บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

ในการหมักน้ำส้มสายชู เครื่องหมักเป็นสิ่งสำคัญส่วนหนึ่งในการทำให้การหมักเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ การที่จะสร้างเครื่องหมักที่มีประสิทธิภาพได้นั้นจะต้องมีการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการหมักน้ำส้มสายชูเสียก่อน การศึกษาเหล่านี้จะทำในห้องทดลองกับเครื่องหมักขนาดเล็ก เนื่องจากใช้เวลาและวัตถุดิบในการศึกษาน้อย แต่จะได้ข้อมูลเป็นจำนวนมาก เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมต่อการหมักน้ำส้มสายชูแล้ว จึงจะทำการขยายขนาดกำลังการผลิตโดยการขยายขนาดของเครื่องหมัก เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำส้มสายชูมากขึ้น และเป็นการลดต้นทุนการผลิต

ในการขยายขนาด ข้อมูลที่ได้จากห้องทดลองและจากเครื่องมือขนาดเล็กที่ใช้ในการพิจารณาการขยายขนาดได้แก่ ปริมาณของผลผลิตต่อหน่วยวัตถุดิบ ปริมาณของผลผลิตต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลา และความเข้มข้นของผลผลิตหรือความบริสุทธิ์ของผลผลิต

2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการหมักน้ำส้มสายชู

เพื่อให้ได้ข้อมูลต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น จะต้องทำการศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการหมักน้ำส้มสายชูก่อน ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ (2) ได้แก่

2.1.1 ปัจจัยที่เกี่ยวกับเชื้อจุลินทรีย์

ในส่วนนี้ อัตราเร็วของการหมักจะขึ้นอยู่กับชนิดและอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ตลอดจนการผลิตสารประกอบอื่น ๆ เช่น ของเสียและผลผลิตข้างเคียง

ในการหมักน้ำส้มสายชูจะเกี่ยวกับปฏิกริยาทางชีวเคมี 2 ขั้นตอนคือ

ก. ยีสต์จะเปลี่ยนน้ำตาลไปเป็นเอทานอล (3)

$$C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\text{yeast enzyme}} 2C_2H_5OH + 2CO_2 \qquad (2.1)$$

ข. เชื้อ Acetobactor จะเปลี่ยนเอทานอลไปเป็นกรดอะซิติกดังสมการ (3)

$$\underset{\text{ethanol}}{C_2H_5OH} + O_2 \longrightarrow \underset{\text{acetic acid}}{CH_3COOH} + H_2O \qquad (2.2)$$

เชื้อแบคทีเรียที่เรียกว่า Acetobactor สามารถผลิตน้ำส้มสายชูจากวัตถุดิบที่มีเอทานอล โดยทั่วไปมักเรียกว่า วินีก้าแบคทีเรีย (vinegar bacteria) ซึ่งสามารถออกซิไดซ์เอทานอลที่มีความเข้มข้น ในช่วงร้อยละ 2-12 โดยปริมาตร แบคทีเรียพวกนี้มีหลายสายพันธุ์ แต่ละสายพันธุ์มีความสามารถในการผลิตกรดอะซิติกได้สูงสุดแตกต่างกัน (3) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสามารถในการผลิตกรดอะซิติกของเชื้อ Acetobactor แต่ละสายพันธุ์

ชนิดของเชื้อ	x โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
A. aceti	6.6
A. xylinum	4.5
A. pasteurianus	6.2
A. keutizinginus	6.6
A. oxydans	2.0

แบคทีเรียเหล่านี้ต้องการสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตแตกต่างกัน ตั้งแต่สารอาหารที่มีสูตรโครงสร้างง่าย ๆ ไปจนถึงสารประกอบซับซ้อนมาก ๆ

การคัดเลือกชนิดของเชื้อแบคทีเรียเพื่อนำมาใช้ผลิตน้ำส้มสายชู นอกจากความสามารถในการผลิตกรดแล้ว ต้องคำนึงถึงวัตถุดิบและกรรมวิธีที่ใช้ในการหมักด้วย อย่างไรก็ตาม ควรเลือกใช้เชื้อแบคทีเรียที่มีความสามารถผลิตกรดอะซิติกได้สูงและรวดเร็ว เจริญได้ดีในสูตรอาหารง่าย ๆ เป็นเชื้อบริสุทธิ์ หาง่าย ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมได้ดี คือ สามารถอยู่ได้ในช่วงความเป็นกรดด่าง และอุณหภูมิค่อนข้างกว้าง และไม่ควรออกซิไดซ์กรดอะซิติกที่ผลิตขึ้นต่อไปได้ง่าย

2.1.2 ปัจจัยที่เกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมภายนอก

สภาวะแวดล้อมภายนอกต่าง ๆ ได้แก่ คุณสมบัติของของไหล ความเข้มข้นของออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ความเป็นกรดด่าง ความเข้มข้นของสารอาหาร ความเข้มข้น

ของผลผลิตและอุณหภูมิ จะเป็นตัวควบคุมอัตราการหมัก ถ้าการถ่ายเทสารอาหารไปสู่ผิวของเซลล์ถูกจำกัดโดยการแพร่ที่เกิดขึ้นภายนอกเซลล์ ดังนั้นอัตราการหมักจะขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ของสารอาหาร จะไม่ขึ้นอยู่กับปฏิกริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์

ปัจจัยที่เกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมภายนอกที่มีผลต่อการหมักน้ำส้มสายชูได้แก่

2.1.2.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิในการหมักขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ โดยปรกติถ้าใช้อุณหภูมิต่ำเกินไปเช่น ต่ำกว่า 15 °ซ แบคทีเรียที่ผลิตกรดอะซิติกจะเจริญเติบโตช้ามาก และเซลล์จะโตและสิ้น แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงเกินไป เกิน 42-45 °ซ เอทานอล กรดอะซิติกและสารที่ระเหยง่าย ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดกลิ่นและรสจะระเหยไป (3) และเซลล์จะมีรูปร่างแบบเส้นด้ายโปร่งใส (long thread-like transparent filaments) บางครั้งจะมีการแตกหน่อ ซึ่งถ้าใช้สภาวะนี้อาจจะทำให้เป็นอันตรายต่อเชื้อจุลินทรีย์ได้ (4) ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้จึงมีความสำคัญ

โดยทั่วไปเชื้อ Acetobactor เจริญได้ดีในช่องอุณหภูมิ 28-30 °ซ (4) และไม่ควรต่ำกว่าหรือสูงกว่า 27-34 °ซ

2.1.2.2 ความเป็นกรดด่าง (pH)

เชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงความเป็นกรดด่างต่างกัน ดังนั้นในการหมักน้ำส้มสายชูจึงต้องมีการปรับสภาวะความเป็นกรดด่างของน้ำหมักให้ได้ในช่วงที่เหมาะสมกับเชื้อ Acetobactor เพื่อให้เชื้อสายพันธุ์ที่เลือกใช้นั้น ๆ เจริญได้ดี โดยทั่ว ๆ ไป A. aceti จะเจริญได้ดีในช่วงของความเป็นกรดด่าง 3-4 (5)

2.1.2.3 ความเข้มข้นของเอทานอล

ได้มีผู้ทำการทดลองพบว่า Acetobactor สามารถสร้างกรดอะซิติกจากการออกซิไดซ์เอทานอลในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 2-12 โดยปริมาตร การปรับปริมาณความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงร้อยละ 10-13 ถ้าใช้ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 14 หรือมากกว่า เชื้อ Acetobactor จะสร้างเมือก (zoogloeal mat) ขึ้นเพื่อป้องกันตัวเอง (3,6) และทำให้เอทานอลเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติกได้ยากและไม่สมบูรณ์ ในขณะเดียวกันถ้าใช้ความเข้มข้นที่ต่ำจะทำให้ได้กรดอะซิติกต่ำกว่าระดับที่ใช้ประโยชน์ได้ เมื่อเอทานอลหมด เชื้อจะออกซิไดซ์กรดอะซิติกไปเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และยังมีเชื้ออื่นปะปนเข้าไปได้ง่าย (3,6)

$$CH_3COOH + 2O_2 \longrightarrow 2CO_2 + 2H_2O \qquad (2.3)$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2.4 ความเข้มข้นของกรดอะซิติก ตอนเริ่มต้นของการหมักกรดอะซิติก จะมีการเติมกรดอะซิติกลงไปเล็กน้อย เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรียอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น และเป็นการปรับสภาพน้ำหมักให้เหมาะกับ Acetobactor ที่ผลิตน้ำส้มสายชูให้เจริญได้ดี (3) จากการทดลองหมักน้ำส้มสายชูในถังกวน (7) พบว่า อัตราส่วนเริ่มต้นของเอทานอลต่อกรดอะซิติกนั้นจะมีผลต่ออัตราการเพิ่มของ Acetobactor ถ้าความเข้มข้นทั้งหมดเพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตของ Acetobactor จะลดลงโดยที่ตัวแปรอื่น ๆ คงที่ และถ้าความเข้มข้นทั้งหมดคงที่ อัตราการแบ่งตัวของเชื้อจะสูงสุดเมื่อมีกรดอะซิติกร้อยละ 7-8 และจะลดลงถ้ากรดอะซิติกสูงขึ้น ดังนั้นทุก ๆ ครั้งของการหมักจะต้องเอากรดอะซิติกออกบางส่วน เพื่อให้ปริมาณกรดอะซิติกในน้ำส้มสายชูอยู่ในช่วงที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามปริมาณกรดอะซิติกและเอทานอลต้องขึ้นกับสายพันธ์ของ Acetobactor ด้วย ในการหมักกรดอะซิติกด้วยเครื่องหมักแบบแพคคอลัมน์โดยใช้เชื้อ A. aceti แบบไม่ต่อเนื่อง ศิริวรรณ (1) ได้ทำการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของเอทานอลต่อกรดอะซิติกในตอนเริ่มต้นของการหมักที่เหมาะสมคือ เอทานอลร้อยละ 7 โดยปริมาตรต่ออะซิติกร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

2.1.3 ปัจจัยที่เกี่ยวกับเครื่องหมัก

ในส่วนนี้รูปร่างและการทำงานของเครื่องหมักจะมีอิทธิพลต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อน และมวลสารของเครื่องหมัก ซึ่งจะเป็นตัวจำกัดช่วงของสภาวะแวดล้อมภายนอกต่อการหมัก (2)

ในการหมักน้ำส้มสายชูด้วยเครื่องหมักแบบแพคคอลัมน์นั้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องหมักที่มีอิทธิพลต่อการหมักคือ แพคเบด ระบบการให้อากาศ ระบบการไหลของน้ำหมัก ระบบการไหลหมุนเวียนของน้ำหมัก

2.1.3.1 แพคเบด

เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดกรดอะซิติกเป็นปฏิกิริยาแบบออกซิเดชั่น การที่จะทำให้ไวน์ผลไม้ที่ใช้ในการทำน้ำส้มสายชูมีโอกาสสัมผัสกับอากาศมากที่สุดก็คือ การใช้แพคเบดเพื่อให้เชื้อน้ำส้มสายชูเกาะ และเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศที่ไหลขึ้นไปกับน้ำหมักที่ไหลลงมา (8,9) โดยเชื้อจะได้รับสารอาหารและออกซิเจนจากสารละลายด้วยวิธีการแพร่กระจายจากภายนอกเซลล์เข้าไปภายในเซลล์ ในขณะเดียวกันก็จะมีการแพร่กระจายของสารที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาภายในเซลล์ออกมาในทิศทางตรงข้าม (9,10) ซึ่งการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้มากนี้ก็เท่ากับเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลสารให้สูงขึ้น เพราะ

อัตราการถ่ายเทมวลสาร = $K_a \Delta c$

K = สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสาร

a = พื้นที่ผิวสัมผัส (interfacial area)

Δc = ความแตกต่างทางด้านความเข้มข้นของสารอาหาร (concentration gradient)

ซึ่งเท่ากับเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องหมักให้ดีขึ้น แพคเบดที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้คือ

- ให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศ น้ำหมัก และจุลินทรีย์สูง ฉะนั้นแพคเบดจะต้องมีพื้นที่ผิวมาก
- สามารถให้น้ำหมักเกาะเป็นฟิลม์บาง ๆ ได้ดี
- แข็งแรง มีอายุการใช้งานนาน
- หาง่าย และราคาถูก
- น้ำหนักเบา
- ไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์
- จุลินทรีย์เกาะได้ดี
- ไม่ทำให้เกิดกลิ่นรส และสีที่ไม่ดีแก่ผลิตภัณฑ์
- สามารถเคลื่อนย้ายและติดตั้งง่าย

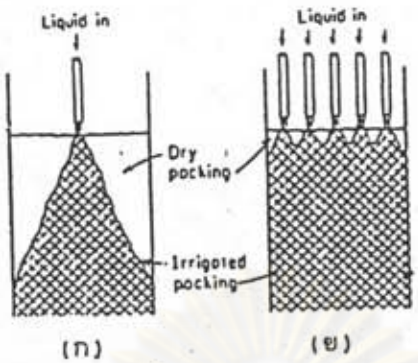
ในการศึกษาในเครื่องหมักแพคคอลัมน์ขนาดเล็ก พรทิพย์ (11) และศิริวรรณ (1) พบว่าวัสดุที่ใช้ทำแพคเบดที่เหมาะสมที่สุดคือ ไม้มะค่ารูปทรงกลม

2.1.3.2 ระบบให้อากาศ

เครื่องหมักที่มีประสิทธิภาพดีควรจะมีหัวกระจายอากาศ ซึ่งให้อากาศออกมามีลักษณะเป็นฟองละเอียด เล็กสม่ำเสมอเท่ากันทุกจุดในเครื่องหมัก เพื่อให้ออกซิเจนสามารถแพร่กระจายเข้าไปในน้ำหมักได้รวดเร็วและสม่ำเสมอ และมีโอกาสสัมผัสกับน้ำหมักได้นาน ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่าออกซิเจนสามารถถ่ายเทเข้าสู่น้ำหมักได้มากที่สุด ขนาดฟองอากาศขึ้นอยู่กับขนาดรูของหัวกระจายอากาศ ซึ่ง นิคม (12) ได้ทำการศึกษาพบว่า หัวกระจายอากาศรูปกรวย ขนาดรูตะแกรง 40 mesh จะให้ผลดีกว่าแบบอื่น ๆ เช่น รูปทรงกลม หรือตะแกรงที่มีรูโตกว่า 40 mesh

2.1.3.3 ระบบการไหลเข้าของน้ำหมัก

ในการสร้างเครื่องหมักให้มีประสิทธิภาพที่ดีนั้น หัวกระจายน้ำ



รูปที่ 2.1 ระบบการไหลของน้ำหมัก (10)

หมักเป็นสิ่งสำคัญมาก (13) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องหมักที่ประกอบด้วยแพคเบด ซึ่งต้องออกแบบให้มีการกระจายของน้ำหมักตกลงบนแพคเบดอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึง ฉะนั้นควรออกแบบหัวกระจายน้ำหมัก โดยให้น้ำหมักไหลลงมาจากหลายจุด ดังรูปที่ 2.1 ข. เพื่อให้แพคเบดทั้งหมดมีโอกาสสัมผัสกับน้ำหนัก ซึ่งถ้าออกแบบให้น้ำหมักไหลลงมาจากจุดเดียว ดังรูปที่ 2.1 ก. จะทำให้แพคเบดบางแห่งไม่มีโอกาสสัมผัสกับน้ำหมัก (dry packing) ดังนั้นจึงไม่มีการถ่ายเทมวลสารระหว่างจุลินทรีย์ น้ำหมัก และอากาศ (8, 9) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องหมักสูแบบดังกล่าวข้างต้นไม่ได้

2.1.3.4 ระบบการไหลหมุนเวียนของน้ำหมัก

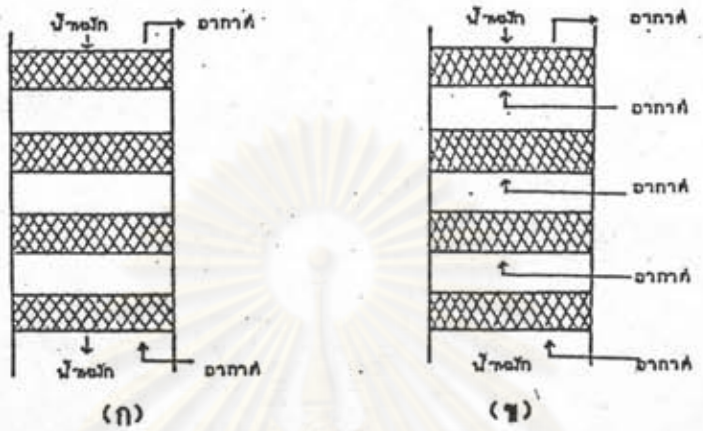
ระบบการไหลหมุนเวียนของน้ำหมักจากถังเข้าสู่คอลัมน์ เป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพราะจากงานวิจัยของพรทิพย์ (11) พบว่าปฏิกริยาการเกิดกรดอะซิติกนั้นส่วนใหญ่จะเกิดในคอลัมน์ ดังนั้นเมื่อมีระบบการไหลหมุนเวียนของน้ำหมัก จะช่วยกักให้น้ำหมักค้างอยู่ในคอลัมน์ได้นานกว่า ดังนั้นเมื่อทำการวิจัยเปรียบเทียบการหมักที่มีระบบการไหลหมุนเวียนกับการหมักที่ไม่มีระบบการไหลหมุนเวียน พบว่าการหมักที่มีระบบการไหลหมุนเวียนจะให้ผลดีกว่า

นอกจากระบบการไหลหมุนเวียนจะมีผลต่อการหมักแล้ว ลักษณะการบรรจุแพคเบดโดยใช้แพคเบดจำนวนเท่ากัน แต่แบ่งเป็นส่วนย่อย ๆ หลาย ๆ ชั้น (มีมากกว่าชั้นเดียว) และมีหัวกระจายอากาศและท่อทางออกของอากาศในทุกชั้นของแพคเบด เพื่อให้น้ำหมักและอากาศสัมผัสกันอย่างทั่วถึงตลอดคอลัมน์ จะทำให้การถ่ายเทมวลสารเพื่อเปลี่ยนสารอาหารให้เป็นผลิตภัณฑ์เร็วขึ้น

ในการหมักโดยใช้เครื่องหมักแพคคอลัมน์ขนาดเล็ก ศิริวรรณ (1) ได้ทดลองใช้เครื่องหมักแบบแพคคอลัมน์ชนิดต่าง ๆ พบว่าเครื่องหมักแพคคอลัมน์แบบอนุกรมสี่ชั้นชนิดรวมคอลัมน์จะ

ให้อัตราการเกิดกรดอะซิติกได้ดีกว่าเครื่องหมักชนิดอื่น ๆ

2.1.4 คุณลักษณะของเครื่องหมักแบบหลายชั้น



รูปที่ 2.2 ลักษณะของเครื่องหมักแบบหลายชั้น

คุณลักษณะของเครื่องหมักแบบหลายชั้นประกอบด้วย เครื่องหมักส่วนย่อย ๆ หลายอันรวมกันเป็นคอลัมน์เดียว โดยให้อากาศเข้าทางด้านล่างเพียงแห่งเดียว และน้ำหมักเข้าทางด้านบนของเครื่องหมักดังรูปที่ 2.2 ก. หรืออาจเป็นเครื่องหมักที่ประกอบด้วยส่วนย่อย ๆ หลายอันโดยให้อากาศเข้าด้านล่างของทุกชั้นและน้ำหมักเข้าทางด้านบนของเครื่องหมักดังรูปที่ 2.2 ข.

ในเรื่องการถ่ายเทมวลสารระหว่างอากาศกับน้ำหมัก เนื่องจากการหมักน้ำส้มสายชูเป็นการหมักแบบใช้อากาศ ดังนั้นจึงมี 3 สถานะที่เกี่ยวข้องกันคือ จุลินทรีย์ น้ำหมัก และอากาศ มีการถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นระหว่างอากาศกับน้ำหมัก และน้ำหมักกับจุลินทรีย์ (9) โดยทั่วไปในเครื่องมือที่มีการถ่ายเทมวลสารระหว่างอากาศกับน้ำหมัก จะแบ่งออกเป็นสองแบบคือ

- อากาศเป็นตัวกระจาย (gas dispersed) เช่น ในเครื่องหมักแบบถังกวน (stirr tank fermenter) ซึ่งน้ำหมักและจุลินทรีย์จะทำหน้าที่เป็นสภาพต่อเนื่อง (continueous phase) ส่วนอากาศหรือออกซิเจนทำหน้าที่เป็นสภาพกระจาย (disperse phase) ในเครื่องหมักแบบถังกวนนี้ ฟองอากาศต้องมีขนาดเล็กและจำนวนมากเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้มากขึ้น (large interfacial area) จึงจะทำให้การถ่ายเทมวลสารสูงขึ้นด้วย การที่จะทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กต้องเพิ่มความเร็วของใบพัดให้มากขึ้น ดังนั้นจึงใช้พลังงานจำนวนมากในการหมุนใบพัด ซึ่งการหมักสารประเภทที่ระเหยง่าย เช่น แอลกอฮอล์ และกรดอะซิติก จะมีการสูญหายเกิดขึ้นได้

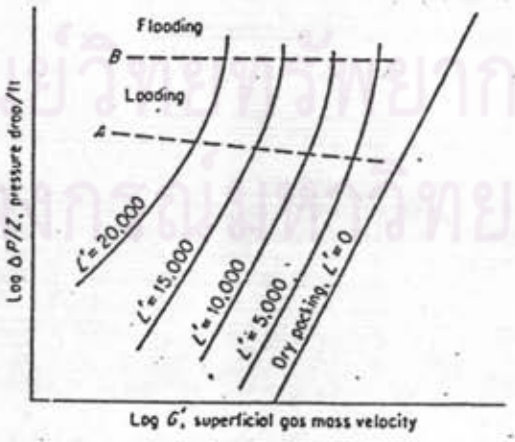
- น้ำหมักเป็นตัวกระจาย (liquid dispersed) เช่น ในเครื่องหมักแบบแพคเบด โดยน้ำหมักและจุลินทรีย์ทำหน้าที่เป็นสภาพกระจาย ส่วนอากาศหรือออกซิเจนทำหน้าที่เป็นสภาพต่อเนื่อง โดยที่น้ำหมักจะเคลือบที่ผิวแพคเบดเป็นฟิล์มบาง ๆ ส่วนช่องว่างของแพคเบดมีอากาศ และเกิดการถ่ายเทมวลสารจากอากาศสู่ฟิล์มของน้ำหมัก

ดังนั้นเครื่องหมักแบบหลายชั้นจึงต้องพยายามปรับให้อัตราการไหลเข้าของน้ำหมักและอากาศที่เหมาะสม ในการใส่แพคเบดลงในคอลัมน์แบบสุ่ม (random packing) (10) พบว่ามีความแตกต่างของความดัน (pressure drop) ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากอัตราการไหลของอากาศและของเหลว (gas and liquid flow rate) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากรูปจะเห็นว่า ที่ความเร็วคงที่อันหนึ่งของอากาศ ค่าความแตกต่างของความดันอากาศ (gas pressure drop) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ภาคตัดขวางสำหรับให้อากาศไหลผ่านลดลง เพราะว่ามีของเหลวอยู่ จากรูปพอสรุปได้ 3 แบบดังนี้คือ

1. ช่วงที่ต่ำกว่า A เมื่ออัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลง ปริมาณของเหลวในแพคเบดจะยังคงที่ ถึงแม้ว่าอัตราการไหลของของเหลวจะเพิ่มขึ้น

2. ช่วงระหว่าง A และ B ปริมาณของเหลวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของอากาศ ฉะนั้นพื้นที่ว่างเปล่าสำหรับให้อากาศผ่านจะเล็กลง และความแตกต่างของความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ช่วงนี้เรียกว่า โหลดดิ้ง (loading)

3. ช่วง B เมื่อให้อัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการไหลของของเหลวคงที่ จะเกิดปรากฏการณ์ดังนี้



รูปที่ 2.3 ความแตกต่างของความดันที่เกิดจากการไหลของของเหลวกับอากาศในเครื่องหมักแบบแพคเบดคอลัมน์ (10)

- ของเหลวที่ผ่านฟองอากาศมาจะปรากฏล้นอยู่ข้างบนและตามช่องว่างของแพคเบด และของเหลวจะไม่ไหลเป็นฟิลม์บาง ๆ รอบแพคเบด

- เกิดการเปลี่ยนแปลงของอากาศจากสภาพต่อเนื่อง และของเหลวจากสภาพกระจาย (gas continuous-liquid dispersed) ไปเป็น อากาศที่อยู่ในสภาพกระจาย ของเหลวอยู่ในสภาพต่อเนื่อง

- ในเครื่องหมักเกิดการท่วม (flooding) เนื่องจากของเหลวและความแตกต่างของความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ฉะนั้นในทางปฏิบัติจะต้องพยายามจัดเครื่องไม่ให้เกิดสภาพของเหลวท่วมแพคเบด โดยพยายามจัดให้อยู่ในช่วงต่ำกว่าโหลดดิ้ง

2.1.5 การถ่ายเทมวลสารภายในแพคเบด

ในการศึกษาการถ่ายเทมวลสารภายในแพคคอลัมน์ Shulman (10) ได้ทำการทดลองและสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer coefficient) โดยใช้แพคเบดรูปทรงกระบอก (raschig rings) และรูปอานม้า (berl saddles) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสารของก๊าซ(gas phase mass transfer coefficient) ดังสมการ

$$k_a P_{B.M} Sc_a^{2/3}/G = 1.195[d_m G/\mu_a(1-\varepsilon_{Lo})]^{-0.36} \qquad (2.5)$$

Sc_a = Schmit number

= $\mu/\rho D$

μ = ความหนืด

ρ = ความหนาแน่น

D = การแพร่

k_a = สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสารในก๊าซ (gas-phase mass transfercoefficient)

$P_{B.M}$ = ความดันภายในแพคเบด

d_m = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมที่มีพื้นที่ผิวเท่ากับแพคเบดที่ใช้

G = ความเร็วมวลผิวเผินของก๊าซโดยโมล (superficial molar gas mass velocity)

G' = ความเร็วมวลผิวเผินของก๊าซ
(superficial gas mass velocity)

ε_{Lo} = ช่องว่างภายในแพคเบดขณะทำการทดลอง
= $\varepsilon - \phi_{Lt}$

ε = ช่องว่างภายในแพคเบดทั้งหมด

ϕ_{Lt} = ปริมาณของเหลวทั้งหมดที่ค้างอยู่ภายในแพคเบดขณะทำการทดลอง
= $\phi_{Lo} + \phi_{Lm}$

ϕ_{Lm} = ปริมาณของเหลวที่ค้างอยู่ตามร่องของแพคเบด

ϕ_{Lo} = ปริมาณของเหลวที่ค้างอยู่ในแพคเบดขณะทำการทดลอง

และค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสารในของเหลวจะหาได้จากสมการ

$$k_L d_p / D_L = 2.51(d_p L'/\mu_L)^{0.45} Sc_L^{0.5} \qquad (2.6)$$

k_L = สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสารในของเหลว
(liquid-phase mass transfer coefficient)

D_L = การแพร่ในของเหลว

L' = ความเร็วมวลผิวเผินของของเหลว
(superficial liquid mass velocity)

μ_L = ความหนืดของของเหลว

จะเห็นว่า สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลสารจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้แพคเบดขนาดเล็กลง

ในการศึกษาการบรรจุคอลัมน์แบบสุ่ม พบว่า จำนวนของแพคเบดต่อหน่วยปริมาตรของคอลัมน์บริเวณผนังของคอลัมน์จะมีค่าน้อยกว่าบริเวณอื่น ๆ เมื่อเป็นเช่นนี้จึงทำให้ของเหลวมีแนวโน้มที่จะไหลลงไปตามผนังของคอลัมน์และก๊าซจะไหลสวนขึ้นมาตรงบริเวณใจกลางของคอลัมน์เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า channeling การเกิด channeling นี้จะมีค่าน้อยลงเมื่อใช้แพคเบดขนาดเล็กกว่า 1 ใน 8 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ แต่การใช้แพคเบดขนาดเล็ก ๆ จะทำให้ความดันลด(pressure drop) มีค่ามากขึ้น ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดการท่วมภายในเบดได้ง่าย ขนาดของแพคเบดที่ดีควรมีค่าประมาณ 1 ใน 15 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ

คอลัมน์ (10) ในการป้องกันการเกิด channeling นั้นทำได้โดยการใช้หัวกระจายน้ำหมักเสริม (liquid redistributor) ที่ระยะความสูงของคอลัมน์ประมาณ 3 ถึง 10 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์

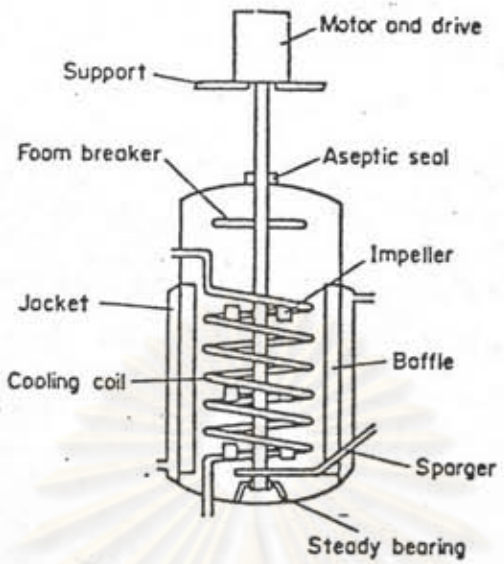
2.2 หลักเกณฑ์ในการขยายขนาด

ในการขยายขนาด เนื่องจากมีหลายหลักเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาในการขยายขนาด ดังนั้นจะต้องเลือกหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการขยายขนาดให้เหมาะสมกับชนิดของเครื่องมือที่จะทำการขยายขนาด ตัวแปรลำดับแรกที่จะต้องพิจารณาในการขยายขนาดคือ ตัวแปรที่เกี่ยวกับอัตราส่วนทางเรขาคณิตของเครื่องหมัก การพิจารณาการเพิ่มรูปร่างทางเรขาคณิตของเครื่องหมัก Charles (14) ได้ให้ข้อสังเกตว่า การขยายขนาดไม่จำเป็นจะต้องให้ขนาดทั้งสองมีรูปร่างทางเรขาคณิตเหมือนกัน เขายังให้ข้อสังเกตอีกว่า โดยทั่ว ๆ ไปแล้วการไม่คำนึงถึงรูปร่างทางเรขาคณิตของเครื่องหมักจะทำให้ผู้ออกแบบสามารถออกแบบได้อย่างยืดหยุ่นมากขึ้น เช่น ในการขยายขนาดของเครื่องหมักแบบถังกวน ซึ่งมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในการออกแบบเครื่องหมักชนิดนี้ให้ใหญ่ขึ้น ตัวแปรที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทออกซิเจนอย่างมาก ได้แก่ พลังงานที่ใช้ในการหมัก ประสิทธิภาพในการผสมกันและอื่น ๆ

เทอมทางกายภาพที่ใช้เป็นตัวแปรในการออกแบบและขยายขนาดของเครื่องหมักแบบถังกวน ได้แก่

1. อัตราส่วนระหว่างพลังงานและปริมาตรในการหมัก
2. สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทออกซิเจน
3. เวลาที่ใช้ในการกวน เพื่อให้เกิดการผสมกันอย่างทั่วถึง
4. ความเร็วของปลายใบพัดกวน
5. สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน

ในการขยายขนาด ถ้าใช้ความคล้ายคลึงกันของรูปร่างทางเรขาคณิตของเครื่องหมักเป็นเกณฑ์ ตัวแปรที่เกิดขึ้นจากการขยายขนาดจะไม่สามารถกำหนดให้คงที่ในเวลาเดียวกันได้ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งเป็นการขยายขนาดของเครื่องหมักจากขนาด 80 ลิตร ไปเป็นขนาด 10,000 ลิตร โดยมีอัตราส่วนของการขยายขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของเครื่องหมัก 5 เท่า แต่จะมีอัตราส่วนของการขยายขนาดของปริมาตรของเครื่องหมักเป็น 125 เท่า ในการเปรียบเทียบผลของการขยายขนาดโดยให้อัตราส่วนทางเรขาคณิตของเครื่องหมักทั้งสองเหมือนกันและไม่



รูปที่ 2.4 ส่วนต่าง ๆ ของเครื่องหมักแบบถังกวน (2)

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติที่ใช้ในการขยายขนาด (15)

Property	Small scale 80 *l*	Large scale 10,000 *l*			
P	1.0	125	3125	25	0.2
P/V	1.0	1.0	25	0.2	0.0016
N	1.0	0.34	1.0	0.2	0.04
D	1.0	5.0	5.0	5.0	5.0
F	1.0	42.5	125	25	5.0
F/V	1.0	0.34	1.0	0.2	0.04
ND	1.0	1.7	5.0	1.0	0.2
$ND^2\rho/\mu$	1.0	8.5	25	5.0	1.0

เหมือนกัน โดยทำการขยายขนาดของเครื่องหมักแบบถังกวน จากขนาด 1 ลูกบาศก์เมตรไปเป็นขนาด 100 ลูกบาศก์เมตร ผลของการขยายขนาดโดยให้รูปร่างทางเรขาคณิตของเครื่องหมักเท่ากัน แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 และในกรณีไม่จำกัดให้อัตราส่วนทางเรขาคณิตเหมือนกัน แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 จากตารางที่ 2.3 จะเห็นว่าสภาวะแวดล้อมของการหมักและการได้รับออกซิเจนขนาด 100 ลูกบาศก์เมตร ลดลงไปจากขนาดหนึ่งลูกบาศก์เมตร ดังนั้นการขยายขนาดโดยวิธีนี้อาจจะทำให้เครื่องหมักที่ทำการขยายขนาดแล้วมีประสิทธิภาพในการหมักน้อยกว่าเครื่องหมักขนาดเล็ก ส่วนในกรณีการขยายขนาดโดยไม่จำกัดให้รูปร่างทางเรขาคณิตเหมือนกัน ดังแสดงผลของการขยายขนาดในตารางที่ 2.4 จะเห็นว่าตัวแปรอื่น ๆ เช่น พลังงานที่ใช้ต่อหน่วยปริมาตร , k_La , หรือเวลาที่ใช้ในการผสมกันจะสามารถกำหนดให้มีค่าคงที่ได้ด้วย เมื่อกำหนดให้ความเร็วของปลายใบพัดกวนมีค่าคงที่ ในกรณีนี้ถึงแม้จะรักษาให้อัตราส่วนระหว่างความสูงและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเครื่องหมักมีค่าคงที่ แต่เพื่อที่จะให้ได้ผลของการขยายขนาดตามต้องการ จึงจำเป็นที่จะต้องมีใบพัดกวนที่ใหญ่ขึ้นในเครื่องหมักขนาด 100 ลูกบาศก์เมตร (เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีให้อัตราส่วนทางเรขาคณิตเหมือนกัน) จึงเป็นผลทำให้พลังงานที่ใช้ทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ก็ทำให้ขบวนการหมักได้รับออกซิเจนมากขึ้นตามไปด้วย

ในการขยายขนาดของเครื่องสกัดแบบ Rotating Disk Contractor(RDC) (16) ซึ่งการสกัดทำได้โดยการให้สารละลายสองชนิดที่ตัวถูกละลายสามารถละลายได้ในตัวทำลายทั้งสอง แต่ตัวทำลายทั้งสองไม่ละลายซึ่งกันและกันนี้ไหลสวนทางกัน โดยสารละลายหนึ่งอยู่ในสภาพต่อเนื่อง (continueous phase) ส่วนอีกสารละลายหนึ่งอยู่ในสภาพกระจาย (disperse phase)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

014415

ตารางที่ 2.3 ผลการขยายขนาดเมื่อกำหนดให้ความเร็วปลายของใบพัดกวนมีค่าเท่ากัน (17)

PARAMETER	SCALE 1	SCALE 2	CHANGE	ENVIRONMENTAL EFFECT
Volume (m^3)	1	100	+	
H (m)	1.72	7.99	+	Higher C_{O_2}; C_{CO_2} (pH)
Impeller Tip Speed	1	1	None	
Power/Unit Volume	1	0.22	-	
k_La	1	0.47	-	
Oxygen Availability (2)	1	0.69	-	Lower oxygen supply
Impeller Liquid Flow/Unit Volume also t_c & t_{mix}	1	0.21	-	More heterogeneity

Notes: (1) Geometric similarity assumed H: D_T: D = 2:1:0.33

(2) (i) Oxygen availability = $k_La\ (C^* - C_L)$

Assume

C^* out = 0.18 atm; C_L = 0.02 atm

1 m^3 scale C^* = C^*_{out}

100 m^3 scale C^* = log mean of C^*_{in} & C^*_{out}

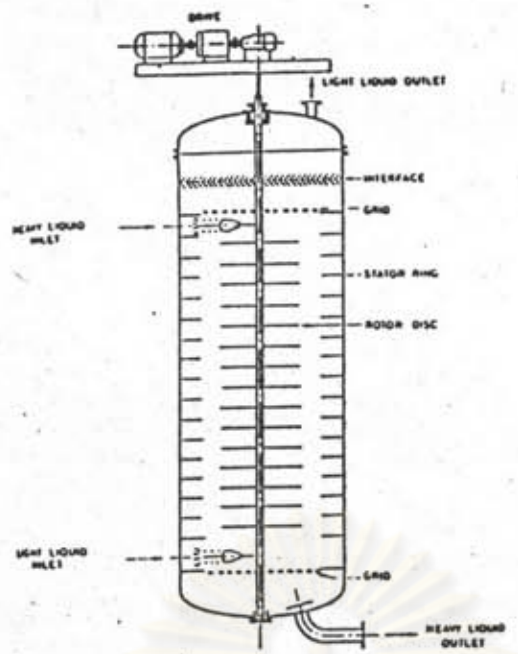
(ii) k_La $(N^3D^2)^{0.5}$

ตารางที่ 2.4 ผลของการขยายขนาด เมื่อกำหนดให้ความเร็วของปลายใบพัดกวนและอัตราการกวนมีค่าเท่ากัน (17)

PARAMETER	SCALE 1	SCALE 2	CHANGE	ENVIRONMENTAL EFFECT
Volume (m^3)	1	100	+	
Height (m)	1.72	7.99	+	Higher C_{O_2} :C_{CO_2} (pH)
Tank Diameter (m)	0.86	3.99	+	
Impeller Diameter (m)	0.29	2.9	+	
Impeller Tip Speed	1	1	None	
Impeller Liquid Flow/Unit Volume also t_c & t_{mix}	1	1	None	
Power/Unit Volume	1	1	None	
k_La	1	1	None	
Oxygen Availability	1	1.5	+	Increased oxygen supply

Note : See Table 3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 รูปร่างของ Rotating Disk Contactor (16)

การทำให้เกิดสภาวะกระจายตัวอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ ทำได้โดยการใช้พลังงานจากภายนอกไปหมุนใบพัดกวน ซึ่งอยู่แกนกลางของคอลัมน์ของ RDC

รูปที่ 2.5 เป็นรูปแสดงรูปร่างของ RDC ซึ่งเป็นเครื่องสกัดที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน มีขนาดตั้งแต่ 1 เมตรจนถึง 4.5 เมตร การขยายขนาดของ RDC สิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการขยายขนาดคือ

1. การขยายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์
2. การเพิ่มความสูงของคอลัมน์

การขยายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ทำได้โดยการกำหนดให้อัตราการไหลต่อพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ที่ทำให้การสกัดเกิดได้ดีที่สุดมีค่าคงที่ และ RDC จะมีอัตราส่วนของเครื่องสกัดแต่ละชั้นมีค่ามาตรฐานดังนี้คือ (16)

dc = 0.7D

di = 0.6D

Hc = 0.1D - 0.2D ใช้ 0.2 เมื่อ D < 0.1 เมตร
ใช้ 0.1 เมื่อ D มีค่ามากขึ้น

di = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ rotor

dc = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ opening

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ column

N = ความเร็วของ rotor

เมื่อทำการขยายขนาดจากกำลังการสกัด 550 ตันต่อวันเป็น 1000 ตันต่อวัน จะได้ผลของการขยายขนาดดังแสดงในตารางที่ 2.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 การขยายขนาดของ RDC จากขนาดกำลังการผลิต 550 ตันต่อวันเป็น 1000 ตันต่อวัน(16)

ตัวแปร	ขนาดเล็ก	ขนาดใหญ่
กำลังการสกัด (Qd, ตันต่อวัน)	500	1000
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ (D, เมตร)	1.54	2.1
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ rotor (di, เมตร)	0.924	1.26
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ rotor opening (dc, เมตร)	1.078	1.47
ความสูงของคอลัมน์แต่ละชั้น (Hc, เมตร)	0.154	0.21
ความสูงทั้งหมดของคอลัมน์ (H, เมตร)	4.57	7.8
จำนวนชั้น	30	37
H : D	2.97	3.71
N	36	36

ในการขยายขนาดของ RDC นั้น เมื่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์เพิ่มขึ้น โดยมีการเพิ่มอัตราส่วนของ D, Hc, di, dc ตามที่กล่าวมาแล้ว ถ้าใช้จำนวนรอบในการหมุนของ rotor เท่าเดิม การผสมกันภายในคอลัมน์จะน้อยลงเนื่องจากการผสมกันในแนวแกนมีค่ามากขึ้น ดังนั้นเพื่อให้การสกัดโดยเครื่องสกัดขนาดใหญ่เกิดได้สมบูรณ์เท่ากับเครื่องสกัดขนาดเล็ก จะต้องทำการเพิ่มจำนวนชั้นของการสกัดมากขึ้น ดังนั้นอัตราส่วนระหว่าง H : D จึงมีค่ามากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.5

สำหรับในกรณีของการขยายขนาดของเครื่องหมักแบบแพคคอลัมน์นั้น เนื่องจากการศึกษาในวารสารปริทัศน์ยังไม่พบการขยายขนาดของแพคคอลัมน์ ดังนั้นเพื่อให้การเสนองานนี้เป็นการศึกษาทางด้านการขยายขนาดอย่างสมบูรณ์ จึงได้นำเอาเรื่องของการขยายขนาดของถังกวนและการขยายขนาดของเครื่องสกัดแบบ rotating disk contactor มาแสดงไว้เพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการขยายขนาดของเครื่องหมักแบบแพคคอลัมน์ ทั้งนี้เนื่องจากว่าเครื่องมือทั้งสองชนิดนี้

อยู่ในช่ายเดียวกันกับเครื่องหมักแบบแพคคอลัมน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย