้ได้ในกรณีที่ค่า Re_i มีค่าในช่วงต่ำๆ ถ้าค่า Re_i มีค่าสูงแล้วจะมีผลทำให้ N_p มีค่าที่คงที่

กรณีที่ของเหลวในถังหมักมีลักษณะเป็นนอนนิวโตเนียน จะพบว่าคุณสมบัติของของเหลวจะแปรตามเวลา เช่น ความหนืดของของเหลวจะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามความเร็ว

รอบที่ใช้ ดึงนั้นในกรณีที่เป็นของเหลวแบบนอนนิวโตเนียน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ใด ๆ เช่น ความเร็วรอบ หรือเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน เป็นต้น จำเป็นต้องคำนวณพลังงานที่ต้องใช้ใหม่ทุกครั้ง

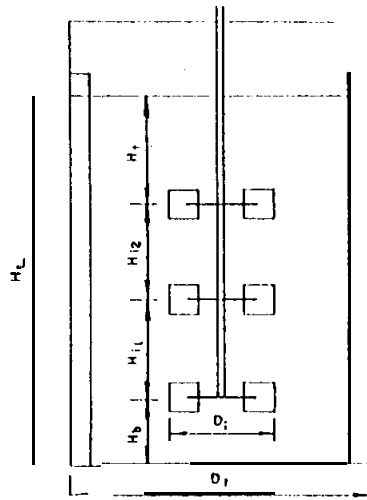
ในการออกแบบถังหมักและองค์ประกอบอื่นๆในถังหมักนั้น กรณีที่ถังหมักมีขนาดที่ใหญ่มาก จำเป็นต้องมีการเพิ่มจำนวนของใบกวน เพื่อให้มีการผสม และการถ่ายเทมวลสารต่างๆได้อย่างทั่วถึง ซึ่งมีผลทำให้พลังงานที่ต้องใช้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการติดตั้งจำนวนใบกวน คือ

$$D, < H, < 2 D,$$

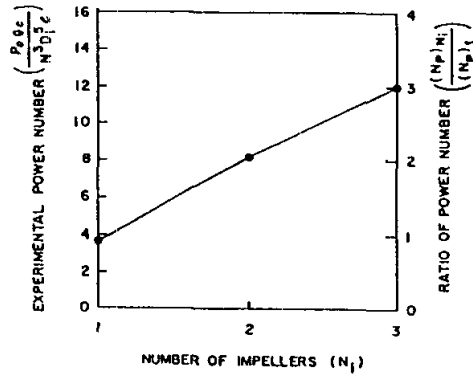
และ $H_L - D, > \text{จำนวนใบกวน} > H_L - 2 D,$

เมื่อ H_L เป็นระยะห่างระหว่างใบกวน

H_L เป็นระดับความสูงของของเหลว



รูปที่ 73 แสดงลักษณะของถังหมักที่มีใบกวนหลายใบ



รูปที่ 74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N_p กับจำนวนใบกวนที่เพิ่มขึ้น

พลังงานที่ต้องใช้ในการกวนในระบบที่มีการให้อากาศ

กำลังงานที่ใช้ในการกวนในระบบที่มีการให้อากาศ จะพบว่ากำลังงานที่ใช้จะลดลง เมื่อเทียบกับการกวนในระบบที่ไม่มีการป้อนอากาศ เนื่องจากฟองอากาศจะทำให้ความหนาแน่นและความหนืดของของเหลวลดลง เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของกำลังงานที่ใช้ จะพบว่า P_g/P_0 มีค่าระหว่าง 0.3 – 1.0

โดยที่ P_g เป็นกำลังงานที่ใช้เมื่อระบบมีการป้อนอากาศ

และ P_0 เป็นกำลังงานที่ใช้เมื่อระบบไม่มีการป้อนอากาศ โดยค่าดังกล่าวนี้จะขึ้นกับ ชนิดของใบกวน และอัตราการให้อากาศ

จากศึกษาพบว่า $P_g/P_0 = f(Na)$

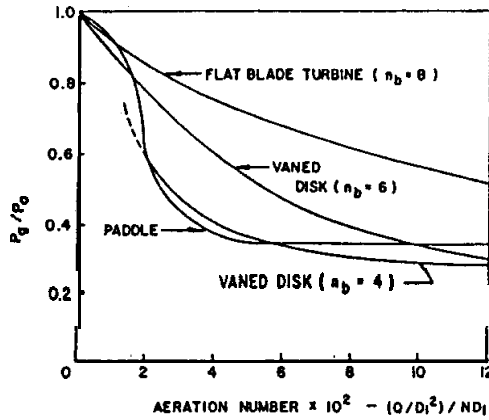
เมื่อ Na คือ กลุ่มตัวเลขไร้มิติที่เรียกว่า ตัวเลขของการให้อากาศ (aeration number)

โดยที่

$$Na = \frac{\text{ความเร็วของอากาศที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของถังหมัก}}{\text{ความเร็วที่ปลายใบกวน}}$$

$$= \frac{Q}{N_1 D_1^3}$$

เมื่อ Q อัตรา



รูปที่ 75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานที่ต้องใช้ ที่ค่า Na ต่างๆ

Meller ละ Michel ได้แสดงความสัมพันธ์เบื้องต้นของพลังงานที่ต้องใช้ในถังหมักที่มีใบกวนเพียงใบเดียว ในระบบที่มีการกวนและการให้อากาศ โดยที่

$$P_g = \frac{0.354 (P, N_i, D_i)^{0.45}}{Q^{0.56}} \quad \text{สมการที่ 122}$$

ส่วน Nagata (1975) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_g และ P ในกรณีที่มีใบกวนเป็นชนิด flat-blade disk turbine โดยที่

$$\log \left(\frac{P_g}{P} \right) = -192 \left(\frac{D_i}{D_T} \right)^{4.38} \left(\frac{D_i^2 N_i}{V} \right)^{0.115} \left(\frac{D_i N_i^2}{g} \right)^{1.96(D_i/D_T)} \left(\frac{Q}{ND_i^3} \right) \quad \text{สมการที่ 123}$$

เมื่อ D_T เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของถังหมัก

V เป็นความหนืดโคเนมาติก

ตัวอย่างที่ 50 ถังหมักที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 1.22 เมตร ที่บรรจุน้ำที่มีระดับความสูงเท่ากับ 1.22 เมตร โดยมีใบกวนเป็นชนิดเทอร์โบ 6 ใบ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 0.36 เมตร หมุนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 2.8 รอบต่อวินาที โดยมีการป้อนอากาศผ่านเข้ามาในถังหมักด้วยอัตราการป้อนเท่ากับ 0.00416 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที ที่ความดัน 1.08 บรรยากาศ และ 25 องศาเซลเซียส จงคำนวณกำลังงานที่ต้องใช้ในการกวน เมื่อกำหนดให้น้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีความหนืดและความหนาแน่นเท่ากับ 8.904×10^{-4} กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที และ 997.08 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ} \quad \text{จาก} \quad Re_i &= \frac{D_i^2 N \rho}{\mu} \\ &= \frac{(0.36)^2 (2.8) (997.08)}{8.904 \times 10^{-4}} \\ &= 406,357 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จากกราฟในรูปที่ 72 จะได้ } N_p &= 6 \\ P_o &= 6 \rho N_i^3 D_i^5 \\ &= 6 (997.08) (2.8)^3 (0.36)^5 \\ &= 794 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } \log \frac{P_g}{P} &= -192 \frac{D_i^{4.38}}{D_T} \frac{D_i^2 N_i^{0.115}}{V} \frac{D_i N_i^2}{g} \frac{1.96(DI/DT)}{ND_i^3} Q \\ &= -192 \left[\frac{0.36}{1.22} \right]^{4.38} \left[\frac{0.36^2 (2.8)}{8.53 \times 10^{-1}} \right]^{0.115} \left[\frac{(0.36)^2 (2.8)}{9.81} \right]^{1.96(0.36/1.22)} \\ &\quad \times \frac{0.00416}{(2.8) (0.36)} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } P_o = 687 \text{ วัตต์}$$