

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 โฮโมจีไนเซชัน (Homogenization)

ในอุตสาหกรรมอาหารได้มีการใช้กระบวนการโฮโมจีไนเซชันเพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โฮโมจีไนเซชันเป็นหน่วยปฏิบัติการของการลดขนาดของของแข็ง หรือของเหลวในอาหารเหลว โดยการให้อาหารเหล่านั้นผ่านช่องแคบ (orifice) ที่มีรูเปิดเล็กมากด้วยความดันสูงและความเร็วสูงมาก เทอมของโฮโมจีไนเซชันเป็นการลดขนาด (ไปเป็น 0.5-3 μm) และเป็นการเพิ่มจำนวนของของแข็งหรือของเหลวที่เป็นเฟสที่กระจายตัว โดยการใช้แรงเฉือน (shear) เพื่อเพิ่มความคงตัวแก่อาหารเหลว ของเหลวชนิดหนึ่งเรียกว่าเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง (discontinuous หรือ internal phase) หรือเฟสที่กระจายตัว (dispersed phase) ในรูปของหยดของเหลว (droplets) หรือโกลบูลเล็กๆ หรืออนุภาคของแข็งจะกระจายตัวอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่งเรียกว่าเฟสต่อเนื่อง (continuous หรือ external phase) เทอมของอิมัลชันเป็นการผสมของเหลวสองชนิดขึ้นไปที่ไม่สามารถละลายเข้ากันได้ (immiscible liquid) ให้มาผสมกันอย่างแน่นแฟ้นเกิดเป็นอิมัลชันที่คงตัว ดังนั้นการโฮโมจีไนเซชันจึงเป็นกระบวนการที่มีความรุนแรงมากกว่า อย่างไรก็ตามทั้งสองกระบวนการนี้จะใช้ในการเปลี่ยนคุณสมบัติที่เรียกว่าฟังก์ชันนัล (functional properties) หรือคุณภาพในด้านการบริโภคของอาหาร โดยแทบไม่มีผลต่อคุณค่าทางอาหารหรืออายุการเก็บ

2.2 อิมัลชันและทฤษฎีของโฮโมจีไนเซชัน (emulsions and theory of homogenization)

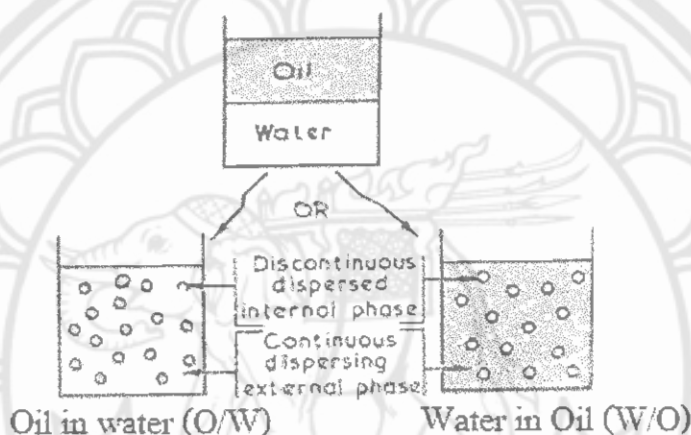
2.2.1 อิมัลชัน (emulsions)

อิมัลชันของของเหลว-ของเหลว มี 2 ชนิดคือ 1). น้ำมันในน้ำ (o/w) เช่น นม และ 2). น้ำในน้ำมัน (w/o) เช่น มาร์การีน อิมัลชันเหล่านี้ค่อนข้างจะเป็นอิมัลชันแบบง่าย ๆ ส่วนอิมัลชันที่ซับซ้อนขึ้นมักพบในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ไอศกรีม ไข่กรอกและเค้ก

ในอิมัลชันของของเหลวส่วนใหญ่ แม้ว่าของเหลวสองชนิดที่มาผสมกันคือ น้ำและน้ำมัน แต่ระบบที่น้ำบริสุทธิ์และน้ำมันบริสุทธิ์มาผสมกันมีน้อย เช่น เฟสของน้ำอาจประกอบด้วยสารละลายเกลือ น้ำตาลและสารอินทรีย์หรือสารคอลลอยด์ต่างๆ (สารประกอบไฮโดรฟิลิก) ส่วนเฟสของน้ำมันอาจประกอบด้วยน้ำมัน ไฮโดรคาร์บอน ไช เรซินและสารอื่นๆ ที่คล้ายน้ำมัน (สารประกอบไฮโดโฟ-

บิก) นอกจากนี้ อาจมีสารตัวที่สามที่เรียกว่าสารอิมัลซิไฟอิง (emulsifying agent) ร่วมอยู่ด้วยเพื่อทำให้สารอิมัลชันมีความคงตัวมากขึ้น สารอิมัลซิไฟอิงอาจมีอยู่ในอาหารเองหรือเติมเข้าไปในระหว่างกระบวนการแปรรูป

เมื่อน้ำและน้ำมันผสมรวมกัน จะเกิดอิมัลชันได้สองชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายตัวและปริมาณของสารทั้งสอง เช่น ถ้าน้ำมันเป็นเฟสที่กระจายหรือเฟสไม่ต่อเนื่อง จะเกิดอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (o/w) หรือถ้าน้ำเป็นเฟสไม่ต่อเนื่อง จะเกิดอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (w/o) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งอิมัลชันที่เกิดขึ้นมักจะแสดงคุณสมบัติส่วนใหญ่ของของเหลวที่เป็นเฟสต่อเนื่อง เช่น อิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำอาจทำให้เจือจางด้วยน้ำ ทำให้เกิดสีได้ด้วยสีที่ละลายน้ำและ



รูปที่ 2.1 : ชนิดของอิมัลชัน

ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

แสดงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่สอดคล้องกับเฟสของน้ำ (aqueous phase) ในทางตรงกันข้าม อิมัลชันของน้ำในน้ำมันก็สามารถทำให้เจือจางด้วยน้ำมัน ทำให้เกิดสีได้ด้วยสีที่ละลายได้ในน้ำมันและมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ อิมัลชันสองชนิดที่มีองค์ประกอบคล้ายกันจะมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันอย่างมาก ขึ้นกับว่าน้ำหรือน้ำมันเป็นเฟสต่อเนื่อง ปัจจัยที่มีผลต่อชนิดของอิมัลชันที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำและน้ำมันผสมกันได้แก่ ชนิดของสารอิมัลซิไฟอิง สัดส่วนของเฟสทั้งสองและวิธีการเตรียมอิมัลชัน

อิมัลชันที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้จากการเตรียมด้วยเทคนิคพิเศษ จะเรียกว่าอิมัลชันหลายชั้น (multiple emulsion) อาจเป็นชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ (w/o/w) หรือน้ำมันในน้ำในน้ำมัน (o/w/o)

2.2.2 ทฤษฎีของโฮโมจิไนเซชัน (theory of homogenization)

หลักการของโฮโมจิไนเซชันคือ การให้ของไหลผ่านช่องแคบออริฟิซ (orifice) ที่บางมากด้วยความดันสูงและความเร็วสูงมาก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผ่าน

ช่องแคบดังกล่าวอย่างเห็นได้ชัด โดยลักษณะการแยกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลจากแรงเฉือนระหว่างผิวหน้าต่างๆ ของวาล์วขณะที่ผลิตภัณฑ์ไหลผ่านช่องเล็กๆ ด้วยความเร็วสูง อนุภาคของของแข็งหรือหยดของเหลวที่อยู่ใกล้กับผนังหรือขอบ (edge) ของกระแสมากที่สุดจะมีแรงต้านทานจากแรงเสียดทานของของไหลในกระแสและกระแสที่อยู่ตรงศูนย์กลางของทางไหลหรือส่วนที่วิ่งเร็วสุดของกระแสจะพาอนุภาคต่างๆ ที่อยู่ตรงกลางเคลื่อนไปได้เร็วกว่าอนุภาคที่อยู่ใกล้กับขอบของกระแสได้ ความแตกต่างในเรื่องความเร็วนี้ทำให้อนุภาคของของแข็งมีการบดซึ่งกันและกันด้วยแรงเฉือน ทำให้มีขนาดเล็กลง ยิ่งการไหลมีความเร็วมากขึ้นและกระแสแคบขึ้น แรงเฉือนก็จะมากขึ้นด้วย

ลักษณะของไฮโมจิโนเซชันกับการไหลของเมื่อน้ำที่ไหลเชื่อมมีความคล้ายกัน คือ การทำให้ของแข็งหรือหยดของเหลวแตกออกจากกันเป็นผลมาจากแรงอิมแพคที่เกิดขึ้นเมื่อกระแสความเร็วสูงชนกับผิวของของแข็ง เช่น breaker ring ในเครื่องไฮโมจิโนเซอร์ซึ่งมีการใช้ในวาล์วบางชนิด หรือผลของการทำให้แตกอาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากความดันที่ลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่ของไหลออกจากวาล์ว นอกจากนี้แรงที่เกิดขึ้นจากการแตกออก (collapse) ของฟองต่างๆ เนื่องจากคาเวซิชั่น อาจเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการไฮโมจิโนเซชันด้วย ในทางปฏิบัติวาล์วส่วนใหญ่ใช้หลักการทั้งสามขนาดและรูปร่างของช่องแคบออริฟิซกำหนดจากปริมาตรที่ต้องการแปรรูปในเวลาหนึ่งๆ และกำหนดจากความหนืดของผลิตภัณฑ์ด้วย

จากการทดลองจะพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุดซึ่งได้จากวาล์วของไฮโมจิโนเซอร์เมื่อของไหลถูกบังคับให้ผ่านวาล์วภายใต้ความดันที่คงที่และสม่ำเสมอเนื่องจากผลของแรงเฉือนของวาล์วเปลี่ยนแปลงไปตามความหนืดของของไหลที่ไหลผ่านวาล์ว เราสามารถแก้ไขได้โดยใช้ความเร็วค่าหนึ่ง ความดันที่ขึ้นๆ ลงๆ ทำให้ความเร็วแปรเปลี่ยนไป ซึ่งมีผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่ไม่ดีนัก

2.3 ปรากฏการณ์การทำให้อนุภาคแตก (disruption phenomena)

ขณะที่อนุภาคของสารแขวนลอยหรือหยดของเหลวที่เป็นเฟสที่ไม่ต่อเนื่องผ่านบริเวณที่ทำให้แตก กลไกการแตกต่างๆอาจเกิดขึ้น ดังนี้

2.3.1 กลไกการเฉือนในการไหลแบบลามินาร์และเทอร์บูเลนต์

(shear mechanisms in laminar and turbulent flow)

การไหลทุกชนิด เช่น การไหลที่เกี่ยวข้องกับการเสียดทาน (friction) ก่อให้เกิดแรงเฉือน (shearing stress) ต่ออนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในกระแส ในการไหลแบบลามินาร์ ความเครียดเหล่านี้เป็นสิ่งปกติและลักษณะหนึ่ง แต่ในการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ ความเครียดดังกล่าว เป็นสิ่งที่ไม่ปกติได้มีการพิสูจน์ด้วยการใช้สมการทางคณิตศาสตร์พบว่า เทอร์บูเลนต์เป็นกลไกที่สำคัญที่สุดที่ทำให้เกิดการแตกขึ้น

2.3.2 คาวิตีชัน (cavitation)

เมื่อความดันในระบบถูกลดลงให้มีค่าต่ำกว่าความดันไอของของเหลว จะทำให้เกิดฟองของไอ (vapor- bubbles) ซึ่งฟองของไอเหล่านี้จะแตก (collapse) ในบริเวณที่มีความดัน ณ ตำแหน่งใกล้เคียง (local pressure) ที่สูงกว่า ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่าคาวิตีชัน (cavitation) โดยการให้ความดันประมาณ $5 \times 10^6 - 5 \times 10^7$ Pa ในวาล์วของการไฮโดรเจนในเซชันความดันสูง คาวิตีชันจะเกิดขึ้นเสมอ ซึ่งพิสูจน์ได้จากการเสื่อมเสียของผิวของวาล์วของการไฮโดรเจนในเซชันซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากคาวิตีชันการมีคาวิตีชัน มีผลทำให้การแตกมากขึ้นเมื่อพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบเท่ากัน และทำให้กระบวนการไฮโดรเจนในเซชันมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในเครื่องไฮโดรเจนในเซชันทุกชนิดจะมีแรงเฉือน ความเค้นเนื่องจากคาวิตีชันและแรงที่เกิดจากความเร่งหรือความถ่วงเกิดขึ้นพร้อมกัน

2.4 ความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ในของไหล (velocity of particles moving in a fluid)

อนุภาคในของเหลวภายใต้แรงคงที่ เช่น แรงโน้มถ่วงของโลก จะถูกเร่งในเวลาหนึ่งหลังจากนั้น จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ความเร็วสูงสุดที่จะมีได้ เรียกว่า ความเร็วเทอร์มินอล (terminal velocity) ซึ่งขึ้นกับขนาด ความหนาแน่น และรูปร่างของอนุภาคต่างๆ และขึ้นกับคุณสมบัติของของไหลด้วย

เมื่ออนุภาคเคลื่อนผ่านของเหลวอย่างคงตัว (steady) จะมีแรงที่สำคัญ 2 ชนิดกระทำต่ออนุภาค คือ แรงภายนอกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่และแรงหน่วง (drag force) ที่ต้านทานการเคลื่อนที่ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานของของเหลวนั่นเอง แรงภายนอกสุทธิที่กระทำต่ออนุภาคที่เคลื่อนที่คือ

$$F_s = Va(\rho_p - \rho_f) \quad (2.1)$$

เมื่อ F_s = แรงภายนอกสุทธิที่กระทำต่ออนุภาค (N)

V = ปริมาตรของอนุภาค (m^3)

a = ความเร่งที่มีผลจากแรงภายนอก

ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาค (kg/m^3)

ρ_f = ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

ส่วนแรงหน่วงที่กระทำต่ออนุภาค (F_d) ได้จากผลคูณระหว่างความดันความเร็ว (velocity-pressure) ของของเหลวที่กำลังไหลกับพื้นที่ฉายแสง (projected area) ของอนุภาคดังนี้

$$F_d = \frac{C\rho_f V^2 A}{2} \quad (2.2)$$

เมื่อ C = สัมประสิทธิ์ของการหน่วง (drag coefficient)

V = ความเร็วของอนุภาค (m/s)

A = พื้นที่ฉายแสงของอนุภาคที่ทำมุมฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ (m^2)

เมื่อแรงเหล่านี้กระทำต่ออนุภาคทรงกลมจะได้ปริมาตรและพื้นที่ของทรงกลมดังนี้

$$V = \frac{\pi D^3}{6} \quad \text{และ} \quad A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.3)$$

เมื่อ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค และเมื่อ

$$F_s = F_d$$

จะได้ความเร็ว v เป็นความเร็วเทอร์มินอล (v_m)

$$\left(\frac{\pi D^3}{6}\right)a(\rho_p - \rho_f) = \frac{C\rho_f V_m^2 (\pi D^2)}{8} \quad (2.4)$$

ในทางทฤษฎีแล้วจะเห็นว่าสำหรับการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมที่มีลักษณะเป็นเส้น (streamline) หรือลามินาร์ สัมประสิทธิ์ของการหน่วง (drag coefficient) ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$C = \frac{24}{(Re)} = \frac{24\mu}{DV_m\rho_f} \quad (2.5)$$

เมื่อ μ = ความหนืดของของไหล ($N.s/m^2$)

ดังนั้น

$$V_m = \frac{D^2 a(\rho_p - \rho_f)}{18\mu V_m} \quad (2.6)$$

ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานในการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่างๆ ในของไหลสมการนี้เรียกว่า กฎของ สโตคส์ (Stokes' Law)

2.5 ความคงตัวของอิมัลชัน (emulsion stability)

ความคงตัวของอิมัลชันหาได้จาก

- 1). ชนิดและปริมาณของสารอิมัลซิไฟอิง
- 2). ขนาดของโกลบูลในเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง
- 3). แรงระหว่างผิวร่วม (interfacial forces) ที่กระทำที่ผิวของโกลบูล
- 4). ความหนืดของเฟสต่อเนื่อง
- 5). ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของเฟสที่ต่อเนื่องและเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง

ยิ่งแรงตึงผิว (interfacial tension) ระหว่างเฟสที่ต่อเนื่องและเฟสที่ไม่ต่อเนื่องมีมากเท่าไร การเกิดและรักษาความคงตัวของอิมัลชันยิ่งมากขึ้น

ปัจจัยที่มีผลทำให้อิมัลชันมีความเสถียรเกี่ยวข้องกับกฎของสโตคส์ ดังนี้

$$V = \frac{D^2 g (\rho_p - \rho_f)}{18 \mu V} \quad (2.7)$$

เมื่อ V = ความเร็วของการแยกเฟส (m/s)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง (m)

g = แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

ρ_p = ความหนาแน่นของเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง (kg/m^3)

ρ_f = ความหนาแน่นของเฟสที่ต่อเนื่อง (kg/m^3)

μ = ความหนืดของเฟสต่อเนื่อง ($N.s/m^2$)

จากสมการข้างต้นชี้ให้เห็นว่าอิมัลชันที่มีความคงตัว (มีความเร็วในการแยกต่ำ) จะเกิดเมื่ออนุภาคทรงกลมดังกล่าวมีขนาดเล็ก (ในทางปฏิบัติอยู่ระหว่าง $1 \mu m - 10 \mu m$) ความหนาแน่นของทั้งสองเฟสใกล้เคียงกันและความหนืดของเฟสที่ต่อเนื่องมีค่าสูง

2.6 แรงตึงผิว (interfacial tension)

ผิวร่วมระหว่างของเหลวสองชนิดที่ไม่สามารถผสมกันได้เป็นส่วนหนึ่งของพลังงานอิสระที่เกิดขึ้นจากความไม่สมดุลระหว่างแรงยึดเกาะ (cohesive) ของของเหลวสองชนิด ซึ่งเรียกว่าแรงตึงผิว (interfacial tension) พลังงานนี้ทำให้ผิวหดตัวเพื่อให้เกิดพื้นที่ระหว่างผิวของทั้งสองเฟสให้เล็กที่สุดที่เป็นไปได้ในอิมัลชันนั้น เฟสที่ไม่ต่อเนื่องมีแนวโน้มที่จะเกิดของเหลว (droplet) หรืออนุภาคทรงกลมที่แสดงพื้นที่ระหว่างผิวร่วมต่อหน่วยปริมาตรของของเหลวที่เล็กที่สุด ดังนั้นอนุภาคของของเหลวเหล่านี้จึงมีแนวโน้มที่จะรวมกันเพื่อเกิดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า ทำให้พื้นที่ระหว่างผิวร่วมต่อหน่วยปริมาตรลดน้อยลง ในอิมัลชันที่หยาบ ลักษณะเช่นนี้สามารถดำเนินต่อไปได้จนเฟสต่างๆนี้แยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์

ในทางตรงกันข้าม การเกิดอิมัลชันเกี่ยวข้องกับการทำให้เกิดผิวหน้า (interface) ใหม่เป็นจำนวนมาก ซึ่งตรงกันข้ามกับแนวโน้มที่จะหดตัวซึ่งเกิดจากแรงตึงระหว่างผิวหน้า ยิ่งแรงตึงระหว่างผิวหน้ามีมาก การทำให้อิมัลชันเกิดขึ้นยิ่งยาก และอิมัลชันมีแนวโน้มที่จะมีความคงตัวลดน้อยลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดแรงตึงระหว่างผิวหน้าเพื่อให้เกิดอิมัลชันที่มีความคงตัว วิธีหนึ่งที่นิยมคือการใช้สารอิมัลซิไฟอิงต่างๆ

2.7 สารอิมัลซิไฟอิง (emulsifying agents)

สารอิมัลซิไฟอิงทำหน้าที่ 2 ชนิด ในการทำให้เกิดอิมัลชัน (ที่เรียกว่าอิมัลซิไฟเคชัน) คือ (1) ช่วยลดแรงตึงระหว่างผิวหน้าของของเหลวต่างๆ ที่จะเกิดเป็นอิมัลชัน และ (2) ป้องกันการรวมตัวของอนุภาคต่างๆ ของเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง ในอิมัลชันที่เกิดขึ้นแล้ว สารที่ใช้เป็นสารอิมัลซิไฟอิงมีอยู่เป็นจำนวนมาก และมีคุณสมบัติแตกต่างกัน อิมัลชันที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ได้แก่ โปรตีน ฟอสโฟไลปิด และสเตอรอล ส่วนสารที่ได้จากการสังเคราะห์ได้แก่ เอสเทอร์ ของกลีเซอรอล โพรพิลีน ไกลคอล เซลลูโลสอีเทอร์ คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส และอื่นๆ ส่วนของแข็งอาจได้แก่ เบนโทไนท์ เป็นต้น

สารอิมัลซิไฟอิงส่วนใหญ่ประกอบด้วยโมเลกุลซึ่งมีทั้งกลุ่มที่มีขั้วและไม่ขั้ว เช่น เมื่อพิจารณาโมเลกุลของโซเดียมพาล์มมิเตท (sodium palmitate) ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.2 ส่วนของไฮโดรคาร์บอนของโมเลกุลเป็นกลุ่มที่ไม่มีขั้ว และกลุ่ม $-COONa$ เป็นกลุ่มที่มีขั้ว เพื่อความสะดวกในการทำความเข้าใจ กลุ่มที่ทำหน้าที่ไม่มีขั้วจะแสดงด้วยสี่เหลี่ยมผืนผ้า และกลุ่มที่มีขั้วแสดงด้วยวงกลม ในอิมัลชันใดๆ สารอิมัลซิไฟอิงจะถูกดูดซับ ณ ตำแหน่งที่อยู่ระหว่างผิวร่วมของเฟสต่างๆ เพื่อลดแรงตึงระหว่างผิว โดยโมเลกุลของสารอิมัลซิไฟอิงจัดตัวให้กลุ่มที่ไม่มีขั้วชี้ไปยังเฟสของน้ำมัน ขณะที่กลุ่มที่มีขั้วจะชี้ไปที่เฟสของน้ำที่ยึดอยู่ด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้นชั้นหรือฟิล์มของสารอิมัลซิไฟอิงจะเกิดขึ้นที่ระหว่างผิวหน้าของน้ำและน้ำมัน ฟิล์มระหว่างผิวหน้านี้จะทำหน้าที่เป็นตัว

ตารางที่ 2.1 สารอิมัลซิไฟอิงบางตัวที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

Emulsifier	HLB Value	Function and typical applications
<i>Ionic</i>		
Sodium stearyl-2-lactylates	—	Crumb softening (baked goods) Aid extrusion and reduce stickiness (pasta, snack foods and chewing gum) Improve whipping and aeration (instant potato, frozen cream and toppings) Dispersion (coffee whiteners)
<i>Non-ionic</i>		
Glyceryl monostearate	2.8	Anti-staling, crumb softening (bread, most baked goods) Fat crystal modification (peanut butter, coat-ings)
Sorbital esters of fatty acids	4.7	Bloom retardation (chocolate, coatings) Overrun control (ice cream)

NB. All are used for combining oil and water to form stable emulsions.

ที่มา : *Follows (1990)*

ของแข็งที่ละเอียดมากๆ มักจะถูกดูดซับที่ระหว่างผิวหน้าในอิมัลชันและกระทำตัวเป็นสารอิมัลซิไฟอิง แม้ว่าจะไม่ค่อยมีประสิทธิภาพมากนัก และของแข็งซึ่งมักจะทำให้เปียกได้ง่ายด้วยเฟสของน้ำ ทำให้เกิดอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ

สารอิมัลซิไฟอิงควรจะมีอยู่ในรูปชนิดของอิมัลชันที่เกิด ถ้าใช้ในอาหารสารอิมัลซิไฟอิงควรจะมีกลิ่น ไม่มีรส ไม่มีสี และต้องไม่เป็นพิษ ในหลายประเทศก็มีการควบคุมการใช้สารอิมัลซิไฟอิงในอาหาร สารอิมัลซิไฟอิงควรมีความคงตัวทั้งทางเคมีและกายภาพภายใต้สภาวะต่างๆของการแปรรูป การจัดการและการเก็บ และควรมีราคาถูก

สารทำให้คงตัวเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ หรือไฮโดรคอลลอยด์ ที่ละลายได้ในน้ำเพื่อให้เกิดสารละลายที่มีความหนืดหรือเป็นเจล ความหนืดที่เพิ่มขึ้นและอันตรกิริยา (interaction) ที่ซับซ้อนซึ่งเกิดขึ้นในอิมัลชันประเภท o/w ทำให้เกิดค้ำยันสามมิติที่ทำให้อิมัลชันมีความคงตัวและป้องกันการ

รวมตัวกันของเฟสไม่ต่อเนื่อง เซลลูโลสที่เป็นผลึกเล็กๆและผงเซลลูโลสเท่านั้นที่ใช้ในการทำให้เกิดอิมัลชันชนิด w/o

2.8 หลักการทั่วไปในการทำให้เกิดอิมัลชัน (general methods for emulsification)

การเกิดอิมัลชันจะต้องมีงานกระทำต่อระบบ เพื่อให้ชนะความต้านทานที่ก่อให้เกิดผิวร่วมระหว่างเฟสขึ้นใหม่ (ซึ่งเกิดขึ้นจากแรงตึงระหว่างผิว) ในทางทฤษฎีงานของการทำให้เกิดอิมัลชันเทียบเท่ากับผลคูณของผิวที่เกิดขึ้นใหม่กับแรงตึงระหว่างผิวหน้า นอกจากนี้พลังงานที่ต้องใช้ยังรวมถึงพลังงานที่ให้ของเหลวเคลื่อนที่ (in motion) และชนะความต้านทานอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานที่พื้นผิวของเครื่องมือ โดยทั่วไปงานที่ให้กับของเหลวกระทำได้โดยการกวนอย่างแรง ชนิดของการกวนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอิมัลชันคือ ชนิดที่ทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ของเฟสไม่ต่อเนื่องได้รับแรงเฉือน ในลักษณะเช่นนี้อนุภาคจะเสีรูปร่างและแตกออกเป็นขนาดที่เล็กลง ทำให้มีการกระจายตัวที่ละเอียดกว่า ถ้าสภาวะที่เหมาะสมฟิล์มของสารอิมัลซิไฟอิงที่ทำหน้าที่ป้องกันดังกล่าวจะถูกฉีกขาดที่ระหว่างผิวหน้าร่วมของทั้งสองเฟสและอิมัลชันที่คงตัวจะเกิดขึ้น

เวลาที่ใช้ในการทำให้เกิดอิมัลซิไฟอิงจะแตกต่างกันขึ้นกับสูตรของอิมัลชันและเทคนิคที่ใช้ และมักได้จากการทดลอง ในแต่ละกรณีของอิมัลซิไฟอิงจะมีช่วงเวลาที่เหมาะสม ถ้าต่ำกว่าเวลาดังกล่าว อิมัลชันที่เกิดขึ้นค่อนข้างจะไม่คงตัว แต่ถ้าการกวนดำเนินต่อไปเกินระยะเวลาที่เหมาะสม อิมัลชันอาจได้รับความเสียหาย เนื่องจากฟิล์มที่ทำหน้าที่ป้องกันนั้นเกิดการเสื่อมเสียด้วยการกวนที่มากเกินไป

ในการเตรียมอิมัลชันควรพิจารณาถึงสารอิมัลซิไฟอิงที่ใช้จะต้องเหมาะสมกับชนิดของอิมัลชันที่ต้องการ เช่น o/w หรือ w/o เปรอเซ็นต์ของปริมาณของเฟสไม่ต่อเนื่อง และอุณหภูมิของการเตรียม เนื่องจากแรงตึงระหว่างผิวและความหนืดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้จะขึ้นกับความไวต่อความร้อนขององค์ประกอบในอาหาร ในกรณีของการผลิตภัณฑ์นมอุณหภูมิที่ใช้ไม่ควรเกิน 70 องศาหรือในผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น นมของเนส จะมีองค์ประกอบของไขมันคงอยู่ด้วย จึงต้องทำให้เป็นอิมัลชันที่อุณหภูมิต่ำมาก

โดยทั่วไปมักเตรียมทั้งสองเฟสแยกกันแล้วจึงเติมสารอิมัลซิไฟอิงเข้าไปยังเฟสต่อเนื่อง แต่มีข้อยกเว้นพวกกัมและคอลลอยด์ที่เป็นไฮโดรฟิลิกบางตัวจะกระจายตัวได้ดีที่สุดในเฟสของน้ำมันเพื่อลดการขยายตัวและการเกาะเป็นก้อนให้น้อยที่สุด เมื่อมีการผสมเฟสต่างๆ เฟสที่ไม่ต่อเนื่องจะค่อยๆ เติมเข้าไปยังเฟสต่อเนื่อง ขณะที่เฟสต่อเนื่องถูกกวน

2.9 องค์ประกอบของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ความดันสูง

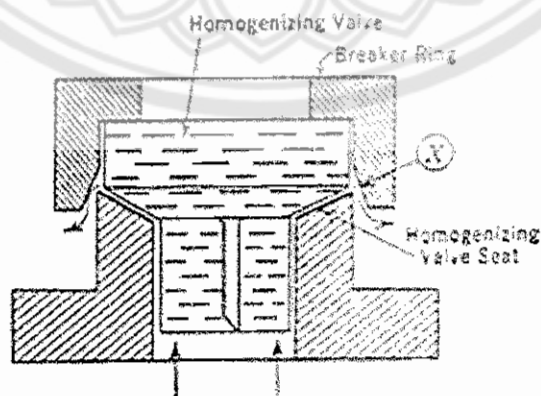
(components of pressure homogenizer)

เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ประกอบด้วยส่วนต่างๆที่ประกอบกันขึ้นเพื่อให้การลดขนาดในของเหลวหรือการเกิดเม็ดไขมันเล็กๆ ในเฟสต่อเนื่องเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.9.1 วาล์วของการโฮโมจีไนเซชัน (homogenizing valve)

วาล์วของการโฮโมจีไนเซชันเป็นหัวใจของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ วาล์วที่ใช้เหล่านี้มีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน หลายชนิดเป็นแบบพอพเพต (poppet type) และมีส่วนที่สองที่เรียกว่า breaker ring ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งอยู่รอบๆ วาล์วหลักของการโฮโมจีไนเซชันเพื่อให้ของเหลวชนกับผิวด้านในของ breaker ring ขณะที่ของเหลวออกจากออร์ทิซที่เกิดจากวาล์วรูปร่างเป็นกรวยและวาล์วซีท (valve seat) ส่วนของวาล์วนี้จะมีการสึกกร่อนค่อนข้างมากเนื่องจากความเร็วและความดันที่สูงของของไหลที่ผ่านวาล์วนี้ จึงต้องทำจากโลหะที่มีความต้านทานต่อการสึกกร่อนและที่มีความเหนียวมาก เครื่องโฮโมจีไนเซอร์รุ่นใหม่มีมักใช้วาล์วที่ทำจากอัลลอยด์ที่มีความแข็งแรงมาก

ขนาดของวาล์วต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสมกับความจุของเครื่อง เนื่องจากวาล์วที่ใหญ่เกินไปมีแนวโน้มที่ทำให้เกิดอนุภาคเม็ดไขมันที่เกาะเป็นกลุ่ม ส่วนวาล์วที่มีขนาดเล็กเกินไปอาจทำให้การแตกของเม็ดไขมันไม่เหมาะสม และอาจก่อให้เกิดไขมันเกาะเป็นกลุ่มมากเกินไปด้วย ส่วนประกอบของวาล์วโฮโมจีไนเซชัน ประกอบด้วยวาล์วที่ถูกดึงออกมาได้ด้วยสปริงที่สามารถปรับแรงดึงได้ เมื่อของเหลวที่มีความเร็วและความดันสูงมาชนกับวาล์ว วาล์วจะยกขึ้นประมาณ 2-3 ส่วนในพันส่วนของความยาว 1 นิ้วเพื่อทำให้เกิดช่องเปิด (orifice) ที่แคบมาก เนื่องจากช่องเปิดของวาล์วนี้เล็กมากทำให้ดูเหมือนว่าคาร์เคลื่อนที่ของวาล์วชนิดนี้มีน้อยมาก



รูปที่ 2.4 : วาล์วของการโฮโมจีไนเซชัน

ที่มา : Farrall (1976)

เครื่องโฮโมจีไนเซอร์บางชนิดมีวาล์วในลักษณะคังกล่าว 2 ตัวต่ออนุกรมกันเพื่อให้เกิดการโฮโมจีไนเซชัน 2 ชั้น เหตุผลหลักสำหรับโครงสร้างเช่นนี้คือ สามารถควบคุมความหนืดของครีมหรือส่วนผสมของไอศกรีมได้ดีขึ้น เครื่องบางชนิดมีการพัฒนาชนิดของวาล์วที่แตกต่างออกไปเพื่อให้ได้ผลการลดขนาดของเหลวเกิดขึ้นได้ดีโดยใช้ความดันที่ต่ำลง เครื่องบางชนิดมักทำให้กระแสการไหลแตกออกเป็นกระแสเล็กๆ หลายกระแสด้วยช่องเปิดเล็กๆ หลายอันและทำให้เกิดการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ขึ้น (การไหลของของไหลที่มีความเร็วสูงและค่าตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 2100) ณ ชั้นที่บางมากโดยการใช้พื้นที่ของวาล์วน้ำเรียบจำนวนมากในขณะที่ผลิตภัณฑ์เคลื่อนผ่านผิวหน้าของวาล์ว

2.9.2 ปัมป์ของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (homogenizer pumps)

ปัมป์ของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ต้องให้ความดันที่สม่ำเสมอเพื่อให้ได้ผลที่ดี เช่น ถ้าใช้ปัมป์ที่เป็นชนิดลูกสูบเดี่ยวเพียง 1 ตัว (a single-plunger pump) ก็จะทำให้ความดันที่เป็นจังหวะทำให้กระบวนการแตกไม่สม่ำเสมอ ในทางตรงกันข้ามถ้าใช้ปัมป์ชนิดหมุน (rotary pump) ซึ่งให้ความดันสม่ำเสมอ ก็จะทำให้กระบวนการทำให้แตกดีขึ้นที่ความดันเฉลี่ยเท่ากัน

อย่างไรก็ตามเครื่องโฮโมจีไนเซอร์รุ่นใหม่มักใช้แบบลูกสูบ 5 สูบ เพื่อที่จะให้ความดันค่อนข้างสม่ำเสมอ ซึ่งปัมป์ชนิดหมุนยังไม่มีการใช้ในทางปฏิบัติเนื่องจากการสึกเกิดขึ้นเร็วเกินไปแม้ว่าจะให้ผลการโฮโมจีไนเซชันที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าก็ตาม

2.9.3 ตัวขับเคลื่อนปัมป์และอื่นๆ (pump driver and others)

ในระบบขับเคลื่อนของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ โดยเฉพาะระบบที่ใช้ 5 ลูกสูบลูกสูบจะขับเคลื่อนเพลลาของลูกสูบโดยตรงด้วยมอเตอร์ สิ่งที่สำคัญคือ ความเร็วที่เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ขับเคลื่อนจำกัดที่ความเร็วรอบค่าหนึ่งเพื่อให้วาล์วและลูกสูบทำงานได้เหมาะสม เช่น ถ้าเดินเครื่องเร็วเกินไป กระบอกลูกสูบยังบรรจุไม่เต็มในแต่ละสโต็คทำให้เกิดความดันและการไหลผิดปกติได้

เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ต้องให้ผลิตภัณฑ์เข้าสู่เครื่องโดยไม่มีอากาศ เนื่องจากการมีฟองอากาศทำให้เกิดความดันที่ผิดไปและเกิดเสียงได้ซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพของการลดขนาดลดลงอย่างมาก

เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ต้องมีระบบการหล่อลื่นที่ดีเนื่องจากเครื่องต้องทนต่อความเค้นอย่างหนัก ในเครื่องรุ่นใหม่จึงมีการออกแบบให้มีระบบหล่อลื่นด้วยความดันหรือด้วยปัมป์ซึ่งให้ผลดีที่สุด เครื่องที่มีขนาดใหญ่บางชนิดใช้ตัวทำให้เย็นชนิดน้ำมันเป็นตัวช่วยให้เกิดการหล่อลื่นที่ดี

โครงสร้างของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ได้มีการพัฒนาจนสามารถที่จะถอดออกมาล้างได้ในแต่ละวัน และมีการใช้ระบบ CIP (cleaning in place) มาช่วยทำความสะอาดได้ง่ายขึ้นและต่อเนื่อง

2.10 เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (homogenizer)

ของผสมที่ต้องผ่านกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน ต้องเป็นของผสมที่มีความหนืดที่สามารถขนถ่ายได้ด้วยปั๊ม เนื่องจากเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ชนิดค้อนเนื่องใช้ปั๊ม ความดันที่ต้องการในของเหลวที่ทอส่งออกของปั๊มขึ้นกับกลไกในการลดขนาดซึ่งเกิดในเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ถ้าแรงที่ต้องการในการลดขนาดของอนุภาคที่เป็นเฟสที่ไม่ค้อนเนื่องได้รับโดยตรงจากพลังงานของการไหลจำเป็นต้องใช้ความดันสูงซึ่งความดันจะลดทันทีเมื่อไหลผ่านช่องเปิดคอรพิซ หรือบางครั้งก็เรียกว่า วาล์วของการโฮโมจีไนเซอร์ เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ชนิดนี้ เรียกว่าเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ความดันสูง และเป็นชนิดมาตรฐานที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

เครื่องที่มีพลังงานของการไหลต่ำ ก็ต้องการความดันต่ำกว่า แต่ต้องอาศัยแหล่งพลังงานอื่นๆ เพิ่มเติมสำหรับการลดขนาดของอนุภาค เครื่องชนิดนี้ที่เป็นที่รู้จักกันดี คือ เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ชนิดโรเตอร์-สเตเตอร์ (rotor-stator homogenizer) เช่น คอลลอยด์ มิลล์ แรงที่ใช้ทำให้อนุภาคของเฟสที่ไม่ค้อนเนื่องแตกเกิดจากพลังงานของโรเตอร์ที่หมุนด้วยความถี่สูง ปัจจุบันใช้ในอุตสาหกรรมอาหารอย่างแพร่หลายเช่นกัน

เครื่องโฮโมจีไนเซอร์มี 4 ชนิดหลักๆ ดังนี้

2.10.1 เครื่องผสม (mixers)

เครื่องกวนแบบใบพาย (paddle) มีความเร็วต่ำมักใช้สำหรับการทำอิมัลชัน หรือการผสมก่อนนำไปแปรรูปอื่นๆ เพราะความรุนแรงของการผสมค่อนข้างน้อย

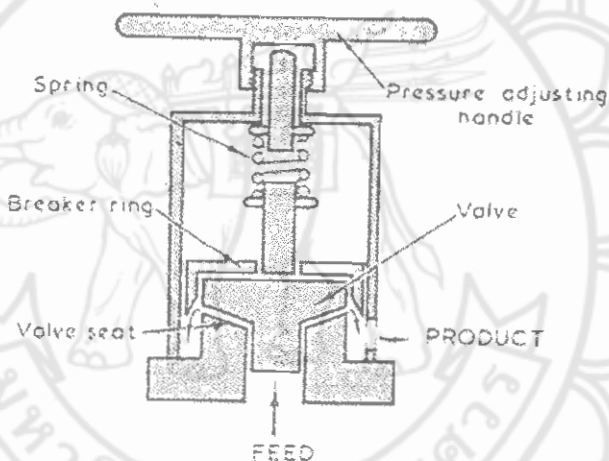
เครื่องผสมชนิดใบพัดกังหัน (turbine) และชนิดใบพัดเรือ (propeller) เป็นชนิดที่มีความเร็วสูง มีประสิทธิภาพมากในการใช้เป็นเพียงตัวผสมก่อนหรือทำเป็นอิมัลชัน โดยเฉพาะสำหรับระบบที่มีความหนืดต่ำ ส่วนใบพัดชนิดอิมเพลเตอร์ของเครื่องผสมความเร็วสูงมักออกแบบมาเพื่อใช้ในการทำอิมัลชันที่เข้มข้น

2.10.2 เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ความดันสูง (pressure homogenizers)

การโฮโมจีไนเซชันเป็นทอมที่ใช้อธิบายการปฏิบัติการที่ต้องการลดขนาดของอนุภาคของเฟสที่ไม่ค้อนเนื่องซึ่ง ทำให้เกิดขึ้นโดยการบังคับอิมัลชันที่พยายามให้ผ่านช่องเปิดแคบๆ ที่มีความเร็วสูง เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ความดันสูงประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ วาล์วของการโฮโมจีไนเซชันและปั๊ม ความดันสูงดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.9 วาล์วนี้จะออกแบบมาเพื่อให้เกิดช่องแคบ (gap) ที่ปรับได้ โดยมีความกว้างระหว่าง 15–300 μm ซึ่งอิมัลชันที่พยายามจะถูกบีบผ่านช่องแคบนี้ที่มีความดันสูงถึง 10000 psi ขณะที่อาหารเหลวเข้าสู่ช่องแคบนี้ ของเหลวถูกเร่งจนมีความเร็วในช่วง 50–200 m/s

ทำให้อนุภาคของเฟสที่ไม่ต่อเนื่องเกิดการเฉือนซึ่งกันและกันจนเสียรูปร่างและแตกออก ในวาล์วหลายชนิด ขณะที่ของเหลวออกจากช่องแคบนี้จะชน (impinge) กับผิวที่แข็งซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการไหล ลักษณะเช่นนี้จะเร่งการแตกหรือการฉีกขาดของอนุภาคที่ไม่เสถียรภาพของเฟสที่ไม่ต่อเนื่องต่อไปอีก ความดันที่ลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่ของเหลวออกจากช่องแคบ และการยุบตัวของฟองเนื่องจากคาวิเทชัน อาจจะมีผลต่อการลดขนาดของอนุภาคด้วย

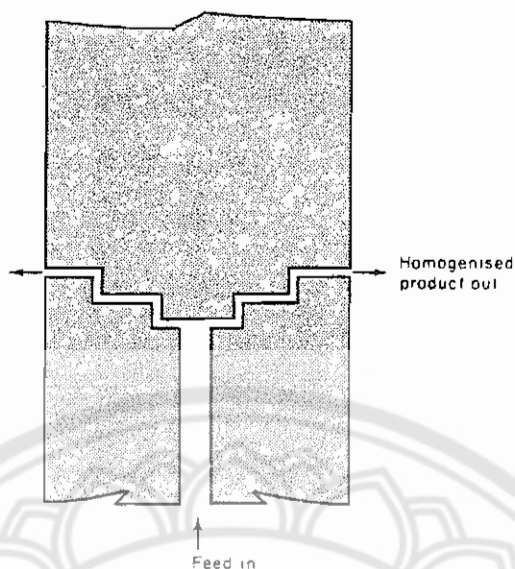
ชนิดของวาล์วที่ออกแบบกันโดยทั่วไปคือ วาล์วพอพเพต (poppet valve) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ของเหลวจะเดินทางระหว่างช่องวาล์วซีต (seat) กับวาล์วที่ยกตัวขึ้นด้านกับสปริงที่แข็งแรงการปรับแรงดึงบนสปริงทำให้เกิดการเปลี่ยนความดันของการไฮโมจิโนเซชัน เมื่อออกจากช่องแคบที่เป็นวงแหวนแล้ว ของเหลวจะชนกับ breaker ring ตัวอย่างของวาล์วที่ออกแบบไว้อีกชนิดหนึ่งแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 : หลักการอย่างง่ายของวาล์วของเครื่องไฮโมจิโนเซอร์
ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

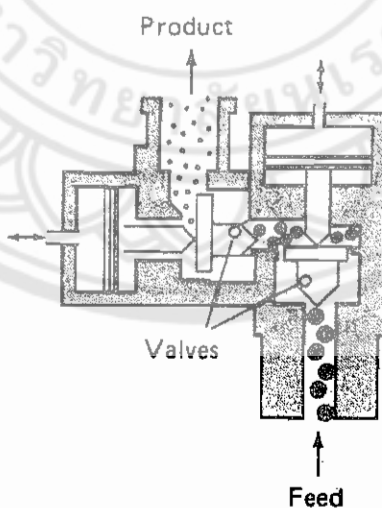
ปั๊มชนิด positive displacement มีไว้เพื่อส่งฟีดไปยังวาล์ว และเพื่อให้การลดขนาดได้ผลอย่างมีประสิทธิภาพ จึงควรเป็นอัตราการไหลแบบคงตัว (steady) ระบบที่ใช้กันเป็นปั๊มทรงกระบอกหลายตัว โดยมีทรงกระบอก 3, 5 หรือ 7 อันที่มีลูกสูบทำงานต่อเนื่องกัน โดยขับเคลื่อนผ่านเฟือง ในระบบเช่นนี้ ผลผลิตที่ได้อาจขึ้นหรือลงประมาณ 20% ซึ่งตัวเลขนี้สามารถลดต่อไปได้อีกโดยการใช้ช่วงของการอัดลูกสูบสั้น ความเร็วสูง

โดยทั่วไปฟีดจะมีการส่งเข้าไปยังไฮโมจิโนเซอร์ ในลักษณะที่เป็นอิมัลชันที่ผสมกันก่อนอย่างหายาก ปกติขนาดของอนุภาคของเฟสที่ไม่ต่อเนื่องประมาณ 0.1–0.2 μm และอาจจะต่ำถึง 0.02 μm



รูปที่ 2.6 : วาล์วของโฮโมจิไนเซอร์ที่มีซีกและวาล์วที่เป็นขั้น
ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

โฮโมจิไนเซอร์ชั้นความดันสูงชนิดที่มีวาล์ว 2 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 อาจจะจำเป็นต้องใช้ เพื่อให้มีการกระจายตัวที่เหมาะสมสำหรับบางผลิตภัณฑ์ เช่น โนผลิตภัณฑ์นม ครีมสลัด และอิมัลชันอื่นๆ ที่โปรตีนทำหน้าที่เป็นสารอิมัลซิไฟอิง อนุภาคขนาดเล็กที่เกิดขึ้นหลังจากผ่าน

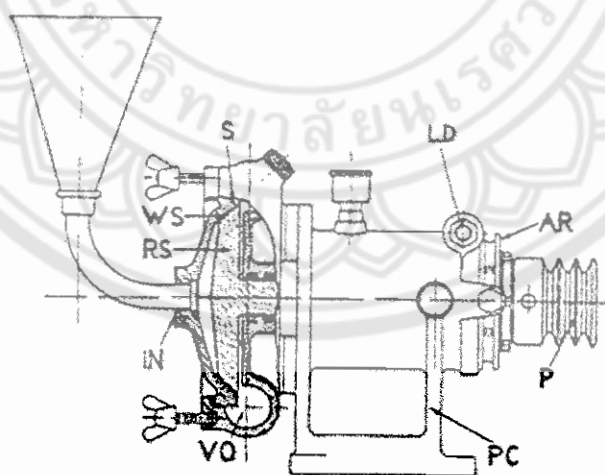


รูปที่ 2.7 : วาล์วของโฮโมจิไนเซอร์แบบ 2 ชั้นระบบไฮดรอลิก
ที่มา : Farrall (1976)

วาล์วของไฮโมจิในเซอร์ 1 ที่ยวกับความดันสูงมีแนวโน้มที่จะเกาะและรวมตัวกันอีก ซึ่งลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นจากการกระจายตัวของสารอิมัลซิไฟอิงที่ตำแหน่งผิวที่เกิดขึ้นใหม่ และเม็ดไขมันก็จะอยู่ภายในฟิล์มของแข็งของสาร ในการแก้ปัญหานี้ อาจจะทำให้อาหารดังกล่าวผ่านวาล์วของไฮโมจิในเซอร์ตัวที่สองที่มีความดันต่ำ เช่น 400–500 psi ด้วยวิธีนี้กลุ่มของอนุภาคที่เกาะกันจะแตกออก เครื่องไฮโมจิในเซอร์ชนิดนี้มักจะใช้ก่อนการพาสเจอร์ไรซ์ และการฆ่าเชื้อผลิตภัณฑ์นมที่อุณหภูมิสูง ในของผสมไอศกรีม จะให้ลักษณะเนื้อผสมและโครงสร้าง (body) ของผลิตภัณฑ์ดี รวมทั้งให้โอเวอร์รันที่สูงเหมือนผ่านการไฮโมจิในเซชัน มักใช้ในการผลิตครีมสด ไอศกรีม และชีสบางชนิด

2.10.3 เครื่องบดคอลลอยด์ (colloid mills)

รูปแบบทั่วไปของเครื่องบดคอลลอยด์จะประกอบด้วยผิวที่อยู่นิ่งเรียกว่าสเตเตอร์ (stator) และผิวที่หมุนหรือตัวหมุนเรียกว่าโรเตอร์ (rotor) ซึ่งหมุนรอบแกนนอน ช่องว่างระหว่างผิวที่อยู่นิ่งและตัวหมุนสามารถปรับได้ (ปกติอยู่ในช่วงของ 50–150 μm) โดยการเลื่อนของตัวหมุน ของเหลวซึ่งเป็นอิมัลชันที่พยายามจะป้อนเข้าสู่ศูนย์กลางของการหมุนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ผ่านช่องระหว่างผิวที่หยุดนิ่งและตัวหมุน ในระหว่างที่ผ่านช่องระหว่างผิวทั้งสองดังกล่าวของเหลวจะได้รับแรงเสียดสีทำให้เกิดเฟสที่ไม่ต่อเนื่องขึ้น จากนั้นของเหลวจะถูกปล่อยออกที่รอบเส้นรอบวงของผิว (รูปที่ 2.8) ความเร็วของตัวหมุนอยู่ระหว่าง 3000 รอบ/นาที สำหรับตัวหมุนขนาด 15 นิ้ว จนถึง 15000 รอบ/นาที สำหรับตัวหมุนขนาด 3.5 นิ้ว เครื่องชนิดนี้เหมาะสำหรับของเหลวความหนืดต่ำ

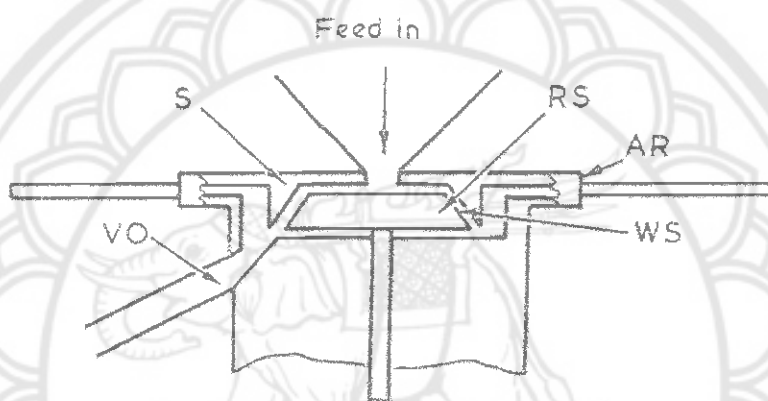


High-speed colloid mill. IN, inlet; RS, rotor; S, stator; WS working surfaces; VO, volute (outlet); AR, Adjusting ring; LD, locking device; P, pulley; PC, pedestal casting. (By courtesy of Premier Colloid Mills Ltd.)

รูปที่ 2.8 : เครื่องบดคอลลอยด์ความเร็วสูง

ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

สำหรับของเหลวที่มีความหนืดสูงนั้น มักนิยมใช้เครื่องบดที่เป็นแบบตัวหมุนที่หมุนในแกนตั้ง เรียกว่า เพสต์มิลล์ (paste mills) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ความเร็วที่อยู่ในช่วงระหว่าง 3000 รอบ/นาที่ สำหรับตัวหมุนขนาด 10 นิ้ว จนถึง 10000 รอบ/นาที่ สำหรับตัวหมุนขนาด 2.5 นิ้ว โดยที่ผลิตภัณฑ์สามารถออกจากเครื่องและการล้างเครื่องทำได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ยังมีการหุ้มด้วยฉนวนเพื่อควบคุมอุณหภูมิ อิมัลชันที่ได้จากเครื่องบดนี้ค่อนข้างละเอียดซึ่งให้เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของเฟสที่ไม่ต่อเนื่องถึง 1–2 μm แต่มีข้อเสียคือการที่อากาศเข้าไปในผลิตภัณฑ์มีผลทำให้การทำงานของเครื่องมีประสิทธิภาพน้อยลง



Top-feed "paste" colloid mill (diagrammatic). RS, rotor; S, stator; WS, working surfaces; VO, volute (outlet); AR, adjusting ring.

รูปที่ 2.9 : แผนภาพของเครื่องบดคอลลอยด์ชนิดเพสต์มิลล์ที่ติดตั้งบน

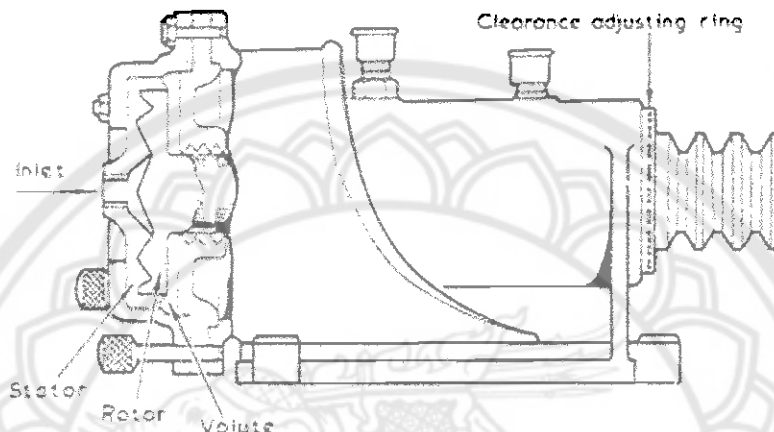
ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

นอกจากนี้ยังมีเครื่องบดบางชนิดที่ออกแบบมาให้ผิวที่อยู่นิ่งและผิวที่หมุนมีลักษณะที่หยักหรือคล้ายลูกฟูก ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งการออกแบบลักษณะลูกฟูกเช่นนี้ทำให้การทำอิมัลชันที่เค้นดำเนินต่อไปได้มากขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องภายใต้ความดันสูงถึง 100 psi และการเกิดอากาศในผลิตภัณฑ์จะมีน้อยที่สุด

โดยทั่วไปเครื่องบดคอลลอยด์มีข้อดีกว่าเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ความดันสูง เมื่อใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดสูง (มากกว่า 1.0 N.s/m²) ส่วนเครื่องโฮโมจีไนเซอร์เหมาะสำหรับสารที่มีความหนืดต่ำ (น้อยกว่า 1.0 N.s/m²)

2.10.4 เครื่องโฮโมจิไนเซอร์ชนิดอุลตราซอ닉 (ultrasonic homogenizers)

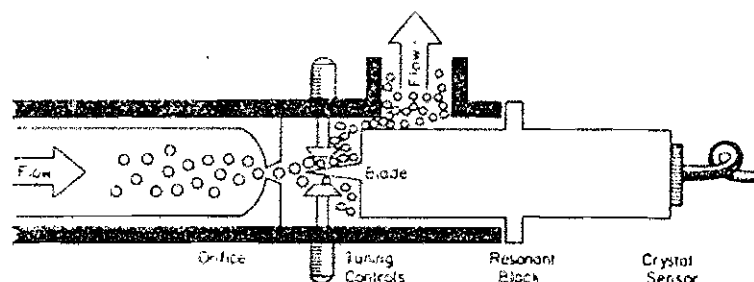
การใช้เครื่องอุลตราซอ닉 เช่น คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า (18–30 kHz) ซึ่งระดับความถี่ที่มนุษย์สามารถรับฟังได้ (16 MHz) เป็นวิธีหนึ่งในการกระจายของเหลวที่ไม่สามารถละลายเข้ากันได้กับของเหลวอีกชนิดหนึ่งเกิดเป็นอิมัลชันขึ้น คลื่นอุลตราซอนิคพลังงานสูงก่อให้เกิดวงจรสลับของแรงอัดและแรงดึงในของเหลวที่มีความหนืดต่ำ เพื่อให้เกิดอิมัลชันที่มีขนาดอนุภาค 1–2 μm



รูปที่ 2.10 : เครื่องบดคอลลอยด์ชนิดที่เป็นรอยหยัก

ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

ในทางปฏิบัติของเหลวที่เป็นเฟสที่ไม่ค่อเนื่องของอิมัลชัน จะถูกเติมเข้าไปในของเหลวที่เป็นเฟสต่อเนื่องแล้วของเหลวทั้งสองจะถูกบีบผ่านเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ที่ความดัน 340–1400 kPa พลังงานของอุลตราซอนิคเกิดจากใบพัดโลหะที่สั่นด้วยความถี่เรโซแนนท์ (resonant frequency) การสั่นอาจเกิดขึ้นทางไฟฟ้าหรือเกิดจากการเคลื่อนที่ของของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ความถี่นี้สามารถควบคุมได้ด้วยการปรับตำแหน่งที่ยึดใบพัด เครื่องโฮโมจิไนเซอร์ประเภทนี้ใช้ในการผลิตครีม สลัด ไอศกรีม เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ในการกระจายผงต่างๆ ในของเหลวด้วย



รูปที่ 2.11 : เครื่องโฮโมจิไนเซอร์ชนิดอุลตราซอนิค

ที่มา : Loncin และ Merson (1979)

2.11 ประสิทธิภาพของกระบวนการโฮโมจีไนเซชัน

(efficiency of homogenization process)

วิธีที่ดีที่สุดวิธีหนึ่งในการหาประสิทธิภาพของกระบวนการโฮโมจีไนเซชันคือ การตรวจสอบตัวอย่างผลิตภัณฑ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงๆ ประมาณ 1000 เท่า เพื่อสังเกตขนาดของเม็ดไขมันหรืออนุภาคซึ่งเป็นฟอสเฟตที่ไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้น และปริมาณของอนุภาคที่จับเป็นกลุ่ม เม็ดไขมันทั้งหมดควรแตกออกมากพอที่จะป้องกันการแยกชั้นของทั้งสองเฟสในผลิตภัณฑ์ และไม่ควรมีการเป็นกลุ่มของอนุภาคมากเกินไป ในกรณีการโฮโมจีไนเซชันของส่วนผสมของไอศกรีมจะพิจารณาว่าใช้ได้ต่อเมื่อประมาณ 85% ของอนุภาคเม็ดไขมันมีเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 2 μm วิธีการที่ใช้ในการหาคุณภาพของโฮโมจีไนเซชันคือ คำนีของฟาร์-รอลล์ (farrall index) ด้วยการหขนาดและการกระจายตัวของเม็ดไขมัน คำนีนี้ได้จากการนับจำนวนเม็ดไขมันที่มีขนาดมากกว่า 2 μm ในพื้นที่ที่กล้องจุลทรรศน์มาตรฐานขนาด 100 μm ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 1000 เท่า ค่าคำนีของฟาร์-รอลล์นี้ขึ้นกับปริมาณของเม็ดไขมันที่มีขนาดมากกว่า 2 μm ข้อดีของการใช้คำนีของฟาร์-รอลล์คือ เป็นวิธีที่รวดเร็วและค่อนข้างถูกต้อง มักใช้กับส่วนผสมของไอศกรีม นมข้นจืด อย่างไรก็ตาม ผู้ปฏิบัติงานในส่วนของโฮโมจีไนเซชันมักสามารถเรียนรู้และตัดสินใจได้ว่าผลของกระบวนการโฮโมจีไนเซชันดีหรือไม่จากลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์หรือตัดสินใจว่าเครื่องมือควรมีการปรับอย่างไร เช่น เพิ่มความดันของเครื่องโฮโมจีไนเซชันจากประสบการณ์การทำงาน

ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ความหนืดของครีมหรือส่วนผสมของไอศกรีมสูงมากเกินไป จะชี้ให้เห็นว่ามีการเกาะเป็นกลุ่ม (clustering) มากเกินไป ควรจะมีการลดความดัน หรือใช้เครื่องโฮโมจีไนเซชันที่เป็น 2 ชั้นก็ควรปรับวาล์วใหม่ นอกจากนี้ ความเป็นกรดของครีมที่มากเกินไปหรือสมดุลของเกลือที่ใช้ไม่เหมาะสมส่วนก่อให้เกิดการจับเป็นกลุ่มก้อนมากเกินไป

2.12 ผลของโฮโมจีไนเซชันต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์

(effect of homogenization on the changed quality of products)

2.12.1 ผลต่อการทำให้ไขมันกระจายตัว (effect on fat breakup and dispersion)

ตารางที่ 2.2 แสดงผลของความดันโฮโมจีไนเซชันต่อการแตกตัวของเม็ดไขมัน โดยทำการทดลองวัดขนาดของเม็ดไขมันในนมอุดมมันเนยหลังจากผ่านเครื่องโฮโมจีไนเซชันชนิดชั้นเดียว โดยใช้ความดันต่างๆ นม ครีม หรือไอศกรีมที่ผ่านการโฮโมจีไนเซชันพบว่า เม็ดไขมันสามารถอยู่ในสถานะต่างๆ กันดังนี้

- 1). เม็ดไขมันเดี่ยวๆ ไม่มีการเกาะติดกัน
- 2). เม็ดไขมันมากกว่า 2 อนุภาคมาเกาะติดกัน (cluster)
- 3). เม็ดไขมันที่มากกว่า 2 อนุภาคมารวมกันแน่นมากทำให้ลักษณะปรากฏของอนุภาคเดี่ยวหายไปเกือบหมด (clumps)
- 4). แต่ละอนุภาคของเม็ดไขมันไม่สามารถแยกออกจากกันได้ (churned or buttered particles)

ซึ่งในการกระจายตัวที่ไม่เหมาะสมก่อให้เกิดการเกาะติดกันของเม็ดไขมันที่มากเกินไปไม่ว่าจะเป็นแบบ clustering หรือ clumping หรือ buttering ซึ่งทำให้วัตถุประสงค์ของการโฮโมจีไนเซชันผิดพลาดได้ และอาจทำให้เกิดความหนืดมากเกินไปทำให้ผลิตภัณฑ์ขาดต่อการขนถ่ายโดยการปั๊มหรือขาดต่อการทำให้เย็นลง โดยความหนืดที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนของเม็ดไขมันและการดูดซับเอาเคซีนเข้าไปบนผิวของเม็ดไขมัน

เครื่องโฮโมจีไนเซอร์บางชนิดทำให้เม็ดไขมันแตกออกได้ดีมาก แต่การกระจายตัวไม่ดีทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มของเม็ดไขมัน เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ชนิดสองชั้นช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของการกระจายตัวของเม็ดไขมัน อย่างไรก็ตามเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ปัจจุบันมีการปรับปรุงให้มีการแตกและการกระจายตัวได้ดีโดยรวดเร็วเพียงขั้นเดียว การเกาะเป็นกลุ่มของเม็ดไขมันในผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ฟีนด์บัดเดอ์ หรือช็อคโกแลต อาจไม่มีปัญหาดังกล่าว แต่ในผลิตภัณฑ์พวกครีม ไอศกรีมและผลิตภัณฑ์นมปัญหาที่มีความสำคัญมาก

ตารางที่ 2.2 ผลของความดันของการโฮโมจีไนเซชันต่อการแตกของเม็ดไขมัน

ความดัน (lb)	ช่วงของขนาดเม็ดไขมัน (μm)	ขนาดของเม็ดไขมันเฉลี่ย (μm)
None	1 - 18	3.71
500	1 - 14	2.39
1000	1 - 7	1.68
1500	1 - 4	1.40
2000	1 - 3	1.08
2500	1 - 3	0.99
3000	0.5 - 2	0.76

ที่มา : Farrall (1963)

2.12.2 ผลต่อค่าเคิร์ดเทนชัน (effect on curd tension)

การโฮโมจีไนเซชันของน้ำนมภายใต้บางสภาวะ ที่มีผลอย่างมากต่อค่าเคิร์ดเทนชัน (curd tension) ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 เคิร์ดเทนชันของนมที่ผ่านการโฮโมจีไนเซชันดูเหมือนว่ามีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับระดับการแตกตัวของไขมัน จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเคิร์ดเทนชันจะมีค่าเท่ากันในเรื่องบางชนิดที่ทำงานที่ความดัน 2000 ปอนด์ และจากเครื่องที่ทำงานที่ความดัน 3000 ปอนด์ ถ้าการแตกตัวของไขมันเหมือนกันในเครื่องทั้งสอง อุณหภูมิของการโฮโมจีไนเซชันก็มีส่วนในการกำหนดค่าเคิร์ดเทนชัน โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่าให้ค่าเคิร์ดเทนชันที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 2.3 ผลของการโฮโมจีไนเซชันต่อค่าเคิร์ดเทนชันในหน่วยกรัม

(Grams of Curd Tension at Indicated Homogenizer pressure)¹

Product	0 lb	500 lb	1000 lb	2000 lb	3000 lb	4000 lb
Skim milk	70	66	67	70	73	63
30% cream	...	16	11	5
Regular 4% milk	53	40	33	29	26	23

ที่มา : *Farrall (1963)*

ตารางที่ 2.4 เคิร์ดเทนชันของนมที่ผ่านการโฮโมจีไนเซชัน

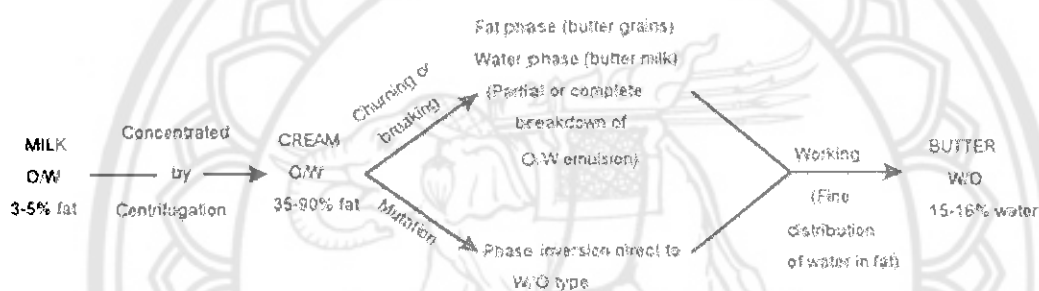
Pressure	Gram Curd Tension		
	Homogenization Temperature °F		
	145	120	90
None	51	59	60
500	74	58	58
1000	27	40	48
1500	22	32	39
2000	20	25	27
1500	18	26	23
3000	17	25	23

¹These data are from a conventional poppet-type homogenizer valve machine. Lower pressures required when the Creamery Package multiflow valve is used.

ที่มา : *Hall และคณะ (1971)*

2.12.3 ผลต่อความหนืดและลักษณะเนื้อสัมผัส (effect on viscosity and texture)

การเปลี่ยนครีมซึ่งเป็นอิมัลชันชนิด o/w ไปเป็นเนยซึ่งเป็นอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (w/o) ไม่สามารถทำให้เกิดอิมัลชันดังกล่าวขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ครีมจะถูกตีปั่น (churning) เพื่อให้อิมัลชันของ o/w แยกบางส่วน ในระหว่างนี้อากาศจะเข้าร่วมด้วยทำให้เกิดลักษณะคล้ายโฟม (เป็นระบบคอลลอยด์ที่มีของเหลวเป็นเฟสที่ต่อเนื่องและแก๊สเป็นเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง) น้ำมันจะออกมาจากเม็ดไขมันมาที่ผิวของฟองอากาศแล้วรวมเป็นกลุ่มเม็ดไขมันเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเกรนของเนย (butter 'grain') จากนั้นจึงตีด้วยความเร็วต่ำเพื่อกระจายน้ำเป็นอนุภาคเล็กๆ จนหัวของผสมและเพื่อทำลายเม็ดไขมันใดๆ ที่อาจหลงเหลืออยู่ในครีม ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะมีเฟสที่ต่อเนื่องของไขมัน 85% ซึ่งประกอบด้วยโกลบูลและเปลือกของไขมันกับฟองอากาศ ส่วนเฟสที่ไม่ต่อเนื่องอีก 15% ประกอบด้วยอนุภาคของน้ำและนมเนย (buttermilk) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 : การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอิมัลชันระหว่างการทำเนย
ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

2.12.4 ผลต่อสี กลิ่น รส คุณค่าทางอาหารและอายุการเก็บ

(effect on color, flavor, nutrition and shelf-life)

การโฮโมจิไนเซชันมีผลต่อสีของอาหารบางชนิด เช่น ในน้ำมัน ยังมีจำนวนของเม็ดไขมันมากจะทำให้เกิดการสะท้อนแสง ทำให้มีสีขาวมากขึ้น กลิ่นรสอาจจะดีขึ้นในอาหารบางชนิดเนื่องจากการทำให้สารประกอบที่ระเหยง่ายเหล่านี้กระจายทั่วอาหาร ทำให้มีการสัมผัสกับตัวรับรสมากขึ้น ขณะที่รับประทานอาหาร คุณค่าทางอาหารจะเปลี่ยนไปเมื่อองค์ประกอบบางชนิดถูกแยกออกไป เช่น ในการทำเนยดังแสดงในตารางที่ 2.5 แต่ในกรณีของอาหารเด็กทารก อาจเป็นการเพิ่มความสามารถในการย่อยของไขมันและโปรตีนเนื่องจากการลดขนาด ส่วนคุณค่าทางอาหารขึ้นอยู่กับสูตรของอาหารไม่ขึ้นกับการทำอาหารเป็นเนื้อเดียวกัน



สำนักหอสมุด

ผลของการทำให้เป็นสารเนื้อเดียวกัน และสารอิมัลซิไฟเออร์ทำให้อาหารคงตัวและมีลักษณะปรากฏที่สม่ำเสมอและป้องกันการแยก แต่ไม่ใช่การถนอมอาหาร หน่วยปฏิบัติการที่เพิ่มเข้ามา เช่น การทำให้เย็น การแช่แข็ง และการอบ จึงมีความจำเป็นสำหรับการยืดอายุการเก็บของอาหาร

22 ส.ย. 2552
TP
373
ก279ด
2551.

ตารางที่ 2.5 ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อคุณภาพทางอาหารในการทำเนย

1,452,0726

Nutrient (per 100g food)	Amount in the following	
	Ceram (double)	Butter (salted)
Water (g)	48	15.4
Protein (g)	1.5	0.4
Fat (g)	48	82
Carbohydrate (g)	2.0	0
Energy (kJ)	1850	3040
Vitamin A (µg)	430	730
Vitamin D (µg)	0.28	0.50
Thiamin (µg)	20	0
Riboflavin (µg)	80	0

ที่มา : คัดแปลงจาก Roll (1982)

2.13 การผสม (mixing)

การผสมเป็นหน่วยปฏิบัติการชนิดหนึ่งเพื่อทำการผสมให้ได้ของผสมที่มีการกระจายตัวขององค์ประกอบตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปอย่างสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน โดยการกระจายตัวขององค์ประกอบหนึ่งเข้าไปยังองค์ประกอบอื่น การผสมไม่มีผลต่อการถนอมอาหาร เป็นเพียงกระบวนการช่วยการแปรรูป (processing aids) หรือปรับปรุงคุณภาพของการบริโภค (eating quality) ในอาหาร กระบวนการนี้มีการใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะในการผสมองค์ประกอบต่างๆ ให้มีคุณสมบัติทางฟังก์ชันแตกต่างกันหรือมีคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสแตกต่างกัน ในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์และเครื่องกลขนาดบางชนิดก็พบว่ามีส่วนทำหน้าที่ของการผสมด้วย

2.13.1 ลักษณะของผสมและวัตถุประสงค์ของการผสม

(characteristics of mixtures and purposes of mixing)

กระบวนการผสมเริ่มจากองค์ประกอบต่างๆ ซึ่งเป็นองค์ประกอบบริสุทธิ์หรืออยู่และองค์ประกอบเหล่านี้จะแยกกันอยู่ในภาชนะต่างๆ เมื่อการผสมเกิดขึ้นและดำเนินต่อไป ตัวอย่างของการผสมจะมีองค์ประกอบในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับสัดส่วนขององค์ประกอบทั้งหมดในภาชนะ การผสมที่สมบูรณ์จะนิยามว่าเป็นสถานะที่ทุกตัวอย่างที่สุ่มมาจากภาชนะที่ทำการผสมจะมีองค์ประกอบต่างๆ ในสัดส่วนที่เหมือนกันกับของผสมทั้งหมด

การผสมของสารสามารถแบ่งออกได้ 5 ประเภท ดังนี้

- 1). การผสมของของแข็งกับของแข็ง เช่น อาหารเด็กอ่อน อาหารสัตว์
- 2). การผสมของของแข็งกับของเหลว เช่น นมคั้นรูป น้ำเชื่อม
- 3). การผสมของของเหลวกับของเหลว เช่น มายองเนสเป็นตัวอย่างของการผสมระหว่างน้ำกับน้ำมัน
- 4). การผสมของแก๊สกับของเหลว เช่น น้ำโซดา ซึ่งเกิดจากการผสมแก๊ส
- 5). การผสมของแก๊สและของแข็ง เช่น นมผงอัดด้วยแก๊สไนโตรเจน

วัตถุประสงค์ของการผสมในอุตสาหกรรมอาหาร คือ

- 1). เพื่อให้องค์ประกอบต่างๆ ทำปฏิกิริยาเคมีได้อย่างสม่ำเสมอ เมื่อรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ถ้าของผสมนั้นสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีต่อกัน เช่น การย่อยแป้งด้วยเอนไซม์
- 2). เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารที่นำมาผสม เช่น การผสมน้ำตาลกับเกลือ เพื่อให้เกิดรสชาติรวมที่มีความหวานนำและความเค็มเป็นรอง ทำให้รสชาติที่ได้มีความกลมกล่อม
- 3). เพื่อช่วยคลุกเคล้าให้ของผสมเป็นเนื้อเดียวกันและมีคุณลักษณะองค์ประกอบตามที่ต้องการ
- 4). เพื่อผสมอนุภาคของของแข็งต่างๆ ให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ หรือสะดวกในการใช้ เช่น การทำส่วนผสมของแป้งสำเร็จรูปในการทำแพนเค้ก เป็นต้น
- 5). เพื่อผสมของเหลวต่างๆ ที่ไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้ ให้เกิดอิมัลชันขึ้น เช่น การโฮโมจีไนเซชันน้ำมัน
- 6). เพื่อกระจายแก๊สเข้าไปในของเหลว
- 7). เพื่อเร่งการถ่ายเทความร้อนระหว่างของเหลวกับคอลล์หรือแจ็กเก็ตที่หุ้มอยู่

2.13.2 ศัพท์ที่ใช้ในการผสม (mixing terms)

- 1). **Mixing** เป็นศัพท์รวมที่ใช้กับการผสมทุกรูปแบบ
- 2). **Blending** เป็นศัพท์ที่มีความหมายทั่วไปเกี่ยวกับการผสม มีความหมายถึงการผสมวัตถุทุกชนิดให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว หรือให้มีความกลมกลืนกันอย่างสม่ำเสมอ การผสมดังกล่าวอาจเป็นการผสมของแข็งกับของแข็ง ของแข็งกับของเหลว และของเหลวกับของเหลว
- 3). **Agitating** หมายถึง การคน การควน เป็นการผสมด้วยใบพาย แท่งควน ใบพัด เพื่อช่วยคลุกเคล้าของผสมให้ผสมกันเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ช่วยกระจายของผสมให้คลุกเคล้ากันอย่างสม่ำเสมอ การใช้แรงคั่นลมจากคอมเพรสเซอร์หรือจากปั๊มก็เกิดลักษณะการคนหรือการควนได้ด้วย
- 4). **Kneading** มีความหมายถึง การนวด เป็นการผสมของของแข็งกับของเหลวซึ่งมีความเหนียวมาก เช่น การผสมน้ำกับแป้งสาลี จะได้ของผสมที่มีความเหนียวเพิ่มขึ้นที่เรียกว่าโด (dough) การนวดจะช่วยให้น้ำกระจายตัวรวมกับแป้งได้อย่างสม่ำเสมอและการนวดก้อนแป้งของโดระหว่างการหมักจะทำให้เกิดกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมออีกด้วย
- 5). **Whipping** เป็นการผสมอีกรูปแบบหนึ่งโดยวิธีการตีหรือปั่นด้วยความเร็วสูงทำให้อากาศเข้าแทรกกับของเหลวหรือของแข็งกึ่งของเหลวทำให้ของเหลวหรือของแข็งกึ่งเหลวนั้นขึ้นฟู เช่นการตีไข่ให้ขึ้นฟู การตีบั้นเนยให้ขึ้นฟู
- 6). **Beating** เป็นลักษณะการผสมอีกแบบหนึ่งโดยการตี นิยมใช้เทอมนี้กับการผสมผลิตภัณฑ์เนื้อ เช่น การทำลูกชิ้นเนื้อ ลูกชิ้นปลา การตีจะทำให้เนื้อเยื่อเซลล์ละเอียดและเกาะตัวกันแน่นขึ้น มีความเหนียวเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมส่วนผสมอื่นลงไป จะได้ของผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยเฉพาะการรวมตัวของน้ำกับเนื้อเยื่อ ผลิตภัณฑ์ได้กรอบบางชนิดที่มีการผสมน้ำแข็งจำนวนมากเพื่อเพิ่มปริมาตรก็จำเป็นต้องผ่านการผสมในลักษณะนี้
- 7). **Rolling** เป็นลักษณะการผสมอีกแบบหนึ่งใช้กับผลิตภัณฑ์บางชนิดที่วัตถุดิบมีปริมาณน้ำมันเป็นองค์ประกอบสูง เช่น ถั่วลิสง งา การผสมโดยวิธีทั่วไปทำได้ยากจำเป็นต้องใช้ระบบการโรลลิ่งช่วย เช่น การผสมส่วนผสมในการทำพินต์บัตเตอร์ เป็นต้น
- 8). **Homogenizing** เป็นการผสมอีกลักษณะหนึ่ง ที่ใช้ผสมของเหลวกับของเหลวที่ไม่อาจผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น น้ำมันในนมสด น้ำในน้ำมันของผลิตภัณฑ์มายองเนส การผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเกิดขึ้นโดยใช้แรงอัดผ่านช่องเปิดเล็กมาก เพื่อให้ขนาดของอนุภาคของแข็งหรือของเหลวแตกตัวและอนุภาคมีขนาดเล็กลง
- 9). **Extruding** เป็นการผสมอีกลักษณะหนึ่งที่มีแหล่งของความร้อนช่วยให้อาหารสุกพร้อมทั้งคลุกเคล้าให้ของผสมรวมตัวกันเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นวิธีการที่ใช้ผสมของแข็งกับของแข็ง เช่น แป้งข้าวเจ้ากับแป้งถั่วเหลือง เพื่อทำอาหารเด็กก่อน

2.13.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผสม (factors on the mixing)

เนื่องจากประเภทของการผสมแตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลต่อการผสมจึงแตกต่างกัน ดังนั้นจึงแยกปัจจัยตามประเภทของการผสมออกได้ดังนี้

2.13.3.1 การผสมของแข็งกับของแข็ง (solid-solid mixing)

การผสมของของแข็งกับของแข็ง จะเป็นการผสมของแข็งที่อยู่ในรูปแบบอนุภาคคือ มีขนาดเล็กกว่า 30 เมส ถึง 100 เมส และอนุภาคที่อยู่ในรูปผงคือ มีอนุภาคเล็กกว่า 100 เมส การผสมของแข็งกับของแข็ง ต้องพิจารณาปัจจัยดังต่อไปนี้

1). ขนาดอนุภาคของของแข็ง ของแข็งที่จะนำมาผสมกัน ควรบดให้มีขนาดเล็ก และร่อนผ่านตะแกรงให้มีช่วงของขนาดอนุภาคให้ใกล้เคียงกัน การผสมจะกระทำได้ง่ายและผสมกันเป็นเนื้อเดียวกัน ทั้งนี้เพราะของแข็งที่มีอนุภาคใหญ่มักจะแยกตัว เนื่องจากแรงสั่นสะเทือนจะทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ไหลลงสู่ด้านล่าง

2). ความหนาแน่นของสารองค์ประกอบ ที่จะผสมกันหากมีความหนาแน่นเท่ากัน หรือใกล้เคียงกันจะผสมกันได้ง่ายกว่าองค์ประกอบที่มีความหนาแน่นต่างกัน เพราะองค์ประกอบที่มีความหนาแน่นสูงจะมีน้ำหนักมากกว่าองค์ประกอบที่มีความหนาแน่นต่ำ

3). ความหนาแน่นสัมพัทธ์ เป็นอัตราส่วนความหนาแน่นของของผสมระหว่างองค์ประกอบที่มีความหนาแน่นต่ำกับองค์ประกอบที่มีความหนาแน่นสูง ของผสมใดที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์เกินกว่า 90% จะผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ง่าย

4). ลักษณะของขนาดและรูปร่าง องค์ประกอบต่างๆ ที่นำมาผสมกัน ควรมีลักษณะและรูปร่างเหมือนกันหรือใกล้เคียงกัน โดยทั่วไปแล้วสารที่นำมาผสมจะต้องเป็นอนุภาคทรงกลมและมีขนาดเล็ก ถ้าองค์ประกอบใดมีรูปร่างแตกต่างกันจะผสมให้กลมกลืนกันได้ยาก โดยเฉพาะรูปร่างกลมจะเคลื่อนที่ได้ง่าย และพยายามแยกตัวตกลงมาด้านล่าง ดังนั้นลักษณะรูปร่างจึงเกี่ยวข้องกับไหลของสาร

5). แรงยึดเหนี่ยวของสาร สารแต่ละชนิดจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคแตกต่างกัน สารใดมีแรงยึดเหนี่ยวสูงจะผสมให้เข้าเป็นสารเนื้อเดียวกันได้ยาก จึงจำเป็นต้องทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่เกาะกันให้แยกออกจากกันก่อน โดยใช้แรงปั่นหรือควนหรือคน ถ้าไม่แยกอนุภาคที่เกาะติดกันเสียก่อน การผสมจะดำเนินไปได้ยากและไม่อาจผสมให้สม่ำเสมอได้ โดยเฉพาะสารที่ดูดความชื้นได้ง่าย (hygroscopic material) จะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสูง แรงยึดเหนี่ยวของสารอาจเกิดจากความแตกต่างของประจุ ก่อให้เกิดแรงเหนี่ยวนำ เป็นผลทำให้อนุภาครวมตัวกันได้

6). อัตราส่วนที่ผสม ถ้าสารแต่ละชนิดมีสัดส่วนของปริมาณที่จะนำมาผสมใกล้เคียงกัน จะผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ง่าย โดยการควบคุมปริมาณของสารแต่ละชนิดให้นำมาผสมพร้อมๆ กันและจำนวนเท่าๆ กัน อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณของสารชนิดหนึ่งมากกว่าหรือน้อยกว่าสารอีกชนิดหนึ่งใน

อัตราส่วนที่แตกต่างกันมาก เช่น การผสมวิตามินในอาหาร ปริมาณวิตามินที่ผสมจะมีจำนวนเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวัตถุดิบอื่นๆ การที่จะผสมให้ได้องค์ประกอบที่สม่ำเสมอได้จะต้องใช้เครื่องมือที่เหมาะสมและเลือกเทคนิคการผสมที่เหมาะสมด้วย

2.13.3.2 การผสมของแข็งกับของเหลว (solid-liquid mixing)

ปัจจัยที่มีผลต่อการผสมของแข็งกับของเหลว คือ

1). ความสามารถในการละลายน้ำ เมื่อของแข็งละลายตัวได้ดีในของเหลว การผสมสามารถกระทำได้ง่ายเมื่ออนุภาคของแข็งมีขนาดเล็ก โดยการผสมจะกระทำได้รวดเร็วมีประสิทธิภาพมากขึ้น เมื่อมีการกวน การคนหรือการปั่น ของแข็งบางชนิดจะละลายตัวได้ เมื่อของเหลวมีอุณหภูมิสูงขึ้น เช่น การผสมแป้งกับน้ำ การผสมเจลาตินกับน้ำ

2). ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของสารที่ผสม เมื่อของแข็งไม่ละลายในของเหลวหรือของแข็งละลายได้เพียงบางส่วน ของแข็งจะตกตะกอนนอนกันที่ด้านล่างเนื่องจากของแข็งมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าของเหลว ถ้าของแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้เกิดการแยกชั้นได้เร็วขึ้น ดังนั้น ของแข็งควรมีขนาดของอนุภาคเล็ก เพื่อให้การกระจายตัวของของแข็งในของเหลวสม่ำเสมอ การกวน การคน และการปั่นจะช่วยให้ของแข็งกระจายตัวในของเหลวได้ดีขึ้นและช่วยแก้ปัญหาการตกตะกอนของของแข็งและการแยกชั้น

3). ความหนืดของของเหลว การเพิ่มความหนืดของของเหลวให้สูงขึ้น เป็นวิธีที่ทำให้ของแข็งที่ไม่ละลายในของเหลวผสมกันได้ดีขึ้น โดยเติมสารบางชนิดที่เพิ่มความหนืดของของเหลว เช่น การเพิ่มความหนืดของน้ำซึ่งเป็นของเหลว โดยการเติมเพกทิน เจลาติน guar หรือสารคงตัว (stabilizers) อื่นๆ นอกจากนี้การเติมสารที่มีประจุไฟฟ้าตรงข้ามกับอนุภาคของของแข็งจะทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวช่วยไม่ให้ของแข็งแยกตัวจากของเหลว

2.13.3.3 การผสมของเหลวกับของเหลว (liquid-liquid mixing)

ของเหลวแต่ละชนิดที่นำมาผสมกันมักมีคุณสมบัติการไหลแตกต่างกัน ของเหลวอาจเป็นของไหลชนิดนิวโตเนียน (Newtonian fluid : คุณสมบัติของของเหลวนี้เมื่อนำค่า stress และ shear rate มาสร้างกราฟจะให้ความชันของกราฟเป็นค่าคงที่ซึ่งเท่ากับความหนืดของของเหลวตัวเอง) หรืออาจเป็นของไหลที่มีคุณสมบัติเป็นนอนนิวโตเนียน ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการผสมของเหลวกับของเหลว คือ

1). ความสามารถในการละลายของของเหลวที่ผสมกัน สามารถละลายเข้ากันได้หรือรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ เช่น การผสมแอลกอฮอล์กับน้ำ การผสมน้ำมันรำกับน้ำมันถั่วลิสง การผสมของเหลวประเภทนี้จะทำได้ง่ายเพียงใช้เครื่องประเภทกวน คน หรือปั่นเข้าช่วยในการผสม

2). ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของของเหลวที่ผสม ซึ่งอาจไม่รวมตัวกัน เนื่องจากมีความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยของเหลวที่มีความหนาแน่นต่ำจะอยู่ด้านบน เช่น การผสมน้ำมันกับน้ำนม ส่วนที่เป็นครีมซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่าจะลอยขึ้นด้านบน การผสมของเหลวประเภทนี้กระทำได้ง่าย จำเป็นต้องใช้สารอิมัลซิไฟอิงช่วย โดยใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์เข้าช่วยภายใต้การควบคุมแรงอัดและอุณหภูมิขณะที่ผสม

2.13.4 ทฤษฎีของการผสมของแข็ง (theory of solid mixing)

ในทางตรงกันข้ามกับของเหลวหรือเพสต์ (paste) ที่มีความหนืด การผสมของของแข็งกับผงของแข็งที่แห้งให้มีความสม่ำเสมออย่างสมบูรณ์นั้นทำได้ยาก ระดับของการผสมจะขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวมาแล้วใน 2.13.3.1 โดยทั่วไป สารที่มีขนาด รูปร่างและความหนาแน่นใกล้เคียงกันมากกว่าสามารถผสมให้เป็นของผสม ที่มีความสม่ำเสมอมากกว่า ในระหว่างการผสมความแตกต่างของคุณสมบัติเหล่านี้มีผลให้เกิดส่วนขององค์ประกอบที่ไม่มีการผสมเกิดขึ้น ความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์สุดท้ายจึงขึ้นกับสมดุลที่ได้ระหว่างกลไกของการผสมและการไม่ผสม ซึ่งขึ้นกับชนิดของเครื่องผสม สถานะการปฏิบัติงาน และอาหารที่เป็นองค์ประกอบ

2.13.4.1 การวัดการผสม (measurement of mixing)

ในงานทางด้านอุตสาหกรรมอาหารที่เกี่ยวข้องกับการผสม ระดับของความสม่ำเสมอของผสมเป็นสิ่งที่ได้รับ ความสนใจมากที่สุด เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างสถานะการผสมและผลของการผสมที่ได้ จึงจำเป็นต้องคำนวณหาคุณภาพของการผสม ซึ่งวิธีการประมาณระดับความสม่ำเสมอที่ง่ายที่สุดวิธีหนึ่ง คือ การตรวจสอบสัดส่วนขององค์ประกอบในของผสมจากแต่ละเข็ชของตัวอย่างที่สุ่มขึ้นมาหลังการผสมผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การประมาณดังกล่าวจำเป็นต้องวิเคราะห์จากมวลซึ่งทำการสุ่มโดยมวลมีค่าคงที่ที่กำหนดไว้ค่าหนึ่ง และระดับของความไม่สม่ำเสมอแสดงได้โดยใช้ค่าวาเรียนซ์หรือค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ถ้าของผสมที่มี 2 องค์ประกอบถูกสุ่มขึ้นมาในตอนเริ่มต้นของการผสม (ในสถานะที่ยังไม่มีการผสมเกิดขึ้น) ตัวอย่างส่วนใหญ่ที่สุ่มขึ้นมาจะประกอบด้วยองค์ประกอบตัวหนึ่งเท่านั้นเมื่อการผสมดำเนินต่อไป องค์ประกอบของแต่ละตัวอย่างที่สุ่มขึ้นมา นั้น จะเริ่มมีความสม่ำเสมอและเข้าใกล้องค์ประกอบเฉลี่ยของของผสมมากขึ้น ซึ่งวิธีหนึ่งในการหาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบ คือ การคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละสัดส่วนในตัวอย่างหลายๆครั้งนั่นเอง

เมื่อทำการผสมของผสมอย่างคืดแล้ว ตัวอย่างของสารจะถูกสุ่มในปริมาณเล็กน้อยเพื่อทำการวัดระดับการผสมที่เกิดขึ้น โดยองค์ประกอบต่างๆ ของตัวอย่างจะเคลื่อนจากสถานะเริ่มต้นไปยังสถานะที่การผสมเกิดขึ้นและการวัดระดับการผสมจะแสดงถึงสิ่งเปลี่ยนแปลงเหล่านี้

ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ขนาดของตัวอย่างที่เลือกควรเป็นเท่าไร เมื่อพิจารณากรณีที่เป็นปลายสุดคือ ถ้าตัวอย่างมีขนาดใหญ่ เช่น ถ้าเป็นส่วนผสมทั้งหมดแล้ว องค์ประกอบของตัวอย่างที่ได้จะเป็นองค์ประกอบเฉลี่ยและไม่จำเป็นต้องมีการผสมอีกต่อไป ในทางตรงกันข้าม ถ้าเราสุ่มตัวอย่างเล็กขนาดโมเลกุลแล้วทุกๆ ตัวอย่างที่สุ่ม จะเป็นเพียงองค์ประกอบหนึ่งหรือเป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบในลักษณะที่เป็นสภาวะบริสุทธิ์ และจะไม่มีส่วนผสมที่ทำให้เกิดความแตกต่าง ดังนั้น ขนาดของตัวอย่างที่สุ่มขึ้นมาที่อยู่ระหว่างขนาดของตัวอย่างทั้งสองดังกล่าวนี้จึงเป็นขนาดของตัวอย่างที่เป็นไปได้ทั้งหมด แต่จุดที่สำคัญที่สุดคือ ผลการวิเคราะห์ที่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวอย่างที่ทำการสุ่ม

ในกระบวนการผสมทางอุตสาหกรรมนั้นขนาดของตัวที่เหมาะสม จะกำหนดโดยสภาวะของกระบวนการหรือข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ เช่น เกลือที่ใช้ในอาหารต้องมี $MgCO_3$ 1% ดังนั้นการเติม $MgCO_3$ 10 kg ลงในเกลือ NaCl 990 kg ก็จะมีคุณสมบัติของเกลือที่ต้องการอย่างไรก็ตาม ถ้าเกลือถูกจำหน่ายในลักษณะถุงขนาด 2 kg และในสภาวะที่การผสมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จะต้องมี $MgCO_3$ 20 กรัมในแต่ละถุง ดังนั้นขนาดของตัวอย่างที่สุ่มควรเป็น 2 kg จากของผสม 1000 kg และเมื่อทำการผสมต่อไปเรื่อยๆ ของผสมจะมีแนวโน้มเป็นสัดส่วน NaCl 99% และ $MgCO_3$ 1%

ดังนั้นค่าความเบี่ยงเบนขององค์ประกอบของตัวอย่าง จากองค์ประกอบเฉลี่ยของของผสมทั้งหมดแสดงถึงการวัดระดับความสม่ำเสมอของกระบวนการผสม ซึ่งความแตกต่างนี้จะลดลงเมื่อทำการผสมต่อไป วิธีการวัดค่าความแตกต่างนี้ จะใช้ค่าทางสถิติที่เรียกว่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้กับค่าเฉลี่ย ดังนี้

$$S^2 = \frac{1}{n} [(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2] \quad (2.8)$$

โดยที่ s = ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)

S^2 = วาเรียนซ์ (variance)

N = จำนวนตัวอย่างที่สุ่มขึ้นในแต่ละครั้ง

x_1, x_2, \dots, x_n = สัดส่วนขององค์ประกอบของ x ในตัวอย่างที่ 1, 2, ..., n

\bar{X} = สัดส่วนขององค์ประกอบเฉลี่ยขององค์ประกอบ x ในของผสมทั้งหมด

ค่า s สามารถคำนวณจากองค์ประกอบของตัวอย่างที่ทำการสุ่มและวัดโดยใช้สมการที่ (2.8)

โดยสุ่ม n ตัวอย่างที่บางขั้นของกระบวนการผสม ในบางครั้งการใช้ s^2 จะสะดวกกว่า

2.13.4.2 การผสมอนุภาค (particle mixing)

เมื่ออนุภาคต่างๆ นำมาผสมเข้าด้วยกัน จะเริ่มจากการเป็นกลุ่มของแต่ละองค์ประกอบที่แยกกัน แล้วจับตัวขององค์ประกอบต่างๆ ที่กระจายกันอยู่อย่างสุ่ม ค่าความแปรปรวนขององค์ประกอบของตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบเฉลี่ยของตัวอย่าง

เมื่อพิจารณาของผสมที่มีสององค์ประกอบที่ประกอบด้วยสัดส่วน p ขององค์ประกอบ P และสัดส่วน q ขององค์ประกอบ Q ในสถานะที่ยังไม่มีการผสมเกิดขึ้น ตัวอย่างขนาดเล็กที่สุ่มทั้งหมดจะประกอบด้วยองค์ประกอบบริสุทธิ์ของ P และ Q แต่ถ้าตัวอย่างที่สุ่มขึ้นมาใหญ่มาจากสัดส่วนทั้งหมด ทำให้คาดได้ว่าสัดส่วน p ของตัวอย่างอาจมีองค์ประกอบบริสุทธิ์ของ P และค่าเบี่ยงเบนขององค์ประกอบเฉลี่ยจะเป็น $(1-p)$ เมื่อตัวอย่างซึ่งมีองค์ประกอบบริสุทธิ์ของ P จะมีสัดส่วนขององค์ประกอบของ P เป็น 1 ในทำนองเดียวกัน สัดส่วน q ของตัวอย่างอาจเป็นองค์ประกอบบริสุทธิ์ของ Q และมีองค์ประกอบที่เป็นสัดส่วนเท่ากับ 0 ในเทอมขององค์ประกอบ P และมีค่าเบี่ยงเบนเป็น $(0-p)$ จากค่าเฉลี่ย เมื่อรวมค่าเหล่านี้ในเทอมขององค์ประกอบที่เป็นสัดส่วนขององค์ประกอบ P และค่า $p+q = 1$ จะได้ค่าความแปรปรวน ณ สถานะที่ยังไม่มีการผสมเกิดขึ้น (เวลาของการผสมเท่ากับ 0)

$$s_0^2 = \frac{1}{n} [pn(1-p)^2 + (1-p)n(0-p)^2] \quad \text{สำหรับ } n \text{ ตัวอย่าง}$$

$$s_0^2 = p(1-p) \quad (2.9)$$

เมื่อของผสมมีการกระจายกันอย่างทั่วถึงองค์ประกอบต่างๆ จะกระจายทั่วปริมาณตามสัดส่วนทั้งหมดของแต่ละองค์ประกอบ ความน่าจะเป็นที่อนุภาคใดๆ ที่สุ่มตัวอย่างขึ้นมาจะเป็นองค์ประกอบ Q เป็น q และ $(1-q)$ เมื่อไม่ใช่ Q เมื่อตัวอย่างมี N อนุภาค จากทฤษฎีความน่าจะเป็นจะได้

$$s_r^2 = \frac{p(1-p)}{N} = \frac{s_0^2}{N} \quad (2.10)$$

โดยสมมติให้ทุกอนุภาคมีขนาดเท่ากัน และแต่ละอนุภาคเป็นสารบริสุทธิ์ P หรือ Q เช่น การผสมของอนุภาคที่มีขนาดเท่ากันของน้ำตาลและนมผง เป็นต้น ตัวห้อย 0 และ r ใช้แทนค่าเริ่มต้นและค่าที่สุ่มของ s^2

เมื่อพิจารณาสมการ (2.9) และ (2.10) จะเห็นได้ว่า ในกระบวนการผสมค่า s^2 ลดลงจาก $p(1-p)$ ไปเป็น $1/N$ ของค่านี้ ดังนั้นค่าต่างๆ ที่อยู่ระหว่าง s_0^2 และ s_r^2 จะใช้อธิบายความก้าวหน้าของการผสม โดยใช้ค่าดัชนีของการผสม (M) ดังนี้

$$(M) = \frac{(s_0^2 - s^2)}{(s_0^2 - s_r^2)} \quad (2.11)$$

ในระหว่างกระบวนการผสม ค่า (M) จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 การวัดลักษณะนี้สามารถใช้ได้กับของผสมของอนุภาคและของผสมของเฟสค์

การผสมที่กล่าวมาแล้วเป็นการผสมที่อนุภาคขององค์ประกอบต่างๆ ที่มีขนาดเท่ากัน แต่ในความเป็นจริง การผสมของอนุภาคต่างๆ มักมีขนาดที่แตกต่างกันมากไม่ว่าจะเป็นขนาดหรือความหนาแน่น เนื่องจากมีแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อเครื่องผสมซึ่งมีแนวโน้มที่จะแยกอนุภาคต่างๆ ออกเป็นช่วงของขนาดและความหนาแน่นต่างๆ ในกรณีเช่นนี้ การผสมในช่วงแรกอาจเป็นลักษณะที่ไม่มีการผสมเกิดขึ้นและเวลาของการผสมจึงค่อนข้างที่จะสำคัญมาก

นอกจากนี้ ปริมาณหรือสัดส่วนขององค์ประกอบต่างๆ ที่มาผสมกันก็มีผลต่อกระบวนการผสมด้วย เมื่อปริมาณที่มาผสมกันมีสัดส่วนประมาณว่าเท่ากัน การผสมจะเป็นแบบที่ง่ายที่สุด แต่ในกรณีที่ต้องการผสมองค์ประกอบหนึ่งที่มีปริมาณน้อยมากเข้าไปในองค์ประกอบอื่นๆ ที่มีปริมาณมากกว่ามาก โดยผสมให้สม่ำเสมอ เช่น การผสมวิตามินลงในผงธัญชาติ วิธีที่ดีที่สุด คือ แบ่งการผสมออกเป็นขั้นๆ และให้สัดส่วนขององค์ประกอบในแต่ละขั้นไม่แตกต่างกันมากนัก ในการวางแผนกระบวนการผสม จำเป็นต้องวิเคราะห์ผลของการผสมในแต่ละขั้น แต่เมื่อกำหนดเวลาของการผสมได้แล้ว ก็เพียงตรวจสอบและวิเคราะห์ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายเท่านั้น

2.13.4.3 อัตราการผสม (rate of mixing)

เมื่อเลือกการวัดการผสมที่เหมาะสมได้แล้ว ก็สามารถหาอัตราการผสมได้โดยสมมติว่าดัชนีของการผสมควรจะเป็นค่าที่อัตราการผสมที่เวลาใดๆ (ภายใต้สภาวะการทำงานคงที่ เช่น เครื่องผสมทำงานที่ความเร็วคงที่) ควรเป็นสัดส่วนกับระดับของการผสมที่เหลือซึ่งต้องกระทำอีก ณ เวลานั้น นั่นคือ

$$\frac{d(M)}{dY} = k[1 - (M)] \quad (2.12)$$

เมื่อ $(M) =$ ดัชนีการผสม

$k =$ ค่าคงที่

และเมื่ออินทิเกรตจาก $Y = 0$ ถึง $Y = Y$ และ (M) จาก 0 ถึง (M)

$$[(1-(M))] = e^{-kY}$$

หรือ $(M) = 1 - e^{-kY}$ (2.13)

ค่าคงที่ K ขึ้นกับเครื่องผสมและสภาวะการผสมจากสมการที่ (2.13) ซึ่งสามารถใช้ในการหาเวลาที่ต้องใช้ในการผสมเพื่อให้ได้ระดับการผสมที่ต้องการได้

ในเครื่องผสมบางชนิดอาจต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่ง เช่น ในการผสมของแข็งที่เหนียว ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีความเกี่ยวข้องระหว่างพลังงานที่ใช้กับความก้าวหน้าของการผสม อย่างไรก็ตาม ในเครื่องผสมที่มีการออกแบบมาอย่างดี พลังงานที่ต้องป้อนเข้าสู่เครื่องจะสัมพันธ์กับความก้าวหน้าของการผสม แม้ว่าความสัมพันธ์ที่แท้จริงจะต้องหาจากการทดลองก็ตาม เช่น ในการผสมโคของแป้งที่ใช้เครื่องผสมความเร็วสูง พลังงานที่ใช้ที่เวลาใดๆ สามารถใช้หาเวลาของการผสมที่ต้องการได้ ขณะที่การผสมเกิดขึ้นร่วมกับปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การออกซิเดชันของแป้งระหว่างการผสมทำให้ความต้านทานต่อการเฉือนที่เกิดจากการผสมเพิ่มขึ้น มีผลทำให้กำลังที่ต้องใช้ในการเดินเครื่องผสมเพิ่มขึ้น

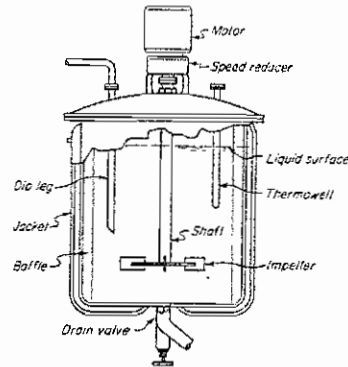
2.13.5 ทฤษฎีของการผสมของของเหลว (theory of liquid mixing)

ในอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารต่างๆ ปฏิบัติการหลายชนิดขึ้นกับการกวนและการผสมของของไหลอย่างมาก ของผสมที่เป็นพวกอาหารเหลวสามารถสุ่มและวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับของแข็ง ข้อมูลส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับกำลังงานที่ต้องใช้ในเครื่องผสม เช่น พวกเครื่องผสมชนิดใบพาย (paddle mixer) และเครื่องผสมชนิดใบพัดเรือ (propeller mixer) ในเครื่องผสมเหล่านี้ ของเหลวที่จะนำมาผสมจะใส่ในภาชนะและตัวกวนจะหมุน ภาชนะทรงกระบอกในแกนตั้ง ด้านบนอาจปิดหรือเปิดก็ได้ ด้านล่างจะกลมไม่แบนเพื่อกำจัดมุมที่คมหรือส่วนที่คมซึ่งมักมีปัญหาที่ว่ากระแสน้ำไหลเข้าไม่ถึง ความลึกของของไหลประมาณเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่ง ใบพัดอยู่ด้านบนซึ่งมีเพลายึดอยู่กับส่วนที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ บางครั้งอาจต่อกับเกียร์บ็อกซ์ (gearbox) เพื่อลดความเร็วลง นอกจากนี้ยังมีเครื่องมืออื่นประกอบด้วยดังแสดงดังรูปที่ 2.13

2.13.5.1 การวัดการผสมของของเหลวกับของเหลว

(measurement of liquid-liquid mixing)

การวัดการผสมของของเหลวกับของเหลวมักอยู่ในรูปอัตราส่วนของโคเมนชันเลส (dimensionless) ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยทางกายภาพซึ่งจะมีผลต่อกำลังงานที่ต้องใช้ ดังสมการต่อไปนี



รูป 2.13 : ภาพสำหรับการกวนและการผสม

ที่มา : McCabe และ Smith (1976)

$$(Po) = K(Re)^n(Fr)^m \quad (2.14)$$

เมื่อ $Re = D^2 N \rho / \mu$
 $Po = \text{Power number} = P / D^5 N^3 \rho$
 $Fr = \text{Froude number} = DN^2 / g$

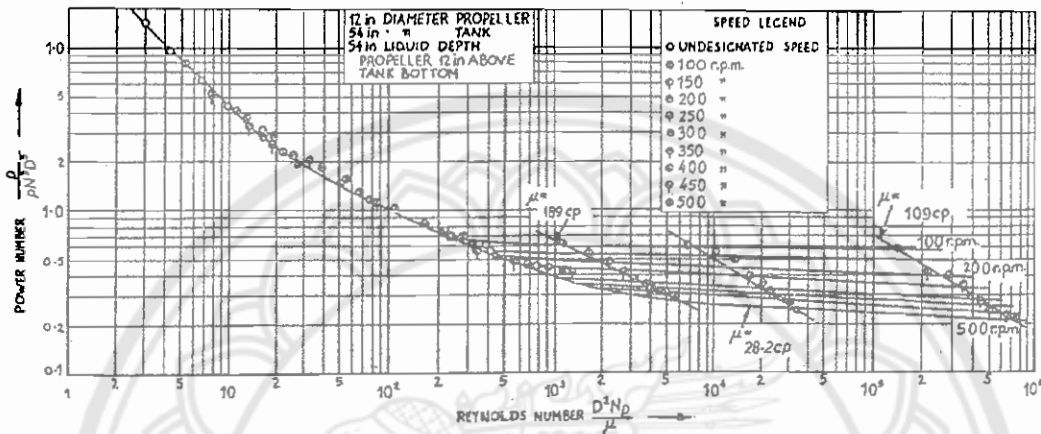
เมื่อ $D =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดเรือ (propeller) (m)
 $N =$ ความถี่ของการหมุนใบพัดเรือ (rpm)
 $\rho =$ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)
 $\mu =$ ความหนืดของของเหลว (N.s/m^2)
 $P =$ กำลังงานที่ใบพัดเรือใช้ (W)

จะเห็นว่า (Re) จะใช้แทน DN เป็นความเร็วซึ่งแตกต่างจากความเร็วที่แท้จริงที่ปลายของใบพัดด้วยแฟคเตอร์ π

ค่า (Fr) เกี่ยวข้องกับผลของแรงโน้มถ่วงและจะมีผลอย่างมากเมื่อผิวของของเหลวถูกใบพัดกวน โดยค่า (Fr) จะมีผลน้อยมาก เมื่อ (Re) ต่ำกว่า 300 ดังนั้นการที่ (2.14) จะเขียนได้เป็น

$$(Po) = K(Re)^n \quad (2.15)$$

ค่าคงที่ K และ n สามารถหาได้จากกราฟของการทดลองเท่านั้น แล้วใช้สมการที่ (2.15) หา กำลังงานที่ต้องใช้ ดังแสดงในรูป 2.14 ของ Rushton และคณะ (1950) เช่น สำหรับใบพัดเรือ ถ้า 1 pitch เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลาง ให้ $n = -1$ และ $K = 41$ ถ้าไม่มีข้อมูลจากการทดลอง วิธีที่ดีที่สุดที่จะ ทำนายกำลังที่ต้องใช้ในเครื่องผสมชนิดใบพัดเรือคือ การใช้โมเดลทางกายภาพ วัตถุประสงค์ต่างๆ และใช้ สมการที่ (2.14) และ (2.15) ขยายระดับของผลการทดลอง



30 cm propeller in 137 cm diameter tank, liquid depth 137 cm, propeller 30 cm above tank volume.

(A) ความหนืด = 0.189 N.s/m² (B) ความหนืด = 0.028 N.s/m² (C) ความหนืด 0.109 N.s/m² ความเร็วของใบพัดเรือ ตั้งแต่ 100 ถึง 500 rpm

รูปที่ 2.14 : การเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลข Po เทียบกับค่าตัวเลข Re สำหรับตัวกวนใบพัดเรือ
ที่มา : Rushton และคณะ (1950)

2.13.6 เครื่องมือที่ใช้ในการผสม (mixing equipment)

ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้มีการออกแบบและผลิตเครื่องผสมออกมาเป็นจำนวนมาก การเลือก ชนิดและขนาดของเครื่องผสมที่ถูกต้องขึ้นกับชนิดและปริมาณของอาหารที่จะนำมาผสมและความเร็ว ของการปฏิบัติงานเพื่อให้ได้ระดับของการผสมที่ต้องการ โดยใช้พลังงานน้อยที่สุด

เครื่องผสมจะแบ่งตามลักษณะการทำงานสำหรับอาหารต่อไปนี้

- 1). ของเหลวที่มีความหนืดต่ำ
- 2). ของเหลวหรือเพสต์ที่มีความหนืดสูง
- 3). อาหารผงที่แห้งหรือของแข็งที่เป็นชิ้น

2.13.6.1 เครื่องผสมสำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำหรือปานกลาง (mixing for low-or medium-viscosity liquids)

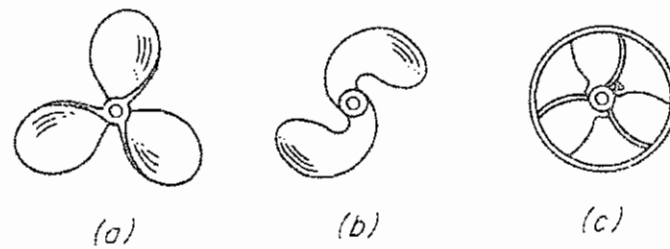
เครื่องผสมหลายตัวที่มีการออกแบบเพื่อผสมของเหลวในภาชนะที่มีแผ่นกั้น (baffle) หรือไม่มีแผ่นกั้นก็ได้ ข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละประเภทตามลักษณะการใช้งานสรุปดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตาราง 2.6 ข้อดีและข้อจำกัดของเครื่องผสมของเหลว

Type of mixer	Advantages	Limitations
Paddle agitator	Good radial and rotational flow , cheap	Poor perpendicular flow , high vortex risk at higher speeds
Multiple-paddle agitator	Good flow in all three directions	More expensive , higher energy requirements
Propeller impeller	Good flow in all three directions	More expensive than Paddle agitator
Turbine agitator	Very good mixing	Expensive and risk of blockage

ที่มา : *Fellows (1988)*

1). เครื่องกวนชนิดใบพัดเรือ (propeller agitator) เป็นใบพัดความเร็วสูงไหลตามแนวแกนเหมาะสำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ สำหรับใบพัดเรือขนาดเล็กนั้น จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากับมอเตอร์ (1150 หรือ 1750 rpm) ถ้าเป็นใบพัดเรือขนาดใหญ่จะหมุนที่ 400-800 rpm ระยะทางที่ใบพัดหมุน 1 รอบแล้วนำของเหลวเคลื่อนที่ไปตามความยาวจะขึ้นกับมุมความชันของใบพัดเรือ อัตราส่วนของระยะทางนี้ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดเรียกว่า pitch ของใบพัด รูปที่ 2.15 เป็นใบพัดเรือแบบต่างๆ และลักษณะของการไหลในถังผสมที่มีแผ่นกั้น โดยการติดตั้งใบพัดเรือที่ศูนย์กลางของถังผสมดังแสดงในรูปที่ 2.16 ลักษณะการไหลชนิดนี้จะเรียกว่า axial flow เนื่องจากของไหลไหลลงที่แกนกลางหรือเพลาของใบพัดเรือ และไหลขึ้นที่ด้านข้างของถังผสม



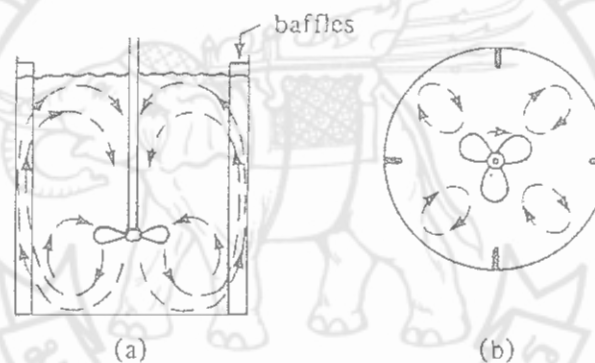
รูปที่ 2.15 : ใบพัดเรือชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการผสม

(a) ใบพัด 3 ใบชนิดมาตรฐาน

(b) weedless

(c) guarded

ที่มา : McCabe และ Smith (1976)



รูปที่ 2.16 : ถังผสมที่มีแผ่นกั้น และตัวกวนที่เป็นแบบใบพัดเรือชนิด 3 ใบ โดยมีลักษณะ

การไหลตามแนวแกน

(a) side view

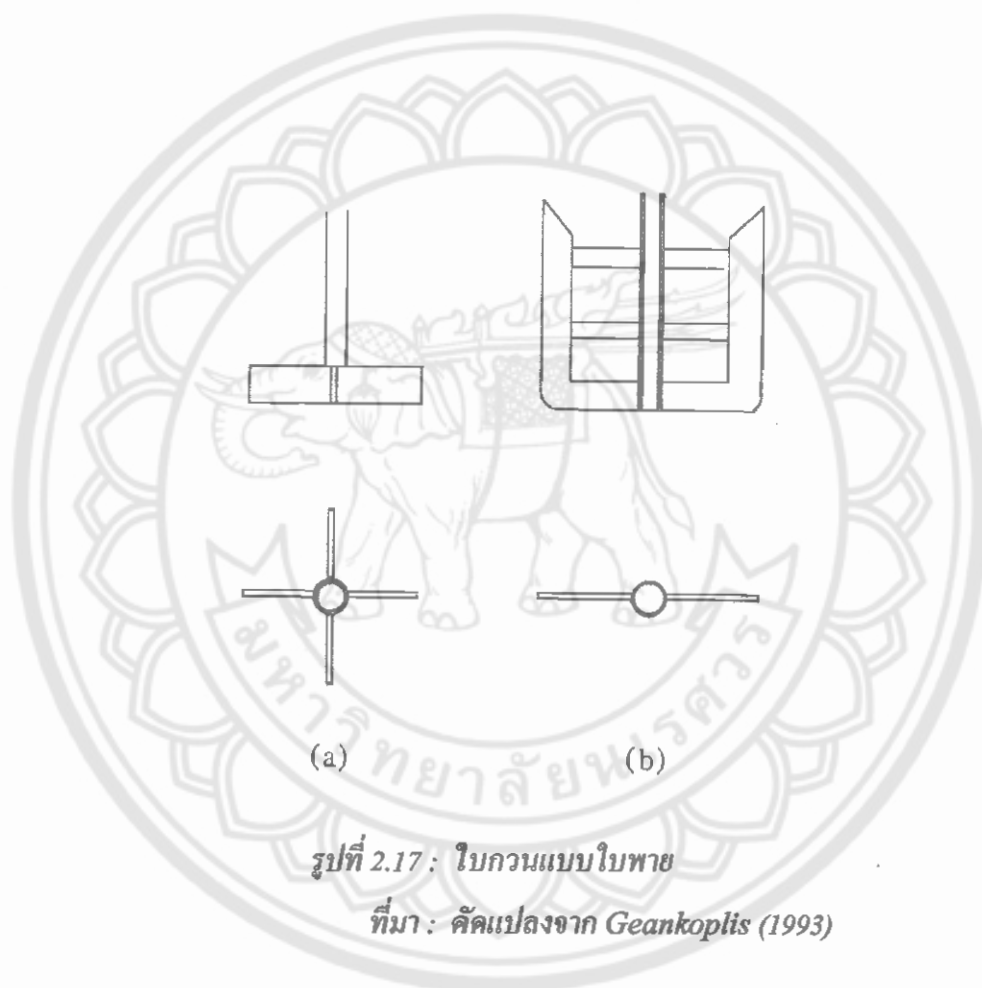
(b) top view

ที่มา : Geankoplis (1993)

2). เครื่องกวนชนิดใบพาย (paddle agitator) เป็นเครื่องกวนแบบง่ายๆ ประกอบด้วย ใบพัดคล้ายใบพายที่แบนหมุนรอบเพลาในแกนตั้งนิยมใช้ใบพายแบบ 2 หรือ 4 ใบดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งหมุนด้วยความเร็วต่ำถึงปานกลางประมาณ 20-200 รอบต่อนาที ณ ศูนย์กลางของถังผสม ซึ่งจะดันของเหลวในแนวรัศมี โดยไม่มีการเคลื่อนในแนวตั้ง ยกเว้นใบพัดแบบ pitch ความยาวทั้งหมดของใบพัดชนิดนี้เป็น 50-80% ของเส้นผ่านศูนย์กลางถังผสมและความกว้างของใบพายเป็น $1/6$ ถึง $1/10$

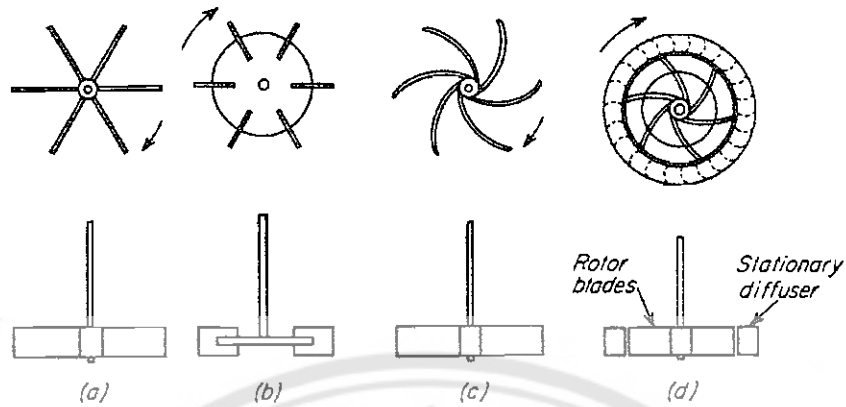
ของความยาว การกวนที่ความเร็วต่ำมักใช้ในถังผสมที่ไม่มีแผ่นกั้น แต่ที่ความเร็วสูงขึ้นต้องใช้แผ่นกั้น เนื่องจากของเหลวจะหมุนวนรอบซึ่งมีผลด้านการผสมเกิดขึ้นเล็กน้อยถ้าไม่มีแผ่นกั้น

3). เครื่องกวนชนิดใบพัดกังหัน (turbine agitator) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ประกอบด้วยใบพัดคล้ายใบพายหลายใบ แต่ใบพัดสั้นกว่าและหมุนด้วยความเร็วสูงบนเพลลาที่ติดตั้งอยู่ตรงกลางของถังผสม เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดกังหันปกติจะมีขนาดประมาณ 30-50% ของเส้นผ่านศูนย์กลางถังผสม ใบพัดกังหันสามารถใช้กับของเหลวที่มีความหนืดในช่วงกว้าง ลักษณะการไหลของของไหลในถังผสมแบบใบพัดกังหันชนิดใบแบน 6 ใบซึ่งมีงานด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.17 : ใบกวนแบบใบพาย

ที่มา : คัดแปลงจาก Geankoplis (1993)



รูปที่ 2.18 : ใบพัดกัณฑ์ชนิดต่างๆ

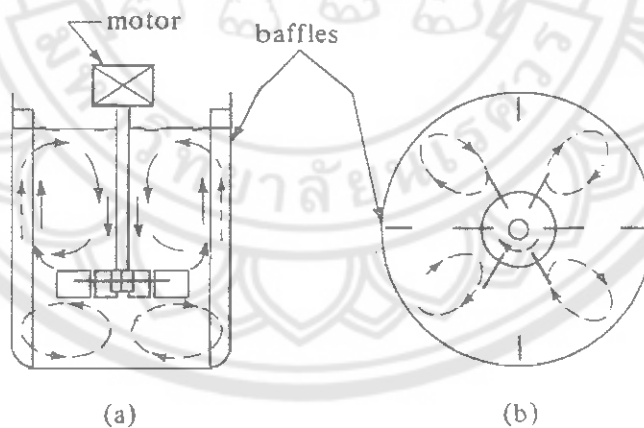
(a) *open straight blade*

(b) *bladed disk*

(c) *vertical curved*

(d) *shrouded curved blade with diffuser ring*

ที่มา : McCabe และ Smith (1976)



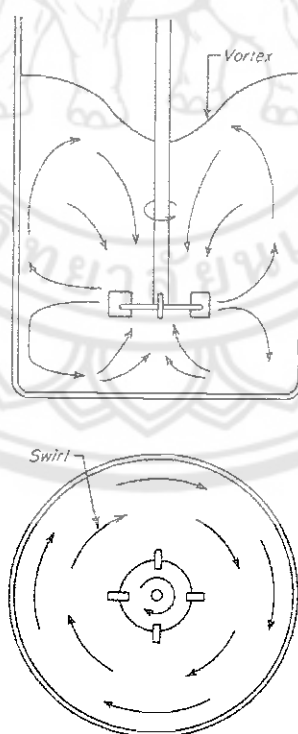
รูปที่ 2.19 : ถังผสมที่มีใบพัดกัณฑ์ชนิด 6 ใบซึ่งมีงานที่แสดงการไหล

(a) *side view*

(b) *bottom view*

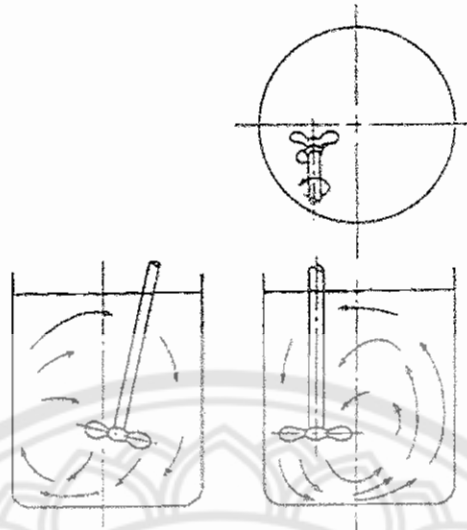
ที่มา : ดัดแปลงจาก Geankoplis (1993)

ในการผสมของเหลว ลักษณะการไหลในถังผสมขึ้นกับชนิดของใบพัด ลักษณะเฉพาะของของไหล ขนาดและสัดส่วนของถังผสม แผ่นกั้นและตัวกวน ความเร็วของของไหลที่จุดใดๆ ในถังประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ คือ (1) ความเร็วในแนวรัศมี (radial) และกระทำในทิศทางตั้งฉากกับเพลลาของใบพัด (2) ความเร็วในแนวตามความยาว (longitudinal) และกระทำในทิศทางที่ตั้งฉากกับเพลลา และ (3) ความเร็วในแนวสัมผัสหรือหมุน (tangential or rotational) และกระทำในทิศทางที่สัมผัสกับทางเดินวงกลมรอบๆ เพลลาของใบพัด ในกรณีที่เพลลาอยู่ในแนวตั้ง องค์ประกอบของความเร็วในแนวรัศมีและในแนวตามความยาวมีประโยชน์และให้การไหลที่จำเป็นต่อการผสม เมื่อแกนของใบพัดติดตั้งที่กึ่งกลางของถังผสมในแนวตั้ง องค์ประกอบของความเร็วในแนวสัมผัส จะก่อให้เกิดข้อเสีย เนื่องจากการไหลในแนวสัมผัสตามทางเดินที่เป็นวงกลมรอบเพลลา ก่อให้เกิดน้ำวน (vortex) ขึ้นที่ผิวของของเหลวดังแสดงในรูป 2.20 จึงจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงแบบการไหลในลักษณะการวนรอบๆ ถังผสมซึ่งมีผลต่อการผสมน้อยมาก ดังนั้นการทำลายการไหลลักษณะนี้ กระทำได้ง่ายโดยติดตั้งใบพัดให้ห่างจากศูนย์กลางของถังผสมดังแสดงในรูปที่ 2.21 สำหรับถังผสมขนาดเล็ก ถ้าเป็นถังผสมขนาดใหญ่ขึ้นอาจมีการติดตั้งแผ่นกั้นที่ผนังของถังผสมดังรูปที่ 2.16 หรือใบพัดอาจติดตั้งที่ด้านข้างของถังผสม โดยมีเพลลาในแกนนอนดังแสดงในรูปที่ 2.22

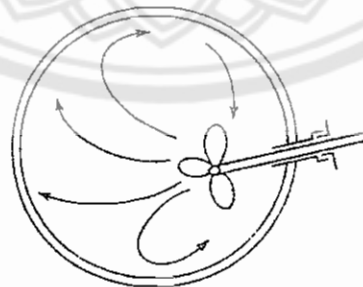
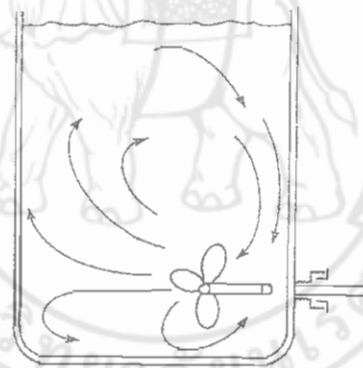


รูปที่ 2.20 : ลักษณะการเกิดการไหลแบบหมุนวน

ที่มา : McCabe และ Smith (1976)



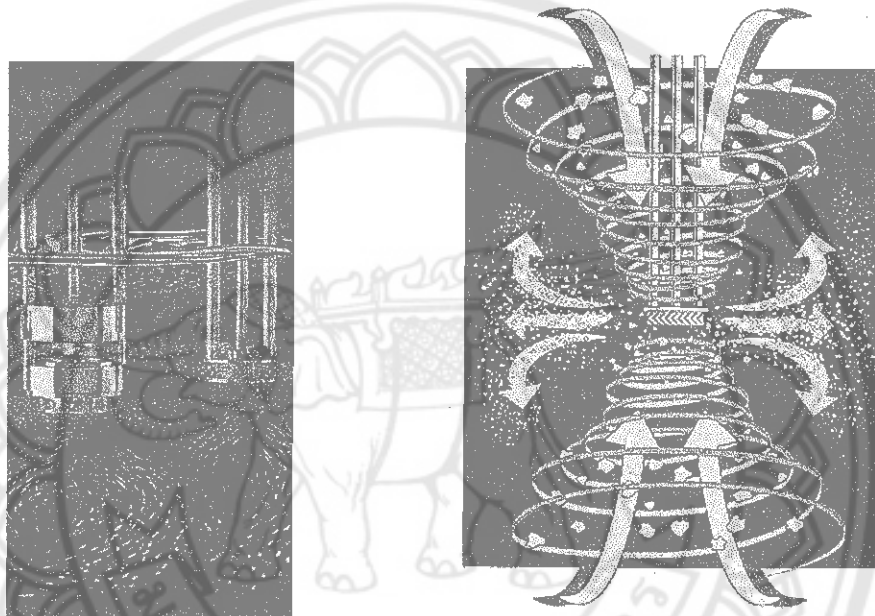
รูปที่ 2.21 : ใบพัดที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่อยู่ห่างจากศูนย์กลาง
ที่มา : McCabe และ Smith (1976)



รูปที่ 2.22 : ใบพัดที่เข้าทางด้านข้าง
ที่มา : McCabe และ Smith (1976)

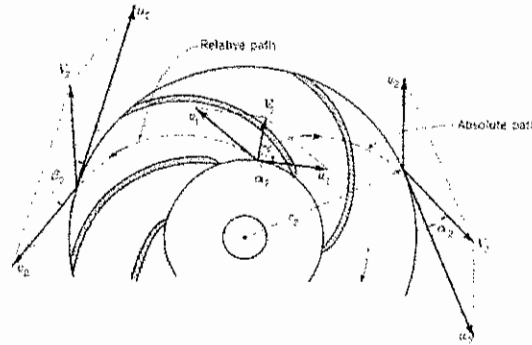
2.14 เครื่องปั่นแรงเหวี่ยงแบบ rotor-stator

หลักการการทำงานของเครื่องปั่นแรงเหวี่ยงแบบ rotor-stator เพื่อที่จะปั่นกะทิจะประกอบด้วย ส่วนสำคัญ คือ ใบพัดและ stator เนื่องจากต้องการให้ของเหลวไหลผ่าน stator จึงจำเป็นต้องออกแบบ ใบพัดให้เป็นแบบ Centrifugal Flow Impeller ซึ่งมีขบวนการในการดึงของเหลวเข้าสู่ศูนย์กลาง ใบพัด โดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อให้ของเหลวไหลตามแนวรัศมีของใบพัด ส่งผลให้ของเหลวไหลผ่านมาที่ปลายใบพัด จากนั้นของเหลวที่มีความเร็วสูงจะไหลผ่านรู stator แสดงดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 2.23 : แสดงทิศทางการไหลของของเหลวผ่าน stator

การออกแบบใบพัด Centrifugal Flow Impeller จำเป็นต้องให้การวางแนวของใบพัดทำมุม 90° กับแกนหมุนของมอเตอร์เพื่อให้เกิดการไหลของของเหลวไหลผ่านตามแนวรัศมีของใบพัดและ เนื่องจากของเหลวมีความหนืดเมื่อไหลผ่านใบพัด จึงทำให้เกิดแรงเสียดทานกระทำที่ผิวใบพัด ในการ ออกแบบเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่สูงสุดจึงต้องออกแบบใบพัดให้มีแรงเสียดทานระหว่างของเหลวที่ ไหลผ่านใบพัดให้มีค่าน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ โดยใช้ทฤษฎีสามเหลี่ยมความเร็ว ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 : แสดงสามเหลี่ยมความเร็วที่ทางเข้าและออกของใบพัด

จาก Newton's second Law ที่ใช้กับการหมุน

$$T = mVr \quad (2.16)$$

$$\Delta M = mV_{w2}r_2 - mV_{w1}r_1 \quad (2.17)$$

โดยที่ : T = แรงบิด, (N·m)

ΔM = ผลต่างโมเมนต์, (N·m)

M = มวล, (kg)

V = ความเร็ว, (m/s)

V_w = ความเร็วหมุนวน, (m/s)

r = รัศมี, (m)

การคำนวณหามุมของปลายใบพัด (β_2)

$$\cot \beta_2 = \frac{(u_2 - V_{w2})}{V_{f2}} \quad (2.18)$$

โดยที่ β_2 = มุมระหว่างเส้นสัมผัสดวงกลมกับแนวของปลายใบพัด

$u_2 = \omega r_2$, (m/s)

v_{w2} = ความเร็วหมุนวนที่ทางออก, (m/s)

v_{f2} = ความเร็วของการไหลที่ทางออก, (m/s)

ω = ความเร็วเชิงมุม, (rad/s)

r_2 = รัศมีจากจุดศูนย์กลางถึงปลายใบพัด, (m)

หมายเหตุ : ในการออกแบบนั้นต้องการให้มีค่า Loss น้อย จึงควรใช้ค่า β_2 อยู่ในช่วง $15^\circ - 90^\circ$

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการ

1). การทดลองเรื่อง “CFD analysis of a rotor-stator mixer with viscous fluids” ของ Fabien Barailler, Mourad Heniche, Philippe A. Tanguy.

เป็นการศึกษาการทดลอง rotor-stator mixing ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะส่วนของ rotor-stator โดยจะอธิบายลักษณะต่างๆออกมาในรูปของโปรแกรม Finite element และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง โปรแกรม Finite element จะช่วยให้เรากำหนดค่าต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ง่าย และรวดเร็วขึ้น จะทำให้สามารถออกแบบใบพัดที่ใช้ได้ง่ายขึ้น คุณสมบัติที่ควบคุมในการทดลองนี้ ประกอบด้วย ถังขนาด 17 L, ใบพัด 4 blade, stator เป็นแบบ Slotted Disintegrating Head มี 72 รู, ด้านบนใบพัดปิดมีรู 8 รู, ความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลอง 100-600 rpm, สารที่ใช้ในการผสมจะมีสถานะเป็นของเหลวกับของเหลว, รัศมีของใบพัด 4.3 cm, ช่วงเวลาในการปั่น 10, 15 และ 20 s

ผลที่ได้คือ ค่าที่ได้จากโปรแกรม Finite element มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงมาก ซึ่งได้ค่าต่างๆ ดังนี้ เมื่อรอบการหมุนสูงขึ้น Torque ก็จะเพิ่มขึ้น, shear stress จะมีค่ามากที่สุดบริเวณปลายใบพัด, เมื่อรอบสูงขึ้น shear stress ก็จะสูงขึ้นตามด้วย, เมื่อของเหลวไหลผ่านไปด้านหลังของ stator จะส่งผลให้ค่า shear stress ลดลงไม่มาก แต่เมื่อของเหลวไหลผ่านรูของ stator จะส่งผลให้ค่า shear stress ลดลงอย่างรวดเร็ว, ที่ความเร็วรอบ 500 rpm เวลาในการปั่นที่ 20 s จะได้ประสิทธิภาพการแตกตัวของอนุภาคมากที่สุด

2). การทดลองเรื่อง “The Effects of Variation of Impeller Blade Inlet Positions on Performance of A Radial Flow Pump” ของ นายปวิศ หนูเกตุ และนายสถาพร สุปรีชากร จากการทดลองนี้กล่าวเกี่ยวกับผลของการเปลี่ยนขนาดมุมของปลายใบพัดที่ทางออก ซึ่งเป็นการไหลแบบ Centrifugal Flow Impeller ที่มีผลต่อสมรรถนะของการไหลตามแนวรัศมี โดยใช้ใบพัด 3 ชุดที่มีมุมที่ทางออกของปลายใบพัดเป็น 15, 30 และ 45 องศา

ผลที่ได้จากการทดลองจะพบว่าที่ปลายทางออกของใบพัดที่มีมุม 15 องศาให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดแต่มีอัตราการไหลที่ต่ำกว่ามุมของปลายใบพัดที่ทางออกที่มีขนาดมุมเป็น 30 กับ 45 องศาตามลำดับ