บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 การลดขนาด (Size reduction)

การลดขนาดซึ่งเป็นปฏิบัติการหนึ่งในอุตสาหกรรม คือการที่อนุภาคของของแข็งถูกตัด หรือถูกทำให้แตกเป็นอนุภาคที่เล็กลง ซึ่งจะเกิดขึ้นด้วยวิธีกล (การบดหรือการตัด) โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของสาร โดยทั่วไป เมื่อทำการบด สิ่งที่ต้องการคือ ความสม่ำเสมอของขนาดหรือรูปร่างของแต่ละอนุภาคหรือแต่ละหน่วยที่ได้จากการบด

การลดขนาดมีข้อดีทั้งในแง่ของการแปรรูปอาหารและผลิตภัณฑ์ดังต่อไปนี้

1) อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอาหารเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการทำแห้ง การให้ความร้อนหรือการทำให้เย็นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพและอัตราการสกัดขององค์ประกอบที่ละลายได้ (เช่น การสกัดน้ำผลไม้จากผลไม้ที่ตัดแล้ว)
2) ได้ช่วงของอนุภาคที่ต้องการหรือที่กำหนดไว้ก่อนได้ โดยการใช้ตะแกรงร่อน ซึ่งมีความสำคัญต่อคุณสมบัติในการแปรรูป หรือการกำหนดคุณสมบัติทางฟังชันนอล (functional) ของผลิตภัณฑ์บางชนิด (เช่น น้ำตาลไอซิ่ง เครื่องเทศ และแป้งข้าวโพด)
3) เมื่อช่วงอนุภาคที่นำมาผสมใกล้เคียงกัน ทำให้การผสมขององค์ประกอบต่าง ๆ สมบรูณ์มากขึ้น (เช่น ซุปผง ส่วนผสมของการทำเค้ก)
4) ทำให้ผลิตภัณฑ์ง่ายต่อการขนถ่าย โดยการใช้ระบบนิวแมติก
5) ทำให้ผลิตภัณฑ์ย่อยได้ง่าย หรือง่ายต่อการบริโภค
6) เป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ตัวใหม่

การลดขนาดของของแข็งนี้ ไม่มีผลทางด้านการเก็บรักษาถนอมอาหาร แต่มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพทางการบริโภค (eating quality) หรือทำให้อาหารเหมาะสมในการแปรรูปต่อไป และยังมีส่วนช่วยเพิ่มช่วงของขนาดของผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ให้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในอาหารบางชนิดการบดก็อาจไปเร่งการเสื่อมเสียเนื่องจากเอนไซม์ที่มีอยู่ในธรรมชาติถูกปล่อยออกมาจากเนื้อเยื่อที่เกิดการเสียหายอันเกิดจากการตัดหรือการบด หรืออาหารอาจจะเสื่อมเสียเนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์หรือการออกซิเดชันที่เกิดขึ้นเนื่องจากพื้นที่ผิวมากขึ้น

วิธีที่ใช้เรียกการลดขนาดจะแตกต่างกันขึ้นกับช่วงของอนุภาคที่ต้องการ เช่น

การกด (compression หรือ crushing) เป็นการลดขนาดของของแข็งอย่างหยาบ ๆ และก่อให้เกิดอนุภาคที่ละเอียดน้อยมาก วิธีนี้จึงใช้กับวัสดุที่แข็ง

การกระแทก (impact หรือ grinding) ของแข็งที่ผ่านการบดด้วยวิธีนี้จะให้อนุภาคที่มีขนาดทั้งหยาบ ปานกลาง และละเอียด

การตัด (cutting) เป็นการกระทำคล้ายกับการใช้มีดที่คม ทำให้เกิดการเสียรูปร่าง (deformation) และการแตกของอาหารน้อยที่สุด ผิวของอาหารใหม่ที่เกิดขึ้นไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง การตัดจะให้ขนาดที่แน่นอน และบางครั้งรูปร่างก็แน่นอนด้วย ซึ่งอาจจะไม่มีอนุภาคที่ละเอียดเลย เช่น การตัดผักผลไม้เป็นชิ้นเพื่อบรรจุกระป๋อง

2.1.1ทฤษฎีและหลักการ (theory and principle)

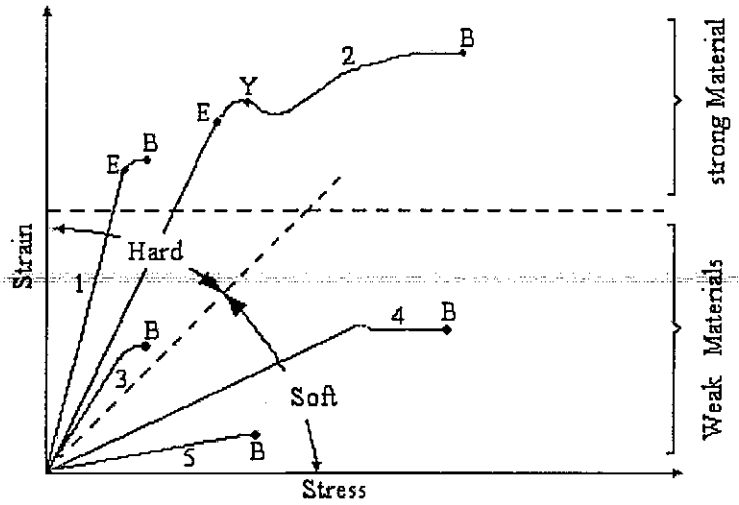
ชนิดของแรงที่ใช้ในการลดขนาดมี 3 ชนิดคือ

1. แรงกด (Compression Force)
2. แรงกระแทก (Impact Force)
3. แรงเฉือน (Shear Force)

ในการลดขนาดส่วนใหญ่ จะมีแรงทั้ง 3ชนิดปรากฏอยู่ แต่จะมีแรงหนึ่งที่เด่นกว่าอีก 2 ชนิด

ในเครื่องบดทั่วไปเมื่อความเค้น (stress) ซึ่งเป็นแรงชนิดหนึ่งกระทำต่ออาหาร จะเกิดความ เครียด (strain) ขึ้น ความเครียดภายในที่เกิดขึ้น จะดูดซับในตอนแรก ทำให้เนื้อเยื่อเกิดการเสียรูปร่าง (deformation) ในหลายกรณี เมื่อค่าความเครียดไม่เกินระดับวิกฤตค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า ขีดจำกัดความเป็นสัดส่วน (proportional limit or elastic limit) เมื่อนำแรงเค้นที่กระทำต่ออาหารออกไป เนื้อเยื่อจะกลับคืนสู่สภาพเดิม และปล่อยพลังงานที่เก็บไว้ออกมาเป็นความร้อน ความจริงแล้ว พบว่าพลังงานที่ให้แก่ระบบการบดนั้น มีเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ ที่ใช้จริง ๆ ในการลดขนาดหรือเกิดพื้นที่ใหม่ ส่วนพลังงานที่เหลือจะเปลี่ยนเป็นความร้อนในผลิตภัณฑ์และเครื่องบด ทำให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อความเครียดภายในพื้นที่หนึ่ง ๆ มีค่าเกินกว่าค่าอิลัสติกลิมิต(E) วัตถุนั้นจะมีการเสียรูปอย่างถาวร ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และถ้ายังคงให้แรงเค้นต่อไป ความเครียดจะถึงจุดที่เรียกว่า yield point(Y) ซึ่งเหนือกว่าจุดที่อาหารจะเริ่มไหล(Y-B ในรูปที่ 2.1) ซึ่งรู้จักในช่วงของความสามารถในการดึงเป็นเส้นได้ (ductility) ในที่สุด แรงเค้นที่ให้ต่อไปก็จะเกิดความเค้นที่ทำให้แตก ทำให้วัตถุแตกเป็นแนวเส้นเปราะและแตกง่าย (weakness) บางส่วนของพลังงานที่เก็บไว้จะปล่อยออกมาในรูปของเสียงและความร้อน ขณะที่ขนาดของวัตถุจะเล็กลงแนวเส้นที่เปราะและแตกง่ายจะมีจำนวนน้อยลง ทำให้แรงที่ต้องใช้เพิ่มขึ้นเพื่อให้มีค่าสูงกว่าความเค้นที่ทำให้แตกเมื่อไม่มีแนวเส้นที่เปราะและแตกง่ายเหลืออยู่ จึงต้องทำให้มีรอยแตกใหม่ (fissures) เพื่อลดขนาดของอนุภาคให้เล็กลงต่อไป ดังนั้นการระบุการกระจายตัวของขนาดที่ต้องการในผลิตภัณฑ์จึงจำเป็น เพื่อหลีกเลี่ยงพลังงานและเวลาที่ไม่จำเป็นซึ่งใช้ไปในการทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กกว่าที่ต้องการ



Stress-strain diagram forvarious types of solids.E is elasticlimit.Y is yield point. B break point. OE iselastic region. EY is elastic deformation. YB region of ductility. The material represented by curve 1 is hard,strong and brittle: material 2 is hard, strong ductile. 3 hard, weak, brittle. 4 soft, weak, ductile: 5 soft, weak brittle.

รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงความเค้นและความเครียดสำหรับของแข็งชนิดต่างๆ

ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

ความแข็งเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของการบด แรงเค้นที่กระทำต่ออนุภาคอยู่ในรูปของ แรงกด การเฉือน แรงกระแทก(หรืออาจเป็นการร่วมกันของแรงที่กระทำเหล่านี้) ดังกล่าวมาแล้วลักษณะความแข็งของสารแสดงได้ด้วยแผนภาพความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดของอาหารที่แข็งหรืออ่อน ดังรูปที่ 2.1

2.1.2กลไกการแตก (breakage mechanism)

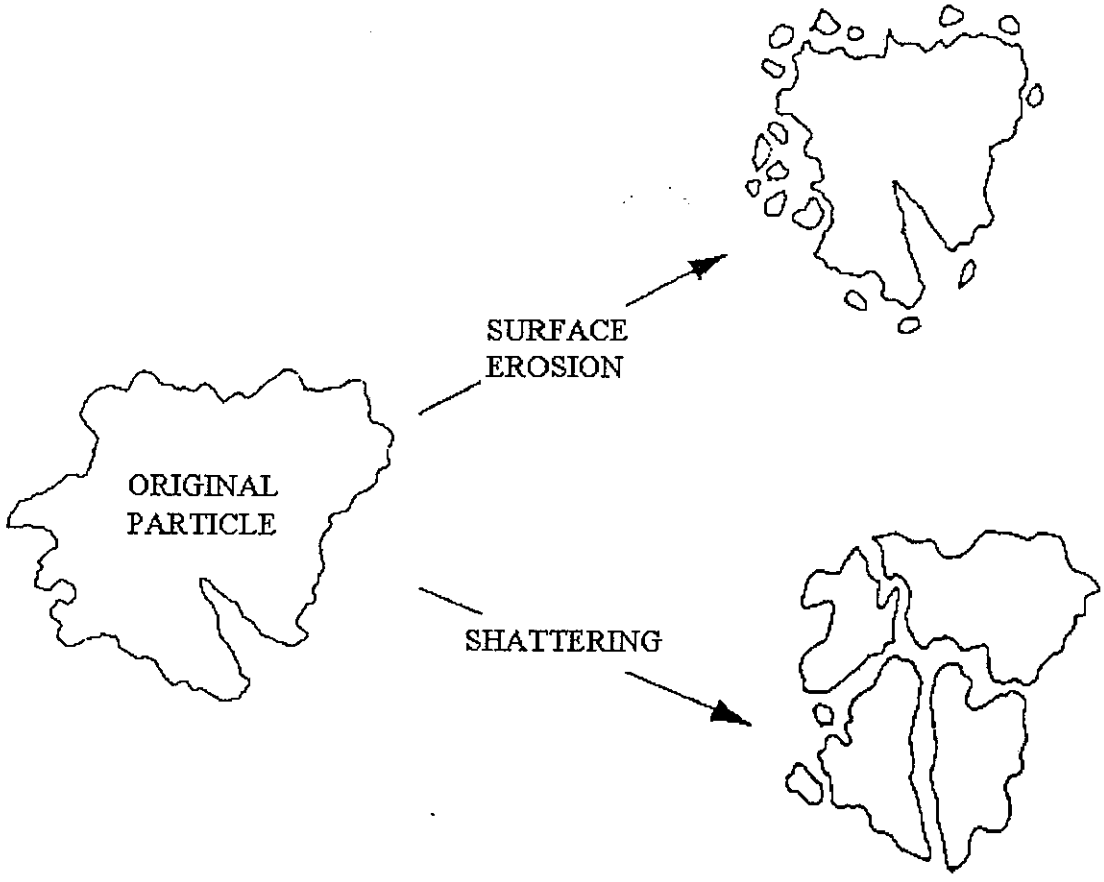
เนื่องจากอนุภาคที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการลดขนาดจะมีรูปร่างและความเป็นมาทางกลแตกต่างกัน (เช่น ทิศทางและความเข้มของแรงกระแทก ทิศทางที่เกิดขึ้นระหว่างการเสียดสีกับอนุภาคอื่น ๆ หรือกับผนังของเครื่องมือ) จึงเป็นการสะดวกที่จะแบ่งกลไกการแตกออกในเทอมของอนุภาคของผลิตภัณฑ์ โดย Wei และคณะ (1997) แบ่งกลไกดังกล่าวออกเป็น 2 ชนิด

1) shattering เป็นกลไกที่ทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง 2-5 เท่าของอนุภาคเริ่มต้น
2) erosion หรือ abrasion เป็นกลไกที่ทำให้อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดเล็กและละเอียดลงมากกว่า 10 เท่าของอนุภาคเดิม

รูปที่ 2.2 แสดงกลไกการแตกของอนุภาคทั้งสองชนิด อย่างไรก็ตามในระบบที่เป็นจริงทั้งกลไกมักจะเกิดขึ้นร่วมกัน แต่อาจจะมีกลไกหนึ่งเกิดในระดับที่มากกว่า และอนุภาคที่แตกออกที่เกิดจากทั้งสอง

กลไกจะเกิดขึ้นพร้อมกัน ความสัมพันธ์ของทั้งสองกลไกที่เปลี่ยนไปมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการกระจายของอนุภาค รูปแบบของการเปลี่ยนแปลงอาจเป็นลักษณะเฉพาะของสารที่เป็นผง และขึ้นกับสภาวะทางกลที่ได้รับ เช่น การบด การสั่น เป็นต้น

ปริมาณของพลังงานที่อาหารดูดซับไว้ก่อนที่จะแตกนั้น กำหนดจากโครงสร้างของอาหารที่มีแนวโน้มที่จะแตกหรือแยก (friability) แตกต่างกัน อนุภาคที่แข็งกว่าจะดูดซับพลังงานได้มากกว่า โดยการทำให้แตกนั้น ต้องการพลังงานที่ป้อนเข้าสู่เครื่องบดมากกว่า ยิ่งอาหารมีแนวเส้นที่เปราะและแตกง่ายมากเท่าใด พลังงานที่ต้องใส่เข้าไปในระบบเพื่อก่อให้เกิดการแตกก็จะมีค่าน้อยลง แรงกดมักใช้กับอนุภาคที่เป็นผลึก (crystalline) หรือแตกง่าย ส่วนแรงกระแทกร่วมกับแรงเฉือน (shearing) ต้องใช้กับอาหารที่มีเส้นใย และแรงเฉือนมักใช้กับการบดละเอียดของอาหารที่มีความอ่อนกว่า อย่างไรก็ตาม ระดับของแรงที่ทำให้อาหารแตกจะต่ำลงถ้าแรงที่กระทำต่ออาหารยาวนานขึ้น จะเห็นว่า ขนาดของอาหารที่ลดลง พลังงานที่ต้องใช้ และปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในอาหาร ล้วนขึ้นกับขนาดของแรงและเวลาที่อาหารได้รับแรงนั้น



รูปที่ 2.2 การแสดงกลไกการแตกออกที่สำคัญของ shattering และ erosion

ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

ปัจจัยอื่นซึ่งมีผลต่อปริมาณพลังงานที่ต้องให้แก่ระบบในการลดขนาดคือ ปริมาณความชื้นและความไวต่อความร้อนของอาหาร ปริมาณความชื้นมีผลมากทั้งต่อระดับการลดขนาดและกลไกการแตกใน

อาหารบางชนิด ตัวอย่างเช่น ข้าวสาลีจะถูกปรับให้มีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมก่อนการบด อย่างไรก็ตาม ถ้าในอาหารแห้งมีความชื้นมากเกินไปอาจทำให้อนุภาคต่าง ๆ เกาะกันซึ่งจะไปปิดกันการบด ส่วนอาหารที่แห้งเกินไปหลังการบดก็ทำให้เกิดฝุ่นที่ก่อให้เกิดอันตรายได้ ในการบดที่ใช้ความเร็วสูงทำให้เกิดปริมาณความร้อนขึ้นจำนวนมาก อาหารที่มีความไวต่อความร้อนจะกำหนดระดับอุณหภูมิที่จะยอมให้สูงขึ้นและกำหนดความจำเป็นในการลดอุณหภูมิของเครื่องบดให้เย็นลง ในการบดที่อุณหภูมิต่ำมาก (cryogenic grinding) จะมีการผสมไนโตรเจนเหลวหรือน้ำแข็งแห้ง (dry ice คือ CO_2 ในสถานะของแข็ง) ผสมลงในอาหารก่อนการบด ทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นลงและรักษาองค์ประกอบที่เสื่อมเสียเนื่องจากความร้อนไว้ได้ เช่น การบดเครื่องเทศ หรือการใช้น้ำแข็งแห้งในการบดเนื้อเพื่อทำไส้กรอกตามลำดับ

2.2 ลักษณะของการผสมและวัตถุประสงค์ของการผสม

ในทางทฤษฎีแล้ว กระบวนการผสมจะเริ่มจากองค์ประกอบต่างๆ ซึ่งเป็นองค์ประกอบบริสุทธิ์อยู่และองค์ประกอบเหล่านี้จะแยกกันอยู่ในภาชนะ เมื่อการผสมเกิดขึ้นและดำเนินต่อไป ตัวอย่างของผสมจะมีองค์ประกอบในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับสัดส่วนขององค์ประกอบทั้งหมดในภาชนะ การผสมที่สมบูรณ์จะนิยามว่าเป็นสภาวะที่ทุกตัวอย่างที่สุ่มมาจากภาชนะที่ทำการผสมจะมีองค์ประกอบต่างๆ ในสัดส่วนที่เหมือนกันกับของผสมทั้งหมด

การผสมของสารสามารถแบ่งได้ 5 ประเภท ดังนี้

1. การผสมของแข็งกับของแข็ง
2. การผสมของแข็งกับของเหลว
3. การผสมของเหลวกับของเหลว
4. การผสมของเหลวกับแก๊ส
5. การผสมของแข็งกับแก๊ส

วัตถุประสงค์ของการผสมคือ

1. เพื่อให้องค์ประกอบต่างๆ ทำปฏิกิริยาเคมีได้อย่างสม่ำเสมอ เมื่อรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ถ้าของผสมนั้นสามารถทำปฏิกิริยาต่อกัน
2. เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารที่นำมาผสม
3. เพื่อช่วยคุกเคล้าให้ของผสมเป็นเนื้อเดียวกันและมีคุณลักษณะตามที่ต้องการ
4. เพื่อผสมอนุภาคของของแข็งต่างๆ ให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ หรือสะดวกในการใช้
5. เพื่อผสมของเหลวต่างๆ ที่ไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้
6. เพื่อกระจายแก๊สเข้าไปในของเหลว
7. เพื่อเร่งการถ่ายเทความร้อนระหว่างของเหลวกับคอลล์หรือแจ็คเก็ตที่หุ้มอยู่

2.3 ศัพท์ที่ใช้ในการผสม

1. **Mixing** เป็นศัพท์รวมที่ใช้กับการผสมทุกรูปแบบ

2. **Blending** เป็นศัพท์ที่มีความหมายทั่ว ๆ ไปเกี่ยวกับการผสมมีความหมายถึงการผสมวัตถุทุกชนิดให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว หรือให้มีความกลมกลืนกันอย่างสม่ำเสมอ การผสมดังกล่าวอาจเป็นการผสมของแข็งกับของแข็ง ของแข็งกับของเหลว และของเหลวกับของเหลว

3. **Agitation** หมายถึงการคน การกวน เป็นการผสมด้วยใบพาย แท่งกวน ใบพัด เพื่อช่วยคลุกเคล้าของผสมให้ผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน ช่วยกระจายของผสมให้คลุกเคล้ากันอย่างสม่ำเสมอ

4. **Kneading** มีความหมายถึงการนวด เป็นการผสมของแข็งกับของเหลวซึ่งมีความหนืดมาก เช่น การผสมน้ำกับแป้งสาลี จะได้ของผสมที่มีความเหนียวเพิ่มขึ้นที่เรียกว่าโด (dough) การนวดจะช่วยให้น้ำกระจายตัวรวมกับแป้งได้อย่างสม่ำเสมอ และการนวดก้อนแป้งของโดระหว่างการหมักจะทำให้แก๊สกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมออีกด้วย

5. **Whipping** เป็นการผสมโดยวิธีการตีหรือปั่นด้วยความเร็วสูงทำให้อากาศเข้าแทรกกับของเหลวหรือของแข็งกึ่งเหลวนั้นขึ้นฟู เช่นการตีไข่ การตีเนยให้ขึ้นฟู

6. **Beating** เป็นลักษณะการผสมโดยการตี นิยมใช้เทอมนี้กับการผสมผลิตภัณฑ์เนื้อ เช่นการทำลูกชิ้น การตีจะทำให้เนื้อแหลกละเอียดและเกาะตัวกันแน่นขึ้น มีความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมส่วนผสมอื่นลงไป จะได้ของผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันโดยเฉพาะการรวมตัวของน้ำกับเนื้อเยื่อ ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกบางชนิดที่มีการผสมน้ำแข็งจำนวนมากเพื่อเพิ่มปริมาตรก็จำเป็นต้องผ่านการผสมในลักษณะนี้

7. **Rolling** เป็นลักษณะของการผสมที่ใช้กับผลิตภัณฑ์บางชนิดที่วัตถุดิบมีปริมาณน้ำมันเป็นองค์ประกอบสูง

8. **Homogenizing** เป็นการผสมที่ใช้ผสมของเหลวกับของเหลวที่ไม่อาจผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เช่นน้ำมันในนมสด

9. **Extruding** เป็นการผสมที่มีแหล่งความร้อนช่วยให้อาหารสุกพร้อมทั้งคลุกเคล้าให้ของผสมรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นวิธีการที่ใช้ผสมของแข็งกับของแข็ง

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการผสมของแข็งกับของแข็ง

ในการผสมของแข็งกับของแข็ง ต้องพิจารณาปัจจัยดังต่อไปนี้

1. **ขนาดอนุภาคของของแข็ง** ของแข็งที่จะนำมาผสมกัน ควรบดให้มีขนาดเล็กและร่อนผ่านตะแกรงให้มีขนาดใกล้เคียงกัน การผสมจะกระทำได้ง่ายและผสมกันเป็นเนื้อเดียวกัน

2. **ความหนาแน่นของสาร** องค์ประกอบที่จะผสมกันหากมีความหนาแน่นเท่ากันหรือใกล้เคียงกันจะผสมกันได้ง่ายกว่าองค์ประกอบที่มีความหนาแน่นต่างกัน

3. **ความหนาแน่นสัมพัทธ์** เป็นอัตราส่วนความหนาแน่นของของผสม ระหว่างองค์ประกอบที่มีความหนาแน่นต่ำกับองค์ประกอบที่มีความหนาแน่นสูง ของผสมใดที่มีค่าความหนา แน่นสัมพัทธ์เกินกว่า 90 % จะผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ง่าย

4. **ลักษณะของขนาดและรูปร่าง** องค์ประกอบต่างๆ ที่นำมาผสมกัน ควรมีลักษณะและรูปร่างเหมือนหรือใกล้เคียงกัน โดยทั่วไป สารที่นำมาผสมจะเป็นอนุภาคทรงกลมและมีขนาดเล็ก ถ้าองค์ประกอบใดมีลักษณะและรูปร่างแตกต่างกันจะผสมให้กลมกลืนกันได้ลำบาก โดยเฉพาะรูปร่างกลมจะเคลื่อนที่ได้ง่าย และจะพยายามแยกตัวตกมาด้านล่าง ดังนั้นลักษณะรูปร่างจึงเกี่ยวข้องกับการไหล

5. **แรงยึดเหนี่ยวของสาร** สารแต่ละชนิดจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคแตกต่างกัน สารใดมีแรงยึดเหนี่ยวสูงจะผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ยาก

6. **อัตราส่วนที่ผสม** ถ้าสารแต่ละชนิดมีสัดส่วนของปริมาณที่จะนำมาผสมใกล้เคียงกัน จะผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ง่าย โดยการควบคุมปริมาณของสารแต่ละชนิดให้นำมาผสมพร้อมๆ กัน และจำนวนเท่า ๆ กัน

2.5 ทฤษฎีการผสมของแข็ง

2.5.1 การวัดการผสม

ในงานด้านอุตสาหกรรมอาหารที่เกี่ยวข้องกับการผสม ระดับของความสม่ำเสมอของของผสมเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจมากที่สุด เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการผสมและผลของการผสมที่ได้ จึงจำเป็นต้องคำนวณหาคุณภาพของการผสม ซึ่งวิธีการประมาณระดับที่ง่ายที่สุดวิธีหนึ่ง คือ การตรวจสอบสัดส่วนขององค์ประกอบในของผสมจากแต่ละชุดของตัวอย่างที่สุ่มขึ้นมาหลังการผสมผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การประมาณดังกล่าวจำเป็นต้องวิเคราะห์จากมวลซึ่งทำการสุ่มโดยมวลมีค่าคงที่ที่กำหนดไว้ค่าหนึ่ง และระดับความไม่สม่ำเสมอแสดงได้โดยใช้ค่าวาเรียนซ์หรือค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ถ้าของผสมที่มี 2 องค์ประกอบถูกสุ่มขึ้นมาในตอนเริ่มต้นของการผสม (ในสภาวะที่ยังไม่มีการผสมเกิดขึ้น) ตัวอย่างส่วนใหญ่ที่สุ่มขึ้นมาจะประกอบด้วยองค์ประกอบตัวหนึ่งเท่านั้น เมื่อการผสมดำเนินต่อไป องค์ประกอบของแต่ละตัวอย่างที่สุ่มขึ้นมาจะเริ่มมีความสม่ำเสมอและเข้าใกล้องค์ประกอบเฉลี่ยของของผสมมากขึ้น ซึ่งวิธีหนึ่งในการหาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบ คือ การคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละสัดส่วนของตัวอย่างหลายๆ ครั้งนั่นเอง

เมื่อทำการผสมของผสมอย่างดีแล้ว ตัวอย่างของสารจะถูกสุ่มในปริมาณเล็กน้อยเพื่อทำการวัดระดับการผสมที่เกิดขึ้น โดยองค์ประกอบต่างๆ จะเคลื่อนจากสภาวะเริ่มต้นไปยังสภาวะที่การผสมเกิดขึ้น และการวัดระดับการผสมจะแสดงถึงสิ่งเปลี่ยนแปลงเหล่านี้

ค่าความเบี่ยงเบนขององค์ประกอบของตัวอย่างจากองค์ประกอบเฉลี่ยของของผสมทั้งหมดแสดงถึงการวัดระดับความสม่ำเสมอของกระบวนการผสม ซึ่งความแตกต่างนี้จะลดลงเมื่อทำการผสมต่อ

ไป วิธีวัดความแตกต่างนี้ จะใช้ค่าทางสถิติที่เรียกว่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้กับค่าเฉลี่ย ดังนี้

$$s^2 = \left(\frac{1}{n}\right)\left[(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + ... + (x_n - \bar{x})^2\right] \quad (2.1)$$

โดยที่ s = ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

s^2 = วาเรียนซ์ (Variance)

n = จำนวนตัวอย่างที่สุ่มขึ้นในแต่ละครั้ง

$x_1, x_2, ..., x_n$ = สัดส่วนขององค์ประกอบ x ในตัวอย่างที่ $1,2,n$

$\bar{x}$ = สัดส่วนขององค์ประกอบเฉลี่ยขององค์ประกอบ x ในของผสมทั้งหมด

ค่า s สามารถคำนวณจากองค์ประกอบของตัวอย่างที่ทำการสุ่มและวัดโดยใช้สมการที่ 2.1 โดยการสุ่ม n ตัวอย่างของกระบวนการผสม ในบางครั้งใช้ s^2 จะสะดวกกว่า

2.5.2อัตราการผสม (Rate of mixing)

เมื่อเลือกการวัดการผสมที่เหมาะสมได้แล้ว ก็สามารถหาอัตราการผสมได้โดยสมมติว่าดัชนีของการผสมควรจะเป็นค่าที่อัตราการผสมที่เวลาใดๆ (ภายใต้สภาวะการทำงานคงที่ เช่น เครื่องผสมทำงานที่ความเร็วคงที่) ควรเป็นสัดส่วนกับระดับของการผสมที่เหลือซึ่งต้องกระทำอีก ณ เวลานั้น นั่นคือ

$$\frac{dM}{d\theta} = k[(1 - M)] \quad (2.2)$$

เมื่อ M = ดัชนีการผสม

k = ค่าคงที่

และเมื่ออินทิเกรตจาก $\theta = 0$ ถึง $\theta = \theta$ และ M จาก 0 ถึง (M)

$$[(1 - M)] = e^{-k\theta}$$

หรือ

$$M = 1 - e^{-k\theta} \quad (2.3)$$

ค่าคงที่ k ขึ้นกับเครื่องผสมและสภาวะการผสมจากสมการที่ (2.3) ซึ่งสามารถใช้ในการหาเวลาที่ต้องใช้ในการผสมเพื่อให้ได้ระดับการผสมที่ต้องการได้

2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการผสม (Mixing equipment)

ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้มีการออกแบบและผลิตเครื่องผสมออกมาเป็นจำนวนมาก การเลือกชนิดและขนาดของเครื่องผสมที่ถูกต้องขึ้นกับชนิดและปริมาณของอาหารที่จะนำมาผสม และความเร็วของการปฏิบัติงานเพื่อให้ได้ระดับของการผสมที่ต้องการโดยใช้พลังงานน้อยที่สุด เครื่องผสมจะแบ่ง ออกตามลักษณะการทำงานสำหรับอาหารต่อไปนี้

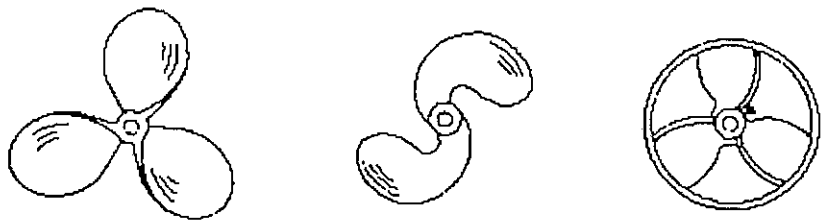
2.6.1 เครื่องผสมสำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำหรือปานกลาง

เครื่องผสมหลายตัวที่มีการออกแบบเพื่อผสมของเหลวในภาชนะที่มีแผ่นกั้น (Buffle) หรือไม่มีแผ่นกั้นก็ได้ ข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละประเภทตามลักษณะการใช้งานสรุปดังแสดงในตารางที่ 2.1

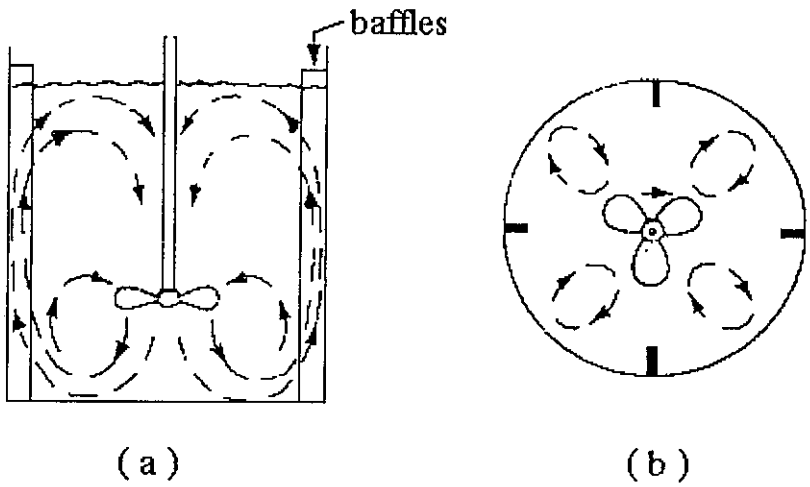
ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อกัดของเครื่องผสมของเหลว

Type of mixer	Advantages	Limitations
Paddle agitator	good radial and totational flow , cheap	Poor perpendicular flow,high vortex risk at higher speed
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	verry good mixing	Expensive and risk of blockage

(1) เครื่องกวนชนิดใบพัดเรือ (propeller agitator) เป็นใบพัดความเร็วสูงไหลตามแนวแกนเหมาะสำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ สำหรับใบพัดเรือขนาดเล็กจะหมุนด้วยความเร็วเท่ากับมอเตอร์ (1,150 หรือ1,750 rpm) ถ้าเป็นใบพัดเรือขนาดใหญ่จะหมุนที่ 400-800 rpm. ระยะทางที่ใบพัดหมุน 1 รอบแล้วของเหลวเคลื่อนไปตามความยาวจะขึ้นกับมุมความชันของใบพัดเรือ อัตราส่วนของระยะทางนี้ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดเรียกว่า pitch ของใบพัด รูปที่ 2.3 เป็นใบพัดเรือแบบต่างๆ และลักษณะการไหลในถังผสมที่มีแผ่นกั้นโดยการติดตั้งใบพัดเรือที่ศูนย์กลางของถังผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ลักษณะการไหลชนิดนี้จะเรียกว่า axial flow เนื่องจากของไหลไหลลงที่แกนกลางหรือเพลาของใบพัดเรือ และไหลขึ้นที่ด้านข้างของผสมดังแสดงในรูป 2.4



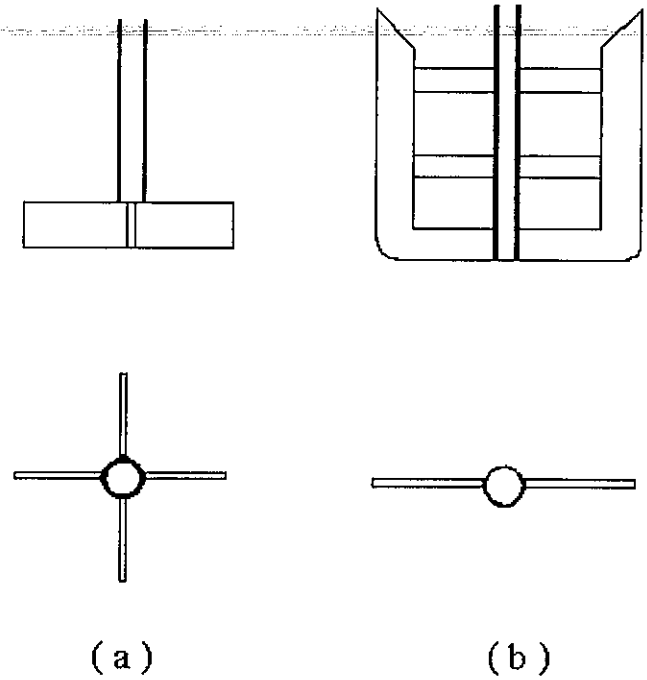
รูปที่ 2.3 ใบพัดเรือชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการผสม
(a) ใบพัด 3 ใบชนิดมาตรฐาน (b) weedless (c) guarded
ที่มา : Brennan และคณะ (1990)



รูปที่ 2.4 ถังผสมที่มีแผ่นกั้น และตัวกวนที่เป็นแบบใบพัดเรือชนิด 3 ใบ
โดยมีลักษณะการไหลตามแนวแกน (a) side view (b) top view
ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

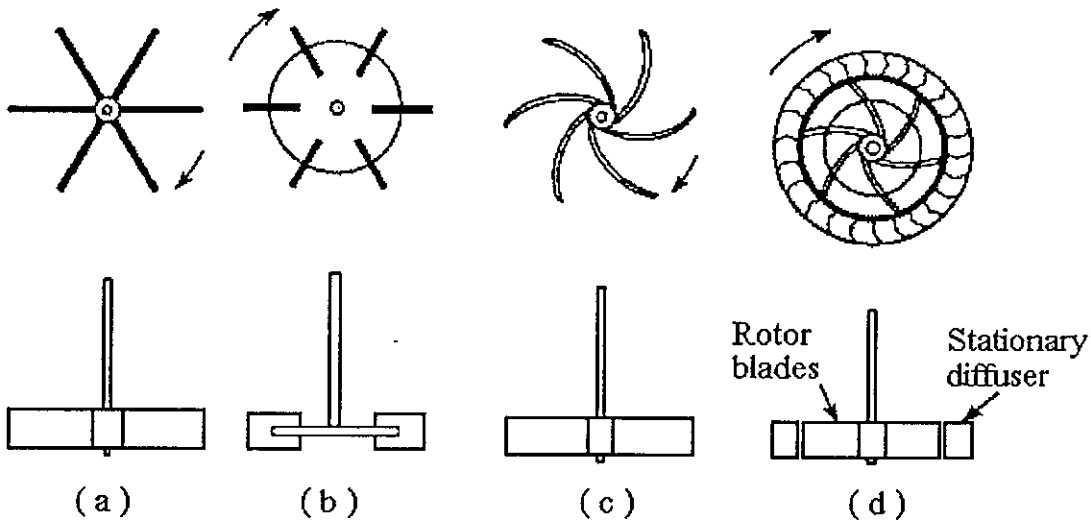
(2) เครื่องกวนชนิดใบพาย (paddle agitator) เป็นเครื่องกวนแบบง่ายๆ ประกอบด้วยใบพัดคล้ายใบพายที่แบนหมุนรอบเพลาในแกนตั้งมักนิยมใช้ใบพายแบบ 2 หรือ 4 ใบดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งหมุนด้วยความเร็วต่ำถึงปานกลาง ประมาณ 20-200 รอบ/นาที ณ ศูนย์กลางของถังผสม ซึ่งจะดันของเหลวในแนวรัศมีโดยไม่มีการเคลื่อนในแนวดิ่ง ยกเว้นใบพัดแบบ pitch ความยาวทั้งหมดของใบพัดชนิดนี้เป็น 50-80 เปอร์เซ็นต์ ของเส้นผ่านศูนย์กลางของถังผสม และความกว้างของใบพายเป็น 1/6 ถึง 1/10 ของความยาว การกวนที่ความเร็วต่ำมักใช้ในถังผสมที่ไม่มีแผ่นกั้น แต่ที่ความเร็วสูงขึ้นต้องใช้แผ่นกั้นเนื่องจากของเหลวจะหมุนวนรอบซึ่งมีผลด้านการผสมเกิดขึ้นเล็กน้อยถ้าไม่มีแผ่นกั้น

(3) เครื่องกวนชนิดใบพัดกังหัน (turbine agitator) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ประกอบด้วยใบพัดคล้ายใบพายหลายใบแต่ใบพัดสั้นกว่าและหมุนด้วยความเร็วสูงบนเพลาที่ติดตั้งอยู่ตรงกลางของถังผสม เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดกังหันปกติจะมีขนาดประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์ ของเส้นผ่านศูนย์กลางของถังผสม ใบพัดกังหันสามารถใช้กับของเหลวที่มีความหนืดในช่วงกว้าง ลักษณะการไหลของถังผสมแบบใบพัดกังหันชนิดใบแบน 6 ใบซึ่งมีจานด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.7



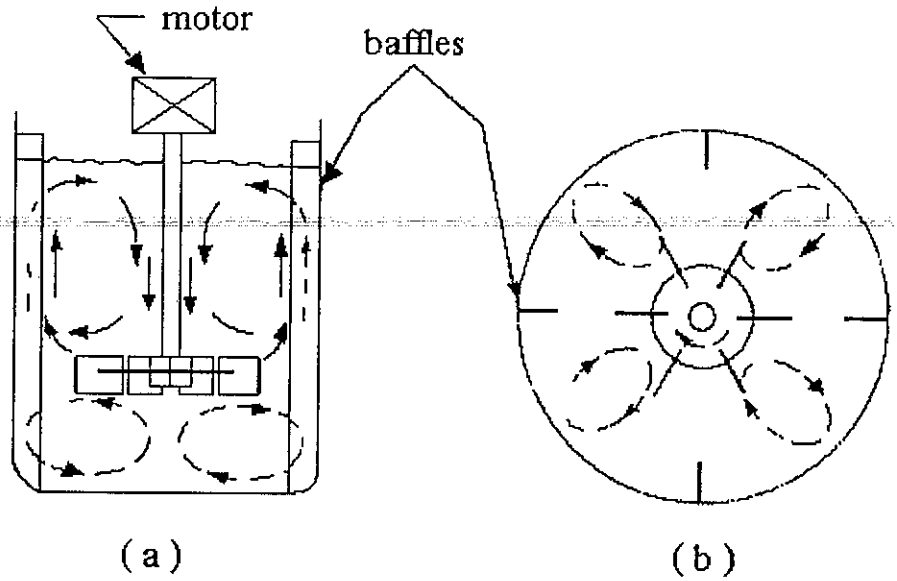
รูปที่ 2.5 ใบกวนแบบใบพาย

ที่มา : Brennan และคณะ (1990)



รูปที่ 2.6 ใบพัดกังหันชนิดต่างๆ

ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

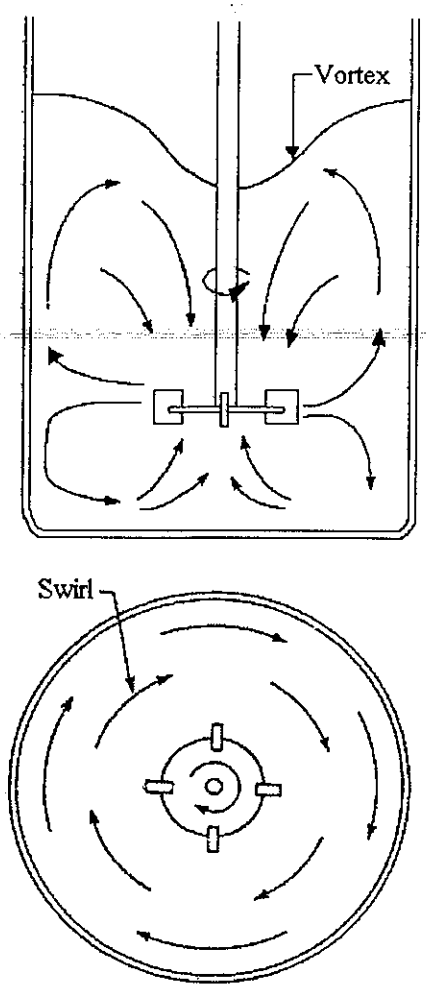


รูปที่ 2.7 ถังผสมที่มีใบพัดกังหันชนิด 6 ใบซึ่งมีจานที่แสดงการไหล

(a) side view (b) bottom view

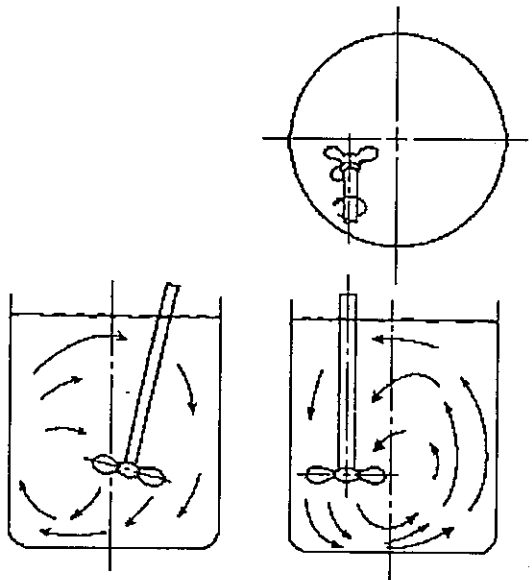
ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

ในการผสมของเหลว ลักษณะการไหลในถังผสมขึ้นกับชนิดของใบพัด ลักษณะเฉพาะของของไหล ขนาดและสัดส่วนของถังผสม แผ่นกั้นและตัวกวน ความเร็วของของไหลที่จุดใดๆ ในถังประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ คือ (1) ความเร็วในแนวรัศมี (radial) และกระทำในทิศทางตั้งฉากกับเพลาของใบพัด (2)ความเร็วในแนวตามความยาว (longitudinal)และกระทำในทิศทางที่ตั้งฉากกับเพลา และ (3) ความเร็วในแนวสัมผัสหรือหมุน (tangential or rotational) และกระทำในทิศทางที่สัมผัสกับทางเดินวงกลมรอบๆ เพลาของใบพัดในกรณีที่เพลาอยู่ในแนวตั้ง องค์ประกอบของความเร็วในแนวรัศมีและในแนวตามความยาวมีประโยชน์และให้การไหลที่จำเป็นต่อการผสมเมื่อแกนของใบพัดติดตั้งที่กึ่งกลางของถังผสมในแนวตั้งองค์ประกอบของความเร็วในแนวสัมผัสจะก่อให้เกิดข้อเสีย เนื่องจากการไหลในแนวสัมผัสตามทางเดินที่เป็นวงกลมรอบเพลา ก่อให้เกิดน้ำวน (vortex) ขึ้นที่ผิวของของของเหลวดังแสดงในรูปที่ 2.8 จึงจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงแบบการไหลในลักษณะการวนรอบๆ ถังผสมซึ่งมีผลต่อการผสมน้อยมาก ดังนั้น การทำลายการไหลลักษณะนี้กระทำได้ง่ายโดยติดตั้งใบพัดให้ห่างจากศูนย์กลางของถังผสม (รูปที่ 2.9) สำหรับถังผสมขนาดเล็ก ถ้าเป็นถังผสมขนาดใหญ่ขึ้นอาจมีการติดตั้งแผ่นกั้นที่ผนังของถังผสม (รูปที่ 2.7) หรือใบพัดอาจติดตั้งที่ด้านข้างของถังผสม โดยมีเพลาในแนวนอน (รูปที่ 2.10)



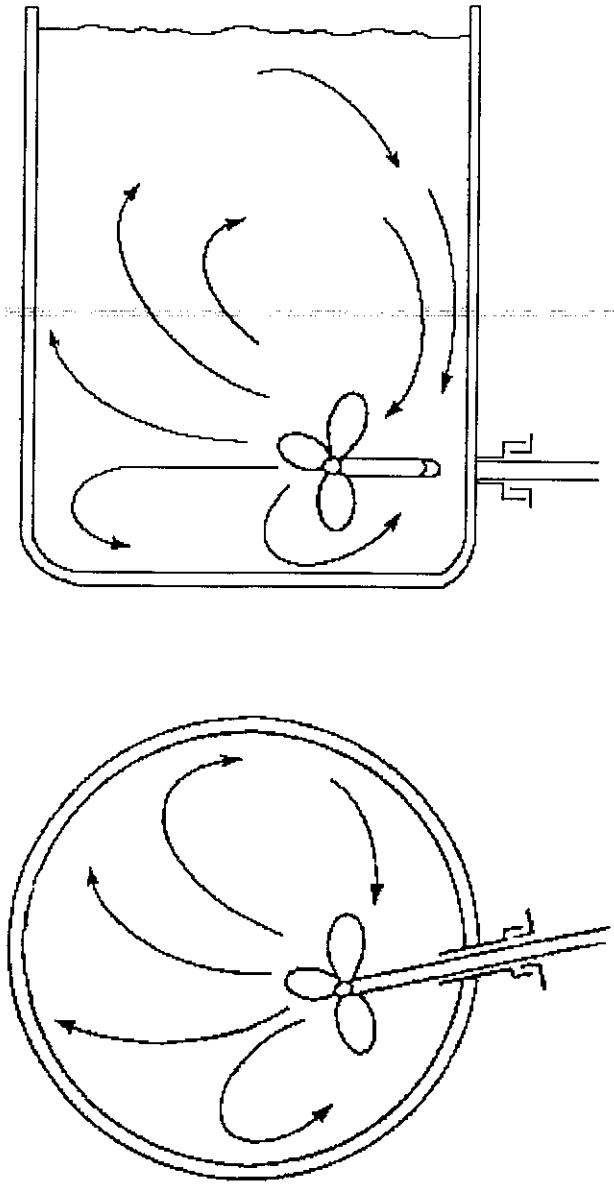
รูปที่ 2.8 ลักษณะการเกิดการไหลแบบหมุนวน

ที่มา : Brennan และคณะ (1990)



รูปที่ 2.9 ใบพัดที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่อยู่ห่างจากศูนย์กลาง

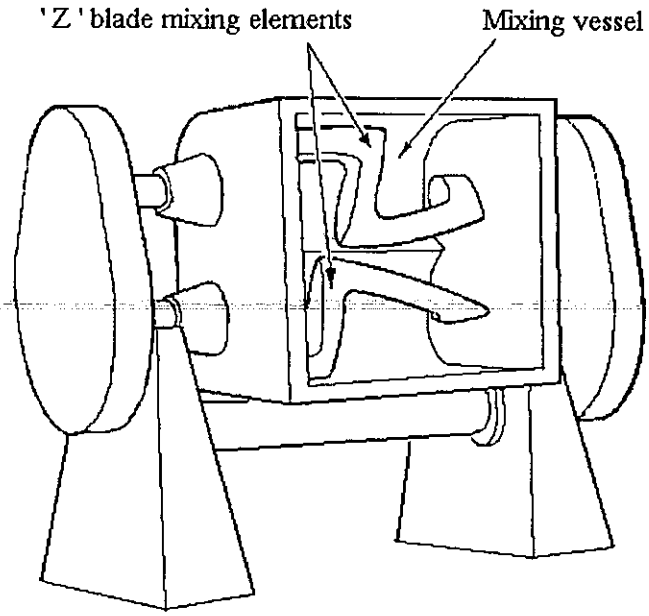
ที่มา : Brennan และคณะ (1990)



รูปที่ 2.10 ใบพัดที่เข้าทางด้านข้าง
ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

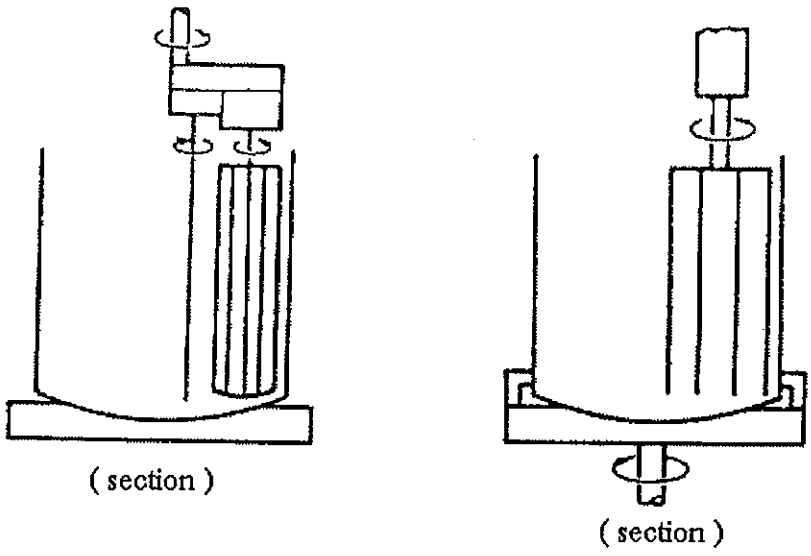
2.6.2 เครื่องผสมสำหรับของเหลวหรือเพสต์ที่มีความหนืดสูง

ในการผสมโด เพสต์ หรือของเหลวที่มีความหนืดสูง จำเป็นต้องผสมในเครื่องที่ต้องใช้กำลังมาก เพื่อที่สารหรืออาหารถูกแบ่ง พับ หรือรวมกลับเข้ามาใหม่ และส่วนต่างๆ เข้าแทนที่กันโดยผิวที่เกิดขึ้นใหม่ควรจะรวมกลับเข้ามาใหม่ให้บ่อยที่สุด เนื่องจากความต้องการในด้านกำลังงานที่ค่อนข้าง มาก กำลังงานจะแผ่กระจายออกไปในรูปของความร้อนซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ร้อนขึ้น ดังนั้นเครื่องชนิดนี้บางเครื่องจึงมีแจ็คเก็ตน้ำเย็นหุ้มเครื่องเพื่อกำจัดความร้อน



รูปที่ 2.11 เครื่องนวดสำหรับเพสต์

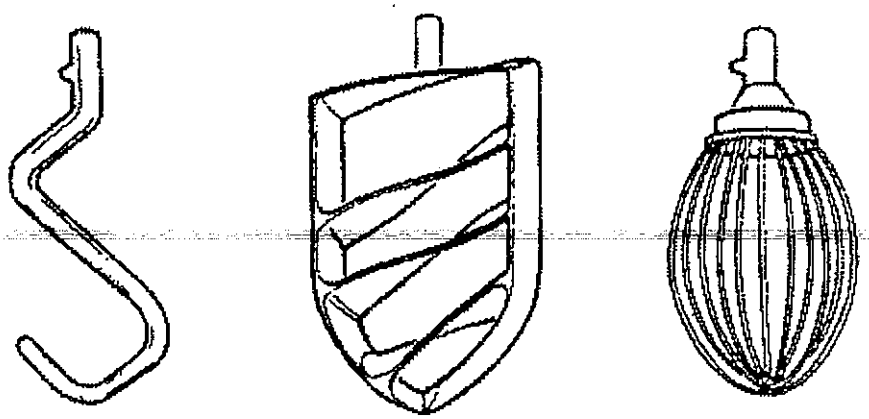
ที่มา : Brennan และคณะ (1990)



(a) Stationary pan mixer (b) Rotating pan mixer

รูปที่ 2.12 หม้อผสมของโดและเพสต์

ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

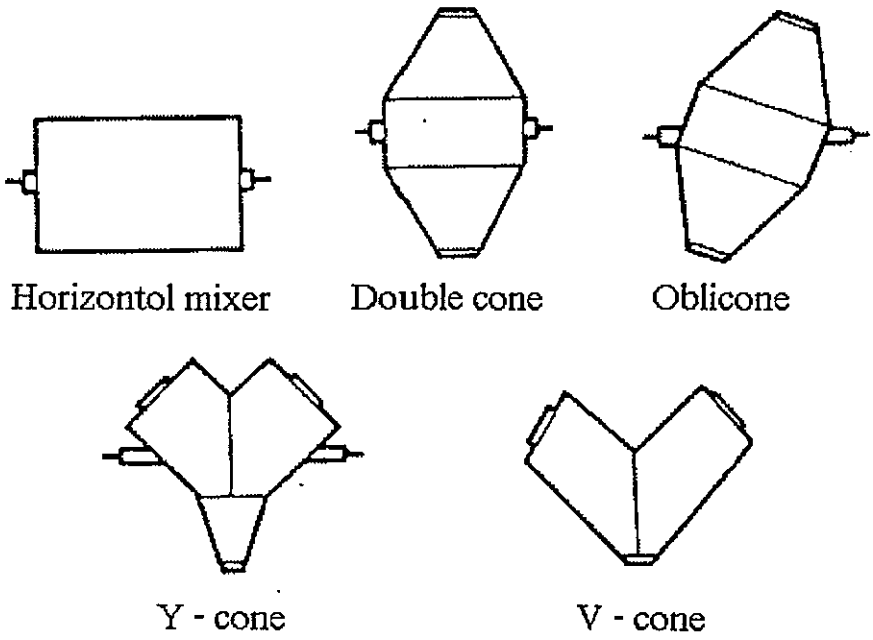


รูปที่ 2.13 ใบกวนแบบต่างๆของโดและเพสต์

ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

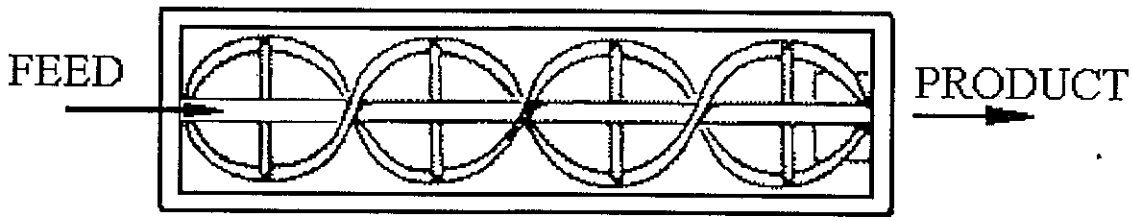
2.6.3 เครื่องผสมสำหรับอาหารผงที่แห้งหรือของแข็งที่เป็นชิ้น

ลักษณะของเครื่องผสมชนิดนี้ก็คือ การแทนที่ของส่วนผสมหนึ่งด้วยของผสมส่วนอื่น เครื่องที่ง่ายที่สุดซึ่งเหมาะสำหรับการผสมคือ การทำให้อาหารกลิ้งไปมา อย่างไรก็ตาม เครื่องชนิดนี้ไม่ได้ใช้เพื่อทำให้อนุภาคที่เกาะกันเป็นกลุ่มแยกออกจากกัน



รูปที่ 2.14 รูปร่างของเครื่องผสมแบบที่ทำให้เกิดการกลิ้งไปมา

ที่มา : Brennan และคณะ (1990)



รูปที่ 2.13 แผนภาพของเครื่องผสมริบบอน
ที่มา : Brennan และคณะ (1990)

2.7 กระบวนการผลิตแบบเอกซ์ทรูชัน(Extrusion Cooking Process)

กระบวนการผลิตแบบเอกซ์ทรูชัน คือ กระบวนการแบบต่อเนื่องที่มีการหมุน ผลัก พาวัตถุดิบ ให้ไหลผ่านช่อง (Channel) ภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ภายใต้สภาวะควบคุมต่าง ๆ จากนั้น วัตถุดิบจะ ถูกขับผ่านรูหน้าแปลน (Die) ให้มีรูปร่างตามต้องการ กระบวนการผลิตแบบเอกซ์ทรูชันมีความสำคัญ ในอุตสาหกรรมอาหาร สามารถนำไปใช้งานได้หลายลักษณะ เช่น ใช้ในการผสม (Mixing) การขึ้นรูปอาหาร (Forming) การทำให้สุก (Cooking) การทำให้พอง (Puffing) หรือการทำแห้ง (Drying) ทั้งนี้ ขึ้นกับการออกแบบเอกซ์ทรูเดอร์ และสภาวะในระหว่างกระบวนการผลิต

ในกระบวนการผลิตแบบทำให้สุก วัตถุดิบที่ปรับความชื้นแล้ว จะได้รับความร้อนใน เอกซ์ทรูเดอร์ ความร้อนภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์นี้มีแหล่งกำเนิด 2 ทาง คือ

1. ความร้อนที่ได้จากบาร์เรล
2. ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของวัตถุดิบเอง หรือ ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของวัตถุดิบกับผนังบาร์เรลในขณะที่เคลื่อนที่ไปตามสกรู (Screw) ความร้อนนี้ จะทำให้เกิดการสุกของแป้ง (Starch gelatinization) การเสียสภาพของโปรตีน (Protein-denaturation) การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิด (Enzyme inactivation) เป็นต้น

เอกซ์ทรูเดอร์เป็นที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้

1. มีความหลากหลาย สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลายประเภท และหลายรูปทรง จากการแปรสภาวะในการผลิต แบบหน้าแปลน และส่วนผสมของวัตถุดิบ
2. มีอัตราการผลิตสูง เนื่องจากมีการผลิตแบบต่อเนื่อง
3. ต้นทุนต่ำ เนื่องจากมีอัตราการผลิตสูง และใช้คนทำงานน้อย นอกจากนี้ เอกซ์ทรูเดอร์ ยังมีขนาดเล็ก ทำให้ประหยัดพื้นที่ที่ใช้ในการผลิต
4. ประหยัดพลังงาน เนื่องจากเอกซ์ทรูเดอร์ใช้ไอน้ำในการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อย ทำให้ประหยัดพลังงานไอน้ำ
5. ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี เนื่องจาก ในกระบวนการผลิตแบบเอกซ์ทรูชันโดยทั่วไป นั้นเป็นกระบวนการแบบ High Temperature Short Time (HTST) มีการสูญเสียคุณค่าทางอาหารน้อยมาก

2.7.1 ชนิดของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบ่งตามลักษณะและสภาวะในการใช้งาน

การจำแนกประเภทของเอกซ์ทรูเดอร์ทำได้หลายวิธี เช่น แบ่งตามลักษณะหน้าที่ที่ ใช้ในการผลิต (Functional characteristics) แบ่งตามลักษณะอุณหพลสาสตร์ (Thermodynamics characteristics) และแบ่งตามปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ (Moisture characteristics) ซึ่งการจำแนกประเภทของเอกซ์ทรูเดอร์โดยวิธีต่าง ๆ เหล่านี้ สามารถสรุปได้อย่างย่อ ดังต่อไปนี้

1. แบ่งตามลักษณะหน้าที่ที่ใช้ในการผลิต (Functional characteristics)

1.1 Pasta extruder เป็นเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลี เช่น มักกะโรนี เอกซ์ทรูเดอร์พวกนี้จะมีร่องเกลียวสกรูลึกผนังด้านในบาร์เรลเรียบและความเร็วของสกรูที่หมุนจะช้า สกรูเกลียวที่หมุนนี้จะทำหน้าที่ผลักพาแป้งเซโมไลนา (Semolina) ที่ชื้นและนุ่มให้เคลื่อนไปข้างหน้า แล้วอัดผ่านรูบนหน้าแปลนออกมา ซึ่งอาจทำให้เซโมไลนาสุกเพียงเล็กน้อยหรือไม่สุกเลยก็ได้ ใน pasta extruder นั้น พลังงานที่ใช้จะน้อยมากและแรงเฉือน (Shear) เกิดขึ้นต่ำมากเช่นกัน จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ถึงกับสุกพอง จำเป็นต้องใช้ขั้นตอนอย่างอื่นมาช่วย ในการทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นสุก พร้อมที่จะนำไปรับประทานได้

1.2 High-pressure forming extruder เริ่มแรกที่พัฒนา หรือประยุกต์นำเอาเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้เข้ามาในอุตสาหกรรมอาหาร ก็เพื่อใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อาหารให้มีรูปทรงตามต้องการ เท่านั้น วัตถุดิบที่ใช้เป็นพวกแป้งที่ผ่านการทำให้เกิดเจลบางส่วน (Pregelatinized starch) อัดผ่านรูที่เปิดบนหน้าแปลน แล้วตัดให้เป็นชิ้นที่มีขนาดตามต้องการ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตแบบนี้จะไม่มีการสุกพองต้องนำไปผ่านขั้นตอนการอบแห้ง แล้วนำไปทำให้สุกโดยการทอดในน้ำมันหรือคั่วเสียก่อนจึงจะรับประทานได้ ในเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้จะออกแบบให้ผนังบาร์เรลด้านในเป็นร่องเพื่อป้องกันการลื่นไถลของวัตถุดิบที่ผนังและสกรูจะถูกออกแบบให้เป็นชนิดที่ทำให้เกิดแรงอัดสูง ผลก็คือเกิดแรงดันสูงที่บริเวณด้านหลังหน้าแปลน นอกจากนี้ยังเกิดความร้อนจากแรงเสียดทานร่วมด้วย จากความร้อนนี้เองที่อาจทำให้เกิดการสุกพองของผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานนี้ ต้องกำจัดออกโดยการใช้น้ำหล่อเย็น รอบผนังของบาร์เรล หรือภายในโพรงสกรู (Screw hollow)

1.3 Low-shear cooking extruder เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ทำให้สุกแบบต่อเนื่อง (Continuous cooking) ใช้กับวัตถุดิบที่ชื้นหรือมีความชื้นสูง รูปแบบของเครื่องจะเป็นเอกซ์ทรูเดอร์ที่ผนังบาร์เรลด้านในเป็นร่องมีแรงเฉือนปานกลางมีการอัดสูงเพื่อช่วยให้เกิดการผสมรวมกันระหว่างอนุภาคของวัตถุดิบได้ดียิ่งขึ้น ร่องที่ผนังบาร์เรลช่วยป้องกันการลื่นไถลของวัตถุดิบที่ผนัง ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานในขณะที่วัตถุดิบอาหารที่มีความหนืดถูกอัดผ่านเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์จะถูกส่งผ่านทางผนังบาร์เรลหรือสกรูเข้าสู่ตัวผลิตภัณฑ์โดยการนำความร้อน ความร้อนนี้จะทำให้วัตถุดิบอาหารเกิดการสุก

1.4 Collet extruder เป็นเอกซ์ทรูเดอร์แบบเรียบง่ายเล็กกระทัดรัด และสะดวกต่อการใช้งาน เอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้มีความยาวของตัวสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องน้อยมาก ประมาณ 3:1

(L/D = 3:1) เท่านั้น ใน Collet extruder จะให้แรงเฉือนสูงมากในระหว่างการทำงาน เนื่องมาจากมีสกรูที่มีร่องเกลียวตื้นและผนังด้านในบาร์เรลถูกออกแบบให้เป็นร่องเช่นเดียวกัน ร่องเกลียวที่ผนังจะป้องกันการลื่นไถลของวัตถุดิบอาหาร วัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่มีความชื้นต่ำ เช่น Corn grit และ ข้าวท่อน ความร้อนเกือบทั้งหมดหรือทั้งหมดจะมาจากการเสียดสีระหว่างอนุภาค ของวัตถุดิบเองหรือระหว่างอนุภาคของวัตถุดิบกับผนังบาร์เรล ความร้อนที่เกิดขึ้นอาจสูงถึง 175 °C ทำให้วัตถุดิบอาหารเกิดการสุก ถ้าเป็นแป้งจะเกิดเป็นเจล หรือเป็นเดกซ์ทรินบางส่วน วัตถุดิบอาหารที่สุกแล้วนี้เรียกว่าเอกซ์ทรูเดท เอกซ์ทรูเดทจะถูกอัดให้ออกมาทางรูเปิดบนหน้าแปลนด้วยการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็วจากภายในเครื่องที่มีความดันสูงมากมาสู่ความดันบรรยากาศ ไอน้ำในเอกซ์ทรูเดทจะระเหยออกไปอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการพองและกรอบ

1.5 High-shear cooking extruder การทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้คล้ายกับการทำงานของ Collet extruder ต่างกันที่ระยะเวลาที่วัตถุดิบอาหารอยู่ในเครื่อง (Residence time) ของ High-shear cooking extruder จะมากกว่าเนื่องจากมีความยาวของสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่อง (L/D) ถึง 15-20:1 และได้มีการออกแบบให้มีระบบระบายความร้อนที่ผนังบาร์เรล ทำให้เอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากกว่า วัตถุดิบที่จะนำมาใช้ก็จะมีความหลากหลายได้มากกว่า สามารถใช้ได้ทั้งวัตถุดิบที่มีความชื้นต่ำมากจนถึงวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง นอกจากนี้ยังมีการให้แรงเฉือนที่สูง เมื่อประกอบกับระยะเวลาที่อยู่ในเครื่องนาน ทำให้วัตถุดิบเกิดการผสมอย่างทั่วถึง

2. แบ่งตามลักษณะอุณหพลสาสตร์ (Thermodynamic characteristics)

2.1 Autogenous extruder ความร้อนทั้งหมดที่เอกซ์ทรูเดอร์ได้รับนั้น มาจากแรงเสียดทาน (Friction force) เพียงอย่างเดียว ปริมาณความร้อนที่ได้รับ หรือระบายออกโดยการนำผ่านทางบาร์เรลจะมีเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่มีเลย Collet extruder หรือ High-shear cooking extruder บางชนิดจะจัดอยู่ในพวก Autogenous extruder เนื่องจากอุณหภูมิภายในเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้จะสูงหรือต่ำนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไปและการจัดรูปแบบของสกรู การควบคุมความร้อนของเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้ทำได้ยาก ไม่เหมาะแก่การนำมาใช้ในการผลิตอาหาร

2.2 Isothermal extruder เป็นเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีระบบควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เท่ากันตลอดความยาวของบาร์เรล Forming extruder จัดอยู่ในประเภทนี้ การควบคุมความร้อนให้คงที่นี้ทำโดยการให้และระบายความร้อนผ่านทางช่องว่างระหว่างผนังของบาร์เรลชั้นนอกและชั้นในที่เรียกว่า Jacket

2.3 Polytropic extruder เป็นเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดที่ให้ความร้อนแก่วัตถุดิบด้วยแหล่งความร้อน 2 แหล่งคือ ความร้อนจากพลังงานกล(ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทาน) และความร้อนที่ได้มาจากแหล่งความร้อนภายนอก(ความร้อนจาก Jacket ที่อยู่รอบบาร์เรล) ในความเป็นจริงแล้วเอกซ์ทรูเดอร์เกือบทุกชนิดจัดเป็น Polytropic extruder

3. แบ่งตามปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ (Moisture characteristics)

3.1 Low moisture วัตถุดิบที่ใช้จะมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 20 พลังงานความร้อนส่วนใหญ่ เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานของวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความแห้งมากและมีลักษณะที่พองมาก ทำให้กำหนดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ได้ยาก

3.2 Intermediate moisture วัตถุดิบที่ใช้จะมีความชื้นในช่วงร้อยละ 20 ถึง 28 พลังงานความร้อนครึ่งหนึ่งได้จากแรงเสียดทาน ที่เหลือได้จากการให้ความร้อนจากแหล่งภายนอก เช่น จาก Steam jacket ผลิตภัณฑ์มีความชื้นพอสมควรต้องผ่านการอบแห้งอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้ได้ความชื้นเท่าที่ต้องการ การพองของผลิตภัณฑ์เกิดเพียงเล็กน้อยทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูปร่างของผลิตภัณฑ์

3.3 High moisture วัตถุดิบที่ใช้มีความชื้นได้มากกว่าร้อยละ 28 ขึ้นไป พลังงานความร้อนจากแรงเสียดทานในแบบนี้จะน้อยมากส่วนใหญ่ต้องมีการให้ความร้อนจากแหล่งภายนอก ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักจะไม่พองทำให้ขึ้นรูปร่างได้หลายแบบแต่ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูงต้องผ่านการอบแห้งก่อนที่จะไปผ่านกระบวนการอื่นๆ

2.7.2ชนิดของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบ่งตามลักษณะและสภาวะในการใช้งาน

1. Piston extruder เป็นเอกซ์ทรูเดอร์ที่ถูกออกแบบให้มีการทำงานง่าย ๆ ไม่ซับซ้อน ประกอบด้วยลูกสูบ (Piston) เพียงอันเดียวหรือเป็นชุดของลูกสูบ ส่วนใหญ่มักใช้เอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ประเภท Confectionery

2. Roller extruder ประกอบด้วยลูกกลิ้งสองอันที่หมุนในทิศที่สวนทางกัน ส่วนใหญ่จะนำมาใช้ประโยชน์ในการขึ้นรูปเช่นเดียวกับ Piston extruder แต่การขึ้นรูปโดยใช้ Roller extruder นี้จะทำได้หลากหลาย รูปแบบกว่า

3. Screw extruder ประกอบด้วยสกรูหนึ่งอัน (Single screw) สองอัน (Twin screws) หรือมากกว่าสองอัน (Multiple screws) วางอยู่ภายในช่อง(Channel) ในระหว่างการทำงานสกรูจะหมุนเพื่อผลักวัตถุดิบให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าและผ่านออกมาทางหน้าแปลนที่ออกแบบเป็นพิเศษให้ผลิตภัณฑ์มีรูปร่าง ตามต้องการ

เอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ มีตัวแปรที่ต้องควบคุมในระหว่างการทำงานมากกว่าสองชนิดแรก ตัวอย่างของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น รูปแบบของสกรู ความเร็วในการหมุนของสกรูและอุณหภูมิของบาร์เรลในโซนต่างๆซึ่งการควบคุมตัวแปรต่างๆดังกล่าวจะมีผลต่อค่า แรงเฉือน ความดัน และ Residence time ด้วยเหตุนี้การนำเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้มาใช้งานในอุตสาหกรรมอาหารในปัจจุบันนอกจากจะใช้ในการขึ้นรูปอาหารแล้วยังใช้ในการทำให้สุก การผสม การทำให้พอง หรือแม้แต่การใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ ทั้งในกระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางชีวภาพ เนื่องจากความหลากหลายในการทำงานนี้เอง ทำให้เอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในทางอุตสาหกรรมอาหาร และมีแนวโน้มของการใช้งานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ